



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

CARBONATACION DE ESTRUCTURAS  
DE CONCRETO REFORZADO.



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO QUIMICO**

P R E S E N T A:

IVAN ALCOECER ORTIZ

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F., JUNIO DE 1994.





Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

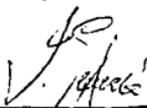
Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

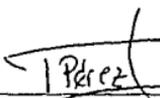
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**           PROFR. MIGUEL SALOMA TERRAZAS  
**VOCAL:**                 PROFR. JOAN GENESCÁ LLONGUERAS  
**SECRETARIO:**         PROFRA. AURORA DE LOS ÁNGELES RAMOS MEJÍA  
**1er. SUPLENTE:**       PROFR. GERMÁN OROZCO GAMBOA  
**2º SUPLENTE:**         PROFR. CARLOS RODRÍGUEZ RIVERA

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:** LABORATORIO DE CORROSIÓN DEL EDIFICIO "D", DE LA FACULTAD DE QUÍMICA.

  
\_\_\_\_\_  
**DR. JOAN GENESCÁ LLONGUERAS.**  
**ASESOR DEL TEMA.**

  
\_\_\_\_\_  
**I.Q. TEZOZÓMOC PÉREZ LOPEZ**  
**SUPERVISOR TÉCNICO.**

  
\_\_\_\_\_  
**IVÁN ATCOZER ORTIZ**  
**SUSTENTANTE.**

## DEDICATORIAS

### A DIOS, NUESTRO SEÑOR.

#### ABUELITA ICHA:

SÉ QUE DONDE TE ENCUENTRES ESTÁS ORGULLOSA DE MÍ. YO SIEMPRE TE LLEVO EN MI MENTE. TE RECUERDO COMO ESA GRAN MUJER QUE ERAS. VIVES DENTRO DE MÍ. AUNQUE FÍSICAMENTE NO ESTÉS CON NOSOTROS UNA PARTE DE TÍ VA SIEMPRE CONMIGO; LA MEJOR HERENCIA QUE PUDE HABER RECIBIDO DE TI FUÉ LA MORAL QUE ME INCULCASTE DESDE PEQUEÑO, ESA MANERA TAN ESPECIAL DE VER LAS COSAS NO ES MIA, ES TUYA PERO TE LA TOMÉ PRESTADA.

OTRA COSA QUE TAMBIÉN TE DEBO ES TU APELLIDO, AUNQUE NO LO LLEVO, SOY LLUCH.

#### MADRE:

OJALÁ PUDIERA EN ESTAS BREVES LÍNEAS, EXPRESAR LO AGRADECIDO QUE ESTOY CONTIGO Y CON LA VIDA POR TENERTE.

TE QUIERO TANTO. ADMIRO TU FORTALEZA Y TU RECTITUD. A TI TE DEBO LA VIDA Y LO QUE SOY. CREO QUE TODOS TUS SACRIFICIOS NO FUERON EN VANO. AQUÍ ESTÁ LA PRUEBA.

ADEMÁS DE LA VIDA TE DEBO EL CARÁCTER FUERTE Y DECIDIDO.

GRACIAS, MIL.

#### A MIS HERMANOS:

ENEIDA, ANDOS Y YALÍ. GRACIAS POR SOPORTARME. GRACIAS POR SUS PALABRAS DE ALIENTO Y TODO SU APOYO CUANDO LO NECESITÉ. SÉ QUE NO ES FÁCIL AGUANTAR A UN HERMANO COMO YÓ, SIN EMBARGO USTEDES LO HAN HECHO.

**A MI MAESTRA CARMEN VEGA FRANCO:  
CON ESTE TRABAJO ME GUSTARÍA RENDIRLE UN PEQUEÑO  
TRIBUTO.**

**TODO SU ESFUERZO QUE SIEMPRE HA PUESTO EN ENSEÑAR A  
LEER Y A ESCRIBIR A UN GRAN NÚMERO DE ALUMNOS NO HA SIDO  
EN VANO. QUIERO QUE USTED SEA PARTÍCIPE DE DE ESTA EMOCIÓN  
QUE ME EMBARGA.**

**USTED FUÉ QUIEN NOS DIÓ LAS SÓLIDAS BASES EN LAS QUE  
ESTÁ Y ESTARÁ CIMENTADO MI DESARROLLO PROFESIONAL; SÉ  
QUE DE NO HABER SIDO USTED, OTRA PERSONA NOS HUBIERA  
ENSEÑADO, PERO QUE BUENO QUE FUE USTED.**

**PIENSO QUE NO HAY CON QUE PAGARLE, PERO SÍ QUIERO  
AGRADECERLE TODO LO QUE NOS DIÓ.**

**SIEMPRE LA RECUERDO CON UN ENORME AFECTO.**

**AL PROFR. CESÁREO PARRA CASTAÑÓN:**

**DE USTED TOMÉ EL GUSTO POR LA QUÍMICA. PIENSO QUE NO  
BASTA QUE UN MAESTRO TENGA CONOCIMIENTOS, TAMBIÉN DEBE  
TRANSMITIRLOS DE LA MANERA MÁS AGRADABLE Y USTED SABE  
COMO HACERLO. GRACIAS POR EL CONOCIMIENTO QUE ME  
TRANSMITIÓ Y POR LAS PALABRAS DE ALIENTO. NUNCA OLVIDARÉ  
EL DÍA EN QUE GANAMOS EL PRIMER LUGAR DE CIENCIAS  
NATURALES A NIVEL ESTATAL. ESE TRIUNFO NO SÓLO FUÉ MÍO, FUÉ  
SUYO TAMBIÉN.**

**A TODOS MIS MAESTROS, LAS RAZONES SON OBIVIAS.**

**A MI NOVIA.**

**A MIS AMIGOS. GRACIAS POR SER COMO SON.**

**MÉXICO, D.F., JUNIO DE 1994.**

## INTRODUCCIÓN.

HACE MÁS DE CUARENTA AÑOS QUE FUÉ CONSTRUÍDA UNA DE LA MÁS GRANDES OBRAS DE LA PLÁSTICA MEXICANA: EL MURAL "REPRESENTACIÓN HISTÓRICA DE LA CULTURA" QUE CUBRE LAS CUATRO PAREDES DE LA BIBLIOTECA CENTRAL DE LA U.N.A.M. ESTE MURAL ES RECONOCIDO A NIVEL MUNDIAL NO SÓLO POR SU APORTE A LA PLÁSTICA MUNDIAL, SINO TAMBIÉN POR SU ENORME TAMAÑO, 4000 METROS CUADRADOS. AQUÍ SE ENCUENTRAN REPRESENTADOS 400 AÑOS DE LA HISTORIA DE MÉXICO: EN EL MURO NORTE SE ENCUENTRA PLASMADA LA HISTORIA PREHISPÁNICA; EN EL SUR, EL MÉXICO COLONIAL; EN EL ORIENTE, EL REVOLUCIONARIO; Y EN EL PONIENTE EL MÉXICO MODERNO.

PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS MURALES, O'GORMAN SIGUIÓ LA TÉCNICA DEL MOSAICO VIDRIADO O VENECIANO, EN EL CUAL TODO SE TIENE QUE DIBUJAR AL REVÉS, PARA LO CUAL ELIGIÓ PIEDRAS NATURALES DE VARIADOS COLORES RECOLECTADAS EN DIFERENTES PARTES DE NUESTRO PAÍS. CADA MURAL ESTÁ CONFORMADO POR PANELES O LOSAS DE CONCRETO DE UN METRO CUADRADA CADA UNO, SOBRE LOS CUALES FUERON COLOCADAS LAS PIEDRAS. LOS PANELES FUERON SUJETADOS A LOS MUROS DE TABIQUE EXTERIORES POR MEDIO DE CUATRO ANCLAS AMARRADAS A UNA MALLA EN FORMA DE CUADRÍCULA UNIDA A LOS TABIQUES. EL ESPACIO ENTRE LOS PÁNELES, EL TABIQUE Y LA MALLA SE COLÓ CON MORTERO.

HACE POCO MÁS DE 10 AÑOS SE EMPEZARON A DESPRENDER LAS PIEDRAS DEL MOSAICO, LO CUAL HA ORIGINADO UNA SERIE DE INQUIETUDES ACERCA DEL ESTADO FÍSICO, QUÍMICO Y MECÁNICO EN QUE SE ENCUENTRA TAL ESTRUCTURA.

EL OBJETIVO PRINCIPAL DE ESTE TRABAJO ES EL DE ANALIZAR EL ESTADO QUE GUARDA CUALQUIER ESTRUCTURA DE CONCRETO REFORZADO; PERO TUVIMOS A BIEN ELEGIR UNA ESTRUCTURA DE LA MAGNITUD DE LA BIBLIOTECA CENTRAL, DADO LO RELEVANTE QUE SIGNIFICA LA PRESERVACIÓN DE LA MISMA. POR FACILIDAD DE TRABAJO SE ELIGIÓ EL CUARTO DE AGUAS (CARA NORTE), SOBRE EL CUAL SE EFECTUARON MEDICIONES PARA LA DETERMINACIÓN DE POTENCIALES DE MEDIA CELDA DE ACUERDO CON LA NORMA ASTM-C-876-87-10, ASÍ COMO LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y FRENTE DE CARBONATACIÓN SOBRE UNA PEQUEÑA PIEZA DESPRENDIDA. CABE SEÑALAR QUE, ACTUALMENTE, PARA LA DETERMINACIÓN DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN NO EXISTE UNA NORMA ESTABLECIDA POR LO CUAL SE PROPONE, EN ESTE TRABAJO, UN MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS MISMOS.

EXISTEN VARIOS MECANISMOS DE DETERIORO DEL CONCRETO Y CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO, ENTRE LOS QUE SE ENCUENTRAN: ATAQUE POR CLORUROS EN AMBIENTES COSTEROS; SULFATACIÓN Y/O CARBONATACIÓN EN ATMÓSFERAS INDUSTRIALES O URBANAS.

EN ESTE TRABAJO SE ABORDA EL DETERIORO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO POR EL MECANISMO DE CARBONATACIÓN.

SE CONOCE COMO CONCRETO ARMADO AL CONCRETO REFORZADO CON VARILLA DE ACERO.

EL CONCRETO PROPORCIONA A LAS ESTRUCTURAS UNA GRAN RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, PERO BAJA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN; PARA AUMENTAR LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN SE UTILIZA VARILLA DE ACERO COMO REFUERZO.

ENTRE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DEL CONCRETO ARMADO SE ENCUENTRAN: EL CEMENTO, LA GRAVA, LA ARENA Y LA VARILLA DE ACERO.

CABE SEÑALAR, QUE EN EL CONCRETO SE PUEDEN PRESENTAR TRES FASES: UNA SÓLIDA, FORMADA POR LA PASTA DE CEMENTO ENDURECIDA Y LA VARILLA DE ACERO; OTRA LÍQUIDA, DENOMINADA SOLUCIÓN PORO, FORMADA PRINCIPALMENTE, POR ÓXIDOS DE CALCIO Y POTASIO; Y FINALMENTE, UNA FASE VAPOR (AIRE CON ALGUNOS AGENTES AGRESIVOS, COMO EL DIÓXIDO DE CARBONO).

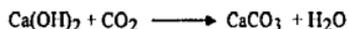
LAS PROPIEDADES QUÍMICAS, FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL CONCRETO NO SON PERMANENTES O INVARIABLES, PUES CAMBIAN CON EL TIEMPO, DEPENDIENDO DEL MEDIO DE SERVICIO AL QUE SE ENCUENTRE EXPUESTO.

LA CARBONATACIÓN ES UN PROCESO EN EL CUAL EL  $\text{CO}_2$  PRESENTE EN EL MEDIO AMBIENTE REACCIONA CON EL CONCRETO PARA FORMAR CARBONATO DE CALCIO, ENTRE OTROS. EL CONCRETO POSEE UN VALOR DE pH DE APROXIMADAMENTE 13.5, DEBIDO AL  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  FORMADO. EL ELEVADO VALOR DE pH PERMITE QUE SE FORME UNA PELÍCULA PROTECTORA ALREDEDOR DE LA VARILLA DE ACERO; ESTA PELÍCULA ESTÁ FORMADA, PRINCIPALMENTE, POR MAGNETITA ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). A ESTA CAPA DE ÓXIDO SE LE CONOCE COMO PELÍCULA PASIVANTE, Y PROTEGE A LA VARILLA CONTRA EL PROCESO DE CORROSIÓN O DISOLUCIÓN ANÓDICA DE LA VARILLA.

LA CARBONATACIÓN DEL CONCRETO OCASIONA LA REDUCCIÓN DEL pH DEL CONCRETO. ESTO SE DEBE A UNA REACCIÓN DE NEUTRALIZACIÓN ENTRE EL  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  DE LA PASTA DE CEMENTO, LOS ÓXIDOS DE CALCIO Y POTASIO DE LA SOLUCIÓN PORO CON EL DIÓXIDO DE CARBONO DISUELTO EN EL AGUA O LA SOLUCIÓN PORO. LA REACCIÓN DE CARBONATACIÓN SE LLEVA A CABO EN LOS ESPACIOS INTERSTICIALES DEL CONCRETO. ESTA REDUCCIÓN DEL pH CAUSA LA DESTRUCCIÓN DE LA PELÍCULA PASIVANTE DE LA VARILLA. ASÍ PUES, EL MECANISMO DE CARBONATACIÓN, ADEMÁS

DE DEGRADAR QUÍMICAMENTE LA PASTA DE CONCRETO, PUEDE FAVORECER LA CORROSIÓN DE LA VARILLA DE ACERO; ESTO ES, LA DISOLUCIÓN ANÓDICA DEL FIERRO PRESENTE EN LA VARILLA DE ACERO Y LA SUBSECUENTE FORMACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE LA CORROSIÓN.

EL PROCESO DE CARBONATACIÓN , DE MANERA GENERAL, SE PUEDE REPRESENTAR COMO:



EL  $\text{Ca(OH)}_2$  ES UNO DE LOS PRINCIPALES PRODUCTOS DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PRESENTE EN EL CONCRETO.

UNA VEZ DESTRUÍDA LA PELÍCULA PROTECTORA, Y BAJO CONDICIONES FAVORABLES, EL ACERO SE CORROE.

CABE SEÑALAR QUE SE ANALIZARON 18 m<sup>2</sup> DEL MURAL DE LA CAJA DE AGUAS DE LOS CUALES SÓLO 0.6 m SE ENCUENTRAN LIBRES DE CORROSIÓN (3.9% ); 13.8 m (73.9%) SE ENCUENTRAN BAJO LA INFLUENCIA DE UNA ALTA PROBABILIDAD DE CORROSIÓN Y 4 m<sup>2</sup> (22.2%) SE ENCUENTRAN ALTAMENTE CORROÍDOS. ESTO SE PUEDE APRECIAR, YA QUE HAY ZONAS EN LAS QUE ESTÁN PRESENTES CUARTEADURAS Y SE VE LA VARILLA DE ACERO EN UN ESTADO AVANZADO DE CORROSIÓN.

DE LO ANTERIOR SE PUEDE INFERIR QUE EL ESTADO DEL RESTO DEL MURAL GUARDA EL MISMO ESTADO DE CONDICIONES CRÍTICAS, DADO QUE HA ESTADO EXPUESTA A LAS MISMAS CONDICIONES.

## ÍNDICE

TEMA	PÁGINA
INTRODUCCIÓN.	v
CAPÍTULO I. GENERALIDADES.	3
I.1. QUÉ ES EL CONCRETO.	3
CEMENTO.	4
ARENA.	6
GRAVA.	6
ACERO.	6
I.2. QUÉ ES LA CORROSIÓN.	9
CAPÍTULO II. CORROSIÓN DEL CONCRETO POR CARBONATACIÓN.	17
II.1 EN QUÉ CONSISTE LA CORROSIÓN DEL CONCRETO REFORZADO.	17
MECANISMOS DE DEGRADACIÓN QUÍMICA DE LA PASTA DE CEMENTO:	
- POR ÁCIDOS.	17.
- POR FORMACIÓN DE SALES EXPANSIVAS.	18
- POR REACCIÓN CON CATIONES.	19
EL PROCESO DE CORROSIÓN DE LA VARILLA DE REFUERZO.	19
A. ROMPIMIENTO PARCIAL O TOTAL DE LA PELÍCULA PASIVANTE.	19
- ROMPIMIENTO ELECTROQUÍMICO.	19
- ROMPIMIENTO POR EXCAVACIÓN.	19
- ROMPIMIENTO MECÁNICO.	20
- ROMPIMIENTO POR PICADO.	20
- ROMPIMIENTO QUÍMICO.	20
B. CORROSIÓN ACTIVA.	21
II.2 CARBONATACIÓN DE ESTRUCTURAS.	23
CARBONATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND.	24
CARBONATACIÓN DEL CEMENTO DE ALTA ALÚMINA.	25

<b>TEMA</b>	<b>PÁGINA</b>
II.3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	28
<b>CAPÍTULO III. INSPECCIÓN Y ANÁLISIS DEL ESTADO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO.</b>	<b>40</b>
<b>III.1 MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO.</b>	<b>40</b>
- DETERMINACIÓN DE LOS POTENCIALES DE MEDIA CELDA.	40
- DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.	45
- DETERMINACIÓN DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN.	51
<b>III.2 INSPECCIÓN DE UNA ESTRUCTURA DE CONCRETO:</b>	<b>53</b>
<b>RESEÑA HISTÓRICA DEL MURAL "LA REPRESENTACIÓN HISTÓRICA DE LA CULTURA" DE LA BIBLIOTECA CENTRAL DE LA U.N.A.M.</b>	<b>53</b>
<b>REPORTE DE RESULTADOS DE POTENCIALES DE MEDIA CELDA.</b>	<b>63</b>
<b>REPORTE DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.</b>	<b>68</b>
<b>REPORTE DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN.</b>	<b>70</b>
<b>III.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.</b>	<b>71</b>
<b>III.4 CONCLUSIONES.</b>	<b>71</b>
<b>APÉNDICE I.</b>	<b>74</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>80</b>

## CAPÍTULO I. GENERALIDADES

### 1.1. QUÉ ES EL CONCRETO

EL CONCRETO ES UN MATERIAL DISCONTINUO, DURO Y DE ALTA DENSIDAD, FORMADO POR PASTA DE CEMENTO ENDURECIDA (HCP), AGREGADOS FINOS (ARENA), AGREGADOS GRUESOS (GRAVA), AGUA Y ADITIVOS EN PROPORCIONES VARIABLES, DE ACUERDO A LAS CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DESEADAS. ENTRE OTRAS COSAS, EL CONCRETO PUEDE TENER ALTA O BAJA PERMEABILIDAD Y POROSIDAD, LO QUE EN GRAN MEDIDA, VA A DETERMINAR SU COMPORTAMIENTO CON RESPECTO A LA CORROSIÓN. PARA QUE UNA ESTRUCTURA DE CONCRETO SE CONSIDERE DE BUENA CALIDAD DEBE SER RESISTENTE Y DURABLE; ESTO ES, QUE RESISTA EN LO MAYOR POSIBLE AL DETERIORO QUÍMICO DE LA PASTA, ASÍ COMO A LA CORROSIÓN DEL ACERO EMBEBIDO. A DIFERENCIA DEL CEMENTO, EL CONCRETO ES UN MATERIAL HETEROGÉNEO MULTICOMPONENTE, CUYAS PROPIEDADES ESTÁN DADAS POR LA SUMA DE LAS PROPIEDADES DE CADA UNO DE LOS COMPONENTES Y DE SU INTERACCIÓN CON ALGUNAS OTRAS. LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO SE REPRESENTAN POR  $C$  :

$$C = f(c, ca, s, w, v, x_1, \dots, x_n)$$

DONDE :

$C$  REPRESENTA AL CONCRETO;

$f$  ES FUNCIÓN;

$c$  ES EL TIPO DE CEMENTO;

$ca$  ES EL AGREGADO DE CUARZO;

$s$  ES LA ARENA;

$w$  ES EL AGUA DE MEZCLA;

$v$  ES EL MEZCLADO, COLOCADO O CURADO, Y

$x_1, \dots, x_n$  SON LOS AGREGADOS MINERALES O QUÍMICOS, REFUERZOS METÁLICOS, ETC.

EL CONCRETO POR SÍ SOLO OFRECE UNA GRAN RESISTENCIA A LOS ESFUERZOS DE COMPRESIÓN Y MUY PEQUEÑA A LOS ESFUERZOS DE TRACCIÓN. POR OTRO LADO, LA VARILLA DE ACERO ES MUY RESISTENTE A LOS ESFUERZOS DE TRACCIÓN O FLEXIÓN; POR LO TANTO, SI SE UTILIZA VARILLA DE ACERO COMO REFUERZO DEL CONCRETO, SE OBTIENE UN MATERIAL MÁS RESISTENTE QUE EL PROPIO CONCRETO A LOS ESFUERZOS DE TENSIÓN Y A LOS DE FLEXIÓN. A ESTE TIPO DE MATERIAL SE LE CONOCE COMO CONCRETO ARMADO, EL CUAL SE CLASIFICA EN:

1. CONCRETO REFORZADO, Y
2. CONCRETO PREEFORZADO.

EL CONCRETO REFORZADO ESTÁ CONFORMADO POR CONCRETO Y ACERO CON BAJO CONTENIDO DE CARBONO; ESTE TIPO DE CONCRETO DESARROLLA ESFUERZOS DE TENSIÓN JUSTO EN EL MOMENTO EN QUE SOPORTA EL PESO DEL CONCRETO Y LAS CARGAS DE LA ESTRUCTURA.

EL CONCRETO PREEFORZADO CONSTA DE CONCRETO Y ACERO DE ALTA RESISTENCIA, SOMETIDO A UN ESFUERZO PREVIO DE TENSIÓN PARA COMPENSAR LOS ESFUERZOS PROVOCADOS POR EL PESO DEL CONCRETO Y LAS CARGAS DE LA ESTRUCTURA.

ENTRE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DEL CONCRETO ARMADO SE ENCUENTRAN :

- EL CEMENTO;
- LA ARENA O AGREGADOS FINOS;
- LA GRAVA O AGREGADOS GRUESOS, Y,
- ACERO DE REFUERZO (VARILLA).

### CEMENTO.

EL CEMENTO ES UNA MEZCLA DE CLINKER CON UN PEQUEÑO PORCENTAJE DE YESO ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ), LOS CUALES SE MUELEN HASTA LOGRAR UN TAMAÑO DE PARTÍCULA MUY FINO. POR SU PARTE, EL CLINKER SE OBTIENE AL CALCINAR, EN UN HORNO ROTATORIO A APROXIMADAMENTE  $1500^\circ\text{C}$ , UNA MEZCLA DE CALIZA ( $\text{CaCO}_3$ ) Y ARCILLA ( $\text{Si}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). ASÍ PUES, LA PASTA DE CEMENTO ESTÁ COMPUESTA, PRINCIPALMENTE, DE CAL Y SÍLICA.

EL CEMENTO SE CLASIFICA, SEGÚN MARGARITA MIRANDA Y WALTTER LÓPEZ (REF. 2.), EN:

- CEMENTO PORTLAND;
- CEMENTO COMPUESTO;
- CEMENTO DE ESCORIA;
- CEMENTO NATURAL;
- CEMENTO DE ALTA ALÚMINA; Y,
- CEMENTO EXPANSIVO.

DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO, EL **PORTLAND** ES DE LOS DE MAYOR IMPORTANCIA, DADO QUE ES EL DE MAYOR USO. ESTE ES UN CEMENTO HIDRAÚLICO; ES DECIR, LAS FASES DEL CEMENTO REACCIONAN QUÍMICAMENTE CON EL AGUA PARA DAR LUGAR A PRODUCTOS DE HIDRATACIÓN INSOLUBLES, QUE SON RESPONSABLES DE LA SOLIDIFICACIÓN Y DEL DESARROLLO DE RESISTENCIA MECÁNICA, AÚN SUMERGIDO EN EL AGUA. COMO SE PUEDE APRECIAR EN LA TABLA I, EXISTEN CINCO TIPOS DE CEMENTO PORTLAND<sup>(2)</sup>:

**TABLA I. PROPORCIONES TÍPICAS DE LAS PRINCIPALES FASES ANHIDRAS DE LOS CINCO TIPOS DE CEMENTO PORTLAND.**

COMPONENTE	TIPO DE CEMENTO:				
	I	II	III	IV	V
SILICATO TRICÁLCICO C <sub>3</sub> S	51	46	58	26	39
SILICATO DICÁLCICO C <sub>2</sub> S	25	32	16	54	43
ALUMINATO TRICÁLCICO C <sub>3</sub> A	9	4	8	2	2
FERRIALUMINATO TETRACÁLCICO C <sub>4</sub> AF	8	12	8	12	8
OTROS COMPONENTES.	7	6	10	6	8

EL CEMENTO **COMPUESTO** ES UNA MEZCLA DE CEMENTO Y PUZOLANA ( 15 A 40 % EN PESO DE PUZOLANA ), CEMENTO TIPO IP; CEMENTO PORTLAND CON 25 A 65 % EN PESO DE ESCORIAS DE ALTOS HORNOS, TIPO IS.

EL CEMENTO DE **ESCORIA** ( TIPO S ) ES UNA MEZCLA DE CAL HIDRATADA Y ESCORIA DE ALTOS HORNOS, FINAMENTE GRANULADA, HASTA EN UN 60 % EN PESO. ESTE TIPO DE CEMENTO PRODUCE BAJA RESISTENCIA.

EL CEMENTO **NATURAL** SE OBTIENE DE LA CALCINACIÓN DE CALIZAS Y ARCILLAS FINAMENTE DIVIDIDAS, A UNA TEMPERATURA MENOR QUE LA DE DESCARBONATACIÓN. ESTE TIPO DE CEMENTO NO TIENE UNIFORMIDAD EN SUS PROPIEDADES, POR LO QUE SE MEZCLA CON CEMENTO PORTLAND PARA FABRICAR CONCRETO.

EL CEMENTO DE **ALTA ALÚMINA** RESISTE EN GRAN MEDIDA AL ATAQUE DE LOS SULFATOS; ESTÁ CONSTITUÍDO POR PARTES IGUALES DE ALÚMINA Y CAL (APROXIMADAMENTE 40 % DE CADA UNA), CON ALGUNOS ÓXIDOS DE HIERRO, Y UNA CANTIDAD LIGERAMENTE SUPERIOR AL 8 % DE SÍLICE.

LOS CEMENTOS **EXPANSIVOS** SON AQUELLOS QUE AUMENTAN DE VOLUMEN EN LOS PRIMEROS DIAS, CON LO QUE SE OBTIENE UN TIPO DE CONCRETO PREEFORZADO AL RESTRINGIR ESTA EXPANSIÓN POR MEDIO DE UN ACERO DE REFUERZO.

## **ARENA.**

LA ARENA ESTÁ COMPUESTA POR PARTÍCULAS METÁLICAS, SILICATOS Y ÓXIDOS METÁLICOS, DE TAMAÑO MUY PEQUEÑO Y CASI UNIFORME.

## **GRAVA.**

LA GRAVA ESTÁ FORMADA, AL IGUAL QUE LA ARENA, POR SILICATOS, PARTÍCULAS METÁLICAS, ÓXIDOS METÁLICOS, ADEMÁS DE PIEDRAS, POR LO QUE EL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS NO ES UNIFORME.

## **ACERO.**

EL ACERO ES UNA ALEACIÓN QUE CONTIENE HIERRO COMO BASE Y CARBONO, PUDIENDO CONTENER Mn, Si, Cr, Ni, Mo, ENTRE OTROS. EL TIPO DE ACERO EMPLEADO EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN ES EL ACERO ESTRUCTURAL, EL CUAL DEBE POSEER ENTRE SUS PROPIEDADES, ALTA RESISTENCIA A LA TENSIÓN, DUCTILIDAD, TENACIDAD Y SOLDABILIDAD.

EL CONCRETO PRESENTA, BAJO CIERTAS CONDICIONES DE HUMEDAD, TRES FASES:

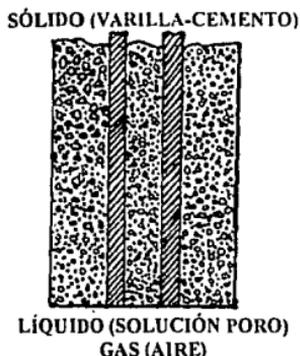
- UNA FASE SÓLIDA. COMPUESTA POR LA PASTA DE CEMENTO, LA ARENA, LA GRAVA Y LA VARILLA DE ACERO;

- UNA FASE LÍQUIDA. ESTA ES CONOCIDA COMO SOLUCIÓN PORO QUE, DE ACUERDO CON PETERSON (REF. 3), POSEE UN pH MAYOR DE 13.5, ESTO SE DEBE A LA PRESENCIA DE ÓXIDOS ALCALINOS, TALES COMO EL  $\text{Na}_2\text{O}$  Y EL  $\text{K}_2\text{O}$ , QUE SE DISUELVEN EN EL AGUA DISPONIBLE DE LOS POROS FORMANDO IONES SODIO Y POTASIO EN EQUILIBRIO CON LOS IONES  $\text{OH}^-$ . ESTOS IONES SE ENCUENTRAN EN EQUILIBRIO CON UNA CONCENTRACIÓN DE IONES  $\text{Ca}^{2+}$  DE 0.0004 A 0.0036 MOL (sic., REF. 4).

ESTA FASE PUEDE DESAPARECER Y DESPUÉS REAPARECER, BAJO CIERTAS CONDICIONES DE HUMEDAD Y TEMPERATURA, PRINCIPALMENTE.

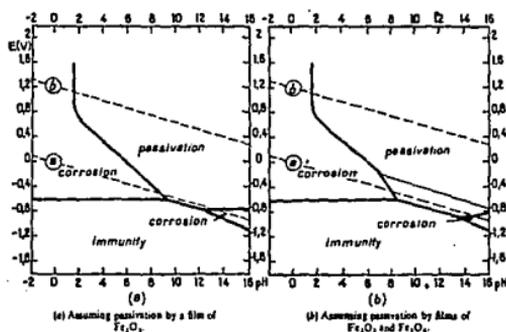
- LA TERCERA FASE ES EL AIRE PRESENTE EN LOS POROS. AL IGUAL QUE LA FASE ANTERIOR PUEDE ESTAR PRESENTE O NO, DEPENDIENDO DEL GRADO DE SATURACIÓN DE LOS POROS DEL CONCRETO.

FIG. 1 FASES PRESENTES EN EL CONCRETO REFORZADO .



UNO DE LOS PRODUCTOS DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO ES EL HIDRÓXIDO DE CALCIO,  $\text{Ca(OH)}_2$ . EL ELEVADO VALOR DEL pH DEL HIDRÓXIDO DE CALCIO PRESENTE EN LA PASTA DE CEMENTO ENDURECIDO (HCP), AL IGUAL QUE EL DE LA SOLUCIÓN PORO, PERMITEN QUE SE FORME UNA CAPA COMPACTA DE ÓXIDOS DE HIERRO, FORMADA PRINCIPALMENTE POR MAGNETITA ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) Y EN MENOR GRADO POR HEMATITA ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) Y WUSTITA ( $\text{FeO}$ ). ESTA CAPA COMPACTA DE ÓXIDOS FORMA UNA PELÍCULA PASIVANTE QUE SE ADHIERE A LA SUPERFICIE DE LA VARILLA METÁLICA, Y QUE LA PROTEGE, BAJO CIERTAS CONDICIONES, DE LOS EFECTOS DE LA CORROSIÓN, ES DECIR, CONTRA LA DISOLUCIÓN ANÓDICA DE LA VARILLA. EN LA FIG. 2 SE PUEDEN APRECIAR, POR ANALOGÍA CON EL ACERO, LAS CONDICIONES TEÓRICAS PARA LA PRESENCIA DE LAS DIFERENTES FASES DEL HIERRO.

FIG. 2. CONDICIONES TEÓRICAS PARA LAS FASES DE: CORROSIÓN, INMUNIDAD Y PASIVACIÓN DEL HIERRO\*.



CABE SEÑALAR, QUE BAJO CONDICIONES DE HUMEDAD Y EN PRESENCIA DE OXÍGENO, LA MAGNETITA SE CONVIERTE EN HIDRÓXIDO FÉRRICO ( $Fe(OH)_3$ ).

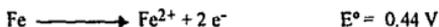
ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS QUE DEBE POSEER UNA BUENA CAPA PASIVANTE SE ENCUENTRAN:

- BAJA CONDUCTIVIDAD IÓNICA;
- BAJA SOLUBILIDAD QUÍMICA;
- ALTA CONDUCTIVIDAD ELECTRÓNICA;
- BAJA VELOCIDAD DE DISOLUCIÓN;
- AMPLIO INTERVALO DE POTENCIAL EN EL QUE SEA TERMODINÁMICAMENTE ESTABLE;
- BUENA ADHERENCIA AL METAL; Y,
- ALTA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

EL PROCESO DE FORMACIÓN DE LA PELÍCULA PASIVANTE, BAJO CONDICIONES ADECUADAS DE pH, CONTENIDO DE HUMEDAD, TEMPERATURA, ETC., ESTÁ DADA POR:

1. LA DISOLUCIÓN PARCIAL DEL HIERRO POR OXIDACIÓN:

EN EL ÁNODO, EL HIERRO SE OXIDA A IONES FERROSOS:



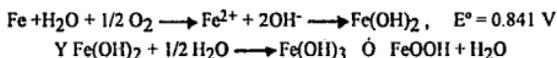
\* TOMADA DE: ATLAS OF ELECTROCHEMICAL EQUILIBRIA IN AQUEOUS SOLUTIONS (REF. 5)

Y,

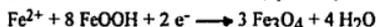
2. LA REDUCCIÓN DEL OXÍGENO A IONES OH<sup>-</sup>:  
EN EL CÁTODO EL OXÍGENO SE REDUCE A IONES OH<sup>-</sup>, DEBIDO AL ALTO pH DEL CONCRETO Y A LA PRESENCIA DE OXÍGENO DISUELTO:



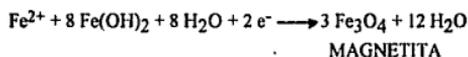
LA REACCIÓN TOTAL ES:



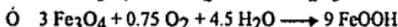
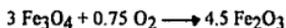
A SU VEZ, LA REACCIÓN ANÓDICA  $\text{Fe} \longrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$  ES BALANCEADA POR LA REDUCCIÓN CATÓDICA, BAJO CONDICIONES DE HUMEDAD Y CUANDO EL ACCESO DE OXÍGENO ES LIMITADO; DE ACUERDO CON EVANS (op. cit. 6):



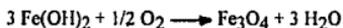
O LO QUE ES LO MISMO:



AL SECARSE Y AUMENTAR EL OXÍGENO DISPONIBLE LA MAGNETITA SE REOXIDA A LA FORMA FÉRRICA CON UNA GANANCIA NETA DE 0.5 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



A TEMPERATURAS COMPRENDIDAS ENTRE 303 - 373 °K SE TIENE QUE, DE ACUERDO CON JOSHI, P.S. et. al. (REF. 7):



LA PELÍCULA PASIVANTE, ADEMÁS DE PROTEGER AL ACERO CONTRA LA CORROSIÓN, AUMENTA LA ADHERENCIA ENTRE LA VARILLA Y EL CONCRETO.

## 1.2. ¿ QUÉ ES LA CORROSIÓN ?

LA MAYORÍA DE LOS METALES EXISTEN EN LA NATURALEZA EN FORMA DE ÓXIDOS, Y NO COMO LOS CONOCEMOS; POR LO QUE PARA OBTENERLOS EN FORMA METÁLICA ES NECESARIO APLICAR CIERTA CANTIDAD DE ENERGÍA PARA REDUCIRLOS. ASÍ PUES, EL METAL OBTENIDO DE ESTA FORMA, TIENE UN ESTADO DE ENERGÍA MAYOR QUE EL ORIGINAL, ES POR ESTO, QUE TALES METALES TIENEN LA

TENDENCIA A VOLVER A SU ESTADO NATURAL, ES DECIR, A ÓXIDOS. ESTA TENDENCIA ES MAYOR EN TANTO LA ENERGÍA SUMINISTRADA PARA EXTRAER EL METAL SEA MAYOR.

PODRÍAMOS DECIR QUE LA CORROSIÓN ES UN PROCESO ELECTROQUÍMICO MEDIANTE EL CUAL UN METAL INTENTA VOLVER A SU ESTADO NATURAL O DE MENOR ENERGÍA. PARA QUE SE PRESENTE DICHO PROCESO SE REQUIERE QUE EXISTAN:

- UN ÁNODO
- UN CÁTODO
- UN ELECTROLITO IONIZADO, Y
- UN CONTACTO ELÉCTRICO ENTRE EL ÁNODO Y EL CÁTODO.

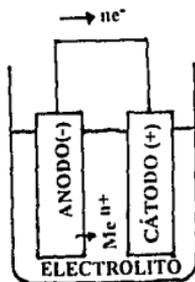
EL ÁNODO ES LA SUPERFICIE O PORCIÓN METÁLICA EN QUE TIENE LUGAR LA CORROSIÓN. AL DISOLVERSE DICHA SUPERFICIE SE LIBERAN ELECTRONES. LA OXIDACIÓN O DISOLUCIÓN DEL METAL ES POSIBLE DEBIDO A UNA DIFERENCIA DE POTENCIAL ENTRE EL ÁNODO Y LA SUPERFICIE QUE ACTÚA COMO CÁTODO. DE ESTE MODO, EL METAL DISUELTO PASA A FORMAR IONES EN EL ELECTROLITO. LOS ELECTRONES LIBERADOS PASAN A TRAVÉS DEL CONTACTO ELÉCTRICO Y LLEGAN HASTA EL CÁTODO

EL CÁTODO ES LA SUPERFICIE EN LA CUAL LOS ELECTRONES PRODUCIDOS EN EL ÁNODO SE COMBINAN CON IONES PRESENTES EN EL ELECTROLITO, EFECTUÁNDOSE ASÍ UNA REDUCCIÓN.

EL ELECTROLITO ES EL MEDIO EN EL CUAL SE DIFUNDEN LOS IONES Y LOS PRODUCTOS DE LA CORROSIÓN.

EL CONTACTO ELÉCTRICO ES UNA UNIÓN METÁLICA ENTRE EL ÁNODO Y EL CÁTODO, ENCARGADO DE TRANSPORTAR LOS ELECTRONES GENERADOS EN EL ÁNODO HASTA EL CÁTODO. VER FIG. 3.

FIG. 3. COMPONENTES DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA.



CABE MENCIONAR, QUE PARA QUE LA CORROSIÓN SE LLEVE A CABO, ES NECESARIO QUE SE PRESENTEN TODOS LOS ELEMENTOS MENCIONADOS ANTERIORMENTE; EN CASO DE QUE FALTE UNO DE ELLOS, EL PROCESO DE CORROSIÓN NO SE PRESENTA; O, SI YA ESTABA PRESENTE, SE DETIENE TEMPORALMENTE PARA REINICIAR EN CUANTO SEA POSIBLE; ES DECIR, EN CUANTO ESTÉN PRESENTES TODOS ELLOS.

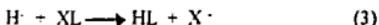
LA CORROSIÓN DE UN METAL SE REPRESENTA POR:



LOS IONES  $\text{Me}^{2+}$  PROVENIENTES DEL ÁNODO REACCIONAN CON MOLÉCULAS DEL AGUA DEL MEDIO Y ALCANZAN EL EQUILIBRIO TERMODINÁMICO, DE ACUERDO CON LA REACCIÓN:



DONDE LA HIDRÓLISIS DEL IÓN METÁLICO PUEDE CONTINUAR A OTRAS FORMAS. SI EL MEDIO CORROSIVO CONTIENE SALES DE ÁCIDOS DÉBILES, LOS PROTONES QUE SE PRODUCEN EN LA REACCIÓN ANTERIOR REACCIONAN CON LA SAL DEL ÁCIDO DÉBIL PARA DAR:



DONDE:

X ES EL CATION, Y,

L ES EL ANIÓN DEL ÁCIDO DÉBIL.

DE ESTA MANERA, EN LA REACCIÓN 3 SE CONSUMEN LOS PROTONES PRODUCIDOS EN LA 2 SIN QUE SE MODIFIQUE EL pH; PERO SI EL MEDIO SÓLO CONTIENE ANIONES DE ÁCIDOS FUERTES, LOS ANIONES NO CAPTARÁN PROTONES, Y AL SUMARSE A LAS REACCIONES 1 Y 2 SE PRODUCE UNA ACIDIFICACIÓN LOCALIZADA.

TODOS LOS METALES POSEEN UNA TENDENCIA DIFERENTE A CORROERSE EN UN MISMO MEDIO, ESTO ES, ALGUNOS SON MÁS RESISTENTES QUE OTROS. LOS METALES CON MENOR TENDENCIA A CORROERSE SON LOS METALES MENOS ACTIVOS, O NOBLES, Y SE LES CONOCE COMO METALES RELATIVAMENTE CATÓDICOS ( EL ORO, LA PLATA, EL PLATINO Y OTROS ). LOS METALES MENOS NOBLES, QUE SON MÁS ACTIVOS, SE LES CONOCE COMO METALES RELATIVAMENTE ANÓDICOS. LOS METALES CATÓDICOS TIENEN UN POTENCIAL ELÉCTRICO ALTO O POSITIVO, MIENTRAS QUE LOS ANÓDICOS TIENEN UN POTENCIAL ELECTRICO BAJO O NEGATIVO, CON RESPECTO AL VALOR DEL POTENCIAL NORMAL DE HIDRÓGENO. DE ESTO SE DESPRENDE QUE MIENTRAS MÁS ELECTRONEGATIVO SEA EL VALOR DEL POTENCIAL DE UN METAL, MAYOR SERÁ LA TENDENCIA DEL MISMO A CORROERSE.

CUANDO ENTRAN EN CONTACTO DOS METALES DE DIFERENTE NATURALEZA SE CREA LO QUE SE CONOCE COMO UN PAR GALVÁNICO, DEBIDO A LA DIFERENCIA DE POTENCIAL ELÉCTRICO. ESTE PAR GALVÁNICO NO ES MÁS QUE LA PRESENCIA DE UN ÁNODO (EL METAL CON POTENCIAL ELÉCTRICO MÁS BAJO), UNIDO ELÉCTRICAMENTE A UN CÁTODO (EL METAL CON POTENCIAL ELÉCTRICO MÁS ALTO).

PARA FINES PRÁCTICOS, SE PUEDE PREVER EL COMPORTAMIENTO DE UN METAL CON RESPECTO AL SERVICIO MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA ENERGÍA DEL SISTEMA.

$$-\Delta G^{\circ} = n F E^{\circ}$$

DONDE:

**n** ES EL NÚMERO DE ELECTRONES TRANSPORTADOS

**F** ES LA CONSTANTE DE FARADAY

**E** ES LA DIFERENCIA DE POTENCIAL

POR LO QUE:

<b>EL CAMBIO DE ENERGÍA LIBRE =</b>	<b>ENERGÍA LIBRE</b>	<b>ENERGÍA LIBRE</b>
<b>DE REACCIÓN DEL SISTEMA</b>	<b>DE LOS PRODUCTOS</b>	<b>DE LOS REACTIVOS</b>

A) CUANDO EL SISTEMA TIENE UNA ENERGÍA LIBRE NEGATIVA, EL METAL ES ACTIVO Y PUEDE HABER CORROSIÓN. A MENOS QUE EL METAL SE ENCUENTRE PASIVADO, NO SE PRESENTA CORROSIÓN POR CIERTO TIEMPO BAJO CIERTAS CONDICIONES.

B) CUANDO LA ENERGÍA LIBRE DEL SISTEMA ES CERO O POSITIVA, EL METAL NO PRESENTA CORROSIÓN.

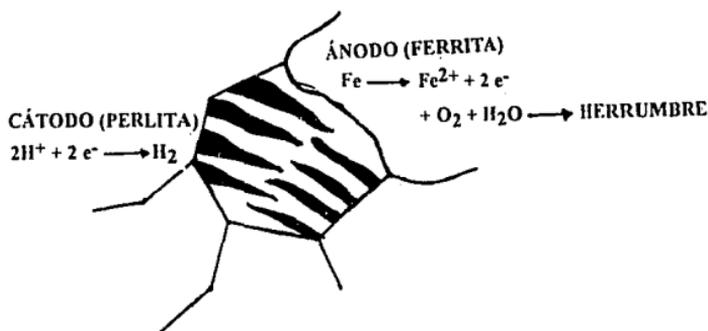
UNA CELDA ELECTROQUÍMICA ES CAPAZ DE GENERAR ENERGÍA QUE SE PUEDE UTILIZAR, MIENTRAS QUE LAS CELDAS DE CORROSIÓN NO, PUES LA TRANSFERENCIA ELECTRÓNICA OCURRE A NIVELES MICROSCÓPICOS. EN ESTE CASO, EL CONDUCTOR PUEDE SER LA MISMA FASE METÁLICA.

LA APARICIÓN DE MANCHAS DE HERRUMBRE EN UNA ESTRUCTURA DE CONCRETO ES SEÑAL DE UN ESTADO AVANZADO DE CORROSIÓN. EL DETERIORO ES CAUSADO POR LOS PRODUCTOS DE LA CORROSIÓN DEL ACERO, PUES OCUPAN UN VOLUMEN DE APROXIMADAMENTE CUATRO VECES MÁS GRANDE QUE EL ACERO DEL CUAL PROVIENEN. ESTO PROVOCA QUE SE GENEREN GRANDES ESFUERZOS SOBRE EL CONCRETO FORMÁNDOSE, PUES, GRIETAS QUE LO FRAGILIZAN; PERDIENDO SUS PROPIEDADES MECÁNICAS Y LA UNIÓN ENTRE EL ACERO Y EL CONCRETO.

LA VARILLA DE ACERO ESTÁ FORMADA EN SU MAYOR PARTE POR HIERRO EN EL CUAL, A NIVEL MICROSCÓPICO, SE OBSERVAN DOS FASES: UNA RICA EN HIERRO

(FERRITA) QUE ACTÚA COMO ÁNODO, Y OTRA FASE QUE CONTIENE CARBUROS DE HIERRO EN UNA MATRIZ DE FERRITA (PERLITA) QUE ACTÚA COMO CÁTODO. ESTAS DOS FASES CONFORMAN UN PAR GALVÁNICO, Y EN PRESENCIA DE UN ELECTROLITO (PUEDE SER: HUMEDAD, UNA SOLUCIÓN QUE CONTenga IONES O ÁTOMOS CARGADOS ELÉCTRICAMENTE, OXÍGENO, DIÓXIDO DE CARBONO, ANHÍDRIDO SULFUROSO, CLORURO O CUALQUIERA QUE ATAQUE AL ACERO) SE FORMA UNA CELDA ELECTROQUÍMICA DE CORROSIÓN.

**FIG. 4. REPRESENTACIÓN DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA DE CORROSIÓN PARA EL ACERO\*.**



EL PROCESO DE CORROSIÓN DEL ACERO COMPRENDE:

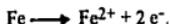
- I. LA DESTRUCCIÓN DE LA PELÍCULA PASIVANTE, Y POSTERIORMENTE,
- II. ATAQUE AL ACERO.

I. LA DESTRUCCIÓN DE LA PELÍCULA PASIVANTE SE DA POR DIFERENTES CAUSAS, ENTRE LAS PRINCIPALES SE ENCUENTRAN: LA DISMINUCIÓN DEL pH Y EL ATAQUE DE IONES AGRESIVOS, COMO SE VERÁ EN EL SIGUIENTE CAPÍTULO.

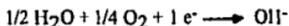
II. EL ATAQUE AL ACERO, UNA VEZ REMOVIDA LA PELÍCULA PASIVANTE, O CORROSIÓN ESTÁ DADO POR:

\* TOMADA DE: MÁS ALLÁ DE LA HERRUMBRE (REF. 8).

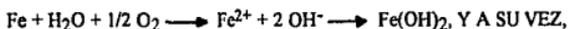
1. LA DISOLUCIÓN ANÓDICA DEL FIERRO:



2. LA REDUCCIÓN CATÓDICA DEL O<sub>2</sub> A IONES OH<sup>-</sup>:



Y LA REACCIÓN TOTAL ES:



EL Fe(OH)<sub>2</sub> Y EL Fe(OH)<sub>3</sub> SON LOS PRODUCTOS DE LA CORROSIÓN.

COMO SE PUEDE APRECIAR, EL PROCESO DE CORROSIÓN ES SIMILAR AL DE LA FORMACIÓN DE LA PELÍCULA PASIVANTE, EXCEPTO POR LAS CONDICIONES EN QUE SE LLEVAN A CABO, COMO SON: pH, TEMPERATURA Y DISPONIBILIDAD DE O<sub>2</sub>.

A CONTINUACIÓN SE MUESTRAN DIAGRAMAS DE POURBAIX PARA EL HIERRO, EN LOS CUALES SE MUESTRAN LAS ZONAS DE EQUILIBRIO ENTRE LAS DIFERENTES ESPECIES PRESENTES EN EL SISTEMA, ASÍ COMO LAS CONDICIONES TEÓRICAS PARA LOS ESTADOS DE PASIVIDAD, INMUNIDAD Y CORROSIÓN EN FUNCIÓN DEL POTENCIAL Y pH DEL SISTEMA A UNA TEMPERATURA DE 25 °C.

FIG. 5. DIAGRAMA DE EQUILIBRIO POTENCIAL-pH PARA EL SISTEMA HIERRO-AGUA A 25°C, CONSIDERANDO COMO SÓLIDOS Fe, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (REF. 5)

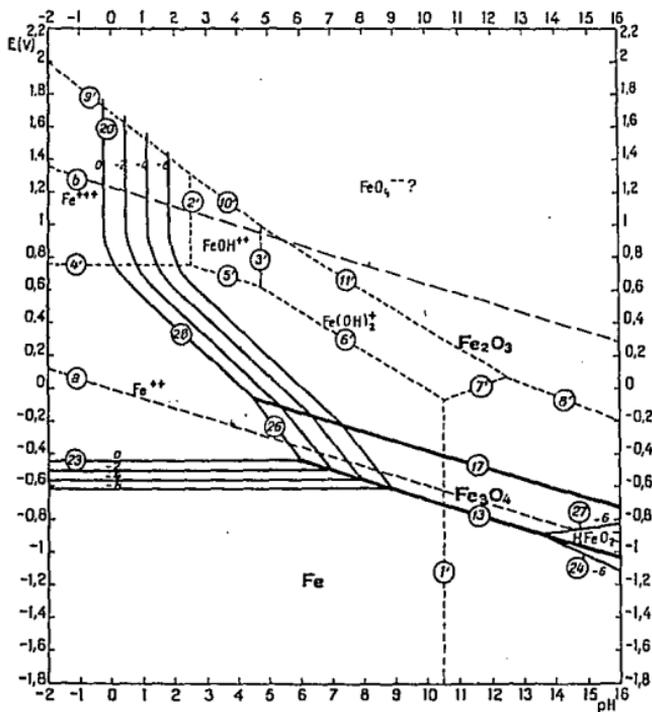
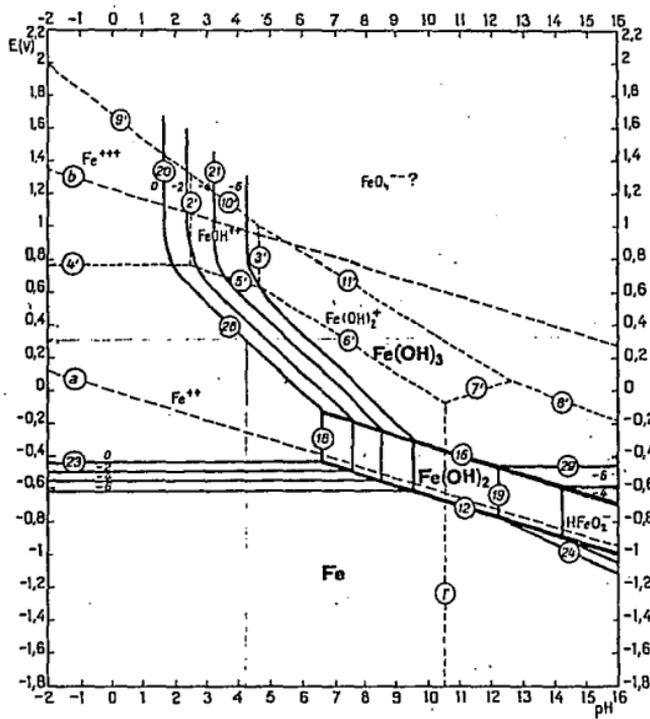


FIG. 6. DIAGRAMA DE EQUILIBRIO POTENCIAL-pH PARA EL SISTEMA HIERRO-AGUA A 25°C, CONSIDERANDO COMO SÓLIDOS  $\text{Fe}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , Y  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  (REF. 5).



## **CAPÍTULO II. CORROSIÓN DEL CONCRETO POR CARBONATACIÓN.**

### **II.1. EN QUÉ CONSISTE LA CORROSIÓN DEL CONCRETO REFORZADO.**

EN EL CAPÍTULO ANTERIOR SE MENCIONÓ QUE EL ACERO EMBEBIDO EN EL CONCRETO SE ENCUENTRA PROTEGIDO POR UNA PELÍCULA PASIVANTE, QUE BAJO CIERTAS CONDICIONES LO PROTEGE CONTRA EL PROCESO DE CORROSIÓN, ADEMÁS DE QUE AUMENTA LA ADHERENCIA ENTRE LA VARILLA Y EL CONCRETO.

EL PROCESO DE CORROSIÓN DEL CONCRETO ESTÁ DADO, PRINCIPALMENTE, POR:

- LA DEGRADACIÓN QUÍMICA DE LA PASTA DE CEMENTO; Y,
- LA CORROSIÓN DE LA VARILLA DE REFUERZO.

LOS MECANISMOS DE DEGRADACIÓN QUÍMICA DE LA PASTA DE CEMENTO, DE MANERA GENERAL, SE CLASIFICAN EN TRES GRUPOS, Y ESTOS SON<sup>(9)</sup>:

- A. LA DEGRADACIÓN DE LA PASTA DE CEMENTO POR ÁCIDOS;
- B. LA DEGRADACIÓN POR FORMACIÓN DE SALES EXPANSIVAS; Y,
- C. LA DEGRADACIÓN POR REACCIÓN CON CATIONES.

PUEDE PRESENTARSE EL CASO EN QUE DOS O LOS TRES MECANISMOS ESTÉN PRESENTES DE MANERA SIMULTÁNEA.

#### **A. LA DEGRADACIÓN DE LA PASTA DE CEMENTO POR ÁCIDOS.**

EL CONCRETO, Y A SU VEZ LA PASTA DE CEMENTO, ESTÁ COMPUESTA PRINCIPALMENTE POR CAL Y SÍLICA. LA SÍLICA ES UN ÁCIDO MUY DÉBIL Y LA CAL UNA BASE MUY FUERTE, POR LO QUE AÚN UN ÁCIDO DÉBIL COMO EL  $\text{CO}_2$  CONVERTIRÁ LA PASTA DE CEMENTO, EN ESTE CASO, A CARBONATO DE CALCIO Y SÍLICA. LA VELOCIDAD DEL DETERIORO ESTÁ DETERMINADA POR EL pH DEL ÁCIDO. LOS ÁCIDOS MÁS AGRESIVOS SON LOS ÁCIDOS MINERALES FUERTES COMO EL ÁCIDO SULFÚRICO, CLORHÍDRICO Y NÍTRICO, AÚN CUANDO TALES ÁCIDOS ESTÉN MUY DILUÍDOS. UN ÁCIDO MINERAL DÉBIL ES EL ÁCIDO SULFÍDRICO, Y ES TAN DÉBIL COMO PARA ATACAR DE FORMA SEVERA AL CONCRETO.

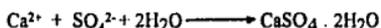
UN TIPO ESPECIAL DE REACCIÓN CON ÁCIDOS ES LA REACCIÓN DEBIDO A LA PENETRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO GAS EN LOS POROS VACÍOS DEL CONCRETO. CUANDO EL DIÓXIDO DE CARBONO ALCANZA LA FRONTERA DE AGUA EN LOS POROS SE DISUELVE PARCIALMENTE EN LA MISMA. EN CONSECUENCIA, EL DIÓXIDO DE CARBONO REACCIONA EN LA INTERFASE AGUA/AIRE CON LA CAL Y,

POSTERIORMENTE, CON EL SILICATO DE CALCIO HIDRATADO Y OTROS COMPUESTOS DE CALCIO.

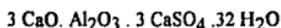
### B. DEGRADACIÓN POR FORMACIÓN DE SALES EXPANSIVAS

LOS SULFATOS CAUSAN LA FORMACIÓN DE SALES DOBLES EXPANSIVAS. LA MAYORÍA DE LOS SULFATOS PENETRAN DESDE EL EXTERIOR AUNQUE, BAJO CIERTAS CONDICIONES, TAMBIÉN PODRÍAN PROVENIR DEL MISMO CEMENTO. EL CEMENTO SIEMPRE CONTIENE ALGÚN PORCENTAJE DE SULFATO DE CALCIO, EL CUAL ACTÚA COMO REGULADOR DE TIEMPO DEL FRAGUADO.

LOS SULFATOS ESTÁN PRESENTES DE MANERA NATURAL EN EL AGUA, A VECES EN ALTAS CONCENTRACIONES. CUANDO LOS IONES SULFATO PENETRAN EN LOS POROS DEL SISTEMA, POR ABSORCIÓN DE LOS IONES PRESENTES EN EL AGUA O POR DIFUSIÓN, PUEDEN REACCIONAR CON LA CAL LIBRE PRESENTE EN EL CONCRETO Y FORMAR YESO:



ESTE YESO REACCIONA CON LOS COMPUESTOS HIDRATADOS DE ALUMINATO DE CALCIO PARA FORMAR ETTRINGITA:



LA FORMACIÓN DE ESTA SAL DOBLE EN CONCRETO ORDINARIO ENDURECIDO ES EXPANSIVA. CUANDO LOS ESFUERZOS DE EXPANSIÓN SUPERAN A LOS ESFUERZOS DE TENSIÓN DEL CONCRETO OCURRE LA RUPTURA DEL MISMO.

OTRA DOBLE SAL DE SULFATO ES LA TAUMASITA:



### C. DEGRADACIÓN POR REACCIÓN CON CATIONES.

ALGUNOS AGREGADOS CONTIENEN FORMAS REACTIVAS DE DIÓXIDO DE SILICIO. LOS COMPUESTOS DE ESTE TIPO PUEDEN REACCIONAR CON LA SOLUCIÓN PORO (IONES SODIO Y POTASIO) DANDO LUGAR A LA FORMACIÓN DE SILICATOS ALCALINOS. ESTOS MATERIALES TIPO GEL PUEDEN ABSORBER GRANDES CANTIDADES DE AGUA, DEBIDO A LOS EFECTOS OSMÓTICOS. POR ESTO LA PASTA REACCIONA COMO UNA MEMBRANA SEMIPERMEABLE. LA PRESIÓN PUEDE AUMENTAR LO SUFICIENTE COMO PARA CAUSAR LA RUPTURA DEL CONCRETO.

EL IÓN AMONIO ( $\text{NH}_4^+$ ) ES INOFENSIVO POR SI SOLO. SIN EMBARGO, EL CATION SIEMPRE SE ENCUENTRA EN COMBINACIÓN CON UN ANIÓN, Y ESTE ANIÓN REACCIONA CON LOS COMPUESTOS HIDRATADOS DEL CEMENTO. AL FORMARSE LAS

SALES DE CALCIO SE LIBERA AMONIACO GASEOSO. EL DESPRENDIMIENTO DE AMONIACO DESPLAZA LA REACCIÓN HACIA LA DERECHA:



LAS SALES DE MAGNESIO REACCIONAN PRIMERO CON EL HIDRÓXIDO DE CALCIO, FORMANDO HIDRÓXIDO DE MAGNESIO DE BAJA SOLUBILIDAD. SIN EMBARGO, EL MAGNESIO ES TAMBIÉN CAPAZ DE REACCIONAR CON EL GEL DE SILICATO DE CALCIO HIDRATADO:



POR OTRO LADO, EL PROCESO DE CORROSIÓN DE LA VARILLA DE REFUERZO ES LA PRINCIPAL CAUSA DEL DAÑO A LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO, Y SE PUEDE GENERALIZAR COMO:

- A. ROMPIMIENTO PARCIAL O TOTAL DE LA PELÍCULA PASIVANTE; Y,
- B. CORROSIÓN ACTIVA.

A). EL ROMPIMIENTO PARCIAL O TOTAL DE LA PELÍCULA PASIVANTE SE DEBE A LA PRESENCIA DE LOS LLAMADOS FACTORES DESENCADENANTES DE LA CORROSIÓN; ESTO ES, AQUELLOS FACTORES QUE FAVORECEN LA FORMACIÓN DE ZONAS CON UNA DIFERENCIA DE POTENCIAL CAPAZ DE ROMPER LA PASIVIDAD. EL ROMPIMIENTO DE LA PELÍCULA PUEDE SER:

- ROMPIMIENTO ELECTROQUÍMICO.

ESTO SE DEBE AL HECHO DE QUE MUCHOS ÓXIDOS METÁLICOS PUEDEN SER REDUCIDOS CATÓDICAMENTE EN VARIAS SOLUCIONES SIN QUE INTERVENGA UNA FEM EXTERNA, SI LA CAPA PASIVANTE TIENE LUGARES DÉBILES QUE FUNCIONEN COMO ÁNODOS LOCALES. SI NO EXISTE LA SUFICIENTE CANTIDAD DE ÓXIDO EN LA PELÍCULA, ÉSTA SE VUELVE EL REACTIVO CATÓDICO REDUCIÉNDOSE COMPLETAMENTE.

- ROMPIMIENTO POR EXCAVACIÓN.

ESTE TIPO DE ROMPIMIENTO SE DA CUANDO EL ACERO SE ENCUENTRA EN UN MEDIO QUE ATACA RÁPIDAMENTE AL SUSTRATO METÁLICO Y LENTAMENTE A LA CAPA DE ÓXIDO, ES POR ESTO QUE SE PRESENTA LA EXCAVACIÓN EN LA PELÍCULA.

- ROMPIMIENTO MECÁNICO.

LA PELÍCULA PASIVANTE ES DE NATURALEZA FRÁGIL, LA CUAL SE ROMPE FÁCILMENTE AL SOMETER A LA VARILLA A ESFUERZOS DE TENSIÓN, IMPACTO, DOBLADO, RASPADO, ETC.

- ROMPIMIENTO POR PICADO.

ES LA FORMACIÓN DE PEQUEÑOS HOYOS QUE PUEDEN EXTENDERSE A UN ATAQUE GENERAL. EL POTENCIAL DE PICADO,  $E_p$ , ES EL POTENCIAL ELÉCTRICO AL QUE SE LLEVA A CABO ESTE TIPO DE ROMPIMIENTO. LOS POTENCIALES DE PICADO MÁS BAJOS SE ENCUENTRAN EN SOLUCIONES DE CLORURO. EL  $E_p$  SE RELACIONA CON LA CONCENTRACIÓN DEL IÓN AGRESIVO POR MEDIO DE LA ECUACIÓN:

$$E_p = A - B \log C_x$$

DONDE A Y B SON CONSTANTES;  $C_x$  ES LA CONCENTRACIÓN DEL IÓN AGRESIVO. CABE SEÑALAR QUE SI LA PELÍCULA PASIVANTE SE ROMPE POR UN ALTO POTENCIAL, LA SUPERFICIE METÁLICA PUEDE SER REPASIVADA BAJANDO SU POTENCIAL.

- ROMPIMIENTO QUÍMICO.

ESTE TIPO DE ROMPIMIENTO ES QUIZÁS, EL MÁS FRECUENTE, Y SE DEBE PRINCIPALMENTE A:

- LA REDUCCIÓN DEL pH DEL CONCRETO; O BIEN A,
- LA PENETRACIÓN DE ANIONES AGRESIVOS, PRINCIPALMENTE IÓN CLORURO.

### REDUCCIÓN DEL pH.

LA REDUCCIÓN DEL pH DEL CONCRETO SE DA POR LA REACCIÓN DEL  $\text{Ca(OH)}_2$  DEL CONCRETO Y LOS ÓXIDOS DE SODIO, CALCIO Y POTASIO DE LA SOLUCIÓN PORO CON EL  $\text{CO}_2$  DISUELTO EN EL AIRE. EL CONCRETO CONTIENE PUES,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  Y  $\text{K}_2\text{O}$  QUE DAN LUGAR A SOLUCIONES BÁSICAS; POR OTRO LADO, LA SOLUBILIDAD DEL  $\text{Ca(OH)}_2$  ES BAJA EN LA SOLUCIÓN PORO, POR LO QUE CRISTALIZA EN LOS ESPACIOS INTERSTICIALES DEL CONCRETO.

CUANDO EL  $\text{CO}_2$  DEL AIRE ENTRA EN LOS POROS DEL CONCRETO, TIENE LUGAR EL PROCESO DE CARBONATACIÓN; EL  $\text{CO}_2$  REACCIONA CON LOS ÓXIDOS DE SODIO Y POTASIO, ADEMÁS DEL  $\text{Ca(OH)}_2$ , PROVOCANDO CON ELLO LA NEUTRALIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN PORO Y DE LA PASTA DE CEMENTO, POR LO QUE EL pH PUEDE LLEGAR A SER, INCLUSO, MENOR A 9.

GENERALMENTE, LA REACCIÓN DE CARBONATACIÓN SE REPRESENTA POR<sup>(3)</sup>:



## PENETRACIÓN DE ANIONES AGRESIVOS.

EL EFECTO DEL IÓN CLORURO NO SE BASA EN EL DESCENSO DEL pH, SINO EN SU GRAN HABILIDAD PARA ATACAR DE MANERA DIRECTA, AÚN A ALTO VALOR DE pH, LA PELÍCULA PASIVANTE.

LA CONCENTRACIÓN DE IONES CLORURO NECESARIA PARA ROMPER LA PELÍCULA PASIVANTE (CONCENTRACIÓN CRÍTICA) DEPENDE DE DIVERSOS FACTORES, ENTRE LOS QUE SE ENCUENTRAN LOS AMBIENTALES Y LA COMPOSICIÓN DEL CONCRETO.

LOS PARÁMETROS AMBIENTALES MÁS IMPORTANTES SON:

- LA HUMEDAD, Y
- EL CONTENIDO DE OXÍGENO.

ENTRE LOS PARÁMETROS DETERMINADOS POR LA COMPOSICIÓN DEL CONCRETO SE ENCUENTRAN:

- EL pH DE LA SOLUCIÓN PORO, Y
- LA CAPACIDAD DE LA PASTA DE CEMENTO PARA FIJAR CLORUROS.

A SU VEZ, LOS DOS ANTERIORES ESTÁN DETERMINADOS POR:

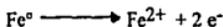
- EL TIPO DE CEMENTO;
- EL CONTENIDO DE PUZOLANA; Y,
- LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO.

ES UN HECHO QUE AUMENTANDO EL CONTENIDO DE  $C_3A$  SE FIJAN MEJOR LOS IONES CLORURO. ANTES DE INICIADA LA CORROSIÓN, UN ELEVADO VALOR DE pH PERMITE UNA GRAN TOLERANCIA HACIA LOS IONES CLORURO.

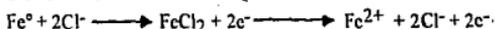
B). LA CORROSIÓN ACTIVA ES EL PROCESO DE LA CORROSIÓN DEL ACERO EN SÍ; ES DECIR, LA DISOLUCIÓN ANÓDICA DEL HIERRO. EN ESTA ETAPA CABEN DOS POSIBILIDADES:

1. CORROSIÓN ACTIVA CON LA PELÍCULA PARCIALMENTE REMOVIDA; Y,
2. CORROSIÓN ACTIVA CON LA PELÍCULA TOTALMENTE REMOVIDA

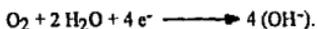
EL PRIMER CASO ES EL MÁS FRECUENTE YA QUE, POR DIVERSAS CAUSAS, EL ROMPIMIENTO DE LA PELÍCULA NO ES UNIFORME. SIN EMBARGO, EN AMBOS CASOS LA DISOLUCIÓN DEL HIERRO SE LLEVA A CABO EN EL ÁNODO; LOS IONES DEL HIERRO ENTRAN A LA SOLUCIÓN COMO IONES  $Fe^{2+}$ , DEBIDO A LA FORMACIÓN DE UNA FEM O FUERZA ELECTROMOTRIZ GENERADA POR LA DIFERENCIA DE POTENCIAL AL HABER CONTACTO ELÉCTRICO ENTRE EL ÁNODO Y EL CÁTODO (VER FIG. 7).



O BIEN, SE PUEDE DISOLVER POR EL ATAQUE DE LOS IONES  $\text{Cl}^-$ :



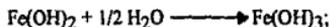
POR CADA ÁTOMO DE HIERRO DILUÍDO QUEDAN 2 ELECTRONES EN EL ACERO, DISMINUYENDO EL POTENCIAL ELÉCTRICO DEL MISMO. SIN EMBARGO, EL POTENCIAL NO PUEDE DISMINUIR INFINITAMENTE, POR LO QUE LOS ELECTRONES PASAN A TRAVÉS DEL ACERO HASTA EL CÁTODO (LA SUPERFICIE CUBIERTA CON LA PELÍCULA PASIVANTE EN LA INTERFASE ACERO/CONCRETO; O HASTA LA PERLITA, EN CASO DE QUE LA PELÍCULA PASIVANTE ESTÉ COMPLETAMENTE REMOVIDA), PARA FORMAR IONES  $\text{OH}^-$ :



LOS IONES  $\text{OH}^-$  TRANSPORTAN LA CARGA ELÉCTRICA A TRAVÉS DEL CONCRETO HASTA EL ÁNODO, DONDE REACCIONAN CON EL  $\text{Fe}^{2+}$  PARA FORMAR HIDRÓXIDO FERROSO:



EL CUAL A SU VEZ, PUEDE SER CONVERTIDO A HIDRÓXIDO FÉRRICO POR EL AGUA Y OXÍGENO DISPONIBLES:



EL CUAL CONSTITUYE LA HERRUMBRE ROJA HIDRATADA ( $\text{FeOOH} + \text{H}_2\text{O}$ ). Y, EN AUSENCIA DE OXÍGENO SE FORMA  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  Ó MAGNETITA.

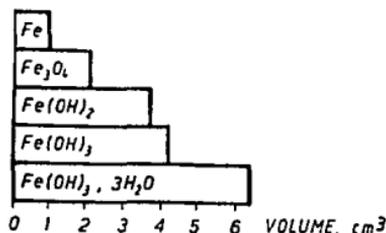
FIG. 7. REPRESENTACIÓN DEL PROCESO DE CORROSIÓN DEL ACERO EMBEBIDO EN EL CONCRETO.



EN LA FIG. 8 SE PUEDE OBSERVAR QUE LOS PRODUCTOS DE LA CORROSIÓN DEL ACERO OCUPAN UN MAYOR VOLUMEN QUE EL HIERRO, POR CONSIGUIENTE, AL FORMARSE TALES PRODUCTOS EL CONCRETO PUEDE NO SOPORTAR LOS ESFUERZOS

DE LA EXPANSIÓN DE LOS MISMOS Y ROMPERSE, PERDIENDO SUS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS ORIGINALES.

FIG. 8. TABLA COMPARATIVA DE VOLUMEN ENTRE EL HIERRO Y LOS PRODUCTOS DE LA CORROSIÓN DEL MISMO\*



POR OTRO LADO, SE TIENE QUE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN ES UN PARÁMETRO QUE DEPENDE DE LA PROPORCIÓN DE LOS PROCESOS ANÓDICO Y CATÓDICO. PUEDE PRESENTARSE UN CONTROL ANÓDICO CUANDO LOS CAMBIOS EN LA DISOLUCIÓN DEL METAL (PROCESO ANÓDICO) DETERMINAN LOS CAMBIOS EN LOS PARÁMETROS ELECTROQUÍMICOS, Y UN CONTROL CATÓDICO CUANDO EXISTE UN FLUJO DE OXÍGENO LIMITADO. SE HAN REPORTADO VALORES PARA LA PERMEABILIDAD DEL OXÍGENO EN CONCRETO<sup>(1)</sup> DE 0.001 A  $30 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ .

## II.2 CARBONATACIÓN DE ESTRUCTURAS.

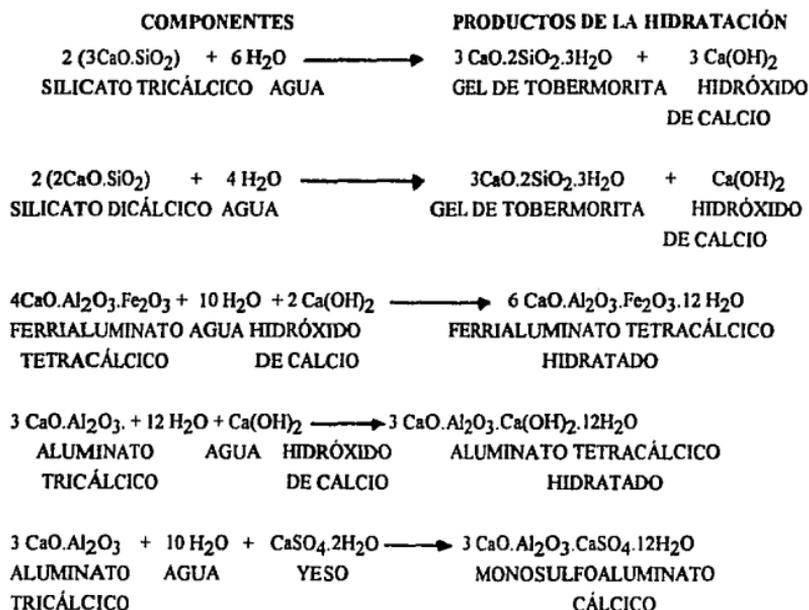
LA CARBONATACIÓN CONSISTE EN LA REACCIÓN DEL CO<sub>2</sub> PRESENTE EN EL MEDIO CON LA FASE LÍQUIDA INTERSTICIAL (SOLUCIÓN PORO) Y CON LOS COMPUESTOS HIDRATADOS DEL CEMENTO EN EQUILIBRIO CON DICHA FASE LÍQUIDA, POR LO QUE DESCENDE EL pH, PROVOCANDO QUE LAS ARMADURAS PASEN DEL ESTADO DE CORROSIÓN PASIVO AL ESTADO ACTIVO.

\* TOMADA DE: SERVICE LIFE OF CONCRETE STRUCTURES WITH REGARD TO CORROSION OF REINFORCEMENT (REF. 10).

## II.2.1 CARBONATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

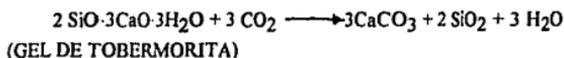
COMO SE VIÓ EN EL PRIMER CAPÍTULO, ENTRE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DE CUALESQUIERA DE LOS CINCO TIPOS DE CEMENTO PORTLAND SE ENCUENTRAN: EL SILICATO TRICÁLCICO (C<sub>3</sub>S), EL SILICATO DICÁLCICO (C<sub>2</sub>S), EL ALUMINATO TRICÁLCICO (C<sub>3</sub>A) Y EL FERRIALUMINATO TETRACÁLCICO (C<sub>4</sub>AF); LOS CUALES, AL MEZCLARSE CON AGUA DAN LOS PRODUCTOS DE HIDRATACIÓN QUE A CONTINUACIÓN SE MUESTRAN:

TABLA II. REACCIONES DEL CEMENTO PORTLAND CON AGUA (2)



BAJO CIERTAS CONDICIONES DE HUMEDAD, EL CO<sub>2</sub> PRESENTE EN LA ATMÓSFERA REACCIONA CON LOS PRODUCTOS DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO (EL AGENTE DE REACCIÓN ES EN REALIDAD EL ÁCIDO CARBÓNICO Y NO EL CO<sub>2</sub>

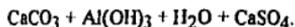
COMO TAL). VENUAT Y ALEXANDRE (Op. Cit. 11) PROPONEN COMO REACCIONES PRINCIPALES EN LA CARBONATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND:



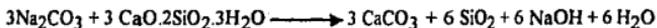
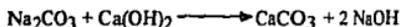
MIENTRAS QUE LOS ALUMINATOS DAN LUGAR A:



Y LOS SULFOALUMINATOS A:



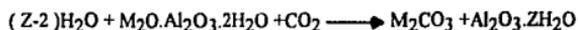
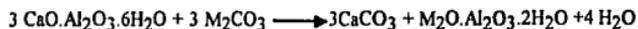
LA CARBONATACIÓN ABARCA POR UNA PARTE, A LOS PRODUCTOS DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO, ESTO ES LA PASTA; MIENTRAS QUE POR OTRA ESTÁ LA CARBONATACIÓN DE LA SOLUCIÓN PORO (COMPUESTA PREDOMINANTEMENTE POR KOH Y NaOH, Y PRÁCTICAMENTE LIBRE DE IONES  $\text{Ca}^{2+}$ ), PROPUESTA POR P. SCHIESSL (Op. Cit. 12) COMO:



LOS COMPUESTOS DE  $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  Y  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  PROVIENEN DEL GEL DE CEMENTO Y EL  $\text{Ca(OH)}_2$  ES LA CAL PRODUCIDA DURANTE EL PROCESO DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO.

## II.2.2 CARBONATACIÓN DEL CEMENTO DE ALTA ALÚMINA

ENTRE LOS PRODUCTOS DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO DE ALTA ALÚMINA ENCONTRAMOS EL  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , EL CUAL EN PRESENCIA DE CARBONATOS ALCALINOS Y  $\text{CO}_2$  ATMOSFÉRICO DA:



CABE SEÑALAR QUE EL CARBONATO ES PRÁCTICAMENTE INSOLUBLE A ALTOS VALORES DE pH, POR LO QUE PRECIPITA.

LA ACCIÓN DEL  $\text{CO}_2$  TIENE LUGAR AÚN A PEQUEÑAS CONCENTRACIONES, TALES COMO LAS ENCONTRADAS EN AMBIENTES RURALES, DONDE LA PRESIÓN PARCIAL DEL  $\text{CO}_2$  ES DEL ORDEN DE  $3 \times 10^{-4}$  ATMÓSFERAS.

LA RAPIDEZ DE LA CARBONATACIÓN ESTÁ FUERTEMENTE CONTROLADA POR LA HUMEDAD DEL CONCRETO Y LA HUMEDAD RELATIVA DEL AMBIENTE. UNA ESTRUCTURA DE CONCRETO EXPUESTA A UNA HUMEDAD RELATIVA DE APROXIMADAMENTE 70% MUESTRA GRANDES PROFUNDIDADES DE CARBONATACIÓN. EN UN AMBIENTE SECO NO SE PRODUCEN POR LO REGULAR, DAÑOS POR CORROSIÓN, AUNQUE LA PASTA QUE RECUBRE AL ACERO ESTÉ CARBONATADO, PUES LA FORMACIÓN DE PRODUCTOS EXPANSIVOS BAJO CONDICIONES DE CARBONATACIÓN SUELE ESTAR ASOCIADA CON UNA H.R.  $\geq 50\%$ , EN CONTRAPARTE, SI LOS POROS DE LA ESTRUCTURA SE ENCUENTRAN COMPLETAMENTE LLENOS DE AGUA DISMINUYE LA ENTRADA DE  $\text{CO}_2$  AL CONCRETO, POR LO QUE SE DETIENE O DIFICULTA EL PROCESO DE CARBONATACIÓN. DE ESTO SE DESPRENDE QUE EL PROCESO DE CARBONATACIÓN EN UNA ESTRUCTURA QUE SE ENCUENTRA EN ALGÚN INTERIOR PROTEGIDO CONTRA LA LLUVIA, EXPUESTA A UNA HUMEDAD RELATIVA  $\geq 50\%$  Y MENOR DEL 70%, SERÁ MAYOR QUE EN UNA QUE NO SE ENCUENTRE PROTEGIDA, PUES AL INUNDARSE CON AGUA LOS POROS DISMINUYE LA PERMEABILIDAD DEL  $\text{CO}_2$  AL CONCRETO.

LA CARBONATACIÓN DE SOLUCIONES SATURADAS DE  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  CONDUCE A UN AUMENTO EN LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DEL ACERO. LOS IONES CARBONATO MODIFICAN LA PELÍCULA PASIVANTE; SEGÚN BOAH, SAMUAHY Y LE BLANC<sup>(13)</sup>, PARECE SER QUE DICHA PELÍCULA ES CONVERTIDA A CARBONATO DE HIERRO.

ASÍ MISMO, EN ALGUNAS ESTRUCTURAS LA CARBONATACIÓN PUEDE NO SER UNIFORME, POR LO QUE ALGUNAS ZONAS PUEDEN PERMANECER PASIVADAS Y OTRAS NO, INDUCIENDO LA FORMACIÓN DE MACROCELDAS, LO QUE DÁ LUGAR A LA REMOCIÓN PARCIAL DE LA PELÍCULA PASIVANTE.

EN LAS FIGURAS 9 Y 10 SE MUESTRAN LAS FASES PRESENTES EN EL SISTEMA  $\text{Fe}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ .

FIG. 9. DIAGRAMA pH POTENCIAL PARA EL SISTEMA Fe-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O A 25°C  
CONSIDERANDO LA FORMACIÓN DE ÓXIDOS\*.

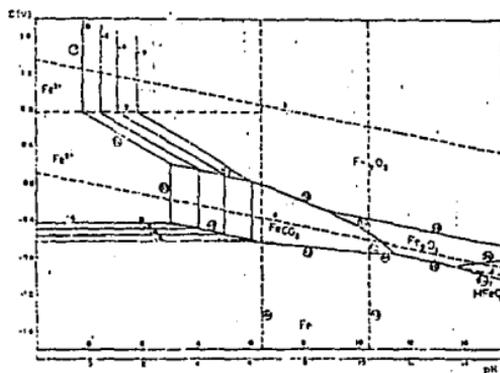
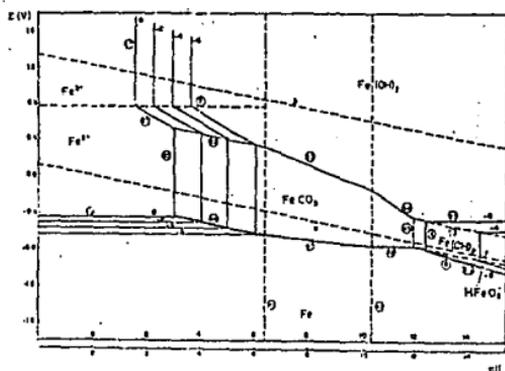


FIG. 10. DIAGRAMA pH-POTENCIAL PARA EL SISTEMA Fe-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O A 25°C  
CONSIDERANDO LA FORMACIÓN DE HIDRÓXIDOS\*.



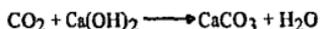
\* TOMADAS DE: TECNOLOGÍA DEL CONCRETO (REF. 14).

### II. 3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

DE UNA REVISIÓN DE VARIOS REPORTES DE DIFERENTES PAÍSES SE DESPRENDE LO SIGUIENTE:

LA CARBONATACIÓN ES UN TIPO ESPECIAL DE REACCIÓN ÁCIDA DEBIDO A LA PENETRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO GAS EN LOS POROS VACÍOS DEL CONCRETO. EL DIÓXIDO DE CARBONO SE DISUELVE PARCIALMENTE EN LA SOLUCIÓN PORO Y REACCIONA EN LA INTERFASE AGUA/AIRE CON LA CAL LIBRE Y POSTERIORMENTE CON EL SILICATO DE CALCIO HIDRATADO.

LA REACCIÓN SE LLEVA A CABO DE ACUERDO A:



DE ACUERDO CON J. M. J. M. BIEN (REF. 9), EN ESTA REACCIÓN, UNA MOL Ó 34 ml. DE HIDRÓXIDO DE CALCIO ES CONVERTIDA A 37 ml. DE CARBONATO DE CALCIO Y 18 ml. DE AGUA, LO QUE DA UN INCREMENTO EN VOLUMEN DE APROXIMADAMENTE 60%. LA MAYOR PARTE DE ESTE INCREMENTO ES AGUA, MIENTRAS QUE EL CONTENIDO TOTAL DEL SÓLIDO ES 9% EN VOLUMEN. EL AGUA FORMADA SE EVAPORA, MIENTRAS QUE EL INCREMENTO EN VOLUMEN DEL SÓLIDO PROVOCA QUE LA POROSIDAD DEL MISMO DISMINUYA, Y EN EL CASO DEL CEMENTO PORTLAND, TAMBIÉN DISMINUYE LA PERMEABILIDAD.

DEBIDO A LA BAJA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO, EL CONSUMO DE DIÓXIDO DE CARBONO Y LA FORMACIÓN DE AGUA DURANTE LA REACCIÓN, GENERALMENTE LA DEGRADACIÓN DEL CONCRETO OCURRE LENTAMENTE.

ASÍ PUES, COMO SE MENCIONÓ ARRIBA, LA PENETRACIÓN DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN SE LLEVA A CABO EN LA SUPERFICIE AGUA/AIRE Y PROCEDE SIMULTÁNEAMENTE CON EL SECADO DEL CONCRETO. ESTE FRENTE DE CARBONATACIÓN SE MUEVE EN LÍNEA CON EL FRENTE DE HUMEDAD. AMBOS SIGUEN LA SEGUNDA LEY DE DIFUSIÓN DE FICK. ES POR ESTO QUE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN ES, EN CIERTO MOMENTO, PROPORCIONAL A LA RAÍZ CUADRADA DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN. PARA EL CONCRETO QUE ES EXPUESTO A CONDICIONES AMBIENTALES EXTERIORES, LOS PERIODOS DE HUMIDIFICACIÓN O DE MOJADO ESTARÁN PROCEDIDOS POR PERIODOS EN LOS CUALES EL CONCRETO ABSORBERÁ O ADSORBERÁ AGUA. CUANDO LOS POROS ESTÁN LLENOS DE AGUA O SOLUCIÓN PORO, LA CARBONATACIÓN SE DETENDRÁ HASTA QUE EL CONCRETO HAYA PERDIDO LA CANTIDAD DE AGUA SUFICIENTE TAL QUE LE PERMITA ALCANZAR EL FRENTE DE CARBONATACIÓN. EL FRENTE DE CARBONATACIÓN NO PUEDE SER EXACTAMENTE PREDICHO POR LA FÓRMULA DE LA RAÍZ CUADRADA. AL FINAL, EL

FRENTE LLEGARÁ A UN PARO COMPLETO. EL FRENTE DE CARBONATACIÓN COINCIDIRÁ CON LA MAYOR PROFUNDIDAD DE SECADO. SI LOS EFECTOS DEL MOVIMIENTO DE HUMEDAD SON TOMADOS EN CONSIDERACIÓN, LA POSICIÓN DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN PODRÁ SER CALCULADO USANDO LA FÓRMULA:

$$X = A [t_1]^{1/2} + A [t_2 - (X_{C1}/B)^2]^{1/2} + A [t_3 - (X_{C2}/B)^2]^{1/2} + A [t_4 - (X_{C3}/B)^2]^{1/2} + \dots + A [t_n - (X_{Cn-1}/B)^2]^{1/2}$$

DONDE:

$(X_C/B)$  = TIEMPO REQUERIDO POR LA ORILLA DE HUMEDAD PARA ALCANZAR EL FRENTE DE CARBONATACIÓN DESPUÉS DEL HUMEDECIMIENTO.

$t$  = TIEMPO DEL PERIODO DE SECADO.

LA SITUACIÓN EXTREMA PARA EL CONCRETO OCURRIRÁ CUANDO LOS POROS DE ÉSTE SE ENCUENTREN COMPLETAMENTE SATURADOS. EN ESTE CASO NO HABRÁ CARBONATACIÓN. EJEMPLOS DE ESTA CLASE DE EXPOSICIÓN SON LAS ESTRUCTURAS BAJO EL AGUA Y ESTRUCTURAS POR DEBAJO DEL NIVEL DEL AGUA RESIDUAL EN LOS SISTEMAS DE DRENAJE.

DE ACUERDO CON ERKKI VESIKARI<sup>(10)</sup> EL TIEMPO DE INICIACIÓN DE LA CORROSIÓN,  $t_c$ , DEL ACERO POR LA CARBONATACIÓN DEL CONCRETO ESTÁ DADA POR:

$$t_c [\text{años}] = (L/K)^2.$$

DONDE:

L ES EL ESPESOR DE LA CAPA DE CONCRETO (mm.) QUE CUBRE AL REFUERZO, K ES EL COEFICIENTE DE CARBONATACIÓN.

PARA ESTRUCTURAS PROTEGIDAS CONTRA LA LLUVIA:

$$K = 26 (w/c - 0.3)^2 + 1.6$$

Y PARA ESTRUCTURAS EXPUESTAS A EXTERIORES:

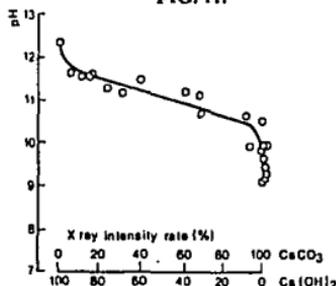
$$K = 10.4 (w/c - 0.3)^2 + 0.64$$

SAEKI (Op. Cit. 15) OBTUVO RESULTADOS QUE INDICAN QUE EN AUSENCIA DE IONES CLORURO, EL PROCESO DE CORROSIÓN EN UN CONCRETO YA CARBONATADO PUEDE INICIARSE A UN pH DE APROXIMADAMENTE 11.4, AUNQUE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN SEA PEQUEÑA.

LA FIGURA 11 ILUSTRRA LOS DATOS OBTENIDOS POR OHGISHI (Op. Cit. 15), EN DONDE MUESTRAS EL pH DE LAS MEZCLAS DE  $\text{Ca(OH)}_2$  Y  $\text{CaCO}_3$ . EN ESTA SE PUEDE APRECIAR QUE MIENTRAS MAYOR SEA LA PROPORCIÓN DE CARBONATO DE CALCIO

EN LA MEZCLA MÁS CERCANO ES EL pH A 9, POR OTRO LADO, MIENTRAS MENOR SEA EL CONTENIDO DE CARBONATO EN LA MEZCLA, Y MAYOR EL DE  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , MÁS ELEVADO ES EL VALOR DE pH. DE ESTO SE PUEDE INFERIR QUE ENTRE MÁS CERCA SE ENCUENTRE EL VALOR DE pH DE UNA ESTRUCTURA A 9 HAY UN GRAN CONTENIDO DE CARBONATO EN LA MISMA.

FIG. 11.



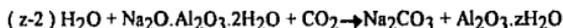
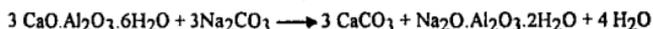
LA CARBONATACIÓN VA ACOMPAÑADA DE UNA CONTRACCIÓN Y DE UN AUMENTO DE PESO EN EL CONCRETO. LA CONTRACCIÓN POR CARBONATACIÓN ES CAUSADA, PROBABLEMENTE POR LA DISOLUCIÓN DE LOS CRISTALES DEL  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  BAJO UN ESFUERZO DE COMPRESIÓN, ADEMÁS DE LA PRECIPITACIÓN DE  $\text{CaCO}_3$  EN LOS ESPACIOS LIBRES DE ESFUERZOS; POR CONSIGUIENTE, LA CAPACIDAD DE COMPRESIÓN DE LA PASTA DE CEMENTO AUMENTA MOMENTÁNEA Y TEMPORALMENTE. ESTA CAPACIDAD DE COMPRESIÓN PUEDE SER SOBREPASADA POR LOS PRODUCTOS DE LA CORROSIÓN DEL ACERO, PUES DICHS PRODUCTOS OCUPAN UN VOLÚMEN MUCHO MAYOR QUE EL DEL ACERO.

EN EXPERIMENTOS LLEVADOS A CABO POR R.D. BLENKINSOP; B.R.CURREL; H.G. MIDGLEY Y J.R. PARSONAGE ( REFERENCIAS 16 Y 17 ), EN LAS QUE UTILIZARON CILINDROS DE CEMENTO DE ALTA ALÚMINA ( $\text{C}_3\text{A}$ ), HIDRATADO A  $50^\circ\text{C}$ , CON UNA COMPOSICIÓN:

ARENA( $\text{SiO}_2$ )	20 %
$\text{C}_3\text{AH}_6$	11.3 %
$\text{AH}_3$	18.9 %
$\text{CAH}_{10}$	2.0 %
$\text{CaCO}_3$	3.6 %
CA	5.0 %
SOLUCIÓN SÓLIDA DE FERRITA	22.0 %
WUSTITA	5.4 %
RESIDUOS	12.0 %

SE OBTIENEN DATOS INTERESANTES ACERCA DE LA CARBONATACIÓN DEL MISMO, ENTRE LOS QUE DESTACAN:

1. AL UTILIZAR CILINDROS TRATADOS CON SOLUCIONES DE CARBONATO DE SODIO A DIFERENTES CONCENTRACIONES ENCONTRARON QUE LA CONCENTRACIÓN QUE PRODUJO EL MAYOR EFECTO DE CARBONATACIÓN, DETERMINANDO EL % EN PESO DE  $\text{CaCO}_3$  PRESENTE EN EL CILINDRO A DIFERENTES TIEMPOS, FUE LA SOLUCIÓN DE CARBONATO DE SODIO 0.01M. ADEMÁS, A ESTA MISMA CONCENTRACIÓN SE OBSERVARON LAS MAYORES VELOCIDADES DE CARBONATACIÓN, CONSIDERANDO LA VELOCIDAD DE DESCOMPOSICIÓN DEL  $\text{C}_3\text{AH}_6$  Y LA VELOCIDAD DE FORMACIÓN DEL  $\text{CaCO}_3$  EN % EN PESO/HORA. LA AUSENCIA PARCIAL DEL  $\text{CO}_2$  ATMOSFÉRICO BAJO EL CUAL SE EFECTUARON LOS EXPERIMENTOS PREVINO LA DESCOMPOSICIÓN DE LOS COMPUESTOS HIDRATADOS ALCALINOS DE LA ALÚMINA A CARBONATOS ALCALINOS Y COMPUESTOS HIDRATADOS DE ALUMINIO. EL  $\text{CO}_2$  PRESENTE REGENERA EL CARBONATO DE SODIO INICIAL, PERMITIENDO LA FORMACIÓN DE HIDRATOS DE ALÚMINA, DE ACUERDO CON LAS REACCIONES:



LA VELOCIDAD DE LA REACCIÓN DE CARBONATACIÓN EN LAS ETAPAS INICIALES ESTÁ DETERMINADA POR LA RÁPIDA FORMACIÓN DEL CARBONATO DE CALCIO Y LA LENTA PRECIPITACIÓN DE LOS HIDRATOS DE ALÚMINA. BAJO ESTE MISMO ESQUEMA, EL PROCESO DE CARBONATACIÓN TOTAL DE LOS CILINDROS OCURRE EN 100 HORAS, OBSERVÁNDOSE LA MAYOR VELOCIDAD DURANTE LA PRIMERA HORA DEL EXPERIMENTO. LA DEPOSICIÓN DEL CARBONATO DE CALCIO REDUCE LA VELOCIDAD DE CARBONATACIÓN.

2. EN LA SIGUIENTE PARTE UTILIZARON CILINDROS DE CEMENTO DE ALTA ALÚMINA. PERO AHORA FUERON COLOCADOS EN AGUA DEIONIZADA PARA QUE REACCIONARAN EN PRESENCIA DE  $\text{CO}_2$  ATMOSFÉRICO, OBSERVARON UNA RÁPIDA CARBONATACIÓN EQUIVALENTE A LA EFECTUADA POR UNA SOLUCIÓN 0.1 - 0.005 M DE CARBONATO DE SODIO. AL USAR UNA ALTA RELACIÓN AGUA/CEMENTO A/C=0.6 OBSERVARON UNA ALTA VELOCIDAD DE PENETRACIÓN DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN SIMILAR A LA OBTENIDA CON CARBONATO DE SODIO 0.05M. AL USAR UNA BAJA RELACIÓN A/C=0.2, LA CAÍDA EN LA VELOCIDAD DE PENETRACIÓN DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN SE DEBIÓ A QUE LAS FASES HIDRATADAS DEL CEMENTO, JUNTO CON LAS OTRAS FASES FORMAN UNA ESTRUCTURA MÁS ESTABLE, QUE PRESENTAN UNA BARRERA DE MAYOR RESISTENCIA A LA CARBONATACIÓN.

EN LA CARBONATACIÓN DEL CEMENTO DE ALTA ALÚMINA SÓLO LA MAYOR PARTE DEL  $\text{CaCO}_3$  PRODUCIDO ES DERIVADO DE LA DESCOMPOSICIÓN DEL  $\text{C}_3\text{AH}_6$ , PUESTO QUE EL  $\text{CaCO}_3$  DETECTADO ES SIEMPRE MAYOR QUE LA CANTIDAD ESTEQUIOMÉTRICA DEL  $\text{C}_3\text{AH}_6$  DESCOMPUESTO. EL EXCESO DE  $\text{CaCO}_3$  ES PRODUCIDO POR LA DESCOMPOSICIÓN DE OTROS ALUMINATOS DE CALCIO PRESENTES EN EL CEMENTO ANHIDRO.

POR OTRA PARTE, EXPERIMENTOS DE M. PÉREZ MÉNDEZ Y F. TRIVIÑO VÁZQUEZ TAMBIÉN SOBRE CEMENTO DE ALTA ALÚMINA (REFERENCIAS 18 Y 19 ) MUESTRAN QUE LA HIDRATACIÓN DE ÉSTE, A TEMPERATURAS POR ARRIBA DE 20 °C CONDUCE A LA FORMACIÓN DEL HIDRATO HEXAGONAL METAESTABLE,  $\text{CAH}_{10}$ . A TEMPERATURAS MAYORES DE 30 °C, ESTO SE CONVIERTE AL HIDRATO CÚBICO  $\text{C}_3\text{AH}_6$ , EL CUAL ES ESTABLE EN EL SISTEMA  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ . LA CARBONATACIÓN DEL  $\text{C}_3\text{AH}_6$  CON  $\text{CO}_2$  ENTRE 20 °C Y 90 °C CAUSA UN INCREMENTO EN EL ESFUERZO, DEBIDO A LA PRESENCIA DE FASES CARBONATADAS TERMODINÁMICAMENTE ESTABLES.

A CONTINUACIÓN SE REPRODUCE UNA TABLA (TABLA III) EN LA CUAL SE PUEDE APRECIAR QUE DEPENDIENDO DE LAS CONDICIONES DE HIDRATACIÓN, ASÍ COMO DE LA TEMPERATURA A LA QUE SE EFECTÚA LA CARBONATACIÓN ES EL TIPO DE CARBONATO DE CALCIO OBTENIDO, EL CUAL PUEDE SER: CALCITA, VATERITA O ARAGONITA.

**TABLA III PRODUCTOS DE LA CARBONATACIÓN DE CEMENTO MORTERO DE ALTA ALÚMINA\*.**

**ESPECÍMENES CON CaCO<sub>3</sub>.**

**HIDRATACIÓN**

T (°C)	EDAD (DIAS)	COMPUESTOS FORMADOS
20	28	CAH <sub>10</sub> +CaCO <sub>3</sub> (CALCITA) + CARBOALUMINATO
60	28	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub> + CaCO <sub>3</sub> (ARAGONITA) + Al(OH) <sub>3</sub>

**ESPECÍMENES CON CaCO<sub>3</sub>.**

**CURADO**

HIDRATACIÓN		CO <sub>2</sub>		COMPUESTOS FORMADOS
EDAD		EDAD		
T (°C)	(DIAS)	T (°C)	(DIAS)	
20	28	20	3	CaCO <sub>3</sub> (CALCITA)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al(OH) <sub>3</sub> (BAYERITA)
		60	3	CaCO <sub>3</sub> (VATERITA) + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al(OH) <sub>3</sub> (BAYERITA)
60	28	60	3	CaCO <sub>3</sub> (ARAGONITA) + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al(OH) <sub>3</sub> (BAYERITA)

EN LA TABLA IV SE PUEDE APRECIAR EL INCREMENTO EN EL ESFUERZO DE LOS ESPECÍMENES SOMETIDOS A TRATAMIENTO CON CO<sub>2</sub>, COMPARADO CON LOS QUE SÓLO FUERON HIDRATADOS .

\* TOMADA DE: STABILIZED PHASES IN HIGH ALUMINA CEMENT MORTARS, PART II (REF. 19)

TABLA IV. SUMARIO DE ESFUERZOS DE FLEXIÓN Y DE COMPRESIÓN DE CEMENTOS MORTEROS DE ALTA ALÚMINA<sup>(18)</sup>.

MUESTRAS SIN CaCO<sub>3</sub>.

SÓLO HIDRATACIÓN

T °C	EDAD	R <sub>f</sub> MPa	R <sub>c</sub> MPa
20	28 DIAS	14	85
40	28 DIAS	11	58
60	28 DIAS	14	70
80	28 DIAS	17	80

HIDRATACIÓN Y TRATAMIENTO CON CO<sub>2</sub>

HIDRATACIÓN	CO <sub>2</sub>	R <sub>f</sub> MPa	R <sub>c</sub> MPa
40°C, 28 DIAS	20°C, 3 DIAS	13	76
	40°C, 3 DIAS	13	77
60°C, 28 DIAS	20°C, 3 DIAS	16	77
	60°C, 3 DIAS	15	93
80°C, 28 DIAS	20°C, 3 DIAS	15	86
	80°C, 3 DIAS	17	114
	60°C, 18 HORAS	14.6	76
60°C, 6 HORAS	60°C, 3 DIAS	16	80
	60°C, 5 DIAS	15	81
	60°C, 24 HORAS	14	74
60°C, 24 HORAS	60°C, 3 DIAS	15	81.5
	60°C, 5 DIAS	15.2	82
	80°C, 21 HORAS	11.4	69
80°C, 3 HORAS	80°C, 3 DIAS	13.7	91.3
	80°C, 5 DIAS	13	86
	80°C, 24 HORAS	12.8	72.5
80°C, 24 HORAS	80°C, 3 DIAS	13.2	88
	80°C, 5 DIAS	17.8	93.2

CABE DESTACAR QUE LOS ALTOS VALORES DE ESFUERZOS PARA LAS ESPECIES HIDRATADAS A 20°C SE DEBEN A LA PRESENCIA DE  $CAH_{10}$  COMO LA PRINCIPAL FASE HIDRATADA, LA CUAL PROPORCIONA ALTOS VALORES DE ESFUERZO A LOS CEMENTOS DE ALTA ALÚMINA. A TEMPERATURAS MAYORES DE 30°C SE ENCUENTRA PRESENTE EN SU MAYORÍA EL  $C_3AH_6$ .

RESULTA INTERESANTE, EL HECHO DE QUE LOS ESFUERZOS VARIÉN LINEALMENTE CON LA TEMPERATURA, COMO LO MUESTRAN LAS SIGUIENTES FIGURAS(18):

FIG. 12. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE HIDRATACIÓN SOBRE LOS ESFUERZOS DE FLEXIÓN Y COMPRESIÓN CON UN LÍMITE DE CONFIABILIDAD DEL 95% PARA CEMENTO DE ALTA ALÚMINA.

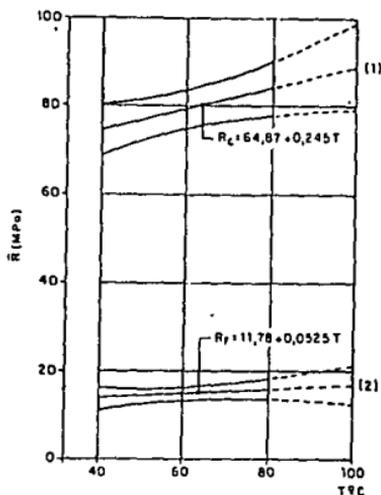
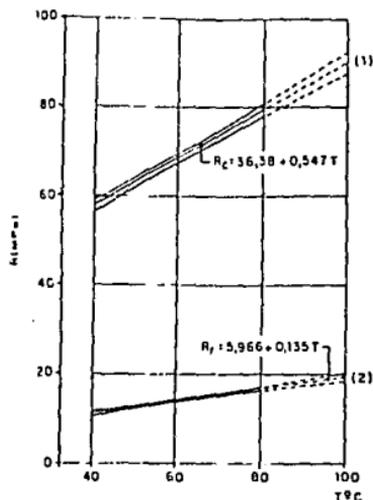


FIG 13. EFECTO DEL TRATAMIENTO DE  $CO_2$  A 20°C SOBRE LOS ESFUERZOS DE COMPRESIÓN Y DE FLEXIÓN PARA CEMENTO DE ALTA ALÚMINA HIDRATADO POR 28 DÍAS A 40, 60 Y 80 °C.

CUANDO LAS MUESTRAS SON CARBONATADAS A 60°C POR TRES DÍAS, SE OBSERVA UNA PROFUNDA CARBONATACIÓN DE LA FASE CÚBICA HIDRATADA. LA CANTIDAD DE  $C_3AH_6$  DISMINUYE CONSIDERABLEMENTE AUNQUE NO DESAPARECE; ADEMÁS NO SE DETECTAN CARBOALUMINATOS. ESTO CONFIRMA QUE ESTOS COMPUESTOS SON INTERMEDIARIOS EN EL PROCESO DE CARBONATACIÓN Y DESAPARECEN CONFORME AVANZA LA REACCIÓN.

NO SE CONSIDERA AL PROCESO DE CARBONATACIÓN COMO UNA CAUSA SUFICIENTE PARA QUE SE PRODUZCA LA CORROSIÓN; PUES DE NO PRESENTARSE LOS FACTORES ACELERANTES, EL ACERO EMBEBIDO NO PRESENTA DAÑOS POR CORROSIÓN<sup>(11)</sup>.

C. ALONSO [ et.al.] (REFERENCIA 20 ) OBSERVARON UN INCREMENTO EN LA RESISTENCIA ELÉCTRICA EN MUESTRAS DE CONCRETO ELABORADAS CON DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO. EL CUAL, DE MANERA GENERAL, ES ATRIBUIDO A LA PRECIPITACIÓN DEL CARBONATO DE CALCIO, LA SÍLICA, LA ALÚMINA Y LOS ÓXIDOS FÉRRICOS; ESTO, ADEMÁS, TRAE COMO CONSECUENCIA QUE DISMINUYA LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO, ASÍ COMO UNA DESAPARICIÓN DE DIFERENTES IONES DE LA SOLUCIÓN PORO.

LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN EL CONCRETO SE DEBE PRINCIPALMENTE AL TRANSPORTE IÓNICO A TRAVÉS DE LA RED DE POROS POR UN ELECTROLITO ACUOSO. POR ESO, LA HUMEDAD, QUE DISUELVE LAS SUSTANCIAS IÓNICAS DEL CONCRETO ES EL PARÁMETRO BÁSICO EN LA CONDUCCIÓN ELÉCTRICA. EL NIVEL DE SATURACIÓN DE AGUA DEL PORO DEPENDE DE LA PERMEABILIDAD TOTAL (CANTIDAD TOTAL DE ESPACIOS VACÍOS QUE PUEDEN SER OCUPADOS POR EL AGUA) Y DE LA H.R. DEL MEDIO AMBIENTE. DE HECHO, EXISTEN CAMBIOS EN EL NIVEL DE SATURACIÓN DEL PORO, PUES DURANTE LOS PROCESOS NATURALES DE HUMIDIFICACIÓN Y SECADO SE ABSORBE O SE EVAPORA EL AGUA, SEGÚN SEA EL CASO. PUEDE VERSE QUE AL DISMINUIR EL CONTENIDO DE HUMEDAD AUMENTA LA RESISTIVIDAD Y DISMINUYE EL POTENCIAL DE MEDIA CELDA.

LA RESISTIVIDAD Y EL POTENCIAL DE MEDIA CELDA SON MUY SENSIBLES A LOS CAMBIOS EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD.

EN LA PRÁCTICA SE OBSERVA QUE:

1. LA RESISTIVIDAD DEL CONCRETO AUMENTA AL PASAR EL TIEMPO.
2. LA RESISTIVIDAD DEL CONCRETO SATURADO AUMENTA CON EL DESCENSO DE LA RELACION AGUA/CEMENTO.
3. LA RESISTIVIDAD DEL CONCRETO PARCIALMENTE SATURADO AUMENTA CON EL AUMENTO DE LA RELACION AGUA/CEMENTO.

4. LA RESISTIVIDAD DEL CONCRETO AUMENTA CON LA DISMINUCIÓN DE LA HUMEDAD.

5. LA RESISTIVIDAD DEL CONCRETO AUMENTA CON LA DISMINUCION DE LA TEMPERATURA.

6. EL POTENCIAL DE MEDIA CELDA AUMENTA CON LA DISMINUCION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD.

SEGÚN J.J. CARPIO [ et. al.] (REF. 21), SE HA DEMOSTRADO QUE CUANDO LA RESISTIVIDAD ES MAYOR A 12 KΩ·CM LA CORROSION ES POCO PROBABLE; ENTRE 5 Y 12 KΩ·CM ES PROBABLE, MIENTRAS QUE A VALORES MENORES DE 5 KΩ·CM LA CORROSION ES MUY PROBABLE, O MÁS BIEN SEGURA.

**TABLA V. PROBABILIDAD DE CORROSIÓN EN FUNCIÓN DEL VALOR DE LA RESISTIVIDAD DEL CONCRETO.**

RESISTIVIDAD KΩ·cm	PROBABILIDAD
> 12	POCO PROBABLE
5 - 12	PROBABLE
< 5	MUY PROBABLE

LA LEY DE HINRICHSON-RASH NOS MUESTRA LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE LA RESISTIVIDAD<sup>(21)</sup>:

$$\rho_1 = \rho_2 e^{a(1/T_1 - 1/T_2)}$$

DONDE:

$\rho_1$  Y  $\rho_2$  SON LAS RESISTIVIDADES A LAS TEMPERATURAS ABSOLUTAS  $T_1$  Y  $T_2$ ;

$a$  ES UNA CONSTANTE ( 2889 PARA EL INTERVALO 6 - 26 °C).

CON RESPECTO A LOS POTENCIALES, LA NORMA ASTM-C-876-87-10 (REF. 22), SEÑALA QUE LA PROBABILIDAD PARA QUE OCURRA LA CORROSIÓN A POTENCIALES POR ARRIBA DE -200 mV/CSE ES MUY BAJA (MENOR A 5%); MIENTRAS QUE POTENCIALES POR DEBAJO DE -350 mV/CSE TIENEN UNA PROBABILIDAD MUY ALTA (MAYOR DE 95%). SIN EMBARGO, LOS POTENCIALES COMPRENDIDOS ENTRE -200 Y -350 mV/CSE TIENEN UNA PROBABILIDAD INCIERTA, POR LO QUE PARA DETERMINAR, DE MANERA MÁS EFECTIVA, EL ESTADO DE LA VARILLA DE REFUERZO ES NECESARIO EMPLEAR OTRO MÉTODO.

DE MANERA MÁS EFECTIVA, EL ESTADO DE LA VARILLA DE REFUERZO ES NECESARIO EMPLEAR OTRO MÉTODO.

**TABLA VI. RIESGO DE CORROSIÓN DEL CONCRETO EN FUNCIÓN DEL POTENCIAL DE MEDIA CELDA DE COBRE-SULFATO DE COBRE.**

POTENCIAL mV	RIESGO DE CORROSIÓN %
> -200	< 5
< -350	> 95

USANDO CEMENTO PORTLAND ORDINARIO COMO REFERENCIA, EL USO DE OTROS TIPOS DE CEMENTO PUEDE CONDUCIR A:

**TIPO DE CEMENTO**

**EFECTO**

**CEMENTO S-R.** BAJA TOLERANCIA A LOS IONES  $Cl^-$  DEBIDO AL BAJO CONTENIDO DE  $C_3A$  (EFECTO FUERTE). AUMENTA EL INGRESO DE IONES  $Cl^-$ .

**CEMENTO DE ESCORIA.** BAJA TOLERANCIA A LOS IONES CLORURO POR CONTENER MENOS CLINKER, POR LO MISMO, BAJO pH (EFECTO MODERADO). DISMINUYE EL INGRESO DE IONES CLORURO.

**CEMENTO FLY-ASH.** BAJA TOLERANCIA A LOS IONES CLORURO POR CONTENER MENOS CLINKER Y TENER BAJO pH.

**ADICIÓN DE SÍLICA.** BAJA TOLERANCIA A LOS CLORUROS DEBIDO A LA REACCIÓN DE LA PUZOLANA; ESTO CAUSA UNA DISMINUCIÓN EN EL VALOR DEL pH. REDUCE SIGNIFICATIVAMENTE LA VELOCIDAD DE INGRESO DE LOS IONES CLORURO.

GAUTEFALL, O. (REF. 24) SEÑALA QUE TAN PRONTO SEA REMOVIDA LA PELÍCULA PASIVANTE, EL ACERO QUEDA SUJETO A LA CORROSIÓN ACTIVA, Y

PROPONE RIESGOS DE CORROSIÓN DE ACUERDO AL CONTENIDO DE CLORURO, LOS CUALES SE MUESTRAN EN LA SIGUIENTE TABLA:

**TABLA VII. RIESGOS DE CORROSIÓN EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE CLORURO**

CONCENTRACIÓN DE Cl <sup>-</sup> (% EN PESO DE CEMENTO)	RIESGO DE CORROSIÓN
< 0.4	MÍNIMO
0.4 - 1.0	POSIBLE
1.0 - 2.0	PROBABLE
> 2.0	SEGURO

POR OTRO LADO, J.J. CARPIO [et. al.] (REF. 21) PROPONEN UNA RELACIÓN DE  $Cl^-/OH^- \leq 0.6$ , Y SEÑALAN QUE, DE HABER IONES CLORURO PRESENTES EN LA ZONA DE REFUERZO, LA PELÍCULA ES DESTRUIDA, AÚN A ALTOS VALORES DE pH; EN TANTO QUE LA NORMA BRITÁNICA SUPONE QUE DE ALCANZAR EL CONCRETO UNA CONCENTRACIÓN DE 0.35% DE IONES CLORO EN PESO DE CEMENTO AUMENTA EL RIESGO DE CORROSIÓN; EN CAMBIO, HHOPE (REF. 22) SEÑALA QUE A UNA CONCENTRACIÓN DE IONES CLORURO DE 0.15% EN MASA DE CEMENTO, PUEDE LLEVARSE A CABO EL ROMPIMIENTO DE LA PELÍCULA PASIVANTE.

CÓMO SE PUEDE APRECIAR, NO HAY UNA UNIFORMIDAD DE CRITERIOS EN CUANTO AL CONTENIDO MÁXIMO DE IONES CLORURO EN UNA ESTRUCTURA. POR LO QUE ES CONVENIENTE CONSIDERAR COMO VALOR CRÍTICO AL MENOR, ESTO ES, 15% EN MASA DE IONES CLORURO.

# **CAPÍTULO III. INSPECCIÓN Y ANÁLISIS DEL ESTADO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO.**

## **III.1 MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL ESTADO DEL CONCRETO.**

EXISTEN VARIAS MANERAS PARA DETERMINAR EL GRADO DE CORROSIÓN QUE PRESENTA UNA ESTRUCTURA SIN TENER QUE EFECTUAR PRUEBAS DESTRUCTIVAS. ENTRE ALGUNOS MÉTODOS SE ENCUENTRAN:

- LA DETERMINACIÓN DE LOS POTENCIALES DE MEDIA CELDA DE LA ESTRUCTURA;
- LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CONCRETO; Y,
- LA DETERMINACIÓN DEL pH DEL CONCRETO.

CABE SEÑALAR QUE AL APLICAR LOS PRIMEROS DOS MÉTODOS, O LOS TRES DE MANERA CONJUNTA, SE OBTIENE UN ANÁLISIS BASTANTE CONFIABLE DEL ESTADO QUE GUARDA UNA ESTRUCTURA.

### **III.1.1 MÉTODO ESTÁNDAR DE PRUEBA PARA LA MEDICIÓN DE LOS POTENCIALES DE MEDIA CELDA DEL ACERO DE REFUERZO EN EL CONCRETO.**

LA DETECCIÓN DE LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO HACIENDO USO DEL MÉTODO DEL POTENCIAL DE MEDIA CELDA ESTÁ MUY EXTENDIDO EN LA INGENIERÍA CIVIL. ESTE MÉTODO PERMITE LA LOCALIZACIÓN DE ÁREAS DONDE ESTÁ PRESENTE LA CORROSIÓN ACTIVA, MAS NO DETERMINA LA MAGNITUD DEL PROBLEMA. LAS MEDICIONES *in situ* DE LA RESISTIVIDAD DEL CONCRETO ADYACENTE AL REFUERZO PUEDE SER USADO JUNTO CON EL MÉTODO DEL POTENCIAL DE MEDIA CELDA PARA EVALUAR LA PROBABLE VELOCIDAD DE CORROSIÓN.

EL MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS POTENCIALES DE MEDIA CELDA AQUÍ PRESENTADO ESTÁ BASADO EN LA NORMA ASTM-C-876-87-10 (REF. 23).

#### **1. ALCANCE:**

1. ESTE MÉTODO ABARCA EL ESTIMADO DEL POTENCIAL DE MEDIA CELDA DEL ACERO DE REFUERZO EN EL CONCRETO, CON EL PROPÓSITO DE DETERMINAR LA ACTIVIDAD DE CORROSIÓN DEL ACERO.

2. ESTE MÉTODO ESTÁ LIMITADO POR LA EXISTENCIA DE UN CIRCUITO ELÉCTRICO. UNA SUPERFICIE DE CONCRETO QUE SE HA SECADO COMPLETAMENTE, DE TAL MANERA QUE SE COMPORTE COMO UN MATERIAL DIELECTRICO, O QUE HAYA

SIDO CUBIERTO POR UNA PELÍCULA DIELECTRICA NO SE COMPORTARÁ COMO UN CIRCUITO ELÉCTRICO.

## **2. USOS:**

1. ESTE MÉTODO PUEDE SER USADO PARA INDICAR LA ACTIVIDAD DE CORROSIÓN ASOCIADA CON EL ACERO EMBEBIDO EN CONCRETO EN MUESTRAS DE CAMPO O DE LABORATORIO.

2. ESTE MÉTODO ES APLICABLE A CUALQUIER MUESTRA, SIN IMPORTAR EL TAMAÑO O LA PROFUNDIDAD DE LA CUBIERTA DE CONCRETO SOBRE EL ACERO DE REFUERZO.

3. ESTE MÉTODO PUEDE SER USADO EN CUALQUIER MOMENTO DURANTE LA VIDA DEL CONCRETO.

4. LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR ESTE MÉTODO NO DEBERÁN SER CONSIDERADOS COMO UN MEDIO PARA ESTIMAR LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES DEL ACERO O DEL CONCRETO.

## **3. EQUIPO:**

EL EQUIPO DE PRUEBA CONSISTE DE LO SIGUIENTE:

1. **MEDIA CELDA (ELECTRODO) DE COBRE-SULFATO DE COBRE SATURADO.** LA MEDIA CELDA CONSISTE DE UN TUBO RÍGIDO, CUYO DIÁMETRO INTERIOR NO DEBER SER MENOR DE 1 PULGADA (25 mm.), CON UN TAPÓN POROSO DE MADERA O PLÁSTICO QUE PERMANEZCA HÚMEDO POR ACCIÓN CAPILAR, Y UNA VARILLA DE COBRE SUMERGIDA EN UNA SOLUCIÓN SATURADA DE SULFATO DE COBRE.

2. **UNIÓN ELÉCTRICA.** SE DEBE USAR UN DISPOSITIVO DE UNIÓN ELÉCTRICA PARA PROPORCIONAR UN PUENTE LÍQUIDO DE BAJA RESISTENCIA ELÉCTRICA ENTRE LA SUPERFICIE DEL CONCRETO Y LA MEDIA CELDA. ESTE PUEDE CONSISTIR DE UNA ESPONJA HUMEDECIDA CON UNA SOLUCIÓN DE BAJA RESISTENCIA ELÉCTRICA.

3. **SOLUCIÓN PARA CONTACTO ELÉCTRICO.** ESTA SOLUCIÓN ES LA QUE SE APLICA A LA UNIÓN ELÉCTRICA. ESTÁ COMPUESTA POR UNA MEZCLA DE 5 ml. DE AGENTE HUMECTANTE (DISPONIBLE COMERCIALMENTE) CON 5 Gal. (19 l.) DE AGUA POTABLE.

4. **VOLTÍMETRO.** EL VÓLTMETRO DEBE TENER LA CAPACIDAD PARA SER OPERADO CON BATERÍA Y TENER UNA EXACTITUD DE  $\pm 3\%$  DE LA ESCALA MÍNIMA. LA IMPEDANCIA DE ENTRADA NO DEBE SER MENOR DE 10 MILLONES DE  $\Omega$ 'S OPERADO A UNA CAPACIDAD TOTAL DE 100 mV. LA ESCALA MÍNIMA DEBE SER DE 20 mV O MENOS.

5. HILO CONDUCTOR ELÉCTRICO, DE LONGITUD NO MAYOR A 150 m DE AL MENOS AWG No. 24.

#### **4. PROCEDIMIENTO:**

##### **1. ESPACIADO ENTRE LECTURAS.**

SE CONSIDERA CONVENIENTE UN ESPACIADO DE 1.2 m PARA LA EVALUACIÓN DE PUENTES. DE MANERA GENERAL, UN MAYOR ESPACIADO AUMENTA LA PROBABILIDAD DE NO DETECTAR ÁREAS DE CORROSIÓN LOCAL. EL ESPACIADO ENTRE LAS LECTURAS DEBE SER REDUCIDO DONDE LAS LECTURAS ADYACENTES MUESTREN UNA DIFERENCIA ALGEBRAICA MAYOR DE 150 mV.

##### **2. CONEXIÓN ELÉCTRICA AL ACERO.**

HACER UNA CONEXIÓN ELÉCTRICA DIRECTA AL ACERO DE REFUERZO POR MEDIO DE UN CAIMÁN. EN ALGUNOS CASOS, ESTA TÉCNICA PUEDE REQUERIR LA REMOCIÓN DE CONCRETO PARA EXPONER EL ACERO DE REFUERZO. CONECTAR EL REFUERZO METÁLICO A LA TERMINAL NEGATIVA DEL VOLTÍMETRO. DEBE DETERMINARSE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS COMPONENTES DEL ACERO CON EL ACERO DE REFUERZO POR LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA ENTRE DOS COMPONENTES AMPLIAMENTE SEPARADOS EN LA ESTRUCTURA.

##### **3. CONEXIÓN ELÉCTRICA DE LA MEDIA CELDA.**

CONECTAR ELÉCTRICAMENTE UNA TERMINAL DEL CABLE A LA MEDIA CELDA Y EL OTRO EXTREMO A LA TERMINAL POSITIVA DEL VOLTÍMETRO.

##### **4. MOJADO PREVIO DE LA SUPERFICIE DE CONCRETO.**

BAJO CIERTAS CONDICIONES, LA SUPERFICIE DE CONCRETO DEBE SER MOJADA. UNA PRUEBA PARA DETERMINAR LA NECESIDAD DE MOJADO PUEDE HACERSE COMO SIGUE:

- COLOCAR LA MEDIA CELDA SOBRE LA SUPERFICIE DE CONCRETO Y MANTENERLA FIJA.

- OBSERVAR EN EL VOLTÍMETRO UNA DE LAS SIGUIENTES CONDICIONES:

a) EL VALOR DE LA LECTURA DEL POTENCIAL DE MEDIA CELDA NO CAMBIA CON EL TIEMPO, O

b) LA LECTURA DEL POTENCIAL DE MEDIA CELDA VARÍA CON EL TIEMPO.

DE OBSERVAR LA CONDICIÓN a) NO ES NECESARIO MOJAR LA SUPERFICIE DE CONCRETO; SIN EMBARGO, SI SE OBSERVA LA CONDICIÓN b), ES NECESARIO MOJARLA DURANTE EL TIEMPO NECESARIO PARA QUE LA LECTURA DE VOLTAJE PERMANEZCA CONSTANTE DURANTE AL MENOS 5 MIN.

5. LAS MEDICIONES DE POTENCIAL DETECTAN ACTIVIDAD DE CORROSIÓN, PERO NO NECESARIAMENTE LA LOCALIZACIÓN DE LA CORROSIÓN ACTIVA. LA LOCALIZACIÓN

PRECISA DE LOS PUNTOS QUE PRESENTAN CORROSIÓN ACTIVA REQUIEREN EL CONOCIMIENTO DE LA RESISTENCIA PARA, CON ELLA, CALCULAR LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL MATERIAL ENTRE LA MEDIA CELDA Y EL ACERO CORROÍDO.

EFFECTUAR MEDICIONES HORIZONTALES Y VERTICALES. ASEGURARSE QUE LA SOLUCIÓN COBRE-SULFATO DE COBRE DE LA MEDIA CELDA HAGA CONTACTO ELÉCTRICO SIMULTÁNEO CON EL AGUA.

#### 6. CUIDADOS DE LA MEDIA CELDA.

EL TAPÓN POROSO DEBERÁ ESTAR CUBIERTO CUANDO NO SE USE POR LARGOS PERIODOS PARA ASEGURARSE DE QUE NO SE SEQUE.

### 5. REGISTRO DE LOS VALORES DE POTENCIALES DE MEDIA CELDA.

REGISTRAR LOS POTENCIALES ELÉCTRICOS DE MEDIA CELDA LO MÁS CERCANO A 10 mV. POR CONVENCION ES USADO EL SIGNO NEGATIVO (-) PARA TODAS LAS LECTURAS. REPORTAR TODOS LOS POTENCIALES DE MEDIA CELDA Y CORREGIR POR TEMPERATURA SI EL POTENCIAL DE MEDIA CELDA SE ENCUENTRA FUERA DEL INTERVALO  $22.2 \pm 5.5$  °C. EL COEFICIENTE DE CORRECCION POR TEMPERATURA ES: 0.0005 V NEGATIVO POR CADA 1.8 °C PARA EL INTERVALO DE TEMPERATURA ENTRE 0 A 49 °C.

### 6. PRESENTACIÓN DE DATOS.

LAS MEDICIONES DE PRUEBA PUEDEN SER PRESENTADOS POR UNO O DOS MÉTODOS. EL PRIMERO, UN MAPA EQUIPOTENCIAL, PROPORCIONA UNA DELINEACIÓN GRÁFICA DE LAS ÁREAS DONDE PUEDE ESTAR OCURRIENDO LA CORROSIÓN ACTIVA. EL SEGUNDO MÉTODO, EL DIAGRAMA DE FRECUENCIA ACUMULADA, INDICA LA MAGNITUD DEL ÁREA AFECTADA DEL CONCRETO.

#### 1. MAPA DE CONTORNO EQUIPOTENCIAL.

SOBRE UN PLANO ESCALADO ADECUADAMENTE, GRAFICAR LA LOCALIZACIÓN DE LOS VALORES DE POTENCIALES DE MEDIA CELDA DEL ACERO EN EL CONCRETO Y MARCAR EL CONTORNO DE POTENCIALES IGUALES. EL INTERVALO DE CONTORNO MÁXIMO DEBERÁ SER 0.10 V.

#### 2. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA ACUMULADA.

PARA DETERMINAR LA DISTRIBUCIÓN DE LAS LECTURAS DE LOS POTENCIALES DE MEDIA CELDA PARA EL CONCRETO, HACER UNA GRÁFICA DE LOS RESULTADOS SOBRE PAPEL NORMAL MILIMÉTRICO DE LA SIGUIENTE MANERA:

1. - ARREGLAR Y ENUMERAR TODOS LOS POTENCIALES DE MEDIA CELDA DEL MENOS AL MÁS NEGATIVO.

2. - DETERMINAR LA POSICIÓN DE CADA POTENCIAL DE MEDIA CELDA DE ACUERDO CON LA SIGUIENTE ECUACIÓN:

$$f_x = \frac{r}{\Sigma n + 1} * 100$$

DONDE:

$f_x$  ES LA POSICIÓN DEL GRAFICADO PARA EL VALOR OBSERVADO, %,

$r$  ES LA POSICIÓN INDIVIDUAL DEL POTENCIAL DE MEDIA CELDA, Y

$\Sigma n$  ES EL NÚMERO TOTAL DE OBSERVACIONES.

3. - ETIQUETAR EL EJE DE LAS ORDENADAS COMO "POTENCIAL DE MEDIA CELDA (mV, CSE)", DONDE CSE ES LA DESIGNACIÓN DEL ELECTRODO COBRE-SULFATO DE COBRE. ETIQUETAR EL EJE DE LAS ABCISAS COMO "FRECUENCIA ACUMULADA (%)". TRAZAR DOS LÍNEAS HORIZONTALES PARALELAS QUE INTERSECTEN EL EJE DE LAS ORDENADAS EN LOS VALORES DE -200 Y -350 mV RESPECTIVAMENTE.

4. - DESPUÉS DE GRAFICAR LOS POTENCIALES DE MEDIA CELDA, TRAZAR UNA LÍNEA QUE SE MEJOR SE AJUSTE A LOS PUNTOS.

## 7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

LOS VOLTAJES MEDIDOS SON REFERIDOS A LA MEDIA CELDA COBRE-SULFATO DE COBRE.

1. SI LOS POTENCIALES EN UN ÁREA SON NUMÉRICAMENTE MENORES QUE -200 mV CSE, HAY UNA PROBABILIDAD MAYOR DEL 90% QUE NO ESTÉ PRESENTE LA CORROSIÓN DEL ACERO EN DICHA ÁREA AL TIEMPO DE EFECTUAR LA MEDICIÓN.

2.- SI LOS POTENCIALES DE UN ÁREA SE ENCUENTRAN EN EL INTERVALO DE -200 A -350 mV CSE LA ACTIVIDAD DE CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EN ESTA ÁREA ES DUDOSA.

3.- SI LOS POTENCIALES DE UN ÁREA SON NUMÉRICAMENTE MAYORES QUE -350 mV CSE, HAY UNA PROBABILIDAD MAYOR AL 90% DE QUE LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO ESTÉ OCURRIENDO EN ESA ÁREA AL TIEMPO DE EFECTUAR LA MEDICIÓN.

4.- EN PRUEBAS DE LABORATORIO DONDE LOS POTENCIALES FUERON NUMÉRICAMENTE MAYORES DE -500 mV, APROXIMADAMENTE LA MITAD DE LOS ESPECÍMENES SE RESQUEBRAJARON DEBIDO A LA ACTIVIDAD DE CORROSIÓN.

5.- AL OBTENERSE LECTURAS POSITIVAS, ÉSTAS NO DEBERÁN SER CONSIDERADAS COMO VÁLIDAS PUES ESTO INDICA HUMEDAD INSUFICIENTE.

## 8. REPORTE.

EL REPORTE DEBERÁ INCLUIR:

- 1.- TIPO DE CELDA USADA;
- 2.- LA TEMPERATURA PROMEDIO ESTIMADA DE LA CELDA DURANTE LA PRUEBA;
- 3.- EL MÉTODO DE HUMIDIFICACIÓN DEL CONCRETO Y EL TIPO DE UNIÓN DEL VÓLTMETRO AL ACERO DE REFUERZO;
- 4.- UN MAPA DE CONTORNO EQUIPOTENCIAL, MOSTRANDO LA LOCALIZACIÓN DEL CONTACTO DEL ACERO DE REFUERZO, O UNA GRÁFICA DE LA DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA ACUMULADA DE LOS POTENCIALES DE MEDIA CELDA, O AMBOS;
- 5.- EL PORCENTAJE DE LOS POTENCIALES DE MEDIA CELDA MÁS NEGATIVOS QUE -350 mV; Y,
- 6.- EL PORCENTAJE DE LOS POTENCIALES DE MEDIA CELDA MENOS NEGATIVOS QUE -200 mV.

## 9. PRECISIÓN.

- 1.- LA DIFERENCIA ENTRE DOS LECTURAS DE MEDIA CELDA TOMADAS EN EL MISMO PUNTO CON LA MISMA CELDA NO DEBERÁ EXCEDER 10 mV CUANDO LA CELDA ES DESCONECTADA Y RECONECTADA.
- 2.- LA DIFERENCIA ENTRE DOS LECTURAS DE MEDIA CELDA TOMADAS EN EL MISMO PUNTO CON DOS CELDAS DIFERENTES NO DEBERÁ EXCEDER 20 mV.

### III.1.2 MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CONCRETO REFORZADO.

LA RESISTIVIDAD DE UN MATERIAL ESTÁ DEFINIDA COMO LA RESISTENCIA DE UN CUBO DE TAMAÑO UNITARIO. DE AQUÍ QUE LA RESISTIVIDAD  $\rho$  DE UNA SECCIÓN CILÍNDRICA DE LONGITUD L Y SECCIÓN A ESTÁ DADA POR:

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

DONDE:

R ES LA RESISTENCIA DE LA MUESTRA.

EL USO DE UN SISTEMA DE CORRIENTE DIRECTA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD TRAE COMO CONSECUENCIA LA POLARIZACIÓN DEL ELECTROLITO Y LA FORMACIÓN DE HIDRÓGENO Y OXÍGENO EN LOS ELECTRODOS; PARA EVITAR ESTO, ES NECESARIO EL USO DE UN SISTEMA DE CORRIENTE ALTERNA CON UNA FRECUENCIA EN EL INTERVALO DE 50 A 1000 Hz.

POR OTRO LADO, LA EXTRACCIÓN DE UN CORAZÓN CILÍNDRICO DE CONCRETO DE UNA ESTRUCTURA CADA VEZ QUE SEA NECESARIA UNA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD ES POCO PRÁCTICA Y ECONÓMICA. SI SE USARA UN EXTRACTOR DE CORAZONES DE TIPO DIAMANTE LUBRICADO CON AGUA ALTERARÍA LA RESISTIVIDAD DEL MATERIAL AL MODIFICAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL MISMO.

ASÍ PUES, UNA TÉCNICA EMPLEADA PARA DETERMINAR LA RESISTIVIDAD DEL CONCRETO DE MANERA RÁPIDA Y FÁCIL- SIN DAÑAR LA ESTRUCTURA -, CONSISTE EN HACER PASAR UNA MAGNITUD DE CORRIENTE ALTERNA ENTRE DOS ELECTRODOS EN CONTACTO CON LA SUPERFICIE DEL CONCRETO (VER FIG. 14). EN UN MATERIAL HOMOGÉNEO SEMI INFINITO SE CREA UN CAMPO DE FLUJO CLÁSICO. DE LA MEDICIÓN DE LA DIFERENCIA DE POTENCIAL A TRAVÉS DE LOS OTROS DOS ELECTRODOS, COLOCADOS ENTRE LOS ELECTRODOS DE CORRIENTE, PUEDE EVALUARSE LA RESISTIVIDAD DEL MATERIAL. EL USO DE CUATRO ELECTRODOS EQUIESPACIADOS ES CONOCIDO COMO EL ARREGLO DE WENNER. (VER FIG. 14) LA RESISTIVIDAD  $\rho$  OBTENIDA USANDO EL ARREGLO DE WENNER ESTÁ DADO POR:

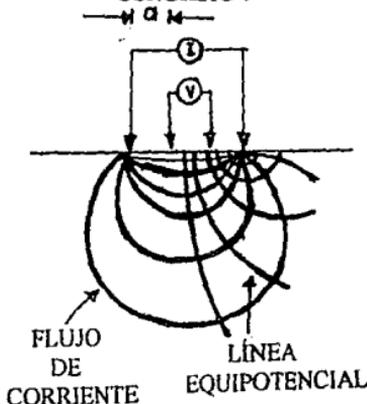
$$\rho = 2\pi a V I , \text{ Ó}$$

$$\rho = 2\pi I R a$$

DONDE:

$a$  ES EL ESPACIO ENTRE ELECTRODOS.

FIG. 14 MÉTODO DE WENNER PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD EN CONCRETO\*.



\* TOMADA DE: MEASUREMENT OF THE ELECTRICAL RESISTIVITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES FOR THE ASSESSMENT OF CORROSION RISK (REF. 25)

CUANDO SE APLICA EL MÉTODO DE LA RESISTIVIDAD DE CUATRO PUNTOS EN CONCRETO HAY TRES ASPECTOS QUE DEBEN TOMARSE EN CUENTA PARA OBTENER RESULTADOS CONFIABLES:

1. EL CONCRETO ES UN MATERIAL ELÉCTRICO HETEROGÉNEO ESPECIALMENTE EL REFORZADO CON VARILLA DE ACERO,

2. UNA ESTRUCTURA PODRÍA NO SER "SEMI INFINITA" EN TAMAÑO, Y

3. PODRÍA HABER DIFICULTADES EN EL CONTACTO SUPERFICIAL ENTRE LOS ELECTRODOS Y LA SUPERFICIE DEL CONCRETO. ESTO PUEDE CAUSAR ERRORES SIGNIFICATIVOS CUANDO LA SUPERFICIE DEL CONCRETO ESTÁ SECA.

CABE DESTACAR QUE EL ESPACIADO O ARREGLO DE WENNER ESTÁ DETERMINADO POR LA SUPERFICIE DEL CONCRETO A MEDIR. SI EL ESPACIADO ES MUY PEQUEÑO, LA PRESENCIA O AUSENCIA DE PARTÍCULAS INDIVIDUALES AGREGADAS, QUE CASI SIEMPRE TIENEN ALTA RESISTIVIDAD, CONDUCIRÁ A UN DISPARO DEL VALOR DE LA RESISTIVIDAD. EN CAMBIO, AL USAR UN ESPACIADO GRANDE PUEDE CONDUCIR A INEXACTITUD EN LA LECTURA DEBIDO A UNA CONSTRICCIÓN DEL CAMPO DE CORRIENTE POR LAS ORILLAS DE LA ESTRUCTURA; ESTOS EFECTOS SON INEVITABLES, Y NO DEBEN SER IGNORADOS AL INTERPRETAR LOS RESULTADOS.

CABE SEÑALAR QUE NO HAY UN MÉTODO ESTABLECIDO COMO NORMA OFICIAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD EN EL CONCRETO; POR LO QUE, EN BASE A LO ARRIBA SEÑALADO Y POR ANALOGÍA CON LA NORMA PARA LA DETERMINACIÓN DE POTENCIALES DE MEDIA CELDA SE PROPONE UNO.

ESTE MÉTODO ESTÁ BASADO EN EL ARTÍCULO DE MILLARD, S.G.; HARRISON, J.A., & EDWARDS, A.J.: MEASUREMENT OF THE ELECTRICAL RESISTIVITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES FOR THE ASSESMENT OF CORROSION RISK<sup>(25)</sup>.

## **1. ALCANCE:**

1. ESTE MÉTODO CUBRE LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL CONCRETO, CON EL PROPÓSITO DE DETERMINAR LA ACTIVIDAD DE CORROSIÓN DEL ACERO EMBEBIDO EN EL CONCRETO.

2. ESTE MÉTODO ESTÁ LIMITADO POR LA EXISTENCIA DE UN CIRCUITO ELÉCTRICO. UNA SUPERFICIE DE CONCRETO QUE SE HA SECADO COMPLETAMENTE, DE TAL MANERA QUE SE COMPORTE COMO UN MATERIAL DIELECTRICO, O QUE HAYA SIDO CUBIERTO POR UNA PELÍCULA DIELECTRICA NO SE COMPORTARÁ COMO UN CIRCUITO ELÉCTRICO.

## **2. USOS:**

1. ESTE MÉTODO PUEDE SER USADO PARA INDICAR LA ACTIVIDAD DE CORROSIÓN ASOCIADO CON EL ACERO EMBEBIDO EN CONCRETO EN MUESTRAS DE CAMPO O DE LABORATORIO.

2. ESTE MÉTODO ES APLICABLE A CUALQUIER MUESTRA, PERO ES BIEN IMPORTANTE LA RELACIÓN ENTRE EL ESPESOR DE LA CUBIERTA DE CONCRETO SOBRE EL ACERO DE REFUERZO Y LA SEPARACIÓN ENTRE LOS ELECTRODOS.

3. ESTE MÉTODO PUEDE SER USADO EN CUALQUIER MOMENTO DURANTE LA VIDA DEL CONCRETO.

4. LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR ESTE MÉTODO NO DEBERÁN SER CONSIDERADOS COMO UN MEDIO PARA ESTIMAR LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES DEL ACERO O DEL CONCRETO.

## **3. EQUIPO:**

EL EQUIPO DE PRUEBA CONSISTE DE LO SIGUIENTE:

1. CUATRO ELECTRODOS DE COBRE-SULFATO DE COBRE SATURADO. CADA ELECTRODO CONSISTE DE UN TUBO RÍGIDO, CUYO DIÁMETRO INTERIOR NO DEBER SER MAYOR A 4 mm., CON UN TAPÓN POROSO DE MADERA PARA QUE PERMANEZCA HÚMEDO POR ACCIÓN CAPILAR, Y UN ALAMBRE DE COBRE SUMERGIDO EN UNA SOLUCIÓN SATURADA DE SULFATO DE COBRE, LA CUAL ES INYECTADA CON UNA JERINGA DE VIDRIO O PLÁSTICO.

3. APARATO PARA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA. EL APARATO DEBE SER OPERADO CON CORRIENTE ALTERNA, CON UNA FRECUENCIA DE 50 - 1000 Hz. Y TENER UNA EXACTITUD DE  $\pm 3\%$  DE LA ESCALA MÍNIMA. EL APARATO PUEDE SER DEL TIPO SOIL RESISTENCE METER, MODEL 400, NILSSON ELECTRICAL LABORATORY INC. O SIMILAR.

4. CAIMANES, PARA UNIR ELÉCTRICAMENTE EL CIRCUITO FORMADO POR EL CONCRETO Y EL APARATO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD.

5. DESECADOR. EL DESECADOR ES USADO PARA COLOCAR LAS MUESTRAS DE CONCRETO EN ÉL, CON EL FONDO DEL MISMO CON AGUA, Y SIMULAR ASÍ, LA CONDICIÓN DE UNA ATMÓSFERA SATURADA.

## **4. PROCEDIMIENTO:**

1. ESPACIADO ELECTRODOS.

SE CONSIDERA CONVENIENTE UN ESPACIADO DE 2 cm PARA LA EVALUACIÓN DE CUBIERTAS DE CONCRETO. MILLARD (op. cit.25) ENCONTRÓ QUE EL 77% DE LA CORRIENTE FLUYE A LO LARGO DE 4a, ES DECIR, CUATRO VECES LA SEPARACIÓN

ENTRE LOS ELECTRODOS, POR LO QUE ES BIEN IMPORTANTE QUE EL ESPACIADO ENTRE LOS ELECTRODOS SEA COMO MÁXIMO 1/4 DEL ESPESOR DE LA CAPA DE CONCRETO. DE ESTA MANERA EL ERROR DEBIDO A LA CONSTRICCIÓN DEL FLUJO ES MENOR AL 20%.

## 2. CONEXIÓN ELÉCTRICA AL CONCRETO.

a) HACER CUATRO INCISIONES EN EL CONCRETO CON UNA BROCA CUYO DIÁMETRO SEA IGUAL AL DIÁMETRO EXTERIOR DE LOS ELECTRODOS, Y A UNA PROFUNDIDAD DE APROXIMADAMENTE 5 mm.

b) COLOCAR UNO A UNO LOS ELECTRODOS EN CADA ORIFICIO, PONIENDO CUIDADO EN QUE REALMENTE HAYA CONTACTO ENTRE EL CONCRETO Y EL TAPÓN POROSO DE CADA ELECTRODO; DE SER NECESARIO, SUJETAR CON PLASTILINA CADA UNO DE LOS ELECTRODOS.

c) LOS DOS ELECTRODOS DEL CENTRO, O INTERIORES, SE CONECTAN CON CAIMANES A LOS BORNES DE POTENCIAL DEL APARATO; LOS ELECTRODOS DE LOS EXTREMOS SE CONECTAN A LOS BORNES DE CORRIENTE DEL APARATO.

## 3. DETERMINAR LOS VALORES DE RESISTENCIA DE CADA MUESTRA:

a) COLOCAR LA MANUA DE RESOLUCIÓN DE BARRIDO EN POSICIÓN DE BAJA (LOW, HACIA ABAJO) Y MANTENERLA EN ESA POSICIÓN, MIENTRAS QUE SE COLOCA LA PERILLA DEL FACTOR DE ESCALA EN UNO TAL QUE LA AGUJA INDICADORA SEA LO SUFICIENTEMENTE SENSIBLE PARA EFECTUAR LA LECTURA; ESTO ES, CON LA PERILLA DE MEDICIÓN, HACER COINCIDIR LA AGUJA CON EL CENTRO DE LA ESCALA. UNA VEZ HECHO LO ANTERIOR, SE LIBERA LA POSICIÓN DE BAJA RESOLUCIÓN.

b) SE COLOCA LA MANUA DE RESOLUCIÓN DE BARRIDO EN LA POSICIÓN DE FINO (HACIA ARRIBA) Y CON LA PERILLA DEL VALOR DE LA LECTURA SE HACE COINCIDIR NUEVAMENTE LA AGUJA CON EL CENTRO DE LA ESCALA.

c) ESTE ÚLTIMO VALOR, MULTIPLICADO POR EL FACTOR DE ESCALA (1, 10, 100 Ohms ó 1, 10, 100 ó 1000 KOhms), ES EL DE LA RESISTENCIA DE LA MUESTRA DE CONCRETO.

## 4. CUIDADOS DE LOS ELECTRODOS. EL TAPÓN POROSO DE CADA ELECTRODO DEBERÁ PERMANECER HÚMEDO AÚN CUANDO NO SE USE. PARA ASEGURARSE QUE NO LLEGUEN A SECARSE SE DEBERÁN MANTENER LOS ELECTRODOS EN UN VASO CON AGUA DESTILADA.

VERIFICAR QUE EL NIVEL DE LA SOLUCIÓN SATURADA DE SULFATO DE COBRE PERMANEZCA CONSTANTE EN CADA ELECTRODO A LO LARGO DE TODA LA PRUEBA.

## **5. REGISTRO DE LOS VALORES DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CONCRETO.**

REGISTRAR LOS VALORES DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA, YA QUE CON ÉSTOS SE CALCULA EL VALOR DE LA RESISTIVIDAD DEL CONCRETO.

## **6. PRESENTACIÓN DE DATOS.**

LAS MEDICIONES DE PRUEBA DEBEN SER PRESENTADOS EN TABLAS EN LAS QUE SE INDIQUE LA ETIQUETA DE LA MUESTRA, LA LECTURA DE LA RESISTENCIA ,LAS CONDICIONES DEL ESPECÍMEN AL MOMENTO DE EFECTUAR LA MEDICIÓN (SI SE ENCONTRABA SECO, HÚMEDO O SI SE DEJÓ EN UNA ATMÓSFERA SATURADA), ASÍ COMO LA TEMPERATURA AMBIENTAL AL MOMENTO DE HACER LAS MEDICIONES.

## **7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.**

LA PRUEBA DE LABORATORIO DE LOS ESPECÍMENES DE CONCRETO INDICA EL VALOR NUMÉRICO DE LA RESISTENCIA, CON LO CUAL SE CALCULA EL VALOR DE LA RESISTIVIDAD. LA RESISTIVIDAD ES REFERIDA A ELECTRODOS DE COBRE/SULFATO DE COBRE.

1. SI LA RESISTIVIDAD DE UNA MUESTRA ES MAYOR DE  $12 \text{ K}\Omega \text{ cm.}$ , ES POCO PROBABLE QUE EL REFUERZO EN EL CONCRETO SE ENCUENTRE CORROÍDO.

2.- SI EL VALOR DE LA RESISTIVIDAD SE ENCUENTRA EN EL INTERVALO DE  $5 - 12 \text{ K}\Omega \text{ cm.}$  LA ACTIVIDAD DE CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EN LA MUESTRA ES PROBABLE.

3.- SI LA RESISTIVIDAD DE LA MUESTRA ES MENOR A  $5 \text{ K}\Omega \text{ cm.}$  LA PRESENCIA DE CORROSIÓN ACTIVA ES MUY PROBABLE.

## **8. REPORTE.**

EL REPORTE DEBERÁ INCLUIR:

1.- TIPO DE ELECTRODOS USADOS.

2.- TIPO DE APARATO USADO EN LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA.

3.- LA TEMPERATURA AMBIENTAL PROMEDIO DURANTE LA PRUEBA.

4.- LAS CONDICIONES DE PRUEBA DE LA MUESTRA DE CONCRETO.

5.- UNA TABLA EN LA QUE SE INDIQUE EL VALOR DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA OBTENIDO, ASÍ COMO LA RESISTIVIDAD CALCULADA.

## **9. PRECISIÓN.**

1.- EL VALOR DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA DEL CONCRETO NO DEBE VARIAR DURANTE AL MENOS 5 MINUTOS.

### **III.1.3 DETERMINACIÓN DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN DEL CONCRETO.**

NO EXISTE UN MÉTODO O NORMA, HASTA LA FECHA, PARA DETERMINAR EL GRADO DE AVANCE O FRENTE DE CARBONATACIÓN DE UNA ESTRUCTURA. LO REPORTADO EN LA BIBLIOGRAFÍA SE LIMITA A UNA TÉCNICA SENCILLA, COMO LO ES EL USO DE UN INDICADOR ÁCIDO-BASE, COMO LO ES LA FENOLFTALEÍNA. ESTA TÉCNICA SE LLEVAR A CABO DE ACUERDO CON EL SIGUIENTE MECANISMO:

#### **1. ALCANCE:**

1. ESTA TÉCNICA ESTIMA EL FRENTE DE CARBONATACIÓN DEL CONCRETO REFORZADO, CON EL PROPÓSITO DE DETERMINAR EL ESTADO DEL CONCRETO.

#### **2. USOS:**

1. ESTA TÉCNICA PUEDE SER APLICADA A CUALQUIER MUESTRA, SIN IMPORTAR EL TAMAÑO O LA PROFUNDIDAD DE LA CUBIERTA DE CONCRETO SOBRE EL ACERO DE REFUERZO.

2. ESTA TÉCNICA PUEDE SER USADA EN CUALQUIER MOMENTO DURANTE LA VIDA DEL CONCRETO.

3. LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON ESTA TÉCNICA NO DEBERÁN SER CONSIDERADOS PARA ESTIMAR LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL CONCRETO.

#### **3. EQUIPO:**

EL EQUIPO NECESARIO ES:

1. TALADRO O DISCO ESMERILADO;
2. BROCHA, GOTERO O ASPERSOR;
3. FRASCO GOTERO CON FENOLFTALEÍNA;
4. VERNIER O REGLA GRADUADA.

#### **4. PROCEDIMIENTO:**

1. EFECTUAR INCISIONES EN EL CONCRETO, CON EL DISCO ESMERILADO O TALADRO, A DIFERENTES PROFUNDIDADES.

2. APLICAR LA SOLUCIÓN DE FENOLFTALEÍNA CON LA BROCHA, EL GOTERO O EL ASPERSOR.

3. DEJAR SECAR LA SOLUCIÓN DE FENOLFTALEÍNA.

4. VERIFICAR EL CAMBIO DE COLORACIÓN A LO LARGO DE TODA LA INCISIÓN:

a) SI TODA LA INCISIÓN ES DEL MISMO COLOR DEL CONCRETO, HACER OTRA INCISIÓN AÚN MÁS PROFUNDA Y REPETIR EL PROCEDIMIENTO A PARTIR DEL PASO 2 HASTA QUE SE OBSERVE UN FRENTE COLOR DE ROSA, PASAR ENTONCES AL PUNTO 5.

b) SI TODA LA INCISIÓN ES DE COLOR ROSA, PASAR AL PUNTO 4.

5. MEDIR EL FRENTE DE CARBONATACIÓN, ES DECIR, LA DISTANCIA ENTRE LA SUPERFICIE EXTERIOR DEL CONCRETO HASTA EL PUNTO EN DONDE EMPIEZA LA COLORACIÓN ROSA.

## **5. REGISTRO DEL VALOR DE FRENTE DE CARBONATACIÓN DEL CONCRETO:**

REGISTRAR EL FRENTE DE CARBONATACIÓN EN cms.

## **6. PRESENTACIÓN DE DATOS:**

PRESENTAR LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN UNA TABLA EN LA QUE SE INDIQUE:

- PROCEDENCIA DE LA MUESTRA;
- NÚMERO DE LA MUESTRA;
- LONGITUD DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN; Y DE SER POSIBLE
- ESPESOR DE LA CAPA DE CONCRETO QUE RECUBRE LA VARILLA.

## **7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS:**

EL pH DE VIRE DE LA FENOLFTALEÍNA SE ENCUENTRA EN EL INTERVALO 8 - 9,8, PRESENTANDO UNA COLORACIÓN ROJA EN UN MEDIO ALCALINO O BÁSICO, Y UNA INCOLORA EN MEDIO ÁCIDO; Y COMO EL PROCESO DE CARBONATACIÓN ES UNA REACCIÓN DE NEUTRALIZACIÓN, EL CONCRETO NO MOSTRARÁ CAMBIO ALGUNO DE COLOR AL APLICAR FENOLFTALEÍNA EN LAS ZONAS CARBONATADAS. UN FRENTE DE CARBONATACIÓN MUY AVANZADO, ES DECIR, MUY CERCANO A LA VARILLA REFLEJA UNA MALA CONDICIÓN DEL ESTADO QUE GUARDA EL REFUERZO.

## **8. REPORTE:**

EL REPORTE DEBERA INCLUIR;

1. PROCEDENCIA DE LA MUESTRA;
2. MÉTODO DE APLICACIÓN DE LA FENOLFTALEÍNA;
3. FRENTE DE CARBONACIÓN; Y DE SER POSIBLE,
4. ESPESOR DE LA CAPA DE CONCRETO QUE RECUBRE LA VARILLA DE ACERO DEL REFUERZO.

### III. 2 INSPECCIÓN DE UNA ESTRUCTURA DE CONCRETO: LA BIBLIOTECA CENTRAL DE LA U.N.A.M.

#### RESEÑA HISTÓRICA.<sup>26</sup>

EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO DE LA BIBLIOTECA ESTUVO A CARGO DE LOS ARQUITECTOS JUAN O'GORMAN, GUSTAVO SAAVEDRA Y JUAN MARTÍNEZ DE VELASCO. CONSTITUYE UNO DE LOS EDIFICIOS MÁS CARACTERÍSTICOS DE LA CIUDAD UNIVERSITARIA, NO SÓLO POR SU LOCALIZACIÓN DENTRO DEL CAMPUS ORIGINAL, SINO POR TRATARSE DE UNA TORRE MASIVA Y CERRADA CUBIERTA EN SU TOTALIDAD POR UN ENORME MURAL POLÍCROMO, REALIZADO CON PIEDRAS NATURALES DE DIVERSOS COLORES, DISEÑADO POR EL MISMO O'GORMAN.

EL EDIFICIO CUENTA CON DOS SÓTANOS DESTINADOS A BODEGAS Y UNO MÁS A MANERA DE BASAMENTO EN DONDE SE LOCALIZAN DEPENDENCIAS ADMINISTRATIVAS Y DE SERVICIO. EN LA PLANTA PRINCIPAL SE ENCUENTRAN LAS SALAS DE LECTURA DE DOBLE ALTURA. ADEMÁS EXISTE DENTRO DE ESTE ESPACIO UN MEZZANINE EN DONDE SE UBICAN LAS OFICINAS ADMINISTRATIVAS Y DE GOBIERNO DE LA BIBLIOTECA. UN NIVEL MÁS ARRIBA COMIENZA PROPIAMENTE LA TORRE DE ONCE PISOS DESTINADA AL ACERVO GENERAL DE LA BIBLIOTECA. EL CONJUNTO SE ARMONIZA MEDIANTE FRISOS DE PIEDRA, FUENTES, JARDINES, TERRAZAS, ETC.

LA CONSTRUCCIÓN, EFECTUADA ENTRE 1949 Y 1952, SE HIZO A BASE DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO Y ACABADOS PÉTREOS. EL EDIFICIO CONSTA DE UN CUERPO HORIZONTAL CON FAJAS VISIBLES DE PIEDRA VOLCÁNICA, VIDRIERAS Y GRANDES SUPERFICIES DE ÓNIX TRANSLÚCIDO, CON MUROS DE PIEDRA CON RELIEVES INSPIRADOS EN MOTIVOS DEL MUNDO INDÍGENA PREHISPÁNICO.

SOBRE EL CUERPO HORIZONTAL SE CONSTRUYÓ UNA TORRE VERTICAL CON 15 NIVELES, QUE EN SU UNIÓN CON EL CUERPO HORIZONTAL PRESENTA UN PISO ABIERTO CON VIDRIERAS. DE AHÍ EN ADELANTE APARECEN DIEZ PISOS CON MURALES PICTÓRICOS A BASE DE MOSAICOS DE COLORES NATURALES EN LOS CUATRO MUROS PERIFÉRICOS DE LA TORRE EN LOS QUE SE PLASMARON SÍMBOLOS IMPORTANTES EN LA HISTORIA NACIONAL.

LA TÉCNICA EMPLEADA EN LA BIBLIOTECA DE CIUDAD UNIVERSITARIA, POR JUAN O'GORMAN PARA RESOLVER LA DECORACIÓN QUE REVESTIRÍA EL BLOQUE

---

<sup>26</sup>TOMADO TEXTUALMENTE DEL DOCUMENTO: ANTECEDENTES PARA LA RESTAURACIÓN DEL MURAL "REPRESENTACIÓN HISTÓRICA DE LA CULTURA" DE JUAN O'GORMAN EN LA BIBLIOTECA CENTRAL DE LA CIUDAD UNIVERSITARIA.

DESNUDO DE LA BIBLIOTECA, PROYECTADA POR ÉL, CON UNA SUPERFICIE TOTAL DE 4,000 METROS CUADRADOS, FUÉ LA DE PREFABRICAR EL MURAL, ES DECIR, PRODUCIRLO POR MEDIO DE LOSAS PRECOLADAS DE UN METRO CUADRADO QUE SERÍAN IZADAS SOBRE LA FACHADA PARA AJUSTARLAS A UN MARCO DE METAL DONDE SE LES FIJARÍA CON CEMENTO.

EL MOSAICO CUBRE LOS CUATRO LADOS DE LA TORRE DE ACERVOS DEL EDIFICIO, CONSTITUYE, COMO SE HA SEÑALADO ATINADAMENTE, POR UNA PARTE LA IMÁGEN PLÁSTICA CON LA QUE SE IDENTIFICA AL MÉXICO MODERNO EN EL MUNDO Y POR OTRA EL RENACIMIENTO DEL MOSAICO CON UNA FUERZA Y ESPLENDOR INIGUALABLES. A O'GORMAN SE DEBE EL RECONOCIMIENTO DEL MOSAICO EN MÉXICO Y SU USO EN ENORMES EXTENSIONES EN LOS MUROS PÚBLICOS.

O'GORMAN EMPEZÓ POR REALIZAR ALGUNOS MODELOS A ESCALA REDUCIDA, ALGUNOS A COLOR Y OTROS EN BLANCO Y NEGRO. PASÓ OCHO MESES CONVIRTIENDO SUS PROYECTOS PRELIMINARES EN DIBUJOS A ESCALA NATURAL, SOBRE UN TABLERO VERTICAL DE MADERA DE 42 X 6 m. QUE SE INSTALÓ EN UNA DE LAS BODEGAS DE MATERIALES DE LA CIUDAD UNIVERSITARIA. SOBRE EL TABLERO DE DIBUJO, CON LA AYUDA DE CUATRO ESTUDIANTES DE ARTE, SE HICIERON LAS PLANTILLAS, ES DECIR, EL DIBUJO DE LOS MOSAICOS AL TAMAÑO NATURAL.

SIGUIENDO LA TÉCNICA TRADICIONAL DEL MOSAICO VIDRIADO O VENECIANO, TODO TENÍA QUE SER DIBUJADO AL REVÉS, SIN EMBARGO O'GORMAN HABÍA DESECHADO EL MOSAICO VIDRIADO Y ELEGIDO PIEDRAS NATURALES DE VARIADOS COLORES. YA EXISTÍAN ANTECEDENTES PREHISPÁNICOS DEL USO DE ESTOS MATERIALES, ASÍ COMO EN EL ARTE POPULAR MEXICANO. ESTOS INSPIRARON LAS DECORACIONES DISEÑADAS POR DIEGO RIVERA, REALIZADAS CON LA COLABORACIÓN DE JUAN O'GORMAN, PARA EL MUSEO ANAHUACALLI EN 1945.

PARA LA BIBLIOTECA CENTRAL, O'GORMAN DECIDIÓ HACER LOSAS DE UN METRO CUADRADO, YA QUE ESTE TAMAÑO FACILITARÍA SU COLOCACIÓN SOBRE LOS MUROS. SOBRE EL GRAN TABLERO DE MADERA SE COLOCABAN CLAVOS A UNA DISTANCIA DE UN METRO DE ANCHO POR UNO DE ALTURA. SE CONSIGUIÓ PAPEL GRUESO DE UN METRO DE ANCHO, DE MANERA QUE LAS PLANTILLAS VENÍAN CORTADAS A LA MEDIDA EXACTA. SE COLGABAN TIRAS DE PAPEL ENTRE LOS CLAVOS, Y SOBRE EL PAPEL SE DIBUJABA EL MOSAICO, COMENZANDO POR LA PARTE INFERIOR Y SIGUIENDO HACIA ARRIBA, DE ACUERDO CON LOS PROYECTOS A UNA ESCALA DE 5 cm. POR METRO.

DURANTE EL PROCESO DE EJECUCIÓN SE HICIERON MUCHAS MODIFICACIONES QUE, A JUICIO DE O'GORMAN, FUERON CAMBIOS NECESARIOS PARA MEJORAR EL DISEÑO Y LA COMPOSICIÓN.

MIENTRAS TANTO, QUINCE ALBAÑILES QUEBRABAN LA PIEDRA A GOLPES DE MARRO PARA OBTENER LA PEDACERÍA DE 2 A 4 cm. DE DIÁMETRO. VEINTE CAMIONES TRANSPORTARON APROXIMADAMENTE 1,019 METROS CÚBICOS DE ROCA DESDE DIVERSOS PUNTOS DEL PAÍS HASTA LA BIBLIOTECA, DONDE LOS OBREROS DEMORARON SIETE MESES EN QUEBRARLA, OBTENIÉNDOSE MÁS DE TRES MILLONES DE DIMINUTAS PIEDRAS.

SOBRE CADA PLANTILLA SE INDICABAN LOS COLORES DE LAS PIEDRAS QUE TENÍAN QUE COLOCARSE SEGÚN EL DIBUJO MARCADO. CADA PLANTILLA LLEVABA UN NÚMERO Y UNA LETRA QUE LA SITUABA CON EXACTITUD EN EL DISEÑO GENERAL. LOS NÚMEROS SE ASIGNARON A LAS FAJAS HORIZONTALES Y LAS LETRAS A LAS VERTICALES. TAMBIÉN SE MARCABA CON ROJO EN LA PARTE SUPERIOR CADA PRECOLADO PARA EVITAR ERRORES EN SU COLOCACIÓN.

PARA LLEVAR A CABO EL TRABAJO DE LOS MOSAICOS SE ORGANIZÓ UN GRUPO DE APROXIMADAMENTE 40 ALBAÑILES, CADA UNO HACÍA UNA LOSA PRECOLADA CON MOSAICO AL DÍA. LAS FORMAS PARA EL PRECOLADO ERAN DE YESO, YA QUE LA MADERA CON ESTAS DIMENSIONES PODÍA TORCERSE, EN CAMBIO EL YESO NO MODIFICABA SU FORMA Y SE ELIMINABA CON FACILIDAD AL DESCIMBRAR. EL GRUESO DE CADA LOSA, INCLUIDAS LAS PIEDRAS Y EL COLADO, FUÉ DE 5 cms. DENTRO DE LOS MOLDES QUE TENÍAN EL TAMAÑO EXACTO DE UNA LOSA SE COLOCABA LA PLANTILLA DE PAPEL DIBUJADA AL REVÉS, PARA QUE AL DESCIMBRARSE PRESENTARA EL LADO DERECHO DEL DISEÑO.

COMO SE MENCIONÓ ANTERIORMENTE, TODAS LAS PLANTILLAS ESTABAN NUMERADAS Y MARCADAS CON LOS COLORES DE LAS PIEDRAS QUE LE CORRESPONDÍAN. EL ALBAÑIL ENCARGADO DE HACERLAS COLOCABA LA PEDACERÍA DE PIEDRAS DE COLORES SOBRE LAS PLANTILLAS. SOBRE ESTA PEDACERÍA SE HACÍA UN PEQUEÑO COLADO CON MEZCLA DE CEMENTO Y ARENA Y Poca AGUA PARA QUE LA MEZCLA FUERA LIGERAMENTE DURA CON EL FIN DE QUE NO ESCURRIERA NI MANCHARA LA PARTE VISIBLE DEL MOSAICO QUE LLEVABA EL DIBUJO DE LA PLANTILLA.

ESTE COLADO SERVÍA PARA MANTENER LAS PIEDRAS EN SU LUGAR, SOBRE ÉSTE SE COLOCABA LA CUADRÍCULA DE FIERRO DE ALAMBRÓN DE UN CUARTO DE PULGADA QUE SERVÍA DE ESTRUCTURA AL PRECOLADO. POSTERIORMENTE, SE COLABA EL MOLDE HASTA LLENARLO TOTALMENTE CON LA MEZCLA DE CEMENTO, ARENA Y GRAVILLA, Y SE DEJABA QUE ESTOS PRECOLADOS FRAGUARAN EN EL MISMO LUGAR EN EL QUE SE HACÍAN. A LOS DOS DÍAS SE LEVANTABAN LOS PRECOLADOS, SE LES DESPEGABA, SE LIMPIABA LA SUPERFICIE DE LA PIEDRA DEL MOSAICO Y SE ALMACENABAN EN UNA BODEGA LISTOS PARA COLOCARLOS EN EL

LUGAR QUE LES CORRESPONDERÍA OCUPAR SOBRE LOS MUROS EXTERIORES DE TABIQUE DE LOS ACERVOS DE LA BIBLIOTECA.

EL MURO DE TABIQUE TENÍA UNA CUADRÍCULA DE VARILLA DE FIERRO ANCLADA PARA DETENER LAS PLACAS DE MOSAICO. CADA UNO DE LOS PRECOLADOS SE LLEVABA A SU SITIO Y SE COLOCABA CON CUATRO ANCLAS AMARRADAS AL FIERRO DE LA CUADRÍCULA DEL MURO. POSTERIORMENTE SE COLABA EL ESPACIO ENTRE EL MURO Y EL PRECOLADO.

LA COLOCACIÓN DE LAS LOSAS SOBRE LA PARED SE REALIZÓ DE ABAJO HACIA ARRIBA, AL FINALIZAR LA COLOCACIÓN, ÉSTAS FUERON LIMPIADAS Y CUBIERTAS CON UNA SOLUCIÓN PROTECTORA.

JUAN O'GORMAN UTILIZÓ POSTERIORMENTE ESTA TÉCNICA EN EL CENTRO SCOP Y EL MURAL "FRATERNIDAD DE LOS PUEBLOS DE MÉXICO Y CHILE" LOCALIZADO EN EL PARQUE DE SAN CRISTÓBAL DE SANTIAGO DE CHILE.

EN CUANTO A LAS PIEDRAS UTILIZADAS POR JUAN O'GORMAN EN LA ELABORACIÓN DEL MOSAICO "REPRESENTACIÓN HISTÓRICA DE LA CULTURA" EN LA BIBLIOTECA CENTRAL DE CIUDAD UNIVERSITARIA, SE UTILIZARON PIEDRAS PROVENIENTES DE DISTINTOS LUGARES DEL PAÍS.

EL PROPIO O'GORMAN RELATA COMO LOCALIZÓ Y SELECCIONÓ LAS DIVERSAS CLASES DE PIEDRAS:

" CLARO ESTÁ QUE PARA HACER MOSAICOS ERA NECESARIO OBTENER PIEDRAS DE TODOS LOS COLORES POSIBLES. PARA TAL EFECTO, EMPREDÍ VIAJES POR TODA LA REPÚBLICA MEXICANA, DESPUÉS DE HABER CONSULTADO EL CASO CON UN VIEJO INGENIERO DE MINAS AMIGO DE MI PADRE, QUIEN ME INDICÓ LOS LUGARES DONDE PODRÍA ENCONTRAR PIEDRAS DE DIFERENTES COLORES. VISITÉ MUCHOS MINERALES Y CANTERAS PARA RECOGER MUESTRAS DE CADA UNO DE ELLOS, HACIENDO UNA COLECCIÓN INTEGRADA POR APROXIMADAMENTE 150 PIEDRAS DE DIFERENTES COLORES PARA OBTENER Y SELECCIONAR LOS QUE TUVIERAN LA MAYOR COLORACIÓN POSIBLE.

EN EL ESTADO DE GUERRERO ENCONTRÉ LOS AMARILLOS, LOS ROJOS Y LOS NEGROS (LOS AMARILLOS Y LOS ROJOS SON ÓXIDOS DE FIERRO), VARIOS COLORES VERDE TAMBIÉN LOS ENCONTRÉ EN LOS ESTADOS DE GUERRERO Y DE GUANAJUATO. EN EL ESTADO DE HIDALGO ENCONTRÉ PIEDRAS VOLCÁNICAS DE COLOR VIOLETA Y DOS CALCEDONIAS DE COLOR ROSA. NUNCA LOGRAMOS ENCONTRAR PIEDRA AZUL, A PESAR DE QUE ME HABÍAN INDICADO QUE PODRÍA ENCONTRAR

ESTE COLOR DE PIEDRA EN EL ESTADO DE ZACATECAS EN UNA MINA O SITIO LLAMADO "PINO SOLO".

EMPRENDÍ LA EXPEDICIÓN QUE REQUIRIÓ DOS DÍAS, ACOMPAÑADO POR GUÍAS Y PROVISTO DE MULAS HASTA DICHO SITIO LEJANO, ATRAVESANDO EL DESIERTO DE ZACATECAS. ALLÍ ENCONTRÉ, EFECTIVAMENTE UNA CALCEDONIA AZULOSA, PERO NO CON EL COLOR SUFICIENTE PARA USARSE EN LOS MOSAICOS COMO COLOR AZUL. EL COLOR DE ESTA CALCEDONIA ERA GRIS AZULOSO, NO LO SUFICIENTEMENTE DISTINTIVO, ADEMÁS DE LA DIFICULTAD PARA SU TRANSPORTE HASTA EL DISTRITO FEDERAL, QUE HABRÍA SIDO MUY GRANDE.

TAMBIÉN FUÉ POSIBLE EMPLEAR EL MÁRMOL BLANCO, DOS TONOS DE VERDES, UNO CLARO Y EL OTRO OSCURO QUE SE LOGRARON CONSEGUIR.

PARA EL AZUL EMPLEÉ EL VIDRIO COLOREADO EN TROZOS Y DESPUÉS TRITURADO COMO SI SE TRATARA DE PIEDRA, O BIEN HECHO EN PLACAS PARA USARLO, COMO SE UTILIZA EN LOS MOSAICOS DE VIDRIO.

CON LA GAMA DE COLORES ANTES DESCRITA, CON ESTA PALETA POR DECIRLO ASÍ, ERA POSIBLE HACER COMPOSICIONES PICTÓRICAS AL EXTERIOR DE LOS EDIFICIOS Y TENER LA CERTEZA Y LA SEGURIDAD DE QUE MIENTRAS PERDURARAN LAS PIEDRAS COLOCADAS EN EL MURO EN FORMA DE MOSAICO PERDURARÍAN TAMBIÉN LOS COLORES.

FUE NECESARIO RECURRIR A LAS PIEDRAS DE COLORES NATURALES PORQUE NO HAY EN NINGUNA PARTE DEL MUNDO COLORES QUE PUEDAN PINTARSE Y QUE RESISTAN A LA INTEMPERIE, LOS RAYOS SOLARES, LAS LLUVIAS Y LOS CAMBIOS DE TEMPERATURA EN EL EXTERIOR. EL MOSAICO DE PIEDRAS DE COLORES O DE VIDRIOS ES PERMANENTE PORQUE EL COLOR ES PARTE INTEGRAL DE LA ROCA QUE LO TIENE Y MIENTRAS DURE, EL COLOR DEL MOSAICO SERÁ PERMANENTE"

#### **DESCRIPCIÓN ICONOGRÁFICA DEL MURO DE LA CARA NORTE.**

COMO HA SIDO SEÑALADO POR ALGUNOS CRÍTICOS, EN ESTOS MOSAICOS SE DIÓ EL TRIUNFO DE LA ALEGORÍA Y EL SÍMBOLO, CON UN PROPÓSITO EMINENTEMENTE DECORATIVO, SOBRE EL MENSAJE POLÍTICO Y SOCIAL.

AQUÍ, O'GORMAN HACE GALA DE SU CAPACIDAD COMO ARTISTA, PERO TAMBIÉN COMO UN GRAN HISTORIADOR E INVESTIGADOR.

SEÑALA, RECURRIENDO A LA MITOLOGÍA PREHISPÁNICA, A LA CULTURA OCCIDENTAL Y AL MÉXICO REVOLUCIONARIO Y MODERNO, EL DEVENIR HISTÓRICO DE LA SOCIEDAD HUMANA Y SU CULTURA CUYA FUERZA MOTRIZ ES LA LUCHA DE CONTRARIOS.

#### **MURO NORTE.**

EN ESTE MURAL JUAN O'GORMAN LOGRA REMONTARNOS AL PASADO PREHISPÁNICO A BASE DE LOS ELEMENTOS Y SÍMBOLOS QUE COMPONEN ESTA MAGNÍFICA OBRA.

EL DISEÑO DEL MURAL SE ENCUENTRA REGIDO POR UN EJE TRANSVERSAL, AL CENTRO Y POR 2 EJES LONGITUDINALES, LOS CUALES HACEN DEL MURAL UNA OBRA ARMÓNICA Y CON UNA COMPOSICIÓN SIMÉTRICA ABSOLUTA.

EL EJE TRANSVERSAL QUE DIVIDE EL MURO EN LA PARTE CENTRAL NOS ENVUELVE EN EL MUNDO DEL DIOS SUPREMO, EN SUS ADVOCACIONES Y DUALIDADES QUE CONFORMAN ESTE MUNDO FANTÁSTICO, LAS RAÍCES DE MÉXICO. EL LADO DERECHO DEL MURAL DADO POR ESTE EJE SE COMPONE DE LAS DEIDADES Y SÍMBOLOS DE LA VIDA, LA FERTILIDAD, EL BIEN ETC. Y EL LADO IZQUIERDO POR LOS SÍMBOLOS DE LA MALDAD, LA MUERTE, ETC. LA CONFORMACIÓN DE ESTE EJE ESTÁ CONSTITUIDO DE ARRIBA HACIA ABAJO, POR EL SOL O LA ESTRELLA DE VENUS SIENDO AMBOS ADVOCACIONES DE QUETZALCÓATL. EL DISEÑO DE ESTA DEIDAD, A BASE DE RAYOS, NOS CONDUCE HACIA UNOS DISCOS QUE NOS SUGIEREN LOS YA TRADICIONALES LENTES DE TLÁLOC, ES DECIR EL DIOS DE LA LLUVIA.

EL SOL TOCA CON UNO DE SUS RAYOS UN ENORME PEDERNAL DE SACRIFICIOS EN EL CUAL APARECEN LOS SIGNOS DE LOS MESES DEL CALENDARIO NÁHUATL Y LA RELACIÓN DE ESTOS SÍMBOLOS CON LA DUALIDAD DEL DÍA Y LA NOCHE.

DE LOS EXTREMOS DEL PEDERNAL SURGEN DOS MANOS, LA PALMA IZQUIERDA LLEVA UNA SIMIENTE Y LA DERECHA UN CHORRO DE SANGRE DE AUTOSACRIFICIO.

EN LA PARTE INFERIOR DEL PEDERNAL, APARECEN DOS SEÑORES SENTADOS FRENTE A UN TEMPLO CONTEMPLANDO LA FUNDACIÓN DE TENOCHTITLÁN, LA CUAL ES REPRESENTADA COMO ES TRADICIONAL CON EL ÁGUILA PARADA EN UN NOPAL DEVORANDO UNA SERPIENTE. EL NOPAL SALE DE UN CERRO QUE LLEVA EN SU PARTE ANTERIOR EL ESCUDO DE LA GUERRA, Y SE ASIENTA SOBRE LAS FAUCES ESTILIZADAS DEL MONSTRUO DE LA TIERRA.

ASÍ PUES PODEMOS VER QUE SE ENCUENTRAN REUNIDOS EN LA PARTE MEDIA DEL MURAL LAS DEIDADES, SÍMBOLOS, RITOS Y ELEMENTOS MÁS IMPORTANTES QUE REGÍAN LA AGRICULTURA, ACTIVIDAD PRIMORDIAL DE LOS ANTIGUOS MEXICAS.

LOS OTROS DOS EJES LONGITUDINALES SE IDENTIFICAN POR CORRIENTES O CANALES DE AGUA EN COLOR AZUL EN LAS QUE APARECEN CANOAS, PECES, CARACOLES Y CULEBRAS, ELEMENTOS QUE HACEN REFERENCIA AL CARÁCTER LACUSTRE DE LA ANTIGUA TENOCHTITLÁN. A CONTINUACIÓN SE ENCUENTRAN REPRESENTADOS LOS SÍMBOLOS DE LAS CIUDADES PRINCIPALES QUE BORDEABAN EL LAGO DE MÉXICO ES DECIR COYOACÁN, CHURUBUSCO, IXTAPALAPA, XOCHIMILCO, ATZCAPOTZALCO Y TACUBA.

AL LADO IZQUIERDO DEL MURAL APARECEN DEIDADES Y ESCENAS QUE TIENEN RELACIÓN CON LOS ASPECTOS MÁS LUMINOSOS Y POSITIVOS DE LA VIDA. EN LA PARTE SUPERIOR TENEMOS LA SIMBOLOGÍA DEL SOL LA CUAL TIENE EN SU INTERIOR LA DUALIDAD DEL DÍA Y LA NOCHE. JUNTO A ÉSTE APARECE QUETZALCÓATL, CUYO NOMBRE SIGNIFICA "SERPIENTE EMBLUMADA" Y SE ENCUENTRA REPRESENTADO POR UNA SERPIENTE EMBLUMADA Y DECORADA CON ELEMENTOS COMO EL MAÍZ QUE REPRESENTA FERTILIDAD Y DE VIRGULAS ENLAZADAS QUE SIMBOLIZAN EL FUEGO. EN LA PARTE POSTERIOR DEL CUERPO DE LA SERPIENTE SE LOCALIZAN DOS DEIDADES AZTECAS: LA PRIMERA ES TLÁLLOC, EL DIOS DE LA LLUVIA, QUIEN APARECE ENTRE UNA PLANTA DE MAÍZ SITUADA A SUS ESPALDAS Y CON UN MANANTIAL SOBRE SU CABEZA. LA OTRA DEIDAD REPRESENTA A QUETZALCÓATL EN SU FORMA HUMANA.

EN LA PARTE MEDIA DEL LADO IZQUIERDO ENTRE LAS DOS CORRIENTES DE AGUA SE ENCUENTRA LA DIOSA TLAZOLTÉOTL, DIOSA DEL PARTO, CUSTODIADA POR EL ÁGUILA SOLAR Y EL TIGRE DE LA NOCHE.

A LA IZQUIERDA DE ESTA DIOSA APARECE EHÉCATL, EL DIOS DEL VIENTO, SE ENCUENTRA EN EL INTERIOR DE SU TEMPLO Y SOPLANDO A TRAVÉS DE UN CARACOL (SÍMBOLO DE ESTE DIOS PARA LOS ANTIGUOS MEXICAS). EN LA PARTE INFERIOR SE ENCUENTRA UNA FRANJA QUE REPRESENTA UNA CEREMONIA RITUAL EN LA QUE SE APRECIA A UN SACERDOTE RODEADO DE MÚSICOS Y DANZANTES CON SUS ATUENDOS RITUALES.

LA COMPOSICIÓN DEL LADO DERECHO DEL MURAL REPRESENTA EL MUNDO DEL MISTERIO, DE LO OSCURO, DEL MAL Y DE LA MUERTE. LA PARTE SUPERIOR DE ESTE CUERPO, NUEVAMENTE REPRESENTA A LA DEIDAD QUETZALCÓATL QUE, A DIFERENCIA DEL LADO IZQUIERDO, SE ENCUENTRA DECORADA CON DISCOS DE CHALCHIHUITES, SÍMBOLO DEL JADE O PIEDRA PRECIOSA, Y SECCIONES DE CARACOL. AL LADO DERECHO DE ESTA DEIDAD SE ENCUENTRA LA LUNA EN CUYO

INTERIOR SE REPRESENTA UN CONEJO, SÍMBOLO CELESTE DE LA CULTURA PREHISPÁNICA.

EN LA PARTE INFERIOR DE LA REPRESENTACIÓN DE QUETZALCÓATL SURGE EL DIOS TEZCATLIPOCA, EL TEMIDO DIOS DE LA FATALIDAD; APARECE RICAMENTE ATAVIADO. EN LUGAR DEL PIE DERECHO, QUE FUE DEVORADO POR CIPACTLI O LAGARTO MITOLÓGICO QUE ENCARNA LA CORTEZA TERRESTRE, LLEVA UN ESPEJO HUMEANTE, DE DONDE SE DERIVA SU NOMBRE. EN ESTE TERRIBLE ESPEJO SE REFLEJA LO QUE LOS HUMANOS OCULTAN EN LO MAS RECÓNDITO DE SU ALMA. JUNTO A ESTA DEIDAD SE LOCALIZA, ENFATIZANDO TODA SU MALDAD, UNA CALAVERA.

ATRÁS DE ÉL, Y UN POCO MAS ABAJO APARECE CHALCHIUHTLÍCUE, DIOSA DEL AGUA, HERMANA DE TLÁLOC DIOS DE LA LLUVIA.

EN LA PARTE INFERIOR MEDIA DEL MURAL SE ENCUENTRA LA REPRESENTACIÓN DE QUETZALCÓATL, QUIEN ENCIERRA UNA DUALIDAD: LA SERPIENTE Y EL PÁJARO REPRESENTAN ELEMENTOS OPUESTOS, LA TIERRA Y EL AIRE. HAY QUE RECORDAR TAMBIÉN QUE EL SUFIJO "COATL", ADEMÁS DE SIGNIFICAR SERPIENTE, ERA SINÓNIMO DE "HERMANOS GEMELOS". EL NOMBRE QUETZALCÓATL, POR LO TANTO, PUEDE TAMBIÉN TRADUCIRSE ESOTÉRICAMENTE COMO "LOS GEMELOS PRECIOSOS". QUETZALCÓATL APARECE EN ESTA REPRESENTACIÓN COMO SU HERMANO GEMELO MICTLANTECUHTLI, QUIEN POSEE DOMINIO SOBRE EL MUNDO INFERIOR. ELLOS SON TESIS Y ANTÍTESIS, EL DIOS DE LA MUERTE UNIDO CON EL DIOS CREADOR, FORMAN EL SISTEMA DE UNA FILOSOFÍA RELIGIOSA CUYO DUALISMO ESTÁ CLARAMENTE SIMBOLIZADO.

AL FINALIZAR LA ICONOGRAFÍA DEL LADO DERECHO DEL MURAL, EN LA PARTE INFERIOR DE LA DEIDAD ANTES DESCRITA, SURGE LA REPRESENTACIÓN DE UN CONJUNTO DE GUERREROS CUBIERTOS DE PIELES DE ANIMALES Y ARMADOS DE MACANAS Y CHIMALLIS, ES DECIR, ESCUDOS.

FIG. 15. MURO NORTE DE LA BIBLIOTECA CENTRAL.

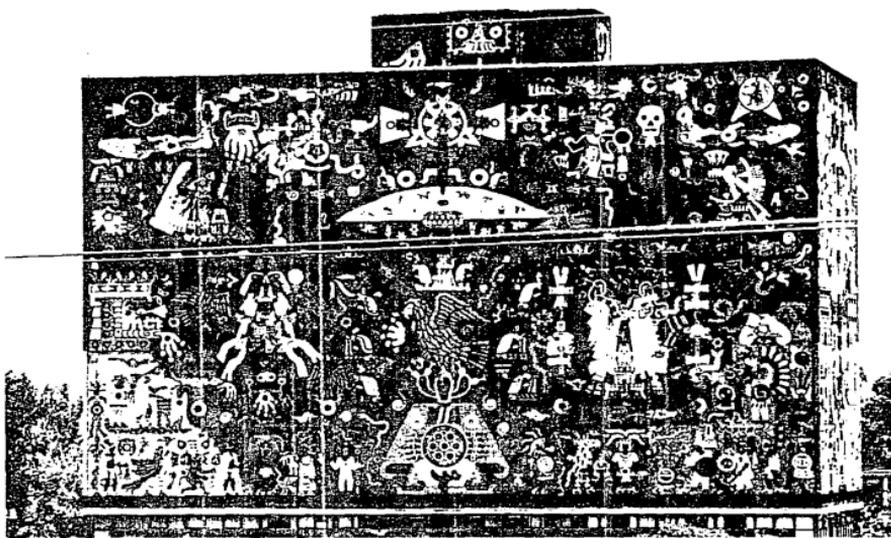
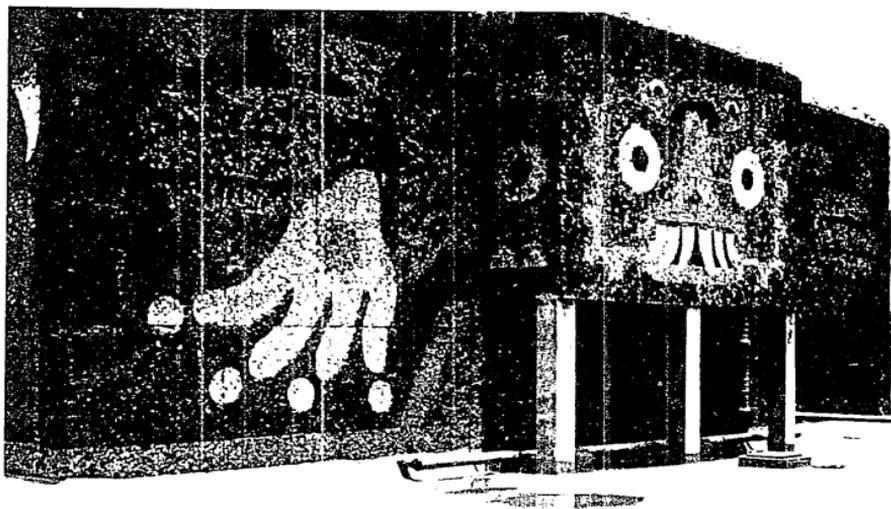


FIG. 16 PARTE NORTE DEL REMATE DEL EDIFICIO.



## RESULTADOS

### III.2.1. REPORTE DE POTENCIALES DE MEDIA CELDA.

#### ESTRUCTURA ANALIZADA:

PARTE NORTE DEL REMATE DEL MURAL "REPRESENTACIÓN HISTÓRICA DE LA CULTURA" DE LA BIBLIOTECA CENTRAL DE LA U.N.A.M.

#### 1. TIPO DE CELDA USADA:

LA MEDIA CELDA USADA FUÉ UNA DE COBRE-SULFATO DE COBRE DE 3.5 cms. DE DIÁMETRO INTERIOR, TAL Y COMO LO SEÑALA LA NORMA ASTM-C-876-87-10, EXCEPTO POR QUE NO CUENTA CON DISPOSITIVO DE UNIÓN ELÉCTRICA NI SOLUCIÓN PARA EL CONTACTO ELÉCTRICO COMO LO INDICA EN EL PUNTO 2 Y 3 DE LA PARTE DE EQUIPO ).

#### 2. TEMPERATURA PROMEDIO:

20 °C.

#### 3. MÉTODO DE HUMIDIFICACIÓN DEL CONCRETO Y TIPO DE UNIÓN DEL VOLTMETRO AL ACERO DE REFUERZO.

SE HICIERON MEDICIONES DE POTENCIAL EN DIVERSAS PARTES DE LA ESTRUCTURA EN SECO Y SE OBSERVÓ QUE ESTE NO ERA ESTABLE, ES DECIR, VARIABA, POR LO QUE SE PROCEDIÓ A MOJAR LA ESTRUCTURA CON UNA BANDEJA.

CON RESPECTO AL TIPO DE UNIÓN ENTRE EL VOLTMETRO Y EL CONCRETO, SE CONECTÓ UN EL EXTREMO DE UN CABLE CON UNA PINZA A UNA VARILLA, PREVIAMENTE LIJADA, Y EL OTRO EXTREMO SE CONECTÓ A LA TERMINAL NEGATIVA DEL VOLTMETRO.

#### 4. RESULTADOS:

A CONTINUACIÓN SE MUESTRA EL DIAGRAMA DE UBICACIÓN DE LOS PÁNELES, Y LA MANERA EN QUE FUERON CLASIFICADOS PARA EL BARRIDO.

CABE DESTACAR QUE EL ESPACIADO ENTRE LECTURAS FUÉ DE 25 cms.

FIG. 17 CLASIFICACIÓN DE LOS PANELES



**TABLA VIII. MATRIZ DE BARRIDO DE POTENCIALES DE LA ESTRUCTURA\*.**  
(mV / ELECTRODO Cu/CuSO<sub>4</sub>)

	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9
N1,1	290	280	250	210	190	170	220		
N1,2	330	220	230	200	200	170	130		
N1,3	490	210	240	190	190	160	140		
N1,4	460	300	210	250	200	190	150		
N1,5	510	280	260	240	210	180	160		
N1,6	420	320	220	200	260	260	210		
N1,7	450	310	220	240	360	240	200		
N1,8	600	300	200	270	320	250	210		
N1,9	620	320	200	290	330	250	210		
N1,10	440	390	360	310	310	290	270		
N1,11	420	350	370	330	300	270	240		
N1,12	390	410	350	320	310	280	250		
N1,13	510	400	340	320	330	270	260		
N1,14	500	420	360	340	370	290	240		
N1,15	450	320	380	360	350	280	250		
N1,16	500	360	390	350	340	280	230		
N1,17	610	390	320	350	350	260	250		
N1,18	460	400	310	310	270	300	299		
N1,19	310	350	310	270	290	310	320		
N1,20	340	350	300	290	210	260	250		
N1,21	360	350	290	320	320	320	250	310	320
N1,22	360	340	300	340	370	320	300	360	380
N1,23	500	360	250	300	310	340	360	430	410
N1,24	500	320	320	300	300	290	360	350	380
N1,25	600	750	370	360	320	290	330	270	210
N1,26	400	450	420	320	370	300	320	280	230
N1,27	350	460	460	300	310	300	300	240	240
N1,28	310	380	310	310	300	300	300	270	220
N1,29	320	280	360	370	320	280	290	300	290
N1,30	300	320	370	390	320	300	340	250	320
N1,31	310	280	340	340	360	270	320	260	200
N1,32	320	290	330	310	350	250	300	250	180
N1,33	300	300	300	300	330	250	300	250	250
N1,34	290	290	-	300	340	240	280	260	250
N1,35	280	290	-	280	330	250	280	270	270
N1,36	280	300	-	300	320	250	310	310	300
N1,37	330	350	310	320	320	310	320	300	300
N1,38	360	420	360	340	330	330	330	340	330
N1,39	340	385	330	330	300	330	310	310	290

\* NOTA: TODOS LOS VALORES DE POTENCIALES DE MEDIA CELDA SON NEGATIVOS.

FIG. 18. MAPA DE CONTORNO EQUIPOTENCIAL.

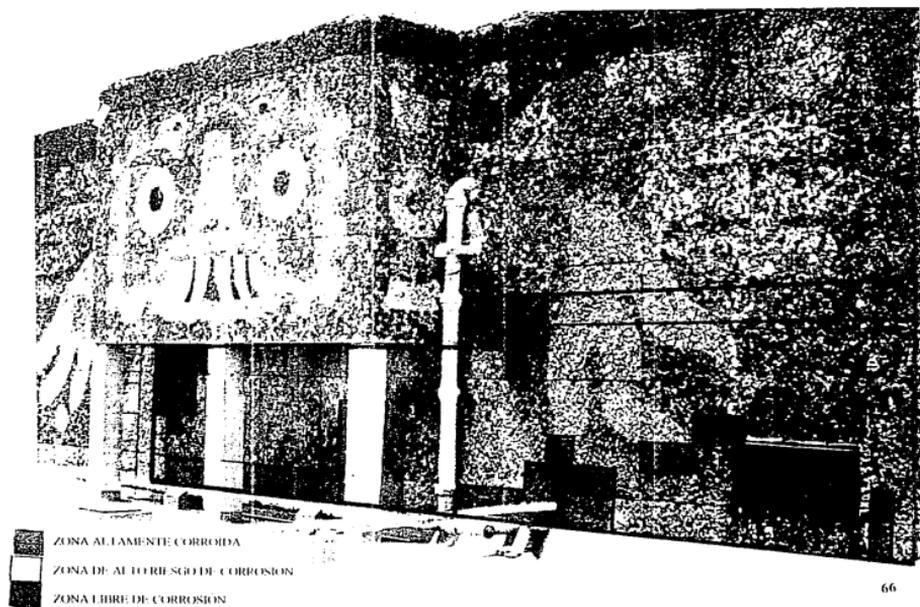
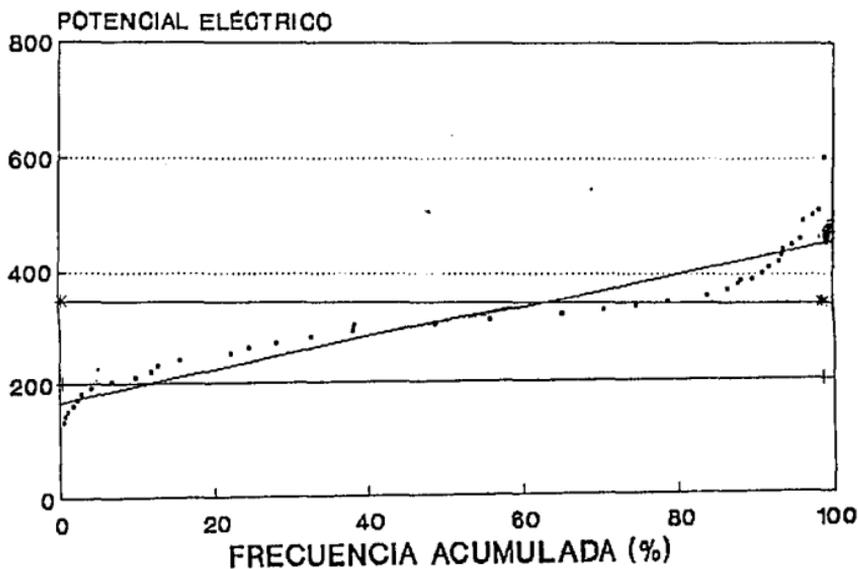


FIG. 19. DIAGRAMA DE FRECUENCIA ACUMULADA DE LOS POTENCIALES DE MEDIA CELDA.



5. PORCENTAJE DE LOS VALORES DE MEDIA CELDA MAS NEGATIVOS QUE -350 mV.  
UN 16.179% DE LAS LECTURAS SON MÁS NEGATIVOS QUE -350 mV.
6. PORCENTAJE DE VALORES DE MEDIA CELDA MENOS NEGATIVOS QUE -200 mV.  
EL PORCENTAJE DE LECTURAS MENOS NEGATIVAS QUE -200 mV ES DE 4.207%.

### III.2.2 REPORTE DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.

#### ESTRUCTURA ANALIZADA:

LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL CONCRETO NO SE PUDO EFECTUAR SOBRE LA MISMA PARTE SUPERIOR DEL REMATE DE LA CARA NORTE DEL MURAL, DADO EL VALOR HISTÓRICO DEL MISMO, PORQUE IMPLICABA EFECTUAR PEQUEÑAS INCISIONES; POR LO QUE SE DECIDIÓ TOMAR TRES MUESTRAS DE CONCRETO DESPRENDIDAS DE LA PARTE SUPERIOR DEL MURO DE LA CARA NORTE, SUPONIENDO QUE TIENE LA MISMA EDAD, QUE ES DEL MISMO TIPO, Y HA ESTADO EXPUESTO A LOS MISMOS AGENTES AGRESIVOS QUE AL REMATE DEL MURAL EN LA PARTE NORTE.

#### 1. TIPO DE ELECTRODOS USADOS:

LOS ELECTRODOS USADOS FUERON CUATRO DE COBRE/SULFATO DE COBRE, COMO SE ESPECIFICA EN EL MÉTODO PROPUESTO.

#### 2. TIPO DE APARATO EMPLEADO EN LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA DEL CONCRETO:

SOIL RESISTANCE METER, MODEL 400, NILSSON ELECTRICAL LABORATORY INC.

#### 3. RESULTADOS:

##### III.2.2. a) LA RESISTIVIDAD DE LAS PIEZAS EN SECO.

T amb: 22 °C

PIEZA No.	RESISTENCIA (K $\Omega$ )	RESISTIVIDAD (K $\Omega$ -cm):
1	9.1	57.18
2	8.5	53.41
3	5.2	32.67

##### III.2.2.b) RESISTIVIDAD DE LAS PIEZAS COLOCADAS EN UN DESECADOR CON AGUA DESTILADA DURANTE 168 HS.

T amb: 22 °C

PIEZA No.	RESISTENCIA (K $\Omega$ )	RESISTIVIDAD (K $\Omega$ -cm)
1	2.5	15.71
2	2.4	15.08
3	3.0	18.85

III.2.2.c) RESISTIVIDAD DE LAS PIEZAS COLOCADAS EN UN DESECADOR CON AGUA DURANTE 168 HS., SEGUIDO DE UNA INMERSIÓN EN AGUA DESTILADA DURANTE 10 MIN.

T amb: 22 °C

PIEZA No.	RESISTENCIA (K $\Omega$ )	RESISTIVIDAD (K $\Omega$ -cm)
1	2.3	14.45
2	2.0	12.56
3	2.0	12.56

III.2.2.d) RESISTIVIDAD DE LAS PIEZAS COLOCADAS EN UN DESECADOR CON AGUA DURANTE 168 HS., SEGUIDO DE UNA INMERSIÓN EN AGUA DESTILADA DURANTE 24 HS. CON 10 MIN.

T amb: 25 °C

PIEZA No.	RESISTENCIA (K $\Omega$ )	RESISTIVIDAD (K $\Omega$ -cm)
1	2.0	12.56
2	1.8	11.31
3	0.65	4.08

III.2.2.e).RESISTIVIDAD DE LAS PIEZAS COLOCADAS EN UN DESECADOR CON AGUA DURANTE 168 HS. SEGUIDO DE UNA INMERSIÓN EN AGUA DESTILADA DURANTE 168 HS. CON 10 MIN.

T amb: 21 °C

PIEZA No.	RESISTENCIA (K $\Omega$ )	RESISTIVIDAD (K $\Omega$ -cm)
1	0.9	5.65
2	1.6	10.05
3	0.39	2.45

III.2.2.f).RESISTIVIDAD DE LAS PIEZAS COLOCADAS EN UN DESECADOR CON AGUA DURANTE 168 HS. SEGUIDO DE UNA INMERSIÓN EN AGUA DESTILADA DURANTE 1536 HS. CON 10 MIN.

T amb: 20 °C

PIEZA No.	RESISTENCIA (K $\Omega$ )	RESISTIVIDAD (K $\Omega$ -cm)
1	0.8	5.03
2	1.6	10.05
3	0.9	5.65

### **III.2.3 REPORTE DE LA DETERMINACIÓN DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN.**

#### **ESTRUCTURA ANALIZADA:**

LA MISMAS PIEZAS UTILIZADAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD.

- LA APLICACIÓN DE LA FENOLFTALEÍNA SE EFECTUÓ POR MEDIO DE UN GOTERO SOBRE TODA LA SUPERFICIE DE LA MUESTRA.

- EL ESPESOR DE LA CAPA DE CONCRETO QUE CUBRE LA VARILLA ES DE APROXIMADAMENTE 25 mm. PARA CADA UNA DE LAS TRES MUESTRAS.

CON RESPECTO AL FRENTE DE CARBONATACIÓN SE OBSERVÓ QUE EN LAS TRES MUESTRAS, DESPUÉS DE APLICAR LA FENOLFTALEÍNA, NO HUBO VARIACIÓN DE COLOR; DE ESTO SE DESPRENDE QUE EL FRENTE DE CARBONATACIÓN ES DE 25 mm.

### III.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

DEL MAPA EQUIPOTENCIAL SE PUEDE APRECIAR QUE UNA GRAN PARTE, EL 16.7%, DEL MURAL ESTUDIADO SE ENCUENTRA BAJO CONDICIONES GRAVES DE CORROSIÓN, PUES EL POTENCIAL ES MÁS NEGATIVO DE -350 mV; MIENTRAS QUE UN 79.614 % SE ENCUENTRA BAJO CONDICIONES DE CORROSIÓN. SÓLO UN 4.207 SE ENCUENTRA LIBRE DEL PROCESO DE CORROSIÓN.

CON RESPECTO A LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS MUESTRAS, ESTÁ CLARO QUE LA RESISTIVIDAD DEL CONCRETO COMPLETAMENTE SECO ES MAYOR DE 32 K $\Omega$ .cm, POR LO QUE BAJO ESTAS CONDICIONES NO AVANZA EL PROCESO DE CORROSIÓN; SIN EMBARGO, AL HUMEDECER LAS MUESTRAS DURANTE AL MENOS 10 MINUTOS LA RESISTIVIDAD DISMINUYE LO SUFICIENTE PARA PERMITIR EL PROGRESO DE LA REACCIÓN.

FINALMENTE, EL FRENTE DE CARBONATACIÓN MUESTRA QUE TODA LA CAPA DE CONCRETO QUE RECUBRE LA VARILLA DE REFUERZO SE ENCUENTRA COMPLETAMENTE CARBONATADA.

### III.4 CONCLUSIONES.

- EL CONCRETO REFORZADO ESTÁ FORMADO POR CONCRETO Y VARILLA DE ACERO. A SU VEZ, EL CONCRETO ESTÁ COMPUESTO POR LA MEZCLA DE CEMENTO, ARENA, GRAVA, AGUA, Y ADITIVOS (EN ALGUNOS CASOS). LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO REFORZADO ESTÁN DETERMINADAS POR LAS PROPIEDADES DE CADA UNO DE SUS COMPONENTES POR EJEMPLO, EL CONCRETO ES RESISTENTE A LOS ESFUERZOS DE COMPRESIÓN, MIENTRAS QUE EL ACERO ES RESISTENTE A LOS ESFUERZOS DE FLEXIÓN; POR LO TANTO, EL CONCRETO REFORZADO TIENE MEJOR RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN QUE EL ACERO SOLO Y MEJOR RESISTENCIA A LA FLEXIÓN QUE EL CONCRETO POR SÍ SOLO.

OTRA DE LAS FUNCIONES DEL CONCRETO ES LA DE ACTUAR COMO UNA DEFENSA FÍSICA Y QUÍMICA QUE PROTEGE A LA VARILLA DE ACERO DE REFUERZO CONTRA LOS AGENTES AGRESIVOS PRESENTES EN EL MEDIO AMBIENTE O MEDIO DE SERVICIO. EL ELEVADO VALOR DE pH (MAYOR DE 13.5) DEL CEMENTO QUE CUBRE LA VARILLA, ASÍ COMO LA SOLUCIÓN PORO, FORMADA PRINCIPALMENTE POR IONES SODIO Y POTASIO PROVENIENTES DE LOS ÓXIDOS ALCALINOS Na<sub>2</sub>O Y K<sub>2</sub>O EN EQUILIBRIO CON IONES OH, PROPORCIONAN AL ACERO UNA PELÍCULA PASIVANTE FORMADA PRINCIPALMENTE POR MAGNETITA (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), Y EN MENOR GRADO POR HEMATITA (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Y WUSTITA (FeO). ESTA PELÍCULA DELGADA PROTEGE AL ACERO CONTRA LA DISOLUCIÓN ANÓDICA.

LA CARBONATACIÓN NO SE CONSIDERA COMO UNA CAUSA SUFICIENTE PARA QUE SE PRODUZCA LA CORROSIÓN PERO CONSIDERANDO QUE ES UNA REACCIÓN DE NEUTRALIZACIÓN ENTRE LOS PRODUCTOS DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO (PRINCIPALMENTE HIDRÓXIDO DE CALCIO Y ALUMINATOS, SIENDO EL PRIMERO UNA BASE FUERTE,) Y EL DIÓXIDO DE CARBONO, CONSIDERADO UN ÁCIDO DÉBIL, SE

PRODUCE UN DESCENSO DEL VALOR DEL pH, PUDIENDO LLEGAR A SER MENOR A 9. LA CAÍDA DEL pH TRAE COMO CONSECUENCIA QUE DESAPAREZCA LA PELÍCULA PASIVANTE, CON LO CUAL EL ACERO PIERDE SUS DEFENSAS Y QUEDA A MERCED DE LOS AGENTES AGRESIVOS PRESENTES, PUDIENDO TENER LUGAR LA CORROSIÓN DEL ACERO A UN pH DE APROXIMADAMENTE 11.4, AUNQUE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN SEA PEQUEÑA.

CABE SEÑALAR QUE LA REACCIÓN DE CARBONATACIÓN PRODUCE UN INCREMENTO TOTAL DEL SÓLIDO DE 9%, LO QUE CAUSA QUE LA POROSIDAD, Y EN ALGUNOS CASOS LA PERMEABILIDAD, DISMINUYA. ASÍ MISMO, LA CARBONATACIÓN PRODUCE UNA CONTRACCIÓN EN EL CONCRETO CAUSADA, PROBABLEMENTE, POR LA DISOLUCIÓN DE LOS CRISTALES DE HIDRÓXIDO DE CALCIO. TAMBIÉN AUMENTA EL ESFUERZO DE COMPRESIÓN; TALES ESFUERZOS PUEDEN SER SOBREPASADOS POR LOS PRODUCTOS DE LA CORROSIÓN, ENTRE LOS QUE SE ENCUENTRAN:  $Fe_3O_4$ ,  $Fe(OH)_2$ ,  $Fe(OH)_3$  Y  $Fe(OH)_3 \cdot 3H_2O$ , LOS CUALES OCUPAN UN VOLUMEN DE APROXIMADAMENTE 2, 3.5, 4 Y 6 VECES EL VOLUMEN DEL ACERO RESPECTIVAMENTE. SI LOS ESFUERZOS GENERADOS POR LOS PRODUCTOS DE LA CORROSIÓN REBASAN LOS ESFUERZOS DE COMPRESIÓN GENERAN CUARTEADURAS EN EL CONCRETO.

CON RESPECTO A LA ESTRUCTURA ANALIZADA SE PUEDE SEÑALAR QUE EN TÉRMINOS GENERALES GUARDA UN ESTADO CRÍTICO; PUES, POR UN LADO, LAS LECTURAS DE LOS POTENCIALES DE MEDIA CELDA MUESTRAN QUE SÓLO UN 4.207 % DE LA SUPERFICIE ANALIZADA SE ENCUENTRA LIBRE DE CORROSIÓN, UN 79.614 % PRESENTA UN ESTADO DE CORROSIÓN QUE CONSIDERO RIESGOSO Y UN 16.179 % GUARDA UN ESTADO CONSIDERADO COMO CRÍTICO.

POR OTRA PARTE, EL REPORTE DE LOS VALORES DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS MUESTRAS SE PUEDE APRECIAR QUE DESPUÉS DE PERMANECER DURANTE 168 HORAS BAJO UNA ATMÓSFERA SATURADA Y Y SUMERGIDAS DURANTE 10 MIN. EN AGUA DESTILADA YA SE PUEDE CONSIDERAR SUFICIENTE PARA PERMITIR EL DESARROLLO DEL PROCESO DE CORROSIÓN, PUES EL VALOR DE RESISTIVIDAD YA DESCENDIÓ HASTA 12  $K\Omega$  cm. ESTO NOS INDICA QUE REALMENTE LA ESTRUCTURA NO NECESITA ESTAR EXPUESTA A CONDICIONES DE HUMEDAD DURANTE BASTANTE TIEMPO PARA PERMITIR EL PROGRESO DE LA CORROSIÓN. LO QUE SÍ ES IMPORTANTE RECALCAR ES EL HECHO DE QUE EN EL MOMENTO EN QUE SE SATURAN LOS POROS CON AGUA PROVENIENTE DE LA HUMEDAD O LLUVIA SE DETIENE TEMPORALMENTE EL PROCESO DE CARBONATACIÓN HASTA QUE SE EVAPORE UNA CANTIDAD TAL QUE PERMITA LA ENTRADA DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN LOS POROS Y SU DISOLUCIÓN PARCIAL EN LA SOLUCIÓN PORO

CON RESPECTO AL FRENTE DE CARBONATACIÓN CABE SEÑALAR QUE LAS MUESTRAS TIENEN UN ESPESOR DE CONCRETO DE APROXIMADAMENTE 2.5 cm. LAS CUALES, AL APLICAR LA FENOLFTALEÍNA, MOSTRARON UN FRENTE DE CARBONATACIÓN IGUAL AL DE LA CAPA DE CONCRETO QUE PROTEGE AL ACERO. ESTO ES, LA VARILLA SE ENCUENTRA PRÁCTICAMENTE SIN DEFENSAS. CABE DESTACAR QUE LA POSICIÓN DE LAS VARILLAS NO ES UNIFORME A LO LARGO DE LAS MUESTRAS, PRESENTANDO UN MAYOR O MENOR ESPESOR A LO LARGO DE CADA UNA DE LAS MUESTRAS. DE ESTO SE DESPRENDE QUE LOS BLOQUES NO FUERON CUIDADOSAMENTE ELABORADOS, Y QUIZÁ NO SE LE PRESTO MAYOR ATENCIÓN A

ESTE TIPO DE DETALLES, ENTRE LOS QUE PRESUMO SE ENCUENTRAN, ENTRE OTROS, LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO (W/C). ESTO ES, QUE NO TIENE LAS MISMAS PROPIEDADES EL MURAL EN TODOS LAS LOSAS, PUES FUERON ELABORADAS POR DIFERENTES PERSONAS. A PESAR DE ESTO, SE PUEDE INFERIR QUE EL ESTADO QUE GUARDA EL RESTO DEL MURAL SE ENCUENTRA EN CONDICIONES SEMEJANTES, AÚN CUANDO HAYA HABIDO PEQUEÑAS VARIACIONES EN SUS PROPIEDADES AL MOMENTO DE CONSTRUIRLO.

CONSIDERO IMPORTANTE SEÑALAR QUE TANTO EL PROCESO DE CARBONATACIÓN COMO EL PROCESO DE CORROSIÓN NO SON CONTINUOS, PERO SUS EFECTOS SON ACUMULABLES; ES DECIR, PUEDEN AVANZAR DE MANERA INTERMITENTE MIENTRAS LAS CONDICIONES LO PERMITAN. SIN EMBARGO EL FRENTE DE CARBONATACIÓN PUEDE MANTENERSE A RAYA Y EN OTROS CASOS LOGRAR QUE RETROCEDA; MIENTRAS QUE LA CORROSIÓN DEL ACERO NO (VER ANEXO I, PARA LA REPARACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO).

ES POSIBLE OBTENER OBTENER ESTRUCTURAS DE CONCRETO QUE CUMPLAN CON FUNCIONES DE ANTEMANO REQUERIDAS Y CON CIERTAS CARACTERÍSTICAS DESEADAS, ASÍ COMO PREVEER EL TIEMPO DE VIDA ÚTIL. EL CONCRETO PUEDE SER DISEÑADO PARA TAL O CUAL FIN, CONOCIENDO DE ANTEMANO LAS PROPIEDADES DE CADA UNO DE LOS COMPONENTES, ASÍ COMO EL MEDIO DE SERVICIO.

CABE DESTACAR QUE AÚN CUANDO UNA ESTRUCTURAS SE PROYECTE PARA UN TIEMPO DADO NO IMPLICA QUE NO DEBA RECIBIR MANTENIMIENTO DURANTE TODO ESE TIEMPO O QUE EL ESTIMADO SEA EXACTO, PUES AÚN CUANDO SE PUEDAN CONOCER CON EXACTITUD LAS PROPIEDADES DE CADA COMPONENTE, EL ESTIMADO DEPENDE TAMBIÉN, EN GRAN MEDIDA, DE LOS FACTORES AMBIENTALES Y ÉSTOS NO SE PUEDEN PREDECIR CON EXACTITUD.

## APÉNDICE I.

### A.I. REPARACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO.

ES MUY IMPORTANTE QUE TODA ESTRUCTURA DE CONCRETO RECIBA MANTENIMIENTO. SERÍA IDEAL QUE UNA ESTRUCTURA FUERA DISEÑADA PARA RESISTIR CUALQUIER ATMÓSFERA Y PRESERVARA SUS PROPIEDADES; SI EMBARGO, LA REALIDAD ES MUY DIFERENTE, LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO REQUIEREN DE MANTENIMIENTO.

EL MANTENIMIENTO PUEDE SER PREDICTIVO O CORRECTIVO.

EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO ES AQUEL QUE SE LE PROPORCIONA A UNA ESTRUCTURA PARA PRESERVAR LAS PROPIEDADES LO MÁS CERCANAS A LAS DESEADAS MEDIANTE EL USO DE ADITIVOS EN EL CONCRETO AL MOMENTO DE PREPARARLO Y EL USO DE SUSTANCIAS QUE IMPIDAN EL PASO DE LOS AGENTES AGRESIVOS (IMPERMEABILIZANTES), ENTRE OTROS.

EL MANTENIMIENTO CORRECTIVO CONSISTE EN, UNA VEZ PRESENTADO EL PROCESO DE CORROSIÓN Y HABIENDO UNA DIFERENCIA NOTABLE ENTRE LAS PROPIEDADES ORIGINALES Y LAS ACTUALES, TRATAR DE DEVOLVER AL CONCRETO SUS PROPIEDADES ORIGINALES.

EL CONCRETO HA SIDO TRADICIONALMENTE REPARADO POR SUSTITUCIÓN DE LAS PARTES DAÑADAS

LAS REPARACION CON MORTEROS TIENE ENTRE OTRAS FUNCIONES:

- RESTAURAR EL AMBIENTE ALCALINO. ESTA RESTAURACIÓN DEL SUSTRATO CARBONATADO PODRÍA IMPLICAR UNA DIFUSIÓN DE MATERIA ALCALINA.

- DE MANERA ALTERNATIVA, LA REPARACIÓN, PUEDE PROPORCIONAR PROTECCIÓN PASIVANTE AL IMPEDIR LA LLEGADA DE OXÍGENO A LA VARILLA DE REFUERZO Y PREVENIR EL CONTACTO ENTRE EL AGUA Y EL REFUERZO.

- PROPORCIONAR UNA BARRERA DURABLE PARA EVITAR EL INGRESO DE AGENTES AGRESIVOS DEL EXTERIOR. POR EJEMPLO, PREVIENE LA RENOVACIÓN DE LA CARBONACIÓN DURANTE EL RESTO DE LA VIDA ÚTIL DE LA ESTRUCTURA. ESTO PODRÍA LLEVARSE A CABO POR EL MORTERO DE REPARACIÓN SOLO, O EN COMBINACIÓN CON CON OTRAS MEDIDAS DE REPARACIÓN.

#### A.I.I. REPARACIÓN DE LA DEGRADACIÓN CAUSADA POR LA CORROSIÓN INICIADA POR CARBONATACIÓN.

LA CORROSIÓN DEL REFUERZO DEL CONCRETO DEBIDO A LA CARBONATACIÓN ES UNA DE LOS PRINCIPALES FACTORES DE LA CORROSIÓN.

EN GENERAL, LA REPARACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS AFECTADAS POR CARBONATACIÓN ES MUCHO MENOS COMPLICADA QUE LA QUE SE LLEVA A CABO PARA ESTRUCTURAS CON CORROSIÓN INICIADA POR ATAQUE DE CLORUROS. ESTO SE DEBE PRINCIPALMENTE A QUE EN APARIENCIA LA CARBONATACIÓN ES HOMOGÉNEA Y NO OCURRE EL PICADO. ADEMÁS, ES MUY ÚTIL LA HABILIDAD DE REALCALINIZAR EL CONCRETO CARBONATADO.

LOS PRINCIPIOS DE LA REPARACIÓN ESTÁN BASADOS EN LA REINSTALACIÓN DE LA PASIVIDAD O EN REDUCIR LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA CORROSIÓN AL INCREMENTAR LA RESISTENCIA DEL ELECTROLITO SECANDO EL CONCRETO.

#### 1. CONCRETO CARBONATADO PERO NO CORROÍDO SEVERAMENTE.

FRECUENTEMENTE SE OBSERVA DAÑO SUPERFICIAL, PERO UN EXAMEN PROFUNDO REVELA QUE LA CARBONATACIÓN HA ALCANZADO EL REFUERZO MÁS QUE DE MANERA INCIDENTAL AÚN CUANDO NO ALCANZE EL NIVEL CRÍTICO. ES POR ESTO QUE SE DEBEN HACER LAS SIGUIENTES PREGUNTAS:

- ¿ES ESTO SUFICIENTE PARA DETENER LA CORROSIÓN ULTERIOR ?
- ¿ OCURRE LA REALCALINIZACIÓN Y REPASIVACIÓN DEBIDO A LA DIFUSIÓN DE IONES  $\text{OH}^-$  DEL SENO DEL CONCRETO HACIA EL INTERIOR DE LA ZONA CARBONATADA?
- ¿ PUEDE LLEVARSE A CABO LA REALCALINIZACIÓN AL APLICAR UNA SUPERFICIE DE CEMENTO PROTECTORA?
- ¿ PUEDE ACELERARSE Y MEJORAR LA REALCALINIZACIÓN?
- ¿ PUEDE SER EFECTIVAMENTE DETENIDA LA CORROSIÓN HACIENDO AL CONCRETO MAS SECO, POR EJEMPLO, INCREMENTANDO LA RESISTENCIA ELECTROLÍTICA?
- ¿ ES POSIBLE LA PROTECCIÓN CATÓDICA?

SI LA MAYORÍA DE ESTAS PREGUNTAS SON CONTESTADAS DE MANERA AFIRMATIVA, LA REMOCIÓN DEL CONCRETO PUEDE SER REDUCIDA SUSTANCIALMENTE

#### 2. REALCALINIZACIÓN.

SE HA OBSERVADO QUE CUANDO LA CARBONATACIÓN SE DETIENE, POR APLICACIÓN DE UNA CAPA PROTECTORA, LOS IONES HIDROXIL EMPIEZAN A EMIGRAR DE LA PARTE NO CARBONATADA HACIA EL ÁREA CARBONATADA.

EL TRATAMIENTO SUPERFICIAL DE BLOQUEO DE LA CARBONATACIÓN NO SÓLO IMPIDE LA CARBONATACIÓN SINO QUE, ADEMÁS, AMORTIGUA LAS FLUCTUACIONES DE HUMEDAD AUXILIANDO EL PROCESO DE REALCALINIZACIÓN.

ES PROBABLE QUE PUEDA OCURRIR UNA REALCALINIZACIÓN Y UNA REPASIVACIÓN EFECTIVA CUANDO EL REFUERZO NO ESTÉ MÁS ALEJADO DE 20 mm. DE LA SUPERFICIE NO CARBONATADA DEL CONCRETO DE CEMENTO PORTLAND. EN ESTE CASO, Y SUPONIENDO QUE LA CORROSIÓN SEA MENOR, BASTARÁ APLICAR UNA PROTECCIÓN SUPERFICIAL CON UNA RESISTENCIA A LA DIFUSIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO,  $S_{\text{dCO}_2}$ , DE AL MENOS 50 m.

LA HABILIDAD DE REALCALINIZACIÓN PARA CEMENTOS CON UN MENOR AMORTIGUADOR ALCALINO, TAL COMO EL CEMENTO DE ESCORIA DE ALTOS HORNOS, PARECE SER MÁS BAJA. SE ESTÁN LLEVANDO A CABO INVESTIGACIONES EN LAS CUALES ESTE TIPO DE CEMENTO ES EL MÁS APLICADO PARA ASEGURAR LA HABILIDAD DE REALCALINIZACIÓN DE ESTE CEMENTO.

SI EL FRENTE DE CARBONATACIÓN ES MAYOR DE 20 mm. POR DETRÁS DEL REFUERZO EN EL CASO DEL CONCRETO DE CEMENTO PORTLAND, Y SI DICHO FRENTE HA ALCANZADO EL REFUERZO, EN EL CASO DEL CEMENTO DE ESCORIA DE ALTOS HORNOS, LA CUBIERTA DE CONCRETO DEBERÁ SER REMOVIDA Y REEMPLAZADO POR UN CONCRETO DE MORTERO DENSO (CONCRETO MODIFICADO CON POLÍMEROS, POR

EJEMPLO). ESTE MORTERO DE REPARACIÓN DEBERÁ TENER UNA RESISTENCIA LO SUFICIENTEMENTE ALTA AL CO<sub>2</sub> PARA EVITAR UNA RENOVACIÓN DE LA DEPASIVACIÓN DURANTE EL RESTO DE LA VIDA ÚTIL; SI EL ESPESOR DE LA CUBIERTA NO PRESENTA ESTA CONDICIÓN, SE DEBERÁ APLICAR UNA CUBIERTA ADICIONAL O UNA CAPA RESISTENTE AL DIÓXIDO DE CARBONO SOBRE EL REFUERZO. EN EL ÚLTIMO CASO SE REQUIERE QUE SE RETIRE EL CONCRETO ALREDEDOR DEL REFUERZO. LA REMOCIÓN DEL CONCRETO ALREDEDOR DEL REFUERZO TAMBIÉN SE REQUIERE CUANDO HA TENIDO LUGAR UNA FUERTE CORROSIÓN ATRÁS DEL REFUERZO.

### 3. REALCALINIZACIÓN FORZADA.

SE HAN HECHO VARIOS INTENTOS PARA DESARROLLAR MÉTODOS DE REALCALINIZACIÓN FORZADA. EN VARIOS PAÍSES SE APLICA UN MÉTODO DESARROLLADO EN NORUEGA.

EN ESTE MÉTODO UNA PASTA FUERTEMENTE ALCALINA (SODA, FIBRAS DE CELULOSA, GEL, ETC.) ES APLICADA SOBRE LA SUPERFICIE. UNA MALLA QUE FUNGE COMO ÁNODO ES EMBEBIDA EN LA PASTA. VER FIG.21. EL ÁNODO ES CONECTADO ELÉCTRICAMENTE AL REFUERZO POR MEDIO DE UNA FUENTE DE CORRIENTE DIRECTA, DC. SE APLICA UN POTENCIAL, CP, RELATIVAMENTE ALTO, e.g. 10 V. DE ACUERDO CON LOS INVENTORES, LA SOLUCIÓN ALCALINA FLUYE HACIA EL INTERIOR DE CONCRETO DEBIDO A AFUERZAS OSMÓTICAS ELECTROLÍTICAS. CUANDO SE ELEVA EL pH LO SUFICIENTE, EN EL CÁTODO SE FORMAN IONES OH<sup>-</sup> POR MEDIO DE LA REACCIÓN

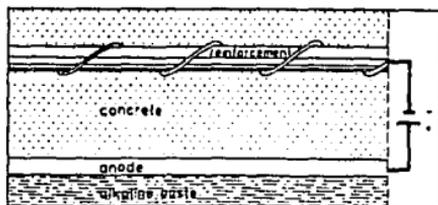


ESTA REACCIÓN REFORZARÁ EL PROCESO DE ALCALINIZACIÓN. LA PRESENCIA DE LA ELECTRO-ÓSMOSIS NO ESTÁ COMPROBADA, PERO SÍ LA REALCALINIZACIÓN A TRAVÉS DE LA FORMACIÓN DE LOS IONES OXIDRILLO.

NO HAY SUFICIENTES DATOS DISPONIBLES PARA ASEGURAR LA EFECTIVIDAD DE ESTE MÉTODO O SUS POSIBLES DESVENTAJAS.

EL AMORTIGUADOR ALCALINO SERÁ RELATIVAMENTE PEQUEÑO POR HABER SIDO RECONSTRUIDO, POR LO QUE ES ACONSEJABLE QUE SE COMPLETE ESTE PROCESO CON UN TRATAMIENTO SUPERFICIAL RESISTENTE AL DIÓXIDO DE CARBONO.

FIG. 21. REALCALINIZACIÓN FORZADA.



#### 4. ELECTROLITO DE RESISTENCIA ÓHMICA ELEVADA.

CUANDO EL CONCRETO TIENE UNA HUMEDAD CORRESPONDIENTE AL ESTADO DE EQUILIBRIO DE 20°C Y 65-70% DE HUMEDAD RELATIVA SU CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA SERÁ MUY BAJA PARA MANTENER EL PROCESO DE CORROSIÓN. RESULTADOS DE INVESTIGACIONES ALEMANAS INDICAN QUE PARA LA CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS DEL ESTE DE EUROPA ESTO PODRÍA SIGNIFICAR QUE SERÍA SUFICIENTE EL APLICAR AGENTES REPELENTES DE AGUA. ESTE MÉTODO TIENE QUE SER COMPLEMENTADO APLICANDO UNA PROTECCIÓN SUPERFICIAL RESISTENTE A LA CARBONATACIÓN. NO EXISTE UNA RETROALIMENTACIÓN DE LA PRÁCTICA EN ATENCIÓN A LA EFECTIVIDAD Y DURACIÓN DE ESTE MÉTODO.

#### 5. PROTECCIÓN CATÓDICA.

EL PRINCIPIO DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA ES DISMINUIR ARTIFICIALMENTE EL POTENCIAL DEL ACERO ESTO DISMINUYE LA DENSIDAD DE CORRIENTE Y, EN CONSECUENCIA, LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DE LA REACCIÓN ANÓDICA.

CUANDO DISMINUYE EL POTENCIAL DE POTENCIAL MEDIO (POTENCIAL DE CORROSIÓN) HASTA EL POTENCIAL NORMAL DEL HIERRO ( $E^{\circ}_{Fe}$ ) NO HABRÁ CONVERSIÓN NETA DE HIERRO A IONES FERROSOS. EL PROCESO DE CORROSIÓN SE DETIENE. SE DEBE LLEVAR A CABO UNA PROTECCIÓN ADECUADA A UN POTENCIAL LIGERAMENTE MENOS NEGATIVO QUE EL  $E^{\circ}_{Fe}$ .

SE SUJETA UN ÁNODO SOBRE LA SUPERFICIE DEL CONCRETO, SIENDO EL ACERO UN CÁTODO ARTIFICIAL POR MEDIO DE UNA FUENTE DE CORRIENTE DIRECTA, DC. LA CORRIENTE FLUYE A TRAVÉS DEL CONCRETO DEL ÁNODO HASTA EL CÁTODO. LAS REACCIONES ELECTROQUÍMICAS QUE TIENEN LUGAR EN EL CÁTODO SON: EN UN AMBIENTE ALCALINO:



EN UN AMBIENTE NEUTRO:



SI ESTÁN PRESENTES LOS IONES CLORURO TAMBIÉN PODRÁ OCURRIR LA SIGUIENTE REACCIÓN:



LOS ANIONES ( $OH^-$  Y  $Cl^-$ ) EMIGRARÁN AL ÁNODO DEL SISTEMA, MIENTRAS QUE LOS CATIONES ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ) SE MOVERÁN EN DIRECCIÓN OPUESTA. ESTO SIGNIFICA QUE EN EL CASO DE CONTAMINACIÓN DEL CONCRETO POR CLORUROS, DISMINUIRÁ LA CONCENTRACIÓN DEL CLORURO EN EL REFUERZO Y AUMENTARÁ LA ALCALINIDAD.

EL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA CON POTENCIAL IMPRESO ESTÁ COMPUESTO DE LO SIGUIENTE:

- UNA FUENTE DE CORRIENTE DIRECTA;
- UN ÁNODO;
- UN ELECTROLITO CONDUCTOR: CONCRETO. EL CONTENIDO DE HUMEDAD TIENE UNA INFLUENCIA DOMINANTE SOBRE LA CONDUCTIVIDAD;
- UN CÁTODO: EL ACERO DE REFUERZO, EL CUAL DEBE TENER CONTINUIDAD ELÉCTRICA;

- CABLES DE CONEXIÓN ELÉCTRICA, LOS CUALES DEBEN SER MECÁNICA Y QUÍMICAMENTE DURABLES;
- HERRAMIENTAS DE CONTROL Y MONITOREO (ELECTRODO DE REFERENCIA, COMPILADORES DE DATOS, UNIDADES DE CONTROL, ETC.)

ÁNODOS.

EL SISTEMA DE ÁNODOS SIRVE PARA SUMINISTRAR LA CORRIENTE DE PROTECCIÓN DE MANERA HOMOGÉNEA. TIENE QUE CUMPLIR CON LOS REQUERIMIENTOS:

- DEBE SER CAPAZ DE RESISTIR INFLUENCIAS MECÁNICAS, FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL MEDIO AMBIENTE;
- EL TIEMPO DE VIDA DEBE SER MAYOR QUE EL DE LA CAPA PROTECTORA, COMO MÍNIMO DE 20 AÑOS;
- LA SUPERFICIE DEL ÁNODO DEBE SER LO SUFICIENTEMENTE GRANDE PARA ASEGURAR QUE LA DENSIDAD DE CORRIENTE ES LO SUFICIENTEMENTE BAJA PARA PREVENIR FALLAS EN EL SISTEMA POR LA DEGRADACIÓN DEL ÁNODO O SU INTERFASE EN LOS ALREDEDORES DEL CONCRETO;

LOS TIPOS DE SISTEMAS DE ÁNODOS QUE SE PUEDEN APRECIAR SON:

- REVESTIMIENTO CONDUCTOR: UNA CAPA QUE ACTÚA COMO ÁNODO CUBRE COMPLETAMENTE LA SUPERFICIE DEL CONCRETO.
- ÁNODOS DISTRIBUIDOS: ÁNODOS DISCRETOS SON COLOCADOS EQUISPACIADOS SOBRE LA SUPERFICIE DEL CONCRETO. SÓLO UNA PARTE DE LA SUPERFICIE DEL CONCRETO ES CUBIERTA CON MATERIAL ANÓDICO ACTIVO.
- CAPAS METÁLICAS DE SACRIFICIO. UNA CAPA DE METAL ACTÚA COMO ÁNODO DE SACRIFICIO. ALGUNOS DE LOS SISTEMAS DISPONIBLES SE DISCUTEN A CONTINUACIÓN.

#### REVESTIMIENTOS CONDUCTORES.

UN ÁNODO QUE CUBRE COMPLETAMENTE LA SUPERFICIE DE CONCRETO CONSISTE EN SU MAYORÍA DE UNA COMBINACIÓN DE ÁNODOS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS. EL ÁNODO PRIMARIO CONSISTE DE UN METAL INERTE. EL ÁNODO SECUNDARIO ES UN REVESTIMIENTO CONSISTENTE DE MORTERO, ASFALTO O PINTURA LA CUAL ES HECHA CONDUCTORA POR ADICIÓN DE PARTÍCULAS DE CARBÓN. ALGUNOS EJEMPLOS SON:

ÁNODOS DE SILICÓN DE HIERRO EN COMBINACIÓN CON UNA CAPA DE ASFALTO CONDUCTOR; ALAMBRES PLATINIZADOS Y SISTEMAS DE PINTURA CONDUCTORA.

#### ÁNODOS DISTRIBUIDOS.

HAY UN GRAN NÚMERO DE ESTOS SISTEMAS DISPONIBLES, ENTRE LOS QUE SE ENCUENTRAN:

SISTEMAS DE ÁNODOS DE RANURAS; FIBRAS DE CARBÓN COMO ÁNODOS SECUNDARIOS; GRAFITO RELLENO CON CABLE DE POLÍMERO CON CORAZÓN DE COBRE; ÁNODOS DE MALLA METÁLICA; ÁNODOS DESNUDOS Y TEJAS DE ÓXIDO DE TITANIO.

#### ÁNODOS DE SACRIFICIO.

OTRO TIPO DE ÁNODO ES EL DE ZINC PULVERIZADO POR FLAMA. SE APLICA UNA CAPA DE APROXIMADAMENTE 200  $\mu\text{m}$  SOBRE EL CONCRETO Y CONECTADO ELÉCTRICAMENTE CON EL REFUERZO. ESTO ES LO QUE SE CONOCE COMO UN ÁNODO

DE SACRIFICIO EL CUAL NO NECESITA UNA FUENTE DE POTENCIAL EXTERNA. EL TIEMPO DE VIDA DE ESTE SISTEMA PARECES ESTAR LIMITADO.

#### DURABILIDAD.

PARA QUE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA DURE, TODAS LAS PARTES DEL MISMO DEBERÁN FUNCIONAR BIEN DURANTE EL TIEMPO DE VIDA. EN UN NÚMERO DADO DE PROYECTOS, HAN APARECIDO ALGUNOS DEFECTOS. ESTOS INCLUYEN: CORROSIÓN DE LOS CABLES DE CONEXIÓN SOBRE LOS ÁNODOS PRIMARIOS, DAÑO DE LA UNIDAD DE CONTROL, LA EROSIÓN DE LAS CAPAS DE ASFALTO CONDUCTOR Y DESPRENDIMIENTO DE LA CAPA DE CONCRETO APLICADA. NO TODOS ELLOS SON TÍPICOS DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.

#### CONSUMO DEL ÁNODO.

UNO DE LOS POSIBLES MECANISMOS DE DEGRADACIÓN CONCIERNE AL ÁNODO. EN EL ÁNODO OCURREN VARIAS REACCIONES. CON RESPECTO AL USO DE GRAFITO PPARA CABLES DE ÁNODO, MORTEROS CONDUCTORES, ETC., PUEDE OCURRIR LA SIGUIENTE REACCIÓN:



## BIBLIOGRAFÍA

1. OBERHOLSTER, R.: PORE STRUCTURE, PERMEABILITY AND DIFFUSIVITY OF HARDENED CEMENT PASTE AND CONCRETE IN RELATION TO DURABILITY: STATUS AND PROSPECTS. CHAIRMAN'S SPECIAL REPORT. R/BOU 1376. 1986, 11 p.p.
2. MIRANDA HERNÁNDEZ, MARGARITA Y LÓPEZ GONZÁLEZ, WALTER.: ESTUDIO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DE LOS REFUERZOS METÁLICOS EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO. TESIS. FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM. 1988.
3. PETTERSON, KARIN.: CORROSION TRESHOLD VALUE AND CORROSION RATE IN REINFORCED CONCRETE. SWEDISH CEMENT AND CONCRETE RESEARCH INSTITUTE. STOCKHOLM, 1992. REPORT: CBI-R-92-2 DE 93 769989. 43 p.p.
4. KOBAYASHI, K. AND UNO, Y.: INFLUENCE OF ALKALI ON CARBONATION OF CONCRETE, PART I. PRELIMINARY TESTS WITH MORTAR SPECIMENS. CEMENT AND CONCRETE RESEARCH. VOL. 19, 1989, p.p. 821-826.
5. POURBAIX, MARCEL. ATLAS OF ELECTROCHEMICAL EQUILIBRIA IN AQUEOUS SOLUTIONS. PERGAMON, PRESS OXFORD, 1966. 644 p.p.
6. NASRAZADANI, S. & RAMAN, A.: FORMATION AND TRANSFORMATION OF MAGNETITE ( $Fe_3O_4$ ) ON STEEL SURFACES UNDER CONTINUOUS AND CICLIC WATER FOG TESTING. THE JOURNAL OF SCIENCE AND ENGINEERING CORROSION. VOL. 49, N° 4, APRIL 1993. p.p. 294-299.
7. JOSHI, P.S. et. al.: STIMULATED DECOMPOSITION OF  $Fe(OH)_2$  IN DE PRESENCE OF AVT CHEMICALS AND METALLIC SURFACES-RELEVANCE TO LOW-TEMPERATURE FEED WATER LINE CORROSION. THE JOURNAL OF SCIENCE AND ENGINEERING CORROSION. VOL. 49, N° 4, APRIL 1993 p.p.300-309
8. ÁVILA, J. Y GENESCÁ, J.: MÁS ALLÁ DE LA HERRUMBRE. SERIE LA CIENCIA DESDE MÉXICO. S.E.P., F.C.E. Y CONACYT. MÉXICO, D.F., 1986. 110 p.p.
9. BIJEN, J.M.J.M. (EDITOR): HERON. MAINTENANCE AND REPAIR OF CONCRETE STRUCTURES. SECTION MATERIAL SCIENCE. DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING DELFT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. DELFT, THE NETHERLANDS. VOL 34, N° 2, 1989. 82 p.p.

10. VESIKARI, ERKKI.: SERVICE LIFE OF CONCRETE STRUCTURES WITH REGARD TO CORROSION OF REINFORCEMENT. CONCRETE AND SILICATE LABORATORY. VALTION TEKNILLINEN TUTKIMUS KESKUS, TUTKIMUTSIA ESPOO, FINLAND. AUGUST 1988. 53 p.p.
11. GONZÁLEZ, J.A.; ANDRADE, C. Y ESCUDERO M.L.: CORROSIÓN EN HORMIGÓN REV. IBER. CORR. Y PROT. VOL. XV, NÚM. 4. 1984, p.p. 11-19.
12. HARTT, WILLIAM & BALAMURALIKRISHNA, R.: INFLUENCE OF CHLORIDES, CARBONATION AND SURFACE FILMS ON CORROSION OF STEEL IN CONCRETE. FINAL REPORT. FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION MATERIALS OFFICE. SEPTEMBER 30, 1990. 78 p.p.
13. BOAH, J.K.; SOMUAH, S. K. & LEBLANC, P.: ELECTROCHEMICAL BEHAVIOUR OF STEEL IN SATURATED CALCIUM HIDROXIDE SOLUTION CONTAINING  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  AND  $\text{CO}_3^{2-}$  IONS. CORROSION VOL. 6, Nº. 2. FEBRUARY, 1990. p.p. 153-158.
14. NEVILLE, A.M.: TECNOLOGÍA DEL CONCRETO. INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. MÉXICO, D.F., 1978, 394 p.p.
15. PARROT. L.J. & KILLOH, D.C.: CARBONATION IN A 36 YEARS OLD, IN-SITU CONCRETE. CEMENT AND CONCRETE RESEARCH. VOL. 19, 1989, p.p. 649-656.
16. BLENKINSOP, R.D. et. al. THE CARBONATION OF HIGH ALUMINA CEMENT, PART I. CEMENT AND CONCRETE RESEARCH VOL. 15, 1985, p.p. 276-284.
17. BLENKINSOP, R.D. et. al.: THE CARBONATION OF HIGH ALUMINA CEMENT, PART II. CEMENT AND CONCRETE RESEARCH. VOL. 15, p.p. 385-390. 1985.
18. PÉREZ MÉNDEZ, M. & TRIVIÑO VÁZQUEZ, F.: STUDY OF THE STRENGTH DEVELOPED BY STABLE CARBONATED PHASES IN HIGH ALUMINA CEMENT. CEMENT AND CONCRETE RESEARCH. VOL. 14, 1984, p.p. 161-169.
19. PÉREZ, M.; VÁZQUEZ, T. & TRIVIÑO, F.: STUDY OF STABILIZED PHASES IN HIGH ALUMINA CEMENT MORTARS, PART II CEMENT AND CONCRETE RESEARCH. VOL. 14, 1984, p.p. 1-10.
20. ALONSO, C.; ANDRADE, C.A. & GONZÁLEZ, J.A.: RELATION BETWEEN RESISTIVITY AND CORROSION RATE OF REINFORCEMENTS IN CARBONATED MORTAR MADE WITH SEVERAL CEMENT TYPES. CEMENT AND CONCRETE RESEARCH. VOL. 8, 1988, p.p. 687-698.
21. CARPIO, J.J. et. al.: A CASE STUDY OF SEVERE CORROSION A 3 Km. LENGTH BRIDGE OVER SEAWATER. NACE '94 CONFERENCE, MARCH 1994.

22. HOPE, B.; IP, A. & MANNING, D.: CORROSION AND ELECTRICAL IMPEDANCE IN CONCRETE. CEMENTE AND CONCRETE RESEARCH. VOL. 15, 1985. p.p. 525-534.
23. ASTM-C-876-87-10. STANDARD TEST MEHOD FOR HALF CELL POTENTIALS OF REINFORCING STEEL IN CONCRETE.
24. GAUTEFALL, O.: THE SERVICE PERFORMANCE OF CONCRETE. REPORT N° 1: THE ABILITY TO PROTECT REBARS AGAINST CORROSION. ST F65 A86050, 51 p.p.
25. MILLARD, S.G.; HARRISON, J.A., & EDWARDS, A.J.: MEASUREMENT OF THE ELECTRICAL RESISTIVITY OF REINFORCED CONCRETE FOR THE ASSESSMENT OF CORROSION RISK. BRITISH JOURNAL OF CORROSION, VOL. 31, p.p. 617-621.
26. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. PATRONATO UNIVERSITARIO. DIRECCIÓN GENERAL DEL PATRIMONIO. DEPARTAMENTO DE BIENES ARTÍSTICOS Y CULTURALES. ANTECEDENTES PARA LA RESTAURACIÓN DEL MURAL "REPRESENTACIÓN HISTÓRICA DE LA CULTURA" DE JUAN O'GORMAN EN LA BIBLIOTECA CENTRAL DE CIUDAD UNIVERSITARIA. MAYO, 1990.
27. O'NEIL, EDWARD F.: DURABILITY AND BEHAVIOR OF PRESTRESSED CONCRETE BEAMS. TECHNICAL REPORT N° 5. CONCRETE LABORATORY. U.S. ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENTE STATION. JUNE 1976. 41 pp.
28. ROSHORE, EDWIN, C.: DURABILITY AND BEHAVIOR OF PRESTRESSED CONCRETE BEAMS. TECHNICAL REPORT N° 3. LABORATORY TESTS OF WEATHERED PRETENSIONED BEAMS. U.S. ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENTE STATION. OCTOBER 1971. 41 pp.
29. SANDOVAL MÁRQUEZ, REBECA, M.: QUÍMICA ANALÍTICA. CURVAS POTENCIOMÉTRICAS DE TITULACIÓN ÁCIDO-BASE. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO/PORRÚA. MÉXICO, 1988. 108 pp.
30. VESIKARI, ERKKI.: CORROSION OF REINFORCING STEELS AT CRACKS IN CONCRETE. CONCRETE AND SILICATE LABORATORY. VALTION TEKILLINEN TUTKIMUS KESKUS, TUTKIMUTSIA. ESPOO, FINLAND. JUNE 1981. 46 pp.

31. WENGER, FRANÇOIS.: ETUDE DE LA CORROSION DE L'ACIER DOUX DANS LE BÉTON  
PAR DES MÉTHODES ÉLECTROCHIMIQUES. APPLICATION AU  
CONTRÔLE DES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL. CORROSION  
INDUSTRIE, N° 742, JUIN 1987. PREMIÈRE PARTIE. 38 pp.