

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**“INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE CENIZA VOLANTE CLASE C EN
EL POTENCIAL DE CORROSIÓN DEL ACERO A615 EMBEBIDO EN
CONCRETO FABRICADO CON CEMENTO PORTLAND TIPO I”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ESTRUCTURAS Y MATERIALES

AUTORES:

BACH. GANOZA AGUILAR, Gregorio Alejandro

BACH. MACEDA ALVAREZ, Pedro Jampierre

ASESOR:

ING. URTEAGA GARCÍA, Juan Manuel

TRUJILLO - PERÚ

2017

JURADO

PRESIDENTE

ING. RODRIGUEZ REYNA, CARLOS ALBERTO
CIP: 58511

SECRETARIO

ING. CANCINO RODAS, CESAR LEONIDAS
CIP: 70103

VOCAL

ING. VELASQUEZ DIAZ, GILBERTO ANAXIMANDRO
CIP: 29040

ASESOR

ING. URTEAGA GARCIA, JUAN MANUEL
CIP: 75985

ÍNDICE

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
SIMBOLOGÍA	vii
LISTADO DE TABLAS	vii
LISTADO DE FIGURAS	viii

I. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.3. FUNDAMENTACION TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.3.1. Potencial de Corrosión	6
1.3.2. Electrodo de Referencia	6
1.3.3. Corrosión del Acero en Concreto Reforzado	11
1.3.4. Deterioro del Concreto Reforzado	12
1.3.4.1. Corrosión por Cloruros	13
1.3.4.2. Corrosión por Carbonatación	16
1.3.4.3. Corrosión por Sulfatación	16
1.3.5. Mecanismo de Corrosión del Acero	17
1.3.6. Mecanismos de Reacción de la puzolana en concreto	17
1.3.7. Mecanismos de mantenimiento del concreto y métodos de protección del acero de refuerzo contra la Corrosión	21
1.3.8. Mecanismos de Protección	22
1.3.8.1. Protección del concreto	23

1.3.8.2. Protección del Acero de Refuerzo	23
1.3.8.3. Protección Catódica	24
1.3.8.4. Protección por Aditivos	25
1.3.8.5. Protección contra ácidos	26
1.3.9. Método de Reparación	26
1.3.9.1. Métodos Convencionales de Reparación	27
1.3.9.2. Métodos No Convencionales de Reparación	28
1.3.9.2.1. Extracción electroquímica de Cloruros	29
1.3.9.2.2. Re-alkalinización	30
1.3.9.2.3. Protección Catódica	31
1.3.10. Evaluación de la corrosión en estructuras de concreto	33
1.3.10.1. Inspección Visual	33
1.3.10.2. Método de la Media Celda	33
1.4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	33
1.5. HIPÓTESIS	33
1.6. VARIABLES	34
1.7. ALCANCE	34
1.8. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	34
1.9. APORTES	35
1.10. OBJETIVOS	35
1.10.1. Objetivo General	35
1.10.2. Objetivos Específicos	35

II. METODOLOGÍA

2.1. MATERIAL	36
2.1.1. Muestra	36
2.1.2. Instrumentos y materiales para la celda galvánica	37
2.2. MÉTODOS	38

2.2.1. Método de la Media Celda (ASTM C876)	39
2.2.2. Comprobación de validez y Confiabilidad	42

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. ENSAYO DE COMPRESIÓN A LA COMPRESIÓN	43
3.2. ENSAYO DE LA MEDIA CELDA	47

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES	52
4.2. RECOMENDACIONES	53

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

55

ANEXOS

ANEXO 01: CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES	58
A) CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS	58
B) ANALISIS DE LA CENIZA VOLANTE	62
C) CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA DEL ACERO UTILIZADO	63
ANEXO 02: A) DISEÑO DE MEZCLAS	64
B) COSTOS UNITARIOS DE MEZCLA CON CENIZA Y SIN CENIZA	70

ANEXO 03: A) RESUMEN FOTOGRAFICO DEL PROCESO DE ELABORACION, CURADO DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN	76
B) RESUMEN FOTOGRAFICO DEL PROCESO DE ELABORACION, CURADO DEL ENSAYO DE LA MEDIA CELDA	78
ANEXO 04: PROCESAMIENTO DE DATOS	79
ANEXO 05: PROCESO DE CÁLCULO PARA LA OBTENCION DE LA RESISTENCIA PROMEDIO	80
ANEXO 06: PROCESO DE CÁLCULO PARA LA OBTENCION DE POTENCIALES DE CORROSION PROMEDIOS	82
ANEXO 07: A) APLICACIÓN DEL ANALISIS ESTADISTICOS DE DATOS	86
B) APLICACIÓN L CONFIABILIDAD ESTADÍSTICA (ALFA CRONBACH)	95

DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis a mis Padres Antero e Inés, a mi hermana Perla, porque ellos le dan razón a mi vida, por sus consejos, su apoyo incondicional y su paciencia. Todo lo que soy hoy y todo lo que he logrado es gracias a ellos, por saber guiarme en el camino de la superación.

A mis compañeros y amigos, con quienes compartimos no solo trabajo y estudio sino también risas y momentos que quedaran en mi recuerdo.

A mis maestros, esos con quien compartimos risas y supieron aconsejarme para seguir adelante, que resolvieron dudas y me encaminaron para ser el profesional que soy.

Gracias totales.

Atte. GREGORIO GANOZA AGUILAR

DEDICATORIA

*A Dios y al Sr. Cautivo de Ayabaca por darme
Una familia Amorosa y unida, Por iluminar mi
camino y fortalecerme en todo momento de mi vida.*

*A mis padres Francisco y Aura, por
su total e incondicional apoyo y
consejos durante el desarrollo de mi
carrera Profesional y a mis hermanos
Alexis, Francisco y Hayro, por su
compañía y ayuda que me brindaron.*

*A nuestros Profesores quienes son
nuestros guías en el aprendizaje para
un buen desenvolvimiento en la
sociedad.*

*A mis Compañeros y las personas
amigas que me han apoyado en la
ejecución y culminación de la presente
investigación. Gracias por la
solidaridad.*

Gracias

PEDRO JAMPIERRE

AGRADECIMIENTO

En primer lugar queremos expresar nuestro integro agradecimiento a la Universidad Privada Antenor Orrego, a la Facultad de Ingeniería; y en especial, a nuestra querida Escuela de Ingeniería Civil y a toda su plana docente, por los conocimientos y orientación impartidos durante nuestra formación profesional.

Al Ing. Juan Manuel Urteaga García, por su asesoramiento y puesta de confianza en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Al Ing. Gerardo Arteaga Cuba, por su continuo asesoramiento en el presente trabajo de investigación.

Al Ing. Gerardo Espinola Villanueva por su apoyo en los laboratorios de la UPAO, quien nos facilitó el espacio y los instrumentos para hacer posible nuestra tesis.

Al laboratorio de Corrosión y Protección de Metales, perteneciente al Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de Trujillo, por permitirnos desarrollar esta investigación y otorgarnos el permiso de utilizar sus equipos e instrumentos.

Al Ing. Elmer Polo Briceño por su asesoramiento y continua colaboración durante la realización de los ensayos de nuestra Investigación.

Así mismo resaltar el apoyo y colaboración de nuestros compañeros de la carrera que en todo momento estuvo dando aliento y su cordial ayuda en el desarrollo y culminación del presente trabajo de investigación.

Y por último a todas aquellas personas que de una u otra manera nos brindaron su apoyo y respaldo.

Los Autores

RESUMEN

En esta investigación se evaluó la Influencia del Porcentaje de Ceniza Volante Clase C en el Potencial de Corrosión del Acero A615 embebido en concreto fabricado con Cemento Portland Tipo I.

El propósito de la investigación fue determinar el porcentaje óptimo de ceniza volante que se debe reemplazar en un concreto fabricado con cemento tipo I para disminuir el potencial de corrosión del acero embebido en concreto. Los porcentajes de ceniza volante estudiados fueron de 5, 10 y 15 % en remplazo del cemento. Con relación $a/c = 0.50, 0.55$ y 0.60 .

Se prepararon probetas de 4x8 pulgadas, que en su interior se introdujo una barra de acero de refuerzo de $5/8$ de pulgada de diámetro, con una longitud de 25cm, para evaluar el Potencial de Corrosión de acuerdo a la norma ASTM C876. Así mismo se prepararon probetas de 15x30 cm para el ensayo de resistencia a la compresión según la norma ASTM C109.

Los resultados para la relación $a/c = 0.50$, referente al ensayo de compresión, muestran una resistencia aceptable al 5% de remplazo de ceniza volante en la estructura del concreto con una resistencia de 292.23 kg/cm^2 , similar a la mezcla de control con 294.10 kg/cm^2 , siendo la variación menor al 1%; y para el ensayo de la media celda se muestran que los resultados de los potenciales de corrosión menos negativos se obtuvieron con el remplazo al 5% de ceniza volante, evaluado durante 9 semanas. Para la relación $a/c = 0.55$, referente al ensayo de compresión muestran una resistencia aceptable al 5% de remplazo de ceniza volante en el concreto con un valor de 245.80 Kg/cm^2 a los 28 días; y para el ensayo de la media celda se muestran que los resultados de potenciales de corrosión menos negativos se obtuvieron con el remplazo de 5% de ceniza volante, durante 9 semanas. Para la relación $a/c = 0.60$, referente al ensayo de compresión muestran una resistencia que desciende razonablemente al 5% de remplazo de ceniza volante en la estructura del concreto con un valor de 206.50 Kg/cm^2 a los 28 días; y para el ensayo de la media celda se muestra que el resultado de potencial de corrosión menos negativo se obtuvo con 5% de incorporación de ceniza volante, evaluado durante 9 semanas.

Mediante análisis estadísticos se confirma la influencia del porcentaje ceniza volante sobre las propiedades en estado endurecido del concreto.

ABSTRACT

In this research we evaluated the influence of the Percentage of Class C Fly Ash in the Potential of Corrosion of Steel A615 embedded in concrete made with Portland cement type I.

The purpose of this study was to determine the optimal percentage of fly ash must be replaced in a concrete made with Type I cement to reduce the potential for corrosion of steel embedded in concrete. The percentages of fly ash studied were 5, 10 and 15 % in replacement of cement. With regard to $c = 0.50, 0.55$ and 0.60 .

We prepared pieces of 4x8 inch, which was introduced in its interior a reinforcing steel bar of 5/8 of an inch in diameter, with a length of 25cm, to assess the potential for corrosion resistance according to ASTM C876. At the same time prepared pieces of 15x30 cm for the test of resistance to the compression according to ASTM C109.

The results for the relationship $a/c = 0.50$, concerning the compression test, show an acceptable resistance to 5% replacement of fly ash in the structure of the concrete with a resistance of 292.23 kg/cm², similar to the mixture of control with 294.10 kg/cm², being the variation less than 1%; and for the testing of the half-cell shows that the results of the potential corrosion less negative were obtained with the 5% replacement of fly ash, evaluated during 9 weeks. For the relationship $a/c = 0.55$, concerning the compression test show an acceptable resistance to 5% replacement of fly ash in concrete with a value of 245.80 Kg/cm² to 28 days; and for the testing of the half-cell shows that the results of potential corrosion less negative is obtained with the replacement of 5% of fly ash, during 9 weeks. For the relationship $a/c = 0.60$, concerning the compression test show a resistance that descends reasonably to the replacement 5% of fly ash in concrete structure with a value of 206.50 Kg/cm² to 28 days; and for the testing of the half-cell shows that the result of corrosion potential less negative was obtained with 5% of incorporation of fly ash, evaluated during 9 weeks.

Using statistical analysis confirms the influence of the percentage fly ash on the properties in the hardened state.

SIMBOLOGÍA

ASTM: American Society for Testing and Materials.

NaCl: Cloruro de Sodio.

a/c: Relación agua/cemento.

w/b: water/binder (agua/aglutinante)

NaSO₄: Sulfato de Sodio.

OPC: Ordinary Portland Cement

GBFS: Granulated Blast Furnace Slag (Escoria Granulada de Alto Horno).

FA: Fly Ash

Ecorr: Potencial de Corrosión.

Cu/CuSO₄: Cobre / Sulfato de Cobre

Ag/AgCl: Plata / Cloruro de Plata

(C – S – H)_S : Silicatos de calcio hidratados de estequiometria no definida

C – S – H : Silicatos de calcio

C – H : Hidróxido de calcio

H₂O: Agua.

CO₂: Dióxido de carbono

SiO₂: Óxido de Sílicio

Al₂O₃: Óxido de Aluminio

Fe₂O₃ : Óxido de Hierro.

Al: Aluminio

C: Carbono.

Si: Silicio.

FC: Resistencia a la Compresión

F: carga axial aplicada (Kg)

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1. Potenciales de los electrodos de referencia.	8
Tabla 1.2. Potenciales estándar de reducción.	9
Tabla 1.3. Serie galvánica para metales y aleaciones en agua de mar.	10
Tabla 1.4. Factores que intervienen en el deterioro del acero de refuerzo.	21
Tabla 2.1: Relaciones de a/c a diferentes porcentajes	36

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema del electrodo de Cu/CuSO ₄	8
Figura 1.2. Proceso de Corrosión del acero embebido en concreto	12
Figura 1.3. Proceso de fisuración del concreto	15
Figura 1.4. Tiempo de vida útil de una estructura	15
Figura 1.5. Microestructura de la pasta de concreto	19
Figura 1.6. Inspección visual de una estructura de concreto deteriorada	21
Figura 1.7. Mecanismo de protección catódica por ánodo de sacrificio	24
Figura 1.8. Mecanismo de protección catódica por ánodo de sacrificio	25
Figura 1.9. Celda electroquímica básica utilizada en las Técnicas Electroquímicas	29
Figura 1.10. Esquema de funcionamiento de la técnica de extracción electroquímica de cloruros	30
Figura 1.11. Representación esquemática de la Re-alkalinización	31
Figura 2.1. Dimensión del acero usado en las probetas	37
Figura 2.2. Dimensión de la probeta usada.	37
Figura 2.3: Esquema de la celda galvánica.	38
Figura 3.1 Ensayo de Resistencia a la compresión a 28 días de relación a/c = 0.50	44
Figura 3.2 Ensayo de Resistencia a la compresión a 28 días de relación a/c = 0.55	45
Figura 3.3 Ensayo de Resistencia a la compresión a 28 días de relación a/c = 0.60	46
Figura 3.4 Ensayo de Resistencia a la compresión a 28 días	47
Figura 3.5 Gráfica de Ecorr de la relación a/c = 0.50	49
Figura 3.6 Gráfica de Ecorr de la relación a/c = 0.55	50
Figura 3.7 Gráfica de Ecorr de la relación a/c = 0.55	51

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las edificaciones que se construyen en nuestro país, usan en sus estructuras el concreto armado debido a su resistencia, durabilidad y facilidad constructiva. Pero en el transcurso de los años, su periodo de vida puede verse disminuida, ya sea por daños físicos como por daños químicos causados por el medio ambiente y los agentes agresivos del medio; que pueden afectar negativamente la durabilidad de la estructura y a su vez, reducir su resistencia frente a cargas externas. Estos ambientes perjudiciales para el concreto armado son las zonas costeras que, por su cercanía al mar influyen negativamente en la vida útil del concreto armado.

La porosidad es una característica importante en el concreto, que influye tanto en la resistencia como en la durabilidad. Por consiguiente, mientras más poroso sea este material, más incidencia tendrá en aminorar la resistencia, y mayor será su vulnerabilidad ante la agresividad del medio ambiente al cual está expuesto.

Un problema común que perjudica al concreto, en especial su durabilidad, es la presencia de cloruros en el ambiente al cual está expuesto, y un ejemplo claro de este problema lo encontramos en el distrito de Huanchaco. Al ser el concreto un material poroso, el ión cloruro presente en el ambiente puede penetrar el recubrimiento de concreto y como consecuencia, reaccionar con el acero de refuerzo. El inicio de la corrosión se da cuando reacciones químicas en el acero dan como resultado la rotura de la capa pasivadora (capa de óxido pasivo protectora) que acelera el fenómeno de corrosión.

Actualmente en nuestro medio, hay diferentes tipos de cementos que son resistentes a los diferentes problemas que comprometen la resistencia y durabilidad de la estructura; sin embargo, no todos son totalmente resistentes

en ambientes de humedad relativa variante, como las zonas cercanas al mar donde existe un clima seco durante el día y muy húmedo durante la noche, por lo que se necesita aditivos y/o adiciones que puedan minimizar los efectos de los agentes externos sobre en las estructuras. Una posible solución es el uso de ceniza volante artificial. En nuestro medio, esta adición se encuentra como subproducto del caldero de la industria papelera Trupal S.A.

La ceniza producto de la quema del carbón, ha sido almacenada de forma incorrecta durante años, lo cual ha generado denuncias hacia la empresa por contaminación. Utilizar este subproducto como una adición en el concreto permitirá, de alguna manera, reducir la contaminación ambiental en la localidad de Santiago de Cao donde se encuentra la empresa.

La determinación del estado del proceso de corrosión en el acero embebido en el concreto, no puede ser realizado a simple vista, por lo que es necesario utilizar métodos que permitan predecir lo que sucede en el interior del concreto ante la presencia de cloruros.

Para ello, se utilizó una técnica termodinámica normada para determinar los potenciales de corrosión del acero embebido en concreto con reemplazos porcentuales de ceniza volante. Utilizando la Norma ASTM C876-15. Método de prueba estándar para Potenciales de media celda de acero reforzado no recubierto en Hormigón. Se utilizó las Normas ASTM, debido a que la Normativa Peruana no contempla ensayos electroquímicos para determinar la corrosión del acero en el concreto, sin embargo nos da algunos alcances sobre protección del refuerzo frente a corrosión. La norma E.060. Concreto Armado nos indica, la relación a/c máxima de 0.40 cuando el concreto se verá afectado por cloruros y también menciona la cantidad máxima de iones cloruros solubles en agua del concreto.

1.2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1. Zamora, Mendoza, Zamora y Calderón, (2009), realizaron la investigación: *Monitorización de Potenciales de Corrosión y Resistencia Mecánica de un hormigón Contaminado Expuesto a un Medio Clorado*, en la Facultad de Ingeniería Civil - Xalapa, Universidad Veracruzana. MÉXICO. La Investigación llegó a las siguientes principales conclusiones:

1. Los especímenes de cemento impermeable expuestos a un medio limpio presentan potenciales que indican incertidumbre de que exista corrosión, de acuerdo con la norma ASTM C-876-91. Se observa poca influencia del grado de contaminación de ambos hormigones. Los especímenes de cemento compuesto normal presentan un comportamiento mejor y más homogéneo que los de cemento impermeable, ubicándolos en un 10% de probabilidad de corrosión de acuerdo a la norma y observando una influencia casi nula de la relación a/c y del grado de contaminación del hormigón.
2. Los especímenes de cemento impermeable expuestos a una disolución al 3.5% de NaCl (medio agresivo) presentan, con el paso del tiempo, potenciales que indican un 90% de probabilidad de corrosión, de acuerdo con la norma ASTM C-876-91. Se observa poca influencia del grado de contaminación de ambos hormigones, teniendo los especímenes con relación a/c = 0.65 los valores más negativos. Los especímenes de cemento compuesto normal también presentan, al transcurrir el tiempo de exposición, valores más negativos ubicando todos los especímenes con una probabilidad de corrosión del 90%. (Sic) [1]

1.2.2. Ujike, Okazaki, Takae y Kasuga, (2013), realizaron la investigación: *Un estudio sobre las propiedades de corrosión de las barras de refuerzo en hormigón de cenizas volantes*, Ehime University, JAPON. La Investigación llegó a la siguiente principal conclusión:

1. Las mediciones del potencial de media celda y de la densidad de corriente de corrosión indican que si el cemento de cenizas volantes es curado insuficientemente, el hormigón se corroe mucho antes que cuando se observa la corrosión en el hormigón sin cenizas volantes. Por otra parte, el espécimen sometido al proceso de curado por sello húmedo apenas muestra el potencial de media celda disminuido y sus propiedades anticorrosión se mejoran mucho mejor que las propiedades anti-corrosión en el hormigón sin cenizas volantes. [2]

1.2.3. Nithya y Mathew, (2016), realizaron la investigación: *Efecto de la ceniza volante sobre el potencial de corrosión del acero en el hormigón*, School of Engineering, Cochin University of Science and Technology, Kochi, Kerala, INDIA. La Investigación llegó a la siguiente principal conclusión:

1. Basándose en el estudio, se podría concluir que, al seleccionar apropiadamente la cantidad de reemplazo de ceniza volante (20%) y la relación w / b (0,40), el potencial de corrosión del acero en el hormigón podría reducirse mucho y al mismo tiempo Las propiedades de resistencia se podrían mejorar. (Sic) [3]

1.2.4. Viveros, Gonzáles, Sandoval y De la Cruz, (2013), realizaron la investigación: *Análisis del Potencial y Velocidad de Corrosión en Concretos reforzados modificados con Microsílice*, en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla (ITSM), Veracruz. MÉXICO. La Investigación llegó a las siguientes principales conclusiones:

1. El concreto de control al ser sometido dentro del medio agresivo (NaSO_4) presenta un potencial de corrosión que esta una zona de incertidumbre lo que no se sabe con exactitud la probabilidad de corrosión. (Sic)

2. El concreto con incorporación de Microsílice al ser sometido dentro del medio agresivo (NaSO_4) presenta un potencial de

corrosión mayor lo que esta una zona de 10% de probabilidad de corrosión. (Sic) [4]

1.2.5. Aperador, Bautista y Delgado, (2013), realizaron la investigación: *Monitoreo de la corrosión de aceros embebidos en concretos obtenidos a partir de subproductos industriales*, en el Departamento de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada Bogotá - Colombia.

La Investigación llegó a las siguientes principales conclusiones:

- 1.** Los concretos obtenidos de mezclas de escorias siderúrgicas y de cenizas volantes activadas alcalinamente sometidos al ataque de ion cloruro exhiben un comportamiento similar a los concretos OPC y GBFS, las diferencias se asocian a los potenciales de corrosión que se estabilizan luego de los 6 meses de evaluación. Esto indica que el acero embebido en el concreto de mezclas pasa de un estado de corrosión inactiva a uno de un 50 % de probabilidad de corrosión. La resistencia a la polarización corrobora los resultados obtenidos por medidas de Ecorr, en donde los concretos GBFS + FA muestran una disminución de la resistencia a la polarización en los dos primeros niveles. Después del tercer nivel aumenta el valor de la resistencia indicando remoción de la capa de pasivación. Los concretos OPC y GBFS, sometidos a las mismas condiciones, muestran una disminución en cada uno de los niveles estudiados lo que indica que el deterioro de la barra de acero sigue su proceso de degradación.
- 2.** Los concretos OPC, GBFS, 90%GBFS + 10%FA y 80%GBFS + 20%FA expuestos a ion cloruro muestran la presencia de los óxidos e hidróxidos de hierro en todas las muestras analizadas. Se encontraron los mismos productos de corrosión (magnetita (Fe_3O_4), Wustita ($\text{Fe}_2 + \text{O}$) y goethita ($\text{Fe}_3 + \text{O} (\text{OH})$). Los concretos OPC y GBFS mostraron un aumento de los productos de corrosión comparado con las mezclas de GBFS +FA. [5]

1.3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Potencial de Corrosión

La norma ASTM C 876-15 establece la medición del potencial de media celda como un parámetro de estimación de la probabilidad de ocurrencia de corrosión. Aunque se ha cuestionado su validez, sigue siendo empleada para mediciones en condiciones reales.

El monitoreo de potencial es una técnica termodinámica en la cual se relaciona el estado de corrosión y el potencial de corrosión de un metal (E_{corr}), como una medida del inicio o de la severidad de la corrosión. Un estado pasivo (tipificado por una velocidad de corrosión baja) se refleja en un potencial de corrosión noble, mientras el mismo material en un estado activo (tipificado por una velocidad de corrosión más alta), tiene un potencial menos noble. Consecuentemente el potencial puede ser monitoreado para mostrar si el material se corroe lenta o rápidamente.

El método es convenientemente aplicado para materiales (por ejemplo aceros inoxidable, aleaciones base níquel titanio, acero de refuerzo, entre otros) que deben su resistencia a la corrosión a la presencia y conservación de una película superficial protectora, la cual los hace pasivos en muchos medios. Cuando la pasividad se pierde, su potencial cambia drásticamente. [6]

1.3.2. Electrodo de Referencia

Es una pila prácticamente impolarizable y de potencial constante, que sirve para medir y controlar el potencial del electrodo sometido a estudio en la celda de ensayo, refiriéndolo a una escala arbitraria. [7]

El electrodo de referencia patrón es el Electrodo de hidrógeno estándar (SHE), pero desgraciadamente, este electrodo es frágil y muy sensible a la contaminación, por cuya razón las medidas suelen realizarse con respecto a otros electrodos de referencia. El más utilizado en el laboratorio es el de cobre/sulfato de cobre (CSE) y de Calomel (SCE)

Los electrodos de referencia de mayor uso en los trabajos de campo y laboratorio son los de Cu/CuSO₄; Ag/AgCl y Cinc. En los trabajos de protección catódica de estructuras enterradas y en la detección de corrientes vagabundas se prefieren los electrodos de cobre sulfato de cobre (Cu / CuSO₄). [8]

Un electrodo muy útil para trabajo de campo, sobre todo en las mediciones de la corrosión, es el de **Cu/CuSO₄**. Este electrodo de construcción simple como vemos en la figura 1.1, se estructura con una barra de cobre sumergida en una solución de sulfato de cobre saturada, que contiene cristales de CuSO₄ para mantener la saturación.

Para establecer el contacto iónico (permitir el paso de los iones y de esta manera la corriente sin causar la contaminación indirecta significativa), se realiza mediante un puente salino el cual se emplea un tapón de madera (de pino o equivalente), el cual debe ir colocado en uno de los extremos de un tubo de vidrio de aproximadamente 20 cm de longitud, el cual contendrá el CuSO₄ y el Cu. En el otro extremo deberá ir una cubierta del mismo material, de preferencia roscada, que permitirá la salida del cable de contacto eléctrico.

El potencial de electrodo se estima por medio de la Ecuación de Nernst, considerando el equilibrio de un sistema metal-ión metálico en solución (Cu^o/Cu²⁺), es decir:

$$E_{Cu^{2+}/Cu^o} = E^o_{Cu^{2+}/Cu^o} + 2.303 \frac{RT}{nF} \log a_{Cu^{2+}} \dots \dots \dots (1)$$

La concentración nominal de una solución saturada de CuSO₄ a 25 °C, es de 1.3605 M siendo su coeficiente de actividad 0.0374 por tanto, dado que el potencial standard para el sistema es de 0.337 v, tenemos

$$E^o_{Cu^{2+}/Cu^o} = 0.2988 \text{ v}$$

y los valores experimentales reportados oscilan entre 0.300 y 0.316 V.

Su uso principal se da en las medidas en el campo; para lo que el electrodo debe ser resistente al choque y donde su usual tamaño grande reduce al mínimo los errores de polarización.

La precisión de este electrodo es adecuada para la mayor parte de las medidas de corrosión en campo, aunque esta algo por debajo de la que se obtiene con electrodos de calomelanos o de cloruro de plata, más propios de uso en el laboratorio.

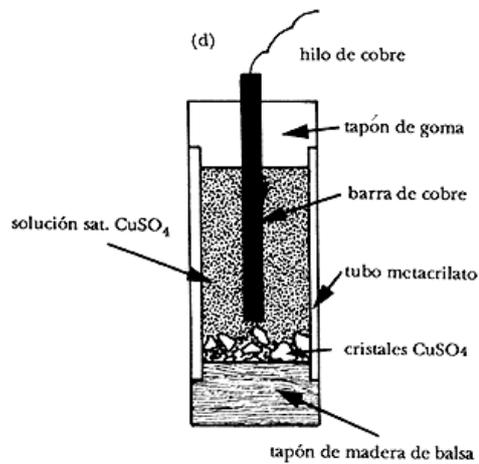


Figura 1.1: Esquema del electrodo de Cu/CuSO₄

Los electrodos de Ag / AgCl son utilizados generalmente para la medición de potenciales en agua de mar y del acero embebido en concreto contaminado con cloruros. [7]

Tabla 1.1. Potenciales de los electrodos de referencia. [9]

Electrodo	Electrolito	Potencial (V)
Calomel (SCE)	Saturado KCl	+0.2420
Plata/Cloruro de Plata (SSC)	Agua de mar	+0.25 aprox.
Cobre / Sulfato de cobre (CSE)	Agua de mar	+0.30 aprox.
Zinc	Agua de mar	-0.79 aprox.

A) Serie Electroquímica

La serie electroquímica se realiza midiendo el potencial de los metales respecto al electrodo de referencia de hidrógeno. La serie

electroquímica toma sólo en cuenta aquellos equilibrios electroquímicos que involucran a los metales y a sus cationes simples, o sea para reacciones que sólo dependen del potencial.

Para obtener información termodinámica de corrosión más completa, además de la serie electroquímica se puede recurrir a la serie galvánica y a los diagramas de Pourbaix. [10]

B) Serie Galvánica

La serie galvánica es una lista de metales y aleaciones ordenadas de acuerdo a su potencial de corrosión relativo en un medio ambiente dado.

Tabla 1.2. Potenciales estándar de reducción [24]

	Reacción en el electrodo	E° (V)
NOBLES	$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- = 2H_2O$	1.770
	$MnO_4^- + 4H^+ + 3e^- = MnO_2 + 2H_2O$	1.695
	$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- = Mn^{2+} + 4H_2O$	1.510
	$Au^{3+} + 3e^- = Au$	1.498
	$2HNO_2 + 4H^+ + 4e^- = N_2O + 3H_2O$	1.290
	$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- = Mn^{2+} + 2H_2O$	1.230
	$O_2 + 4H^+ + 4e^- = 2H_2O$	1.229
	$Pt^{2+} + 2e^- = Pt$	1.200
	$Pd^{2+} + 2e^- = Pd$	0.987
	$NO_3^- + 4H^+ + 3e^- = NO + 2H_2O$	0.960
	$Ag^+ + 1e^- = Ag$	0.799
	$Hg_2^{2+} + 2e^- = 2Hg$	0.788
	$Fe^{3+} + 1e^- = Fe^{2+}$	0.771
	$O_2 + 2H_2O + 4e^- = 4OH^-$	0.401
	$Cu^{2+} + 2e^- = Cu$	0.337
	$Sn^{4+} + 2e^- = Sn^{2+}$	0.150
	Electrodo de Referencia	$2H^+ + 2e^- = H_2$
$Pb^{2+} + 2e^- = Pb$		-0.126
$Sn^{2+} + 2e^- = Sn$		-0.136
$Ni^{2+} + 2e^- = Ni$		-0.250

ACTIVOS	$Co^{2+} + 2e^{-} = Co$	-0.277
	$Cd^{2+} + 2e^{-} = Cd$	-0.403
	$Fe^{2+} + 2e^{-} = Fe$	-0.440
	$Cr^{3+} + 3e^{-} = Cr$	-0.744
	$Zn^{2+} + 2e^{-} = Zn$	-0.763
	$Mn^{2+} + 2e^{-} = Mn$	-1.180
	$Al^{3+} + 3e^{-} = Al$	-1.662
	$Mg^{2+} + 2e^{-} = Mg$	-2.363
	$Na^{+} + 1e^{-} = Na$	-2.714
	$Ca^{2+} + 2e^{-} = Ca$	-2.870
	$K^{+} + 1e^{-} = K$	-2.925

Tabla 1.3. Serie galvánica para metales y aleaciones en agua de mar. [11]

↑	
Nobles o catódicos	
↓	
Activos o anódicos	
↓	

	Platino
	Oro
	Grafito
	Titanio
	Plata
	Chlorimet 3 (62 Ni, 18 Cr, 18 Mo)
	Hastelloy C (62 Ni, 18 Cr, 15 Mo)
	Acero inoxidable 18 – 8 con Mo (pasivado)
	Acero inoxidable (pasivado)
	Acero inoxidable al cromo 11 – 30% Cr (pasivado)
	Inconel (pasivado) (80 Ni, 13 Cr, 7 Fe)
	Níquel (pasivado)
	Soldadura de plata
	Monel (70 Ni, 30 Cu)
	Cuproníquel (60 – 50 Cu, 40 – 10 Ni)
	Bronces
	Cobre
	Latón
	Chlorimet 2 (66 Ni, 32 Mo, 1 Fe)
	Hastelloy B (60 Ni, 30 Mo, 6 Fe, 1 Mn)
	Inconel (activo)
	Níquel (activo)
	Estaño
	Plomo
	Soldadura Pb – Sn
	Acero inoxidable 18 – 8 con Mo (activo)
	Acero inoxidable 18 – 8 (activo)
	Ni – resist (fundición con alto níquel)
	Acero inoxidable al cromo 13% Cr (activo)
	Fundición
	Acero o Fierro
	Aluminio 2024 (4, 5 % Cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn)
	Cadmio
	Aluminio comercialmente puro (1100)
	Cinc
	Magnesio y aleaciones de magnesio

De acuerdo a la International Union for Pure and Applied Chemistry (IUPAC), los metales “Nobles” son los que tienen un potencial más positivo y por lo tanto sufren un mínimo de corrosión, mientras que los metales “Activos” son los que tienen un potencial más negativo (en comparación con los metales nobles) y los que se corroen más fácilmente.

Cabe destacar que la serie galvánica es útil cuando se desea elegir un metal o aleación para ser utilizado en un electrolito específico, puesto que se conoce su tendencia a corroerse.

El metal “Pasivo” es el que posee alguna forma de película protectora sobre su superficie, como es el caso de los aceros inoxidable, el aluminio, el titanio, el cobre y otros metales.

El metal “activo” es un metal desnudo, sin película protectora. El estado activo está asociado con un potencial más negativo que el correspondiente a un estado pasivo. [12]

1.3.3. Corrosión del Acero en Concreto Reforzado

La corrosión se presenta como un proceso de oxidación (proceso opuesto al de reducción) en el cual el acero sólido se disuelve y forma compuestos porosos y de mayor volumen, que provocan daños en el concreto.

En el medio ambiente existen diversos factores que pueden causar corrosión en el acero o promover las condiciones para que ésta se inicie. La causa más común de la corrosión del acero de refuerzo es la presencia de cloruros.

El tipo de corrosión depende del medio en el que se desarrolla, en un ambiente seco predomina la corrosión química y en un ambiente acuoso se presenta la corrosión electroquímica.

La corrosión que se presenta en el acero de refuerzo en concreto es electroquímica y consta de los mismos elementos con las siguientes consideraciones: la zona anódica: es una parte del acero de refuerzo, la zona catódica: es otra parte del acero de refuerzo, el conductor eléctrico: es el acero de refuerzo y el conductor iónico: es la solución

existente en los poros del concreto. Esquemáticamente la corrosión del acero de refuerzo se presenta en la figura 1.2:

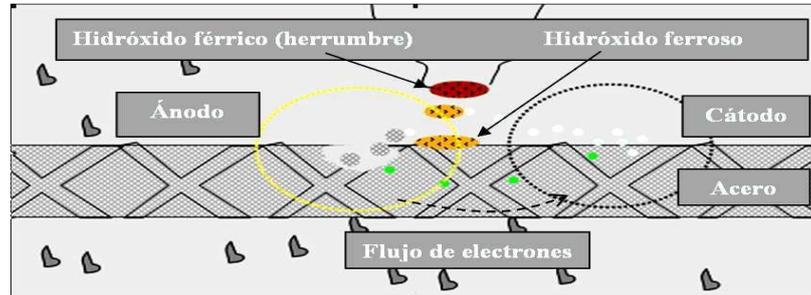


Figura N° 1.2 Proceso de corrosión del acero embebido en concreto

Fuente: Guzmán, G. (2008). Influencia del Agrietamiento del Concreto en la Corrosión del Acero de Refuerzo [Tesis de Maestría]. Recuperado de: [http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/431/Influenciadel%20agrietamiento .pdf?sequence=1](http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/431/Influenciadel%20agrietamiento.pdf?sequence=1)

Debido a que la corrosión en el acero de refuerzo es electroquímica se puede monitorear de forma no destructiva con las diferentes técnicas electroquímicas existentes. [13]

1.3.4. Deterioro del Concreto Reforzado.

El concreto es un material discontinuo, duro y de alta densidad. El concreto simple, sin refuerzo, es resistente a la compresión, pero es débil en tracción, lo que limita sus aplicaciones como material estructural. Para resistir cargas de tracción se emplea refuerzo de acero, generalmente en forma de barras, colocado en las zonas en donde se prevé que se desarrollarán tensiones bajo las acciones de servicio. El acero restringe el desarrollo de las grietas originadas por la poca resistencia a la tensión del concreto. El uso del refuerzo no está limitado a la finalidad anterior; también se emplea en zonas de compresión para aumentar la resistencia del elemento reforzado, para reducir las deformaciones debidas a cargas de larga duración y para proporcionar confinamiento lateral al concreto, lo que indirectamente aumenta su resistencia a la compresión [14].

Las estructuras de grandes ciudades, costas, puentes, etc., están reforzadas interiormente con varillas de acero las cuales se cubren de

concreto (mezcla de cemento Portland, arena, agua y agregado de pH alto, aproximadamente 12). Debido a su propia constitución, contiene una gran cantidad de poros, los cuales pueden estar interconectados, siendo por tanto permeable a líquidos y gases. Esto es de una gran importancia para el proceso de corrosión del acero de refuerzo, pues tanto el oxígeno como el agua pueden difundirse hacia el acero a través de la masa de concreto.

El deterioro del acero de refuerzo del concreto se puede llevar a efecto por diferentes fenómenos:

- Fractura localizada de la película de pasivación por iones cloruro
- Carbonatación. Decrecimiento del pH, lo que produce una pérdida de la pasivación; esto se puede deber a la lixiviación producida por agua (lluvia, nieve) la cual disuelve y elimina al hidróxido de calcio. También se puede presentar un intercambio iónico (iones Mg, amonio, sulfato, oxidrilo) entre los componentes de la pasta y el medio ambiente, reacciones que dan lugar a la formación de componentes solubles en el agua, la cual los va retirando del concreto.
- Sulfatación. La acción del SO_2 actúa sobre la superficie del acero de refuerzo, llevando a cabo un ataque localizado desde afuera hacia adentro del concreto.

1.3.4.1. Corrosión por Cloruros

Los cloruros provienen de sales inorgánicas que abundan en la naturaleza; y por eso, suelen encontrarse en el concreto desde la formación de la pasta de cemento. La presencia excesiva de cloruros en el concreto se puede originar por vía interna y externa.

- ✓ *Vía interna:* es cuando los cloruros han sido adicionados a la pasta desde la fabricación del concreto, al estar contenidos en el agua empleada para formar la pasta; en los agregados o con algún aditivo.

- ✓ *Vía externa:* es cuando los cloruros se encuentran en el medio ambiente que está en contacto con la estructura (suelo, agua, aire) y penetran en el concreto a través de fisuras o por difusión.

Por ejemplo, cuando la estructura de concreto está en contacto frecuente con agua que contenga iones de cloruro (agua de mar), a través de la propia porosidad del concreto puede llegar a las varillas de acero. En este momento se inicia la corrosión del acero. La herrumbre que se va formando como resultado del proceso de corrosión en el acero, por una parte disminuye la sección original de la varilla, y por otra, hace perder la adherencia inicial y deseada entre el acero y el concreto. El óxido de hierro formado (herrumbre) ocupa un volumen aproximadamente cuatro veces mayor que el acero sin corroer [15].

A medida que se va formando herrumbre por la corrosión del acero, ésta ejerce una gran presión sobre el concreto que lo rodea. Las fuerzas son de tal magnitud dentro del concreto que provocan grietas que lo fragilizan, perdiendo éste sus buenas propiedades mecánicas; el proceso continúa hasta que la herrumbre llega a aparecer en la superficie del concreto y se pueden observar las estructuras "manchadas". Los cloruros existen en dos formas básicas como cloruros libres y cloruros enlazados, los primeros representan elementos móviles en solución, mientras que los segundos representan iones relativamente fijos que interactúan con la pasta del cemento.

De acuerdo con el modelo de Tutti (1982) el proceso de corrosión puede ser diferenciado claramente mediante dos períodos. En primer lugar, se tiene un proceso de iniciación el cual corresponde con el tiempo que tarda la carbonatación y/o los cloruros en provocar la despasivación. Posteriormente, se

inicia el período de propagación donde propiamente el acero se corroe hasta llegar a un deterioro inaceptable de seguridad, funcionalidad o estética de la estructura. La corrosión progresiva del acero de refuerzo no solo es un daño en sí mismo del metal, si no que se traduce también en un deterioro irreversible del concreto donde la manifestación principal es el agrietamiento y desprendimiento del material. En la figura 1.9 y 1.10, se muestran esas etapas [16].

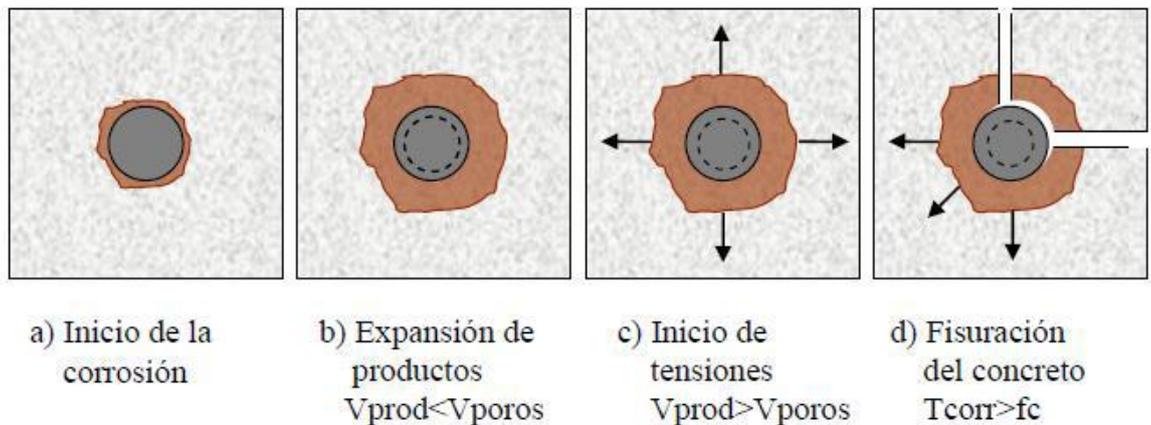


Figura 1.3. Proceso de fisuración del concreto (Weyers, R, 1998)

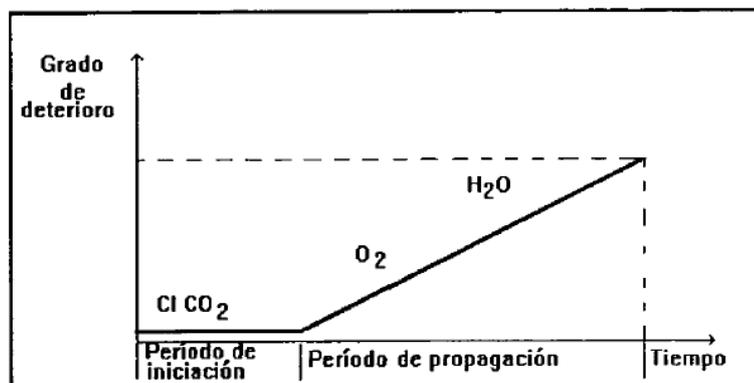


Figura 1.4 Tiempo de vida útil de una estructura

Los efectos de los cloruros sobre la corrosión son:

- Incrementan la conductividad de la mezcla, lo cual permite el movimiento de los iones hidroxilo (OH)⁻ entre el cátodo y el ánodo.

- Formación de ácido clorhídrico, lo cual produce el deterioro en la película de pasivación. Esto se presenta en el caso de que el grado de concentración de cloruros sea muy grande.

1.3.4.2. Corrosión por Carbonatación

La carbonatación en el concreto está dada por la modificación del pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH (fuertemente alcalino) a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral.

El concreto protege al acero de refuerzo ahogado contra la corrosión; esta protección se logra por la formación de una capa de óxido pasivo sobre la superficie del acero que permanece estable en el ambiente altamente alcalino. Por las condiciones de proceso, la carbonatación se presenta como un frente paralelo a la superficie del material, el cual se desplaza en dirección perpendicular. El frente de avance de la carbonatación se puede determinar a través de la aplicación de sustancias orgánicas (fenolftaleína). [16]

1.3.4.3. Corrosión por Sulfatación (SO₂)

Estudios previos manifiestan que el deterioro por concentraciones altas de dióxido de azufre (SO₂), se presenta de forma más rápida en este tipo de elementos (concreto reforzado), considerando que la herrumbre se formaba más rápidamente durante ciertas estaciones del año, dónde el contenido de SO₂ era elevado, aun considerando que la presencia en volumen de dicho contaminante es pequeño (1 molécula de dióxido de azufre permite la formación de 15 a 40 moléculas de herrumbre, de acuerdo a la estación).

En términos generales, los iones sulfato reaccionan con los aluminatos cálcico hidratados del clinker de cemento portland formando la sal de Candlot o Etringita, que es muy poco soluble en agua y provoca un gran aumento de volumen del orden del 250% en relación a los reactivos iniciales. Esta expansión produce grandes tensiones internas que, por lo general, no pueden ser absorbidas por el material y desencadena una serie de fisuras y desprendimientos superficiales de material. [16]

1.3.5. Mecanismo de Corrosión del acero



El fierro al liberar dos electrones se convierte en un ión con carga positiva, ésta es una reacción de oxidación y la porción del metal donde ocurre esta reacción es el ánodo.



El agua, el oxígeno y los electrones provenientes del ánodo se combinan y forman iones hidróxilo u oxidrilo.



El ion de carga positiva se combina con los iones hidroxilo para formar el hidróxido ferroso



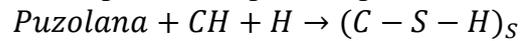
El hidróxido ferroso se combina con el agua y con moléculas de oxígeno para formar finalmente el hidróxido férrico o herrumbre de color rojizo, que tiene un volumen 8 veces mayor al volumen inicial de la molécula de fierro. [13]

1.3.6. Mecanismos de Reacción de la Puzolana en concreto

Cuando una puzolana se usa en combinación con el cemento portland, este durante su hidratación, es la fuente de hidróxido cálcico que

reacciona con los aluminosilicatos presentes en la puzolana para formar compuestos cementantes.

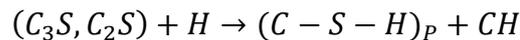
La reacción puzolánica puede representarse mediante:



donde:

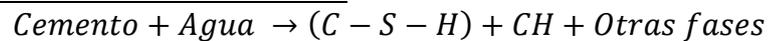
$(C - S - H)_S$: *Silicatos de calcio hidratados de estequiometría no definida*

Por su parte la reacción de hidratación del cemento puede representarse por:



Reacciones Hidráulicas del cemento

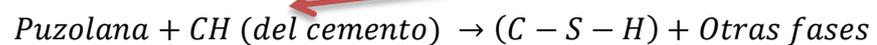
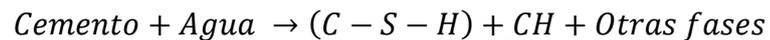
Hidratación del cemento Portland



Donde:

- *C - S - H: Silicato de calcio*
"Pegamento" que mantiene todo unido y principalmente responsable de la Resistencia y la impermeabilidad del concreto
- *C - H: Hidróxido de calcio*
No tiene valor de cementación, es de fácilmente lixiviado y participa en el ataque de los sulfatos

Reacciones Puzolánicas



Donde:

- *C - S - H: Silicato de calcio*
Se obtiene más "Pegamento" y más Resistencia y por lo tanto mayor impermeabilidad del concreto. Además como su composición son esferas muy pequeñas tapan los poros del concreto. [17]

Las propiedades técnicas de los materiales con adiciones puzolánicas, se derivan, principalmente, de tres características de la reacción puzolánica:

1. Es una reacción lenta, al contrario que la reacción de hidratación del cemento que es rápida, por tanto, la velocidad de liberación

del calor y el desarrollo de resistencias serán procesos más lentos

2. Es una reacción que consume hidróxido de calcio en vez de generarlo, lo que es importante para la durabilidad de las pastas hidratadas en ambientes ácidos.
3. Al producirse en un tiempo posterior los productos de reacción rellenan, de forma muy eficiente, los espacios capilares que quedan después de la hidratación de los componentes del cemento.

Así se mejora la impermeabilidad y la resistencia mecánicas del sistema (menor porosidad).

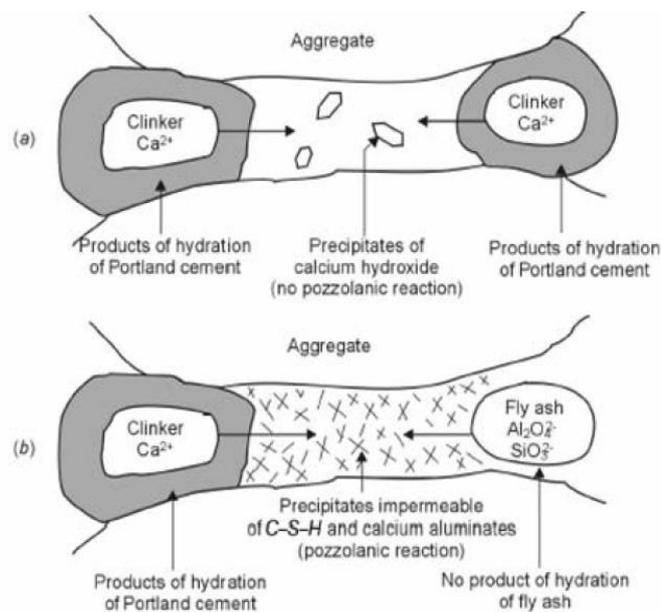


Figura 1.5 a) Microestructura de la pasta de cemento Portland hidratada, b) Microestructura de la pasta de cemento Portland hidratada con adición de cenizas volantes

(i) Refinamiento de tamaño de Poro:

La formación de productos de hidratación secundarios (principalmente silicatos de calcio hidratados) alrededor de las partículas de puzolana tiende a rellenar las grandes cavidades

capilares con un material microporoso y, por consiguiente, de baja densidad. El proceso de transformación de un sistema que contiene grandes cavidades capilares en un producto microporoso que contiene numerosos poros finos se denomina «refinamiento del tamaño de poro».

(ii) El refinamiento de tamaño de grano.

La nucleación del hidróxido de calcio alrededor de las finas y bien distribuidas partículas de puzolana tendrá el efecto de reemplazar los grandes y orientados cristales de hidróxido de calcio por numerosos, pequeños, y menos orientados cristales (de baja cristalinidad) procedentes de la reacción puzolánica. El proceso de transformación de un sistema que contiene granos grandes de un componente en un producto que contiene los granos más pequeños se denomina «refinamiento del tamaño de grano».

Tanto el proceso de refinamiento del tamaño del poro como de grano dan lugar a que aumente la resistencia de la pasta de cemento. [17]

Desde el punto de vista de la Impermeabilidad y Durabilidad

Los efectos de la reacción del puzolánica son probablemente más importantes en el hormigón que en la pasta de cemento hidratada

La permeabilidad del hormigón, generalmente, es más alta que la de la pasta de cemento debido a las microgrietas que se producen en la zona de la transición.

Se ha sugerido que los procesos de refinamiento del tamaño del poro y del tamaño de grano fortalecen la zona de la transición, reduciéndose la microfisuración y aumentando la impermeabilidad del hormigón.

Las cenizas volantes tienen algunos efectos importantes sobre el funcionamiento de estructuras de concreto armado siendo los más importantes: la enorme reducción de la tasa de penetración de los iones cloruro en el concreto, el aumento de la concentración crítica de

cloruro respecto a la corrosión inducida y la resistencia al ataque de sulfatos. [17]

1.3.7. Mecanismos de mantenimiento del concreto y métodos de protección del acero de refuerzo contra la corrosión

Debido a que la corrosión en el concreto reforzado es un fenómeno electroquímico es posible estudiarla con métodos tales como:

- Inspección visual (Figura 1.6)
- Media celda
- Resistencia a la polarización lineal
- Impedancia electroquímica
- Ruido electroquímico

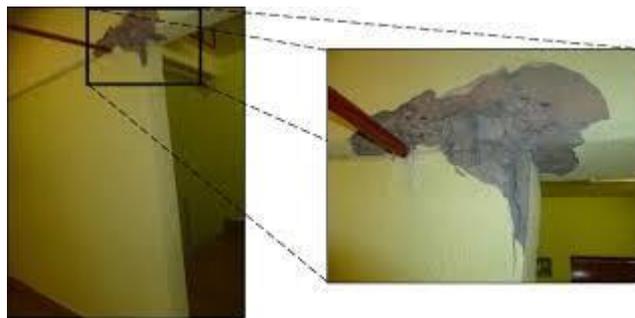


Figura 1.6: Inspección Visual de una estructura de concreto deteriorada

La selección de las técnicas en un estudio específico depende del tipo de corrosión y de consideraciones económicas. Sin embargo, debido a la complejidad del fenómeno en estudio es necesario llevar a cabo por lo menos dos de las pruebas anteriores. [13] Los factores que intervienen en el deterioro del acero de refuerzo del concreto se pueden asociar con los presentados en la tabla 1.4:

Tabla 1.4 Factores que intervienen en el deterioro del acero de refuerzo [13]

A) Concreto	B) Características del material de refuerzo	C) Medio Ambiente
• Permeabilidad (relación	• Condición Superficial	• Humedad relativa

agua/cemento, cemento/arena, compactación y curado) • Porosidad • Espesor del recubrimiento • Homogeneidad del recubrimiento. • Tipo de cemento • Agregados • Colocación del concreto	• Composición y microestructura del material • Estado de solicitaciones	• Contaminantes presentes (CO ₂ , SO ₄ , Cl, O ₂). • Corrientes parasitas. • Efectos de organismos vivos (Corrosión o degradación biológica)
---	---	---

1.3.8. Métodos de Protección

El concreto armado es un material compuesto de concreto y acero asociados de modo que forman un sólido único. Existen diversas medidas para limitar el daño que puede sufrir el acero de refuerzo, entre otras se puede mencionar:

- Reparación del concreto dañado.
- Modificación del medio ambiente.
- Modificación de las condiciones internas del concreto.
- Formación de una barrera entre el concreto y el medio exterior.
- Formación de una barrera entre el acero de refuerzo y el concreto.
- Aplicación de protección catódica.
- Empleando materiales más resistentes a la corrosión para las barras de refuerzo.

Para que el concreto funcione adecuadamente como protector del acero de refuerzo, debe también poseer un espesor adecuado; de tal forma que en las condiciones ambientales en la que se encuentre expuesto, la velocidad de penetración de los agentes corrosivos sea congruente con la vida útil de la estructura. La primera etapa en la

lucha para evitar el deterioro del concreto se da a través de evitar el acceso de aire con sus respectivos agentes corrosivos (SO_2 , CO , CO_2 y O_2). La eficiencia del concreto como elemento protector depende de su permeabilidad, integridad y espesor.

1.3.8.1. Protección del Concreto

El recubrimiento debe mantener aislado al concreto del medio externo corrosivo, lo cual se puede lograr mediante:

- ✓ **Películas Poliméricas;** la más usual es el polietileno, aunque el inconveniente es que el espesor suele ser grande, dejando a la superficie inhabilitada para funciones en las que el acabado superficial es importante.
- ✓ **Recubrimientos por Película;** es similar al de un impermeabilizante de superficies. Los materiales más utilizados son las resinas epóxicas.
- ✓ **Protección por sellado;** ideal para superficies en donde se busca aislar al acero de refuerzo de posibles daños por corrosión.

1.3.8.2. Protección al Acero de Refuerzo

Es mediante recubrimientos especiales; éstos pueden ser:

- a. Metálicos:** entre los recubrimientos metálicos se distinguen 2 tipos:
- i.** Aquellos que se efectúan con metales más activos que el acero, como son el zinc y el cadmio, con los cuales al presentarse el fenómeno corrosivo se ataca el metal de recubrimiento al funcionar anódico con relación al acero.
 - ii.** Los recubrimientos con metales más nobles que el acero, como el cobre y el níquel; cuya eficacia en la protección del acero depende de la integridad del recubrimiento metálico.

b. No Metálicos: el recubrimiento no metálico más empleado para proteger al acero de refuerzo contra la corrosión consiste en aplicar resinas epóxicas en forma de polvo, que se adhiere electrostáticamente a las varillas perfectamente limpias y previamente calentadas.[13]

1.3.8.3. Protección Catódica

La protección catódica del acero de refuerzo ha sido utilizada desde la década de 1980; es particularmente aplicada en los casos donde la corrosión es debida al ataque por cloruros. El principio de la protección catódica se basa en llevar el potencial del acero hacia valores más negativos, reduciendo de esta forma la diferencia de potencial entre sitios anódicos y catódicos. Para la aplicación de la protección catódica, existen dos métodos, estos son:

- ✓ **Por Ánodos de Sacrificio;** en este caso, un metal más activo (ánodo) es conectado al refuerzo funcionando el recubrimiento de concreto como un medio electrolítico (ver figura 1.7). De esta forma la corrosión toma lugar en el ánodo y no en el refuerzo [16]

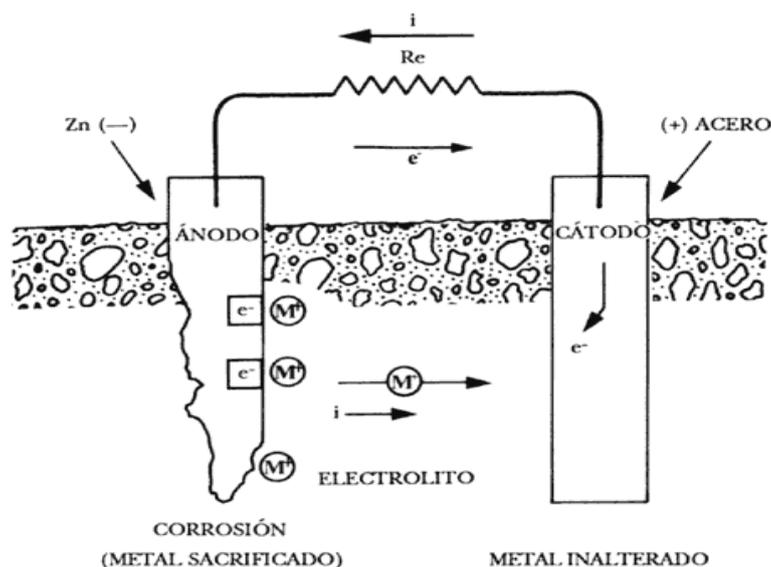


FIGURA 1.7 Mecanismo de protección catódica por ánodo de sacrificio [15]

- ✓ **Por Corriente Impresa;** un ánodo inerte se conecta al refuerzo y la corriente directa es aplicada cambiando el potencial hacia valores catódicos (ver Figura 1.8)

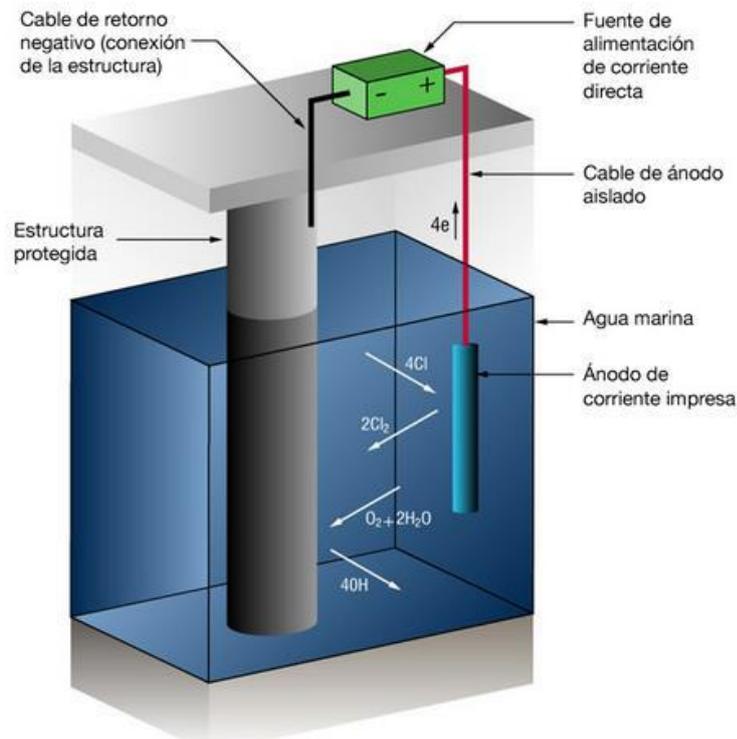


FIGURA 1.8: Protección catódica por corriente impresa [16]

1.3.8.4. Protección por Aditivos

Existen también sustancias que se le agregan al concreto desde su elaboración (aditivos), con el fin de proteger al acero de refuerzo de la corrosión. Estos tipos de aditivos se pueden separar en dos clases:

- I.** Neutralizadores de Corrosión; son compuestos químicos inorgánicos que al estar en el concreto neutralizan la reacción química que existe entre el acero de refuerzo y el medio que lo rodea.
- II.** Reductores de permeabilidad; a fin de incrementar la capacidad del concreto para oponerse a la penetración de los agentes corrosivos, es posible considerar también el uso de dos tipos de aditivos:

1. Reductores de agua; el efecto que se persigue es el de reducir la relación agua/cemento, que es el medio más práctico de regular la porosidad y la permeabilidad del concreto al agua y al aire
2. Polvos minerales con propiedades puzolánicas; se busca aprovechar la aptitud de las puzolanas para modificar la estructura porosa de la pasta de cemento hidratada, reduciendo el tamaño de los poros, logrando así una disminución de la permeabilidad del concreto.

1.3.8.5. Protección contra ácidos

Ya que los componentes del cemento son solubles en ácidos, deben preverse medidas de protección en la fabricación de concretos que deben de resistir la acción de dichos ácidos. El agua que contiene dichos ácidos libres, es fácil de reconocer, porque su valor de pH es menor a 7, aunque no sean dañinas para el concreto mientras su pH sea mayor a 6. Sin embargo, agua con pH menor a 7 puede ser perjudicial para las armaduras, por lo que la protección en este caso es necesaria. La mayoría del agua ácida disuelve la pasta endurecida del cemento, aumentando su poder disolvente al disminuir el valor de pH.

La actividad de los ácidos contenidos en agua, tanto del subsuelo como de otros orígenes, debe ser estimada de acuerdo con las normas y recomendaciones de los diferentes países, normas en las cuales se prescriben o recomiendan las medidas protectoras a adoptar [14]

1.3.9. Métodos de Reparación

Aunque muchas obras de concreto son o han sido diseñadas y construidas bajo criterios de durabilidad, también es cierto que existen

ambientes altamente agresivos que provocan la degradación prematura de estas estructuras. Por ello, es necesario tomar acciones para recuperar y garantizar la vida de servicio.

Es importante resaltar que el mantenimiento y rehabilitación con métodos convencionales permite cumplir en menor grado con criterios de sustentabilidad, puesto que conllevan a la utilización de nuevos materiales. A diferencia de los métodos no convencionales (Técnicas electroquímicas) de intervención, los cuales cumplen en un sentido más amplio con el concepto de sustentabilidad puesto que no requieren de una sustitución de materiales. Es preciso señalar que la aplicación oportuna y preventiva permite alcanzar una mayor eficiencia de las técnicas electroquímicas [16]

1.3.9.1. Métodos Convencionales de Reparación

Los métodos tradicionales para proteger y reparar estructuras de concreto han sido ampliamente utilizados por varias décadas, incluso su uso tiene vigencia debido a los bajos costos que representan.

✓ Reemplazos de Concreto

Este tipo de reparación consiste básicamente en la sustitución del concreto deteriorado por concreto nuevo. Este método se debe hacer de forma inmediata a la eliminación de aquellas regiones de material deteriorado, se considera que el material se deberá limpiar hasta llegar a la superficie de concreto que no ha sufrido deterioro.

✓ Aleaciones

Las aleaciones no deben presentar corrosión aun cuando exista la presencia de cloruros y de la propia carbonatación del material. Se ha optado por el empleo de aceros inoxidable austeníticos, en particular 304 y

316. Los casos de aplicación de estos son mínimos y se circunscriben a situaciones donde:

- i. Existe una elevada concentración de cloruros
- ii. Estructuras construidas sobre el mar
- iii. Estructuras en las que se espera una larga vida de servicio

El uso de acero inoxidable no sólo representa una forma en la que se podrá evitar la corrosión del acero, garantizando así la confiabilidad de la estructura, sino que al no formarse óxidos (existe un aumento de volumen) se evita también el que exista alguna tendencia del concreto a fracturarse, manteniéndose la integridad de la unión concreto-material de refuerzo.

1.3.9.2. Métodos No Convencionales de Reparación

La aplicación de las técnicas electroquímicas (TE) como métodos no convencionales de reparación y mantenimiento han despertado gran interés en el campo de la ingeniería; sin embargo, algunos de estos avances solo han podido ser incluidos en reglamentos y normas de carácter local y regional. Actualmente existe un claro consenso de que solo hay dos y en algunos casos tres técnicas (protección catódica, extracción electroquímica de cloruros y re-alcalinización) capaces de controlar o disminuir hasta un nivel despreciable la corrosión del acero de refuerzo.

Las TE son capaces de detener o retrasar los procesos anódicos o catódicos de la corrosión mediante la polarización del acero y por los cambios químicos del concreto. Dichas técnicas involucran la aplicación de campos eléctricos al sistema acero-concreto, el arreglo (Figura 1.9) consiste en colocar en la superficie del concreto un metal conductor denominado ánodo, conectado éste a su vez a la polaridad

positiva de una fuente de corriente directa, mientras que el polo negativo se conecta al acero de refuerzo. El flujo de corriente en la celda propiciará condiciones físicas y químicas que facilitarán el restablecimiento de la pasividad del acero.

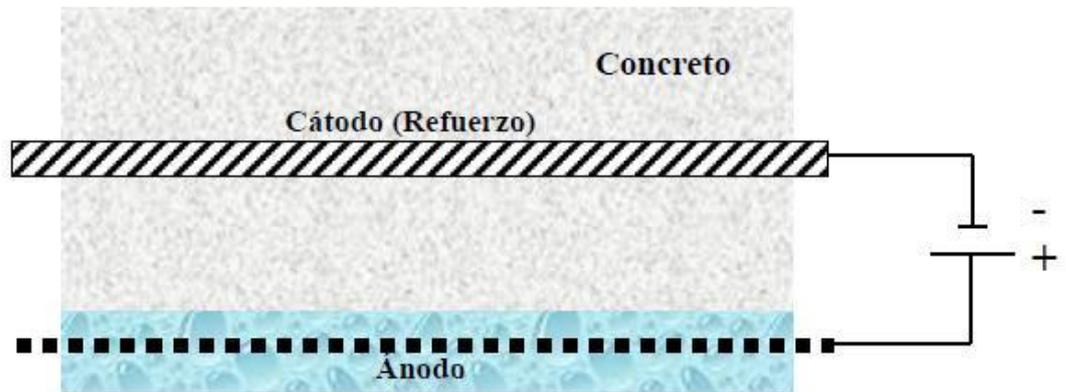


Figura 1.9 Celda electroquímica básica utilizada en las Técnicas electroquímicas (González, 2010)

En el caso de las TE no es necesario remover grandes cantidades de recubrimiento de concreto, solo será suficiente con resanar desconchamientos y agrietamientos localizados. De acuerdo con lo anterior, es posible deducir que los mayores beneficios económicos de las TE se obtienen cuando las intervenciones se llevan a cabo antes de que el daño se extienda por todo el elemento estructural, es decir de manera preventiva [16]

1.3.9.2.1. Extracción electroquímica de Cloruros.

Esta técnica es utilizada en estructuras en las que se ha determinado que existe contaminación por cloruros. Consiste en extraer por medios electroquímicos los iones cloruro que han penetrado en el concreto, esto a través de la aplicación de corriente directa entre un ánodo y el acero de refuerzo que actúa como cátodo. Estos métodos se recomiendan para estructuras sin acero pre o post

tensado y cuyo deterioro del concreto sea limitado. Al igual que en la protección catódica, es necesario un preciso control de la corriente aplicada, ya que si esta excede la magnitud requerida, se producirá reducción de la resistencia, reblandecimiento de la pasta de concreto alrededor de las barras de refuerzo y fracturas en el concreto (Figura 1.10)

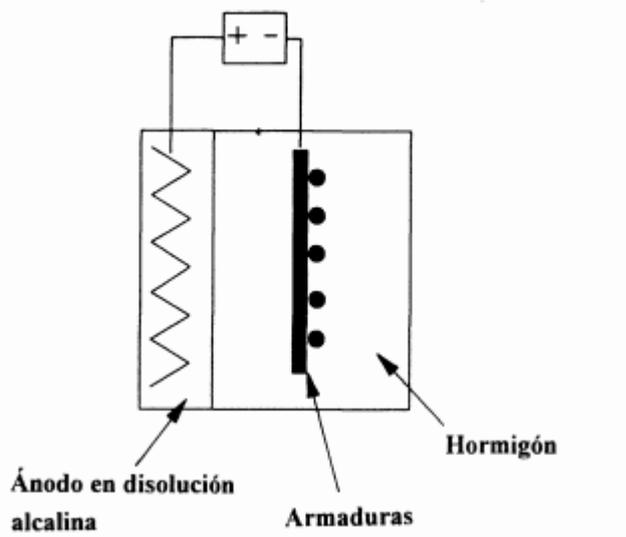


Figura 1.10 Esquema de funcionamiento de la técnica de extracción electroquímica de cloruros (Bertolini Luca, et al.,)

1.3.9.2.2. Re-alkalinización.

Este tipo de restauración consiste en devolverle al concreto su grado de alcalinidad perdida por efecto de la carbonatación. Este método es similar a la extracción electroquímica de cloruros, pues también se aplica una corriente directa entre el acero y un ánodo externo. En este caso el electrolito usado es una solución de carbonato de sodio. En este proceso las densidades de corriente son significativamente mayores a las requeridas por la protección catódica [13].

En la Figura 1.11 se muestra esquemáticamente.

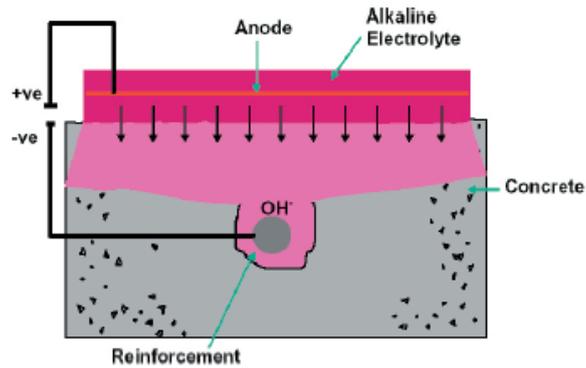


Figura 1.11 Representación esquemática de la Re-alcalinización (Sika-Vector corrosión technologies, 2003)

1.3.9.2.3. Protección Catódica

La protección catódica interviene en el proceso de corrosión; para detener la corrosión, esta intervención debe ser al nivel apropiado y debe ser continua. El sistema de protección catódica es medido periódicamente para determinar el nivel de protección que está siendo logrado y asegurar la continuidad de la protección como sea posible. Es también importante mantener adecuados registros de esas inspecciones. En algunos casos, estos registros son requeridos por acuerdos regulatorios. En cualquier caso, los registros son usados en la conciliación de problemas en el sistema, ya que las tendencias dentro de un sistema son con frecuencia características de ciertos tipos de problemas del mismo. Esta sección dará un idea general de la mediciones que son realizadas durante un monitoreo de rutina en un sistema de protección catódica.

El control de eficiencia de ésta técnica está basado normalmente en el valor de potencial alcanzado

durante la aplicación. Es importante reconocer que no existe un potencial fijo de inmunidad puesto que éste valor depende de diversas variables, dentro de las que destacan el contenido de cloruros, pH del concreto y tipo de cemento. La cantidad de despolarización es el criterio mayormente utilizado para evaluar la eficiencia de la técnica. Las condiciones de prevención y protección en este caso se alcanzan cuando el potencial decae menos de 100 [mV] dentro de un período de tiempo de 4 a 24 horas medido inmediatamente (0.1 a 1 segundo) después de interrumpir el circuito (NACE ESTANDAR RP0290-90).

El potencial alcanzado durante la aplicación es también un criterio normalmente utilizado para evaluar el grado de protección [16]. En el caso de estructuras de concreto reforzado expuestas a la atmósfera, la cantidad de polarización en las primeras 24 horas deberá ser como mínimo de 100 [mV].

Conociendo el tipo de daño en cualquier estructura de concreto, será posible optar por uno de los mecanismos de mantenimiento antes mencionados. Pero si el daño es tal que empieza a llegar al acero de refuerzo, con los mecanismos de protección se tomara a criterio del analista cual es el adecuado. Por lo que, en este proyecto se optó por emplear 3 métodos de evaluación en especímenes cilíndricos de concreto.

1.3.10. Evaluación de la corrosión en estructuras de concreto

Debido a que la corrosión en el concreto reforzado es de tipo electroquímico es posible estudiarla con métodos afines como: inspección visual, media celda, resistencia a la polarización lineal (RPL), impedancia electroquímica o ruido electroquímico. La selección de las técnicas en un estudio específico depende del tipo de corrosión y de consideraciones económicas.

1.3.10.1. Inspección visual

La ventaja principal de este método radica en que es accesible y sirve para evaluar en cualquiera que sea la condición de la estructura, es confiable y no se requiere de una inversión económica alta.

1.3.10.2. El método de la Media Celda

Este método estima la probabilidad de corrosión del acero de refuerzo en concreto interpretando su potencial de corrosión. Sin embargo este potencial no puede ser medido directamente, pues al intentarlo es necesaria una segunda terminal cuyo potencial absoluto se desconoce, por esta razón, se adopta el electrodo normal de hidrógeno (ENH). [6]

1.4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿En qué medida influye el porcentaje de Ceniza volante clase C en el Potencial de Corrosión del Acero A615 embebido en Concreto fabricado con Cemento Portland Tipo I?

1.5. HIPOTESIS

➤ Si se incorpora un 5% de ceniza volante de clase C en concreto armado entonces el Potencial de Corrosión del Acero A615 disminuirá.

1.6. VARIABLES

- Variable dependiente:

El Potencial de Corrosión del Acero A615 disminuirá.

- Variable independiente:

Se incorpora ceniza volante clase C en concreto armado.

1.7. ALCANCE

Se logrará predecir la estimación de la probabilidad de ocurrencia de corrosión del acero embebido en concreto incorporando diferentes porcentajes de una puzolana artificial que es la ceniza volante de clase C, para lo cual se va a confeccionar una serie de probetas cilíndricas con acero embebido en concreto que serán expuestas a un medio agresivo por un determinado tiempo.

Para obtener la estimación de la probabilidad de ocurrencia de corrosión se hará uso de una técnica termodinámica en el cual relaciona el estado de corrosión y el potencial de corrosión de un metal en un medio agresivo.

1.8. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El uso de residuos agroindustriales como puzolanas, nos brinda la oportunidad de desarrollar, en nuestro país, soluciones aplicando ingeniería para el desarrollo de tecnologías capaces de reducir la contaminación ambiental.

Estas puzolanas derivadas de las cenizas, son materiales silíceo-aluminosos que actúan como compuestos cementantes, contribuyendo a las propiedades del concreto durante su hidratación.

La ceniza volante clase C por sus características químicas con el cemento puede reducir la permeabilidad en el concreto dando como consecuencia reducir los potenciales de corrosión en el concreto armado y por lo tanto reducir la velocidad de corrosión del acero embebido en concreto, generando así una solución y mejoramiento del concreto armado utilizado tradicionalmente, así mismo con esto se podrá alargar el periodo de vida útil de las estructuras haciéndolas más seguras. Incluso, podría reducirse el costo

de mantenimiento de las estructuras debido a su calidad constructiva y eficiencia frente a agentes agresivos.

1.9. APORTES

El uso de ceniza volante Clase C como sustitución parcial del cemento, ayudará a reducir la permeabilidad del concreto y disminuirá la probabilidad de corrosión del acero de refuerzo en el concreto. Estos usos de puzolanas utilizando residuos agroindustriales, permitirá crear futuras líneas de investigación innovando en las técnicas de construcción para una mejora en la respuesta estructural de las edificaciones, como también disminuir la contaminación producida por desechos agroindustriales fomentando su uso para hacer tecnología capaz de solucionar problemas en el concreto armado.

Lograr con la ceniza volante clase C la sustitución parcial del cemento, contribuirá en una reducción de impacto ambiental, así como una reducción económica a la industria cementera del Perú. (Ver Ejemplo de Análisis de Costos Unitarios en Anexos)

1.10. OBJETIVOS

1.10.1. General

- Determinar la influencia del porcentaje de ceniza volante clase C en reemplazo del cemento tipo I sobre el Potencial de corrosión del acero A615 embebido en concreto fabricado con cemento tipo I.

1.10.2. Específicos

- Determinar el porcentaje adecuado de ceniza volante clase C en reemplazo al cemento portland I.
- Determinar la influencia del porcentaje de ceniza Volante clase C en la Resistencia a la Compresión.
- Comparar los costos unitarios del concreto con ceniza y sin ceniza de los diferentes relaciones de a/c.

CAPÍTULO II METODOLOGÍA

2.1. MATERIAL

2.1.1. MUESTRA

Se elaboraron probetas de concreto, de un total de 36 probetas cilíndricas con las relaciones de agua/cemento = 0.50, 0.55 y 0.60. Las probetas cilíndricas de concreto fueron de 4"x8" pulgadas. A las probetas se le incorporó 0%, 5%, 10% y 15% en peso de reemplazo de ceniza volante, en la siguiente tabla 1 se muestra información de las dosificaciones.

Tabla 2.1: Relaciones de a/c a diferentes porcentajes.

CEMENTO PORTLAND TIPO I											
a/c = 0.5				a/c = 0.55				a/c = 0.60			
0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%

Las probetas se elaboraron con cemento comercial portland tipo I (ASTM C150, 1999) producido por la empresa Pacasmayo y ceniza volante (FA) que se obtuvo de la Planta de la Empresa Papelera Trupal S.A ubicado en la zona de Malca, Distrito de Santiago de Cao, Provincia de Ascope, Departamento de La Libertad. Se utilizó agregado grueso y fino de canteras que son propios de la provincia donde se realizó el proyecto. Se utilizó agua potable, cuyos iones y características fisicoquímicas están dentro de los rangos permitidos por la norma de diseño de mezcla ASTM C1602/C1602M (ver Anexo 01). Finalmente, se utilizará un acero de baja aleación, ASTM A615, grado 60 y diámetro de 5/8 de pulgada para refuerzo de concreto.

En cada probeta se colocó una varilla de acero ASTM A615 como electrodo de trabajo con una longitud de 25 cm los cuales estarán en la parte céntrica de la probeta lo cual se muestra en la figura 2.1 y estas probetas se crearon específicamente para esta tesis procurando crear las condiciones reales del acero en las edificaciones

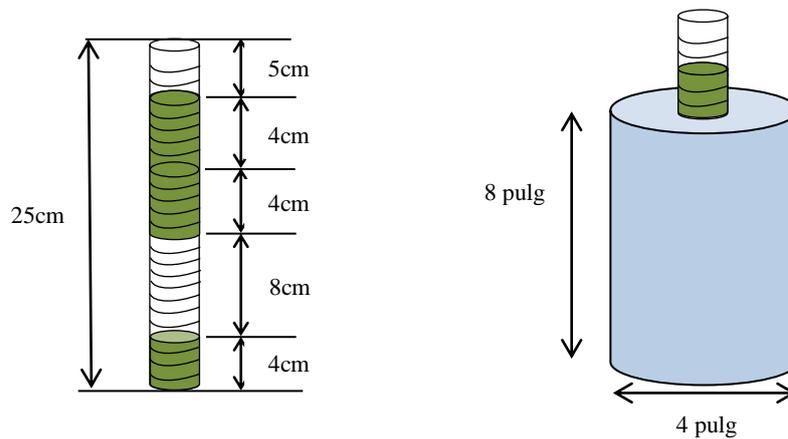


Figura 2.1: Dimensión del acero usado en las probetas

A su vez se elaboró probetas de concreto que fueron para el ensayo de compresión que nos indicó la resistencia de la probeta, de un total de 36 probetas cilíndricas con las relaciones de agua/cemento = 0.50, 0.55 y 0.60. Las probetas (cilindros de concreto 150x300mm), se elaborarán en base a las Normas ASTM C470-15 y ASTM C192-16. A las probetas se le incorporó 0%, 5%, 10% y 15% en peso de reemplazo de ceniza volante lo cual fue descrito en el cuadro anteriormente.

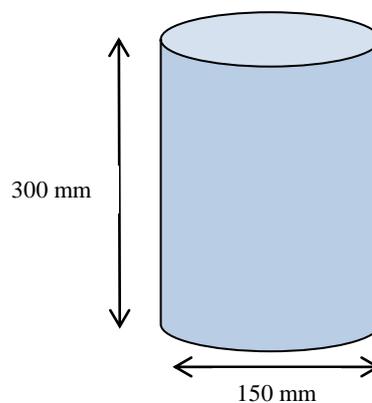


Figura 2.2: Dimensión de la probeta usada.

2.1.2. INSTRUMENTOS Y MATERIALES PARA LA CELDA GALVÁNICA

- ✓ Un Voltímetro digital
- ✓ Electrodo de Referencia (Cu/CuSO₄) ($\varnothing_1 = 27\text{mm}$)
- ✓ Cloruro de Sodio (NaCl)
- ✓ Cristales de Sulfato de cobre (CuSO₄)
- ✓ Un recipiente de plástico para solución acuosa electrolítica

2.2. MÉTODOS

Antes de proceder a medir los potenciales de la media celda, primero verificamos que el electrodo de referencia nos dé una lectura correcta del potencial de corrosión con respecto a otro metal y para eso utilizamos una celda galvánica que consta de un metal que en este caso es el Zinc por ser un metal activo y más fácil de conseguir, un voltímetro digital, una solución acuosa electrolítica (NaCl al 3.0%) capaz de la transferencia de electrones en el medio, un recipiente para la colocación de la solución y un electrodo de referencia Cu/CuSO₄. En la siguiente figura 2.3 se muestra el montaje de la celda galvánica.

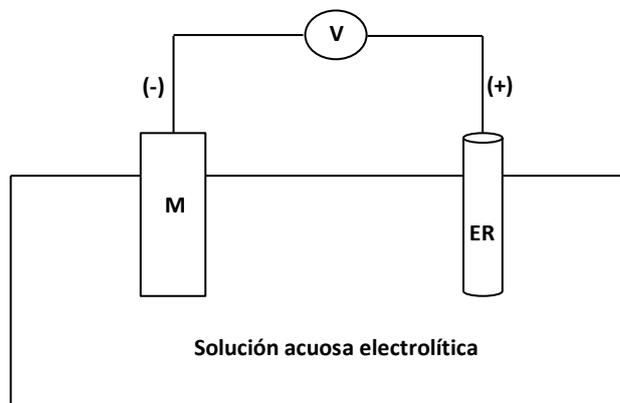


Figura 2.3: Esquema de la celda galvánica.

Se coloca la solución en el recipiente para luego sumergir parcialmente el metal zinc y el electrodo de referencia, después se conecta los cables conectores del voltímetro al metal Zinc y al electrodo de referencia, el voltímetro debe indicar una diferencia de potenciales de la reacción catódica y la reacción anódica igual a +1.10 voltios.

El objetivo principal del montaje de la celda galvánica es el de obtener que el electrodo de referencia tome valores correctos al medir potenciales en el método de la media celda.

El procedimiento para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto está contenido en la Norma ASTM C 876-15, la cual establece criterios que relacionan al potencial de corrosión y su condición de corrosión. [6]

2.2.1. Método de la Media Celda (ASTM C 876-15)

1. Espaciamiento entre medidas:

Cuando no está pre-definido un espaciamiento mínimo entre medidas en la superficie del miembro de concreto, es de valor pequeño para tomar dos medidas desde virtualmente el mismo punto. Contrariamente, las medidas tomadas con espaciamiento muy ancho tampoco pueden detectar la actividad corrosiva que está presente ni resulta en la acumulación adecuada de datos para evaluación. El espaciamiento será entonces consistente con el elemento que está siendo investigado y el proyectado uso final de las mediciones.

2. Conexión Eléctrica para el Acero:

2.1. Haga una conexión eléctrica directa con el acero de refuerzo, por medio de una compresión tipo abrazadera o por soldadura, a una varilla saliente. Para asegurar una conexión de resistencia eléctrica baja, raspe o cepille la varilla antes de conectar al acero de refuerzo. En algunos casos, esta técnica puede requerir la remoción de alguna parte de concreto para exponer el acero de refuerzo. Conecte eléctricamente el acero de refuerzo al terminal positivo del voltímetro.

2.2. El acoplamiento puede ser directamente al acero de refuerzo, excepto en casos donde esto pueda ser documentado que un miembro de acero expuesto está directamente adherido al acero de refuerzo. Algunos miembros, tales como presas de expansión, placas, trabajos elevados y parapeto de rieles pueden no estar directamente ligados al acero de refuerzo y entonces puede producir la invalidez de las lecturas. La continuidad eléctrica de los componentes del acero con el acero de refuerzo puede ser establecida mediante la medida de la resistencia entre los componentes del acero separados extensamente sobre la cubierta. Donde la medida de ensayos duplicados es continuada sobre un largo

período de tiempo, idénticos puntos de conexión deben ser usados cada vez, para una medida dada.

3. Conexión Eléctrica de la Media Celda: Una conexión eléctrica al final del cable conductor de la media celda y el otro extremo del mismo cable al terminal negativo del voltímetro.

4. Pre-humedecimiento de la Superficie de Concreto:

4.1. Bajo ciertas condiciones, la superficie de concreto o un material de sobrecapa, o ambas, pueden ser pre-humedecidas por cualquiera de los métodos descritos en la Norma para decrecer la resistencia eléctrica del circuito.

4.2. Un ensayo para determinar la necesidad de pre-humedecer puede ser hecho así:

4.2.1 Coloque la media celda en la superficie de concreto y manténgala sin moverse.

4.2.2 Observe el voltímetro para una de las condiciones siguientes:

a) El valor medido del potencial de media celda no cambia o fluctúa con el tiempo.

b) El valor medido del potencial de media celda cambia o fluctúa con el tiempo.

4.2.3 Si la condición (a) es observada, el pre-humedecimiento de la superficie de concreto no es necesario. Sin embargo, si la condición (b) es observada, el pre-humedecimiento es requerido para una cantidad de tiempo en la cual la lectura del voltaje es estable (± 0.02 V) observada por al menos 5 minutos. Si el pre-humedecimiento no puede obtener la condición (a), la resistencia eléctrica del circuito es demasiado grande para obtener medidas validas de potenciales de media celda del acero o corrientes erradas desde un sistema de tracción de corriente directa cercana u otra fluctuación de corriente directa,

tales como soldadura de arco, está afectando la lectura. En ambos casos, el método de media celda no debe ser usado.

5. Mediciones Horizontales y Verticales bajo el agua (Underwater)

5.1. Las medidas de potencial detectan la actividad corrosiva pero no necesariamente la localización de la actividad corrosiva. La localización precisa de la actividad corrosiva requiere conocimiento de la resistencia eléctrica del material entre la media celda y el acero corroído. Mientras que las mediciones bajo el agua sean posibles, los resultados con respecto a la localización de corrosión pueden ser interpretados muy cuidadosamente. Frecuentemente no es posible localizar con precisión puntos de actividad corrosiva bajo el agua en ambientes de agua salada porque las lecturas de potencial a lo largo del elemento aparecen uniformes. Sin embargo, la magnitud de las lecturas sirve para indicar que ya sea o no, la actividad corrosiva está ocurriendo. Tener cuidado durante todas las mediciones bajo el agua que la media celda no sea contaminada y que ninguna otra parte que la punta porosa del electrodo de media celda con sulfato de cobre-cobre está en contacto con el agua.

El comportamiento horizontal y vertical ascendente de las mediciones es exactamente como en las mediciones verticales descendentes. Sin embargo, asegurar adicionalmente que la solución de sulfato de cobre-cobre en la media celda hace contactos eléctricos simultáneos con el tapón poroso y la varilla de cobre todo el tiempo.

6. Registro de los Valores de Potencial de Media Celda

6.1. Registre los potenciales eléctricos de media celda con una precisión de 0.01 V. Reporte todos los potenciales de media celda en voltios y corríjalos por temperatura si la temperatura de la media celda esta fuera del rango de 72 ± 10 °F (22.2 ± 5.5 °C). [6]

2.2.2. Comprobación de Validez y Confiabilidad

Para comprobar la validez de los resultados, haremos uso de métodos estadísticos, que son herramientas importantes en las investigaciones que nos ayudarán a comprobar los datos obtenidos mediante inferencias válidas para la muestra obtenidas.

Se van a comparar más de dos grupos de adiciones de ceniza volante con respecto a una variable cuantitativa, el cual debe utilizarse el **análisis de la varianza (ANOVA)**.

Además para la confiabilidad de la muestra se utilizará el **coeficiente de Confiabilidad Alfa de Cronbach**, que un parámetro que sirve para medir la fiabilidad de una escala de medida donde requiera más de dos grupos de muestras. **(Ver Anexo 07)**

La justificación del análisis estadístico no radica en los datos, sino en la forma en que han sido recogidos.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos luego de realizar el ensayo de compresión y el ensayo de la Media Celda (ASTM C876-15) a probetas de concreto a base de cemento portland tipo I con diferentes reemplazos porcentuales de ceniza volante por cemento.

3.1. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En las siguientes figuras se presentan los resultados de resistencia a la compresión a 28 días de curado en función al porcentaje de reemplazo de ceniza volante en probetas cilíndricas a base de cemento portland tipo I con ceniza volante a diferentes relaciones agua/cemento.

En la figura 3.1 se representa la relación de $a/c = 0.50$ y a medida que se incrementa el porcentaje hasta un 5% en peso de reemplazo de ceniza volante la resistencia a la compresión tiene una tendencia casi similar que la del 0%, pero a medida que se sigue incrementando el porcentaje de ceniza observamos que disminuye linealmente hasta de 15% de ceniza volante.

En la figura 3.1 se representa la relación de $a/c = 0.50$ y a medida que se incrementa el porcentaje hasta un 5% en peso de reemplazo de ceniza volante la resistencia a la compresión tiene una tendencia casi similar que la del 0% (mezcla de control), pero a medida que se sigue incrementando el porcentaje de ceniza volante, hasta de 15%, observamos que disminuye linealmente.

El comportamiento casi similar de la resistencia a la compresión del concreto a 5% se debe a que la ceniza volante ha reaccionado con suficiente hidróxido de calcio del cemento para alcanzar a la mezcla de control, 0% de ceniza, con dicha resistencia.

Esta tendencia decreciente de la resistencia a compresión es debido a que se redujo la cantidad de cemento del diseño, para incorporar ceniza volante a la

mezcla, obteniendo una reacción química que consume hidróxido de calcio (presente en el cemento) en vez de generarlo, es decir, estamos disminuyendo el hidróxido de calcio y la ceniza volante no tendrá con que reaccionar, en consecuencia, se disminuye la resistencia a compresión. En otras palabras, a menos hidróxido de calcio, menor será la resistencia a compresión.

Es importante señalar que los incrementos de la resistencia a la compresión se dan a periodos de tiempos muy largos por lo que a edades tempranas no se observa dicho efecto en el concreto.

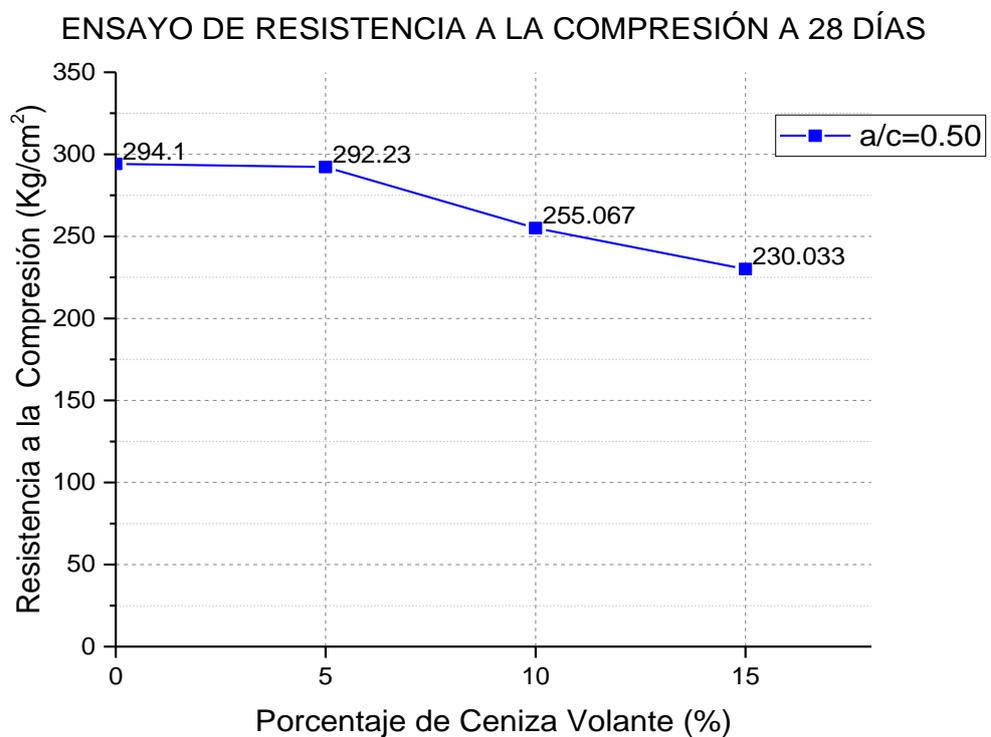


Figura 3.1: Ensayo de Resistencia a la Compresión a 28 días de relación $a/c = 0.50$

En la figura 3.2 se representa gráficamente los resultados para la relación de $a/c = 0.55$. Se observa que a medida que se incrementa el porcentaje hasta un 5% de reemplazo de ceniza volante en peso, la resistencia a la compresión tiene una tendencia casi similar que la mezcla de control, 0% de reemplazo ceniza, pero a medida que se sigue incrementando el porcentaje de ceniza, hasta el 15%, observamos que disminuye linealmente.

Este comportamiento decreciente se debe a la reacción generada por la ceniza volante y el hidróxido de calcio, no obstante, a medida que se incrementa el porcentaje de reemplazo de ceniza se observa una disminución lineal, debido a que la ceniza no encuentra más compuestos de hidróxido de calcio que permitan su reacción para adquirir resistencia, ya que se disminuyó el cemento de la mezcla. A pesar que es una relación de agua/cemento moderada se sabe que a medida que se incrementa la relación a/c se obtiene un concreto con más porosidad, y la influencia de la ceniza volante en el concreto se notará en periodos de tiempos largos, por lo que en edades tempranas no se aprecia el aumento de la resistencia.

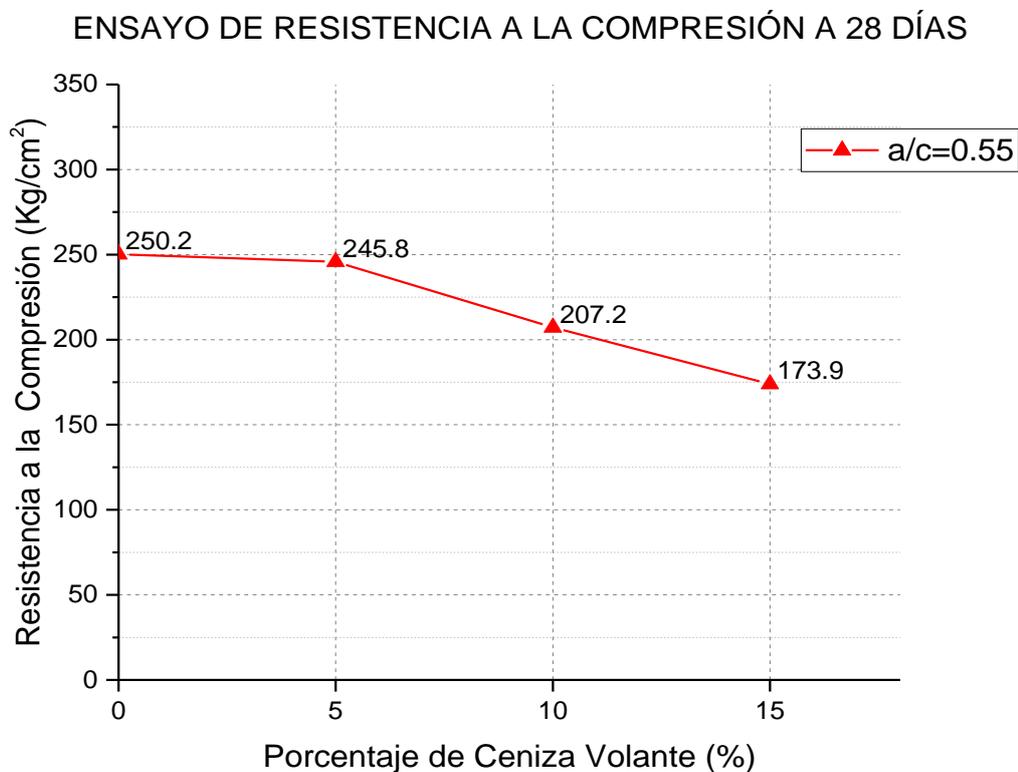


Figura 3.2: Ensayo de Resistencia a la Compresión a 28 días de relación $a/c = 0.55$

En la figura 3.3 se representa la relación de $a/c = 0.60$, y se observa que a medida que se incrementa el porcentaje de ceniza, hasta 15%, observamos que su resistencia a la compresión disminuye linealmente.

Este comportamiento de la disminución de la resistencia a la compresión es debido a que estamos disminuyendo la cantidad de cemento del diseño para

incorporar ceniza volante a la mezcla. Como se menciona en párrafos anteriores, la ceniza volante no logrará reaccionar debido a la falta de hidróxido de calcio ocasionada por la aminoración de cemento en la mezcla, ocasionando una disminución de la resistencia a compresión.

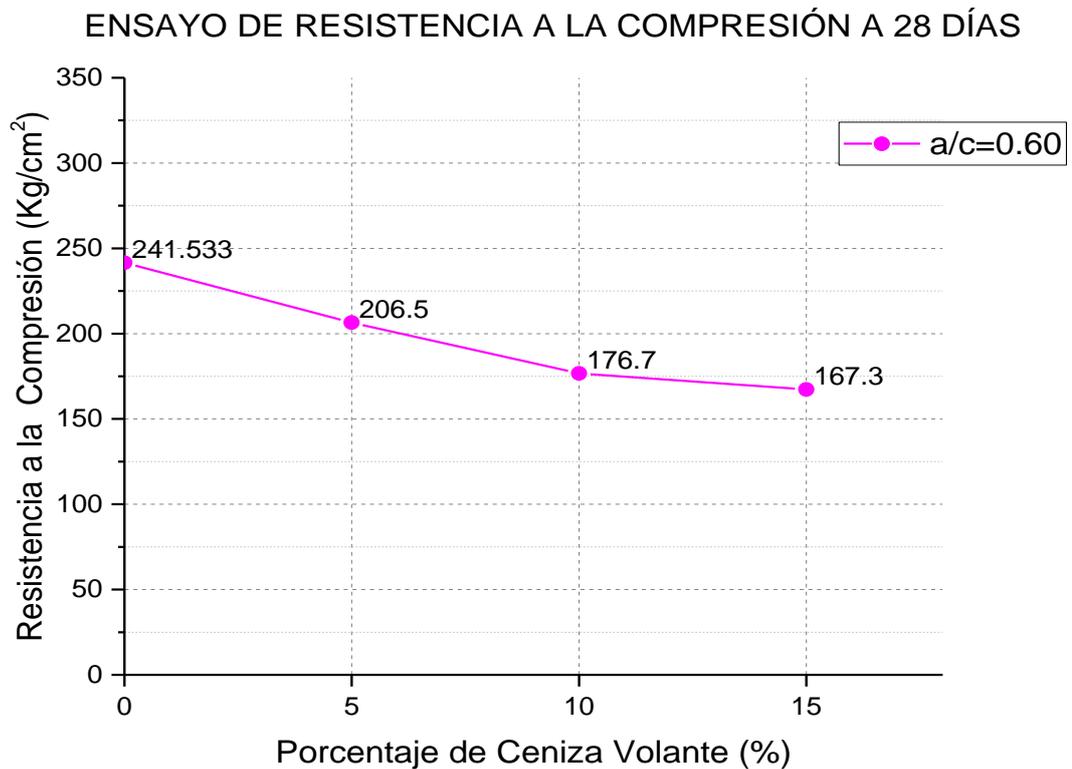


Figura 3.3: Ensayo de Resistencia a la Compresión a 28 días de relación $a/c = 0.60$

En la figura 3.4 se representa todos los diseños de mezcla que se elaboró y se muestra una clara diferencia de resistencia a la compresión entre todos ellos. Se aprecia que la relación de $a/c = 0.50$ tiene más resistencia que todos debido que necesita menos agua y por ende tiene menos porosidad que las demás relaciones.

Se puede apreciar, también, que a mayor relación a/c , menor es la resistencia a la compresión, lo cual es lógico dado que las relaciones a/c mayores, tendrán menor cantidad de cemento en la mezcla.

En las tendencias de las curvas se pueden notar que a medida que se incrementa el reemplazo porcentual de ceniza volante por cemento, estas

pierden resistencia, la única que logra una resistencia similar a la mezcla de control, son los reemplazos al 5% de ceniza con relaciones a/c 0.50 y 0.55, respectivamente; lo que nos puede decir que hasta un 5% la ceniza puede adquirir algunas propiedades cementantes, y es posible, que en periodos más largos se genere una mejora en la resistencia a la compresión, debido a que las puzolanas necesitan periodos más largos para completar su reacción en la mezcla, algunos antecedentes nos menciona que a los 56 días la ceniza mejoraría la resistencia a compresión en el concreto.

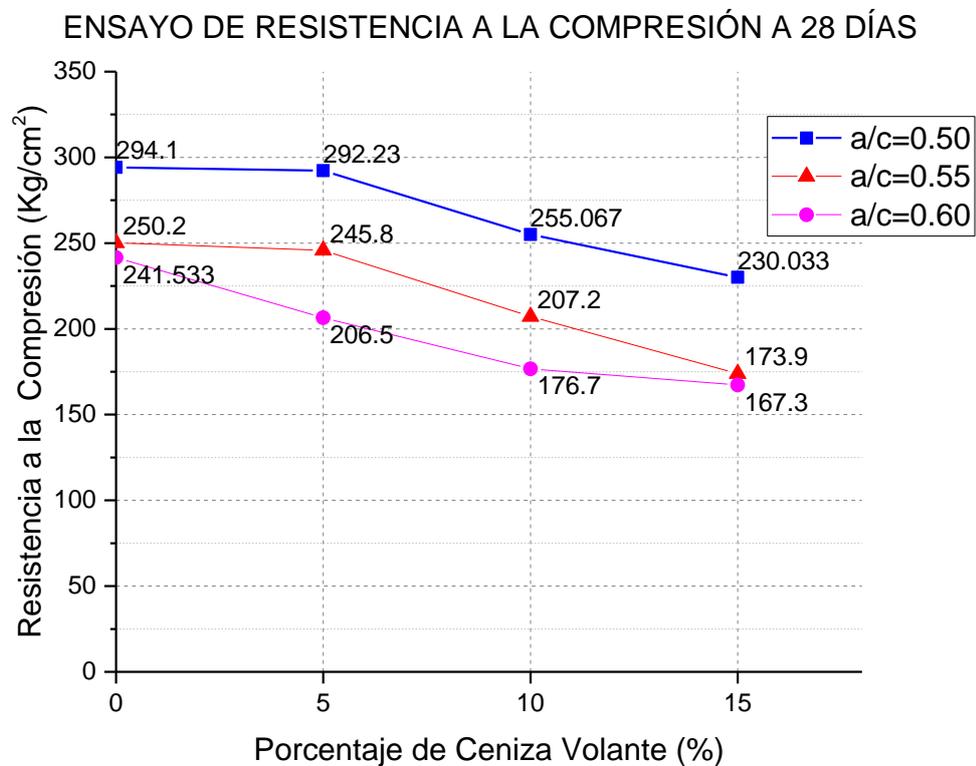


Figura 3.4: Ensayo de Resistencia a la Compresión a 28 días

3.2. ENSAYO DE LA MEDIA CELDA

En las siguientes figuras se aprecian las gráficas de los comportamientos de potenciales de corrosión (E_{corr}) de los aceros embebidos en concreto con distintos porcentajes de reemplazo de ceniza volante por cemento, los cuales fueron sometidos a un medio agresivo acuoso de Cloruro de Sodio al 3.5% simulando el agua de mar durante 63 días (9 semanas).

En la figura 3.5 se puede observar el comportamiento de los potenciales de Corrosión (E_{corr}) de los diferentes porcentaje de reemplazo de ceniza volante con relación $a/c = 0.50$, durante los primeros 10 días los potenciales son menores a -200mV que de acuerdo a la norma ASTM C876, indica que hay un 10% de probabilidad de corrosión y esto se da debido que aún no hay presencia de cloruros en el acero, pero entre los 10 y 24 días varían entre los -200mV a -350mV que de acuerdo a la norma ASTM C876 indica que se tiene incertidumbre del proceso de corrosión y se debe que hay presencia de cloruros en el interior del concreto que han comenzado a llegar al acero, por lo que el acero forma una película pasiva. Pero, la difusión de cloruros al concreto es rápida, y en intervalo de los 24 a 40 días varían entre los -350 a -537 mV que de acuerdo a la norma ASTM C876 que se tiene una probabilidad de 90% que se esté corroyendo el acero, lo cual no significa que el acero se está corroyendo sino que el medio en el que se encuentra terminaría siendo perjudicial para el acero embebido. A partir de los 40 días en adelante el potencial de corrosión será menos negativo lo cual lo lleva a zonas de incertidumbre por la interacción de la ceniza volante en el concreto que comienza a influir ganando resistencia y haciéndolo más impermeable en su estructura y así disminuyendo la difusión de los cloruros por lo que el acero comienza a formar su película pasiva estable.

Entre los diferentes porcentajes de reemplazo de ceniza volante, el que más influyó en el potencial del acero embebido en concreto, fue al que se le incorporó 5% de Ceniza Volante, esta mezcla tiene los potenciales menos negativos y debido a la acción del hidróxido de calcio del cemento con la ceniza, y además que las puzolanas obtienen mejores resistencias a lo largo del tiempo, sin embargo, los demás porcentajes de ceniza también influyen pero sus potenciales tienen similitud con la mezcla de control, en la última toma de datos,. Además ninguno de los demás porcentajes se encuentra en la zona del 90% de probabilidad de corrosión.

POTENCIALES DE CORROSIÓN A RELACIÓN $a/c = 0.50$

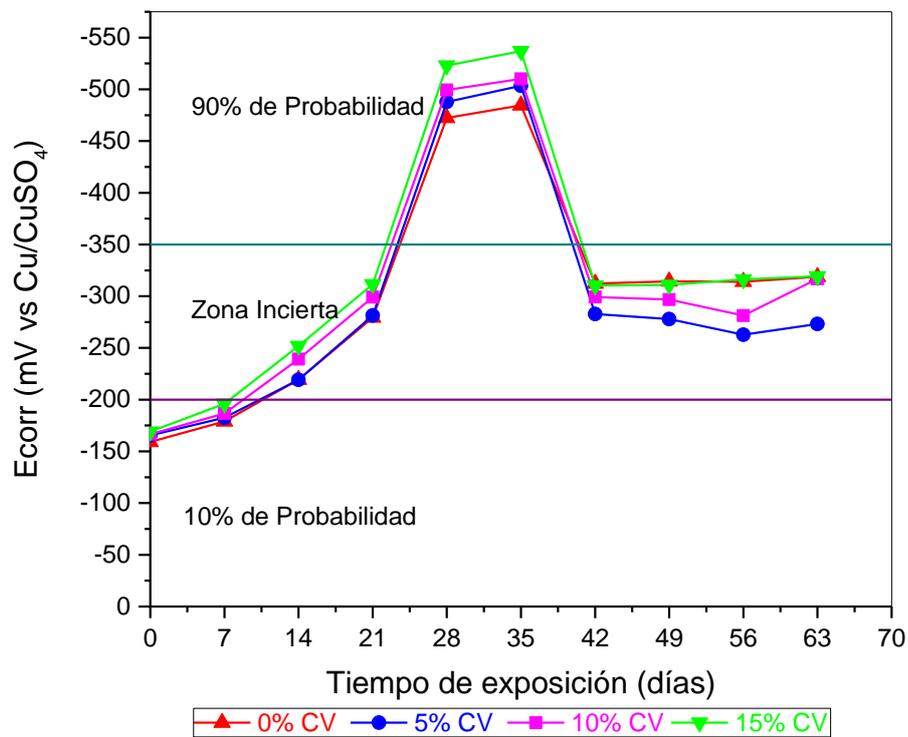


Figura 3.5: Gráfica de Ecorr de la relación $a/c = 0.50$

En la figura 3.6 se observa el comportamiento de los potenciales de Corrosión (Ecorr) de los diferentes porcentajes de reemplazo de ceniza volante por cemento, con relación $a/c = 0.55$. Durante los primeros 8 días sus potenciales son menores a -200mV que de acuerdo a la norma ASTM C876 indica que hay un 10% de probabilidad de corrosión, y esto se debe a que aún no hay presencia de cloruros en el acero. Pero entre los 8 y 23 días varían entre los -200mV a -350mV que de acuerdo a la norma ASTM C876, indica que se tiene incertidumbre del proceso de corrosión, y se debe a que hay presencia de cloruros en el interior del concreto que han llegado al acero, el cual tiende a formar una película pasiva protectora. La difusión de cloruros en el concreto es rápida, y en intervalo de los 23 a 41 días varían entre los -350 a -541 mV que de acuerdo a la norma ASTM C876 se tiene una probabilidad de 90% de corrosión en el acero. A partir de los 41 días en adelante el potencial de corrosión se ubica en zonas de incertidumbre menos negativas por la interacción de la ceniza volante en el concreto que

comienza a influir ganando resistencia y haciendo más impermeable a su estructura y así disminuyendo la difusión de los cloruros por lo que el acero comienza a formar su película pasiva estable.

Entre los diferentes porcentajes de reemplazo de ceniza volante elaborados, el que tiene un mejor comportamiento haciendo menos negativo el potencial del acero en concreto, es al que se incorporó el 5% CV, debido a la acción del hidróxido de calcio del cemento con la ceniza; además que las puzolanas obtienen mejores resistencias a lo largo del tiempo, no obstante, la curva de la mezcla de control se encuentra en la zona más negativa que los -350 mV y de acuerdo a la norma ASTM C876 nos indica que hay una probabilidad del 90% de corrosión.

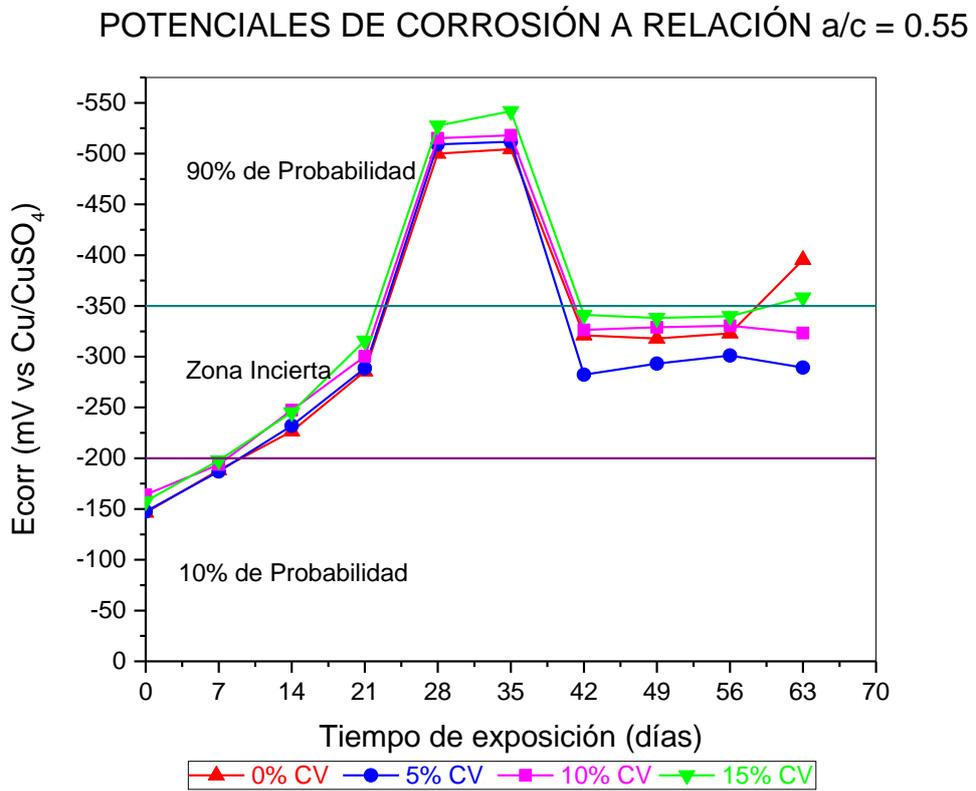


Figura 3.6: Gráfica de E_{corr} de la relación a/c = 0.55

En la figura 3.7 se indica el comportamiento de los potenciales de Corrosión (E_{corr}) de los diferentes porcentajes de reemplazo de ceniza volante con relación a/c = 0.60. Durante los primeros 7 días sus potenciales son menores a -200mV que de acuerdo a la norma ASTM C876 indica que hay un 10%

de probabilidad de corrosión. Entre los 7 y 22 días varían entre los -200mV a -350mV que de acuerdo a la norma ASTM C876 indica que se tiene incertidumbre del proceso de corrosión y se debe que hay presencia de cloruros en el interior del concreto que han llegado al acero, durante esta etapa el acero forma una película pasiva. En el intervalo de los 22 a 42 días, los potenciales varían entre los -350 a -570 mV que de acuerdo a la norma ASTM C876 que se tiene una probabilidad de 90% que se esté corroyendo el acero, pero a partir de los 42 días en adelante los potenciales se ubican en zonas de incertidumbre menos negativas, por la interacción de la ceniza volante. Para esta relación, $a/c = 0.60$, solo al 5% de reemplazo de ceniza por cemento en la mezcla se logra influir ganando resistencia y haciendo más impermeable al concreto, disminuyendo la difusión de los cloruros por lo que el acero comienza a formar su película pasiva estable; para los demás reemplazos de ceniza no se logró una reducción de los potenciales de corrosión, ubicándose los potenciales en zonas de 90% de probabilidad de corrosión.

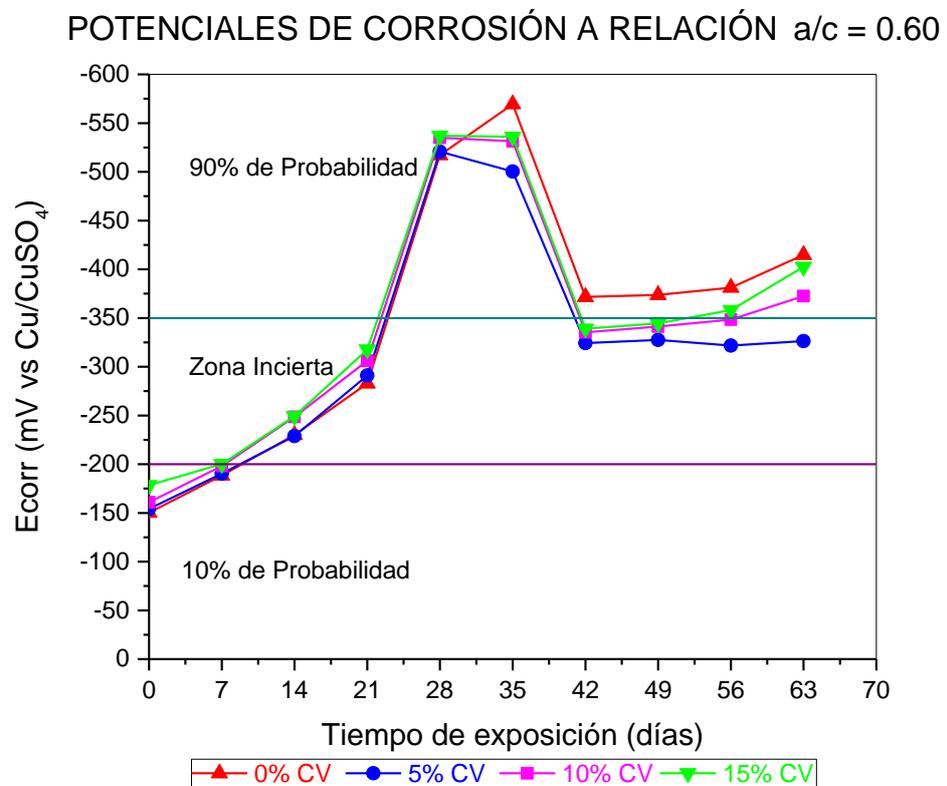


Figura 3.7: Gráfica de E_{corr} de la relación $a/c = 0.60$

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Se determinó que la resistencia a la compresión para la relación $a/c = 0.50$ con la incorporación del 5% de reemplazo de ceniza volante alcanza 292.23 Kg/cm^2 similar a la mezcla de control con 294.10 Kg/cm^2 , y a más reemplazo de ceniza descende la resistencia.
- Se determinó que la resistencia a la compresión para la relación $a/c = 0.55$ con la incorporación del 5% de reemplazo de ceniza volante alcanza 245.80 kg/cm^2 similar a la mezcla de control con 250.20 Kg/cm^2 y a más reemplazo de ceniza descende la resistencia.
- Se determinó que la resistencia a la compresión para la relación $a/c = 0.60$ con las incorporaciones de los porcentajes de reemplazo de ceniza volante no alcanza a la mezcla de control, por lo que a 5% de incorporación se tiene un valor muy por debajo a la de control, en la curva de compresión.
- Se determinó que la mezcla de relación $a/c=0.50$ tiene un menor potencial de corrosión del acero cuando se le incorpora un 5% de ceniza volante a diferencia de las demás incorporaciones de ceniza volante y la mezcla de control.
- Se determinó que la mezcla de relación $a/c=0.55$ tiene una disminución del potencial de corrosión del acero cuando se le incorpora un 5% de ceniza volante a diferencia de las demás incorporaciones de ceniza volante, no obstante la mezcla de control mostró una tendencia hacia la zona de 90% de probabilidad de corrosión.
- Se determinó que la mezcla de relación $a/c=0.60$ tiene una disminución del potencial de corrosión cuando se le incorpora un 5% de ceniza volante y es la única que está en una zona de incertidumbre a diferencia de las demás incorporaciones de ceniza volante que están en la zona de 90% de probabilidad de corrosión.

- Se determinó que de las tres relaciones a/c preparadas para los ensayos es recomendable preparar relaciones de agua/cemento menores por la disminución de su porosidad cuando van a estar expuestas en ambientes agresivos.
- Se comprobó que los costos unitarios al utilizar una mezcla de concreto con reemplazo de ceniza al 5% se reducen a comparación de una mezcla sin ella, lo que nos indica que existirá un ahorro económico a diferentes relaciones de a/c.
- Se comprobó estadísticamente que el porcentaje de ceniza volante influye sobre las propiedades de resistencia a la compresión, y mejora la durabilidad del concreto convencional.
- Se determinó la confiabilidad de la muestra para cada relación a/c que se elaboró, obteniendo una confiabilidad de 74.508% para la relación a/c = 0.50, una confiabilidad de 67.342% para la relación a/c = 0.55 y una confiabilidad de 63.123% para la relación de 0.60.

4.2. RECOMENDACIONES

De la experiencia adquirida en esta investigación se expresa las siguientes recomendaciones:

- Complementar la investigación sometiendo las probetas a diferentes medios agresivos para ver su interacción con el medio y la reacción que tomaría frente a ellos.
- Complementar la investigación haciendo uso de técnicas electroquímicas para hallar la velocidad de corrosión del acero en el concreto.
- Ampliar la investigación haciendo uso de otras técnicas que inducen al proceso de corrosión del acero y métodos para calcular la difusión de ion cloruro en el concreto.
- Desarrollar investigación sobre el desempeño de la resistencia residual del concreto reforzado, una vez iniciada la corrosión. (Ver: REFERENCIA [18]).

- Desarrollar estudios de inhibidores de corrosión, tales como recubrimientos epóxicos, para barras de refuerzo o empleo de barras galvanizadas en el concreto.
- Estudiar el reemplazo de barras de refuerzo de acero, por barras de fibra de vidrio, como solución a los problemas de corrosión.
- Estudiar el empleo de otras adiciones para reducir el potencial de corrosión del acero.
- Estudiar el efecto de los restos de alambre empleado en el encofrado de estructuras, que usualmente contaminan el concreto. Dado que, el almacenamiento de alambre en obra no es adecuado, por lo general se le coloca con inicio de corrosión.

CAPÍTULO V: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Zomora, B., Mendoza, N., Zamora, H., y Calderon, A. (2009). Monitorización de Potenciales de Corrosión y Resistencia Mecánica de un hormigón Contaminado Expuesto a un Medio Clorado. *Portugalaliae Electrochimica ACTA*, 27(3), 237-246. Recuperado de: <http://www.scielo.mec.pt/pdf/pea/v27n3/v27n3a06.pdf>
- [2] Ujike, I., Okazaki, S., Takae, N., y Kasuga, S. (Abril de 2013), Un estudio sobre las propiedades de corrosión de las barras de refuerzo en hormigón de cenizas volantes. En P. Claisse (Presidencia), *Sustainable Construction Materials and Technologies*. Third International Conference on Ehime University, Japan. Recuperado de: <http://www.claisse.info/2013%20papers/data/e275.pdf>
- [3] Nithya, P. y Mathew, G. (2016), Efecto de la ceniza volante sobre el potencial de corrosión del acero en el hormigón. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, (03), 09. Recuperado de: <https://www.irjet.net/archives/V3/i9/IRJET-V3I9154.pdf>
- [4] Viveros, S., Gonzáles, M., Sandoval, H., y De la Cruz, J. (2013), Análisis del Potencial y Velocidad de Corrosión en Concretos reforzados modificados con Microsílice. *Revista Ingeniantes*, (1), 34-40. Recuperado de: <http://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes3no1vol1/An%C3%A1lisis%20del%20potencial%20y%20velocidad%20de%20corrosi%C3%B3n%20en%20concretos%20reforzados.pdf>
- [5] Aperador, W., Bautista, J., y Delgado, A. (2013), Monitoreo de la Corrosión de Aceros Embebidos en Concretos obtenidos a partir de Subproductos Industriales. *Información Tecnológica*, 24(4). 55-66. Recuperado de: <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v24n4/art07.pdf>
- [6] Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete (Withdrawn 2008). [En línea] <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C876-91R99.htm>
- [7] Pantoja C. – Cárdenas, D. 2001. *Influencia del tipo de ánodo sacrificial y masa sobre la velocidad de corrosión del acero estructural ASTM A-36 sumergido en una solución al 3.5% NaCl agitada* (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.
- [8] Ulick, R. (Ed.). 1987. *Corrosiones Metálicas*. Barcelona, España: Editorial Reverte S.A.

- [9] Cárdenas, D. 1998. *Corrosión y Protección de Metales*. UNT-Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales – Trujillo – Perú.
- [10] Universidad de Antioquia, Vicerrectoría de Extensión. (2017). *Corrosión Electroquímica*. Medellín, Colombia. Recuperado de: http://docencia.udea.edu.co/cen/electroquimicaII/corrosion/corrosion_2.php?t=2.
- [11] Avner, S. (Ed.). 1979. *Introducción a la Metalurgia Física*. Juárez, México: Editorial Mc Graw Hill.
- [12] Del Valle A., Pérez T., Martínez M. (2011) , “*El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado*” Publicación Técnica No 182, Sanfandila, Qro, 2001, México. Recuperado de: <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt182.pdf>
- [13] Guzmán, O. (2008). *Influencia del Agrietamiento del Concreto en la Corrosión del Acero de Refuerzo*. (Tesis de Maestría). Recuperado de: <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/431/Influenciadel%20agrietamiento.pdf?sequence=1>
- [14] González, C. (Ed.). 2005. *Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado*. México, México: Editorial Limusa.
- [15] Genescá, J. (2009). *Más allá de la Herrumbre II. La lucha contra la corrosión*, Fondo de Cultura Económica, México. Recuperado de: <http://www.biblioteca.org.ar/Libros/bdmexico/sep%20ciencia/masalla2.htm>
- [16] González, F. (2010). *Realcalinización Electroquímica del Concreto Reforzado Carbonatado: Una Opción de Prevención contra la Corrosión* (Tesis Doctoral). Recuperado de: <http://eprints.uanl.mx/2142/1/1080177800.pdf>
- [17] Blanco F., (2014 – 2017). *Reacción Puzolánica*. Oviedo, España. Recuperado de: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion4.Reaccion.PUZOLANICA.pdf>
- [18] Mohd, H., y Sonoda, Y. (Abril 2016). Potential Effects of Corrosion Damage on the Performance of Reinforced Concrete Member. MATEC Web of Conferences, 47, 02007 2016. Published by EDP Sciences, 2016. Recuperado de: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2016/10/mateconf_iconees2016_02007.pdf

ANEXOS

ANEXO 01

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

A.) CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Contenido de Humedad de los Agregados

Agregado Fino			
Ensayo	P. Muestra Húmeda (gr)	P. Muestra Seca (gr.)	% Humedad
1	250	247.70	0.929
2	250	247.40	1.051
3	250	246.90	1.256
% Humedad Prom.			1.078

Agregado Grueso			
Ensayo	P. Muestra Húmeda (gr)	P. Muestra Seca (gr.)	% Humedad
1	500	496.4	0.725
2	500	496.8	0.644
3	500	495.9	0.827
% Humedad Prom.			0.732

Pesos Unitarios

Agregado Fino					
Ensayo	Peso suelto (g.)	Peso compactado (g.)	Volumen del recipiente (cm³)	P.U. Suelto (kg/m³)	P.U. Compactado (kg/m³)
1	4488.5	4952.6	2793.98	1606.49	1772.60
2	4475.3	4964.6	2793.98	1601.77	1776.89
3	4477.7	4958.3	2793.98	1602.63	1774.64
Promedio				1603.63	1774.71

Agregado Grueso					
Ensayo	Peso suelto (g.)	Peso compactado (g.)	Volumen del recipiente (cm³)	P.U. Suelto (kg/m³)	P.U. Compactado (kg/m³)
1	4374.8	4676.2	2793.98	1565.80	1673.67
2	4389.5	4661.4	2793.98	1571.06	1668.38
3	4383.5	4680.0	2793.98	1568.91	1675.03
Promedio				1568.59	1672.36

Porcentaje de Absorción de los Agregados

Peso Específico del Agregado Grueso							
N°	Peso Seco (g)	P sss. (g.)	Peso sumergido (g.)	Peso Específico (g/cm ³)	Peso Específico sss (g/cm ³)	Peso Específico Aparente (g/cm ³)	Absorción (%)
	A	B	C	γ	γ_{SSS}	γ aparente	Abs%
1	2421.1	2456.6	1478	2.4740	2.5103	2.5672	1.47
2	2423.6	2459.8	1480	2.4736	2.5105	2.5685	1.49
3	2424.3	2460.3	1480.5	2.4743	2.5110	2.5687	1.48
PROMEDIO				2.4740	2.5106	2.5681	1.4816

Peso Específico del Agregado Fino								
N°	PESO SECO (g)	Volumen fiola (ml.)	Peso de la fiola (g.)	Peso fiola+fino+ agua (g.)	Peso Específico (g/cm ³)	Peso Específico sss (g/cm ³)	Peso Específico Aparente (g/cm ³)	Absorción (%)
	A	B	C	D	γ	γ_{SSS}	γ aparente	Abs%
1	491.3	500	188.7	996.4	2.5549	2.6001	2.6759	1.77
2	492.4	500	181.1	986.8	2.5342	2.5733	2.6374	1.54
3	490.2	500	181.1	990.6	2.5732	2.6247	2.7128	2.00
PROMEDIO					2.5541	2.5994	2.6754	1.7712

CARACTERISTICAS DE LA CENIZA VOLANTE

Muestra	Humedad (%)
Ceniza Volante	0.70

Características Físicas de la Ceniza Volante Realizado en el Laboratorio de la escuela de Ingeniería de Materiales - UNT

Muestra	Salinidad (%)	Conductividad uS/cm	T (°C)	TDS (mg/L)
Agua potable	0.07	1446	20.1	725
Agua Destilada	0.0	55.1	20.1	27.5
Muestra con ceniza volante	0.01	130.9	21.1	65.3

ANALISIS GRANULOMÉTRICO (NTP 400.012) AGREGADO FINO

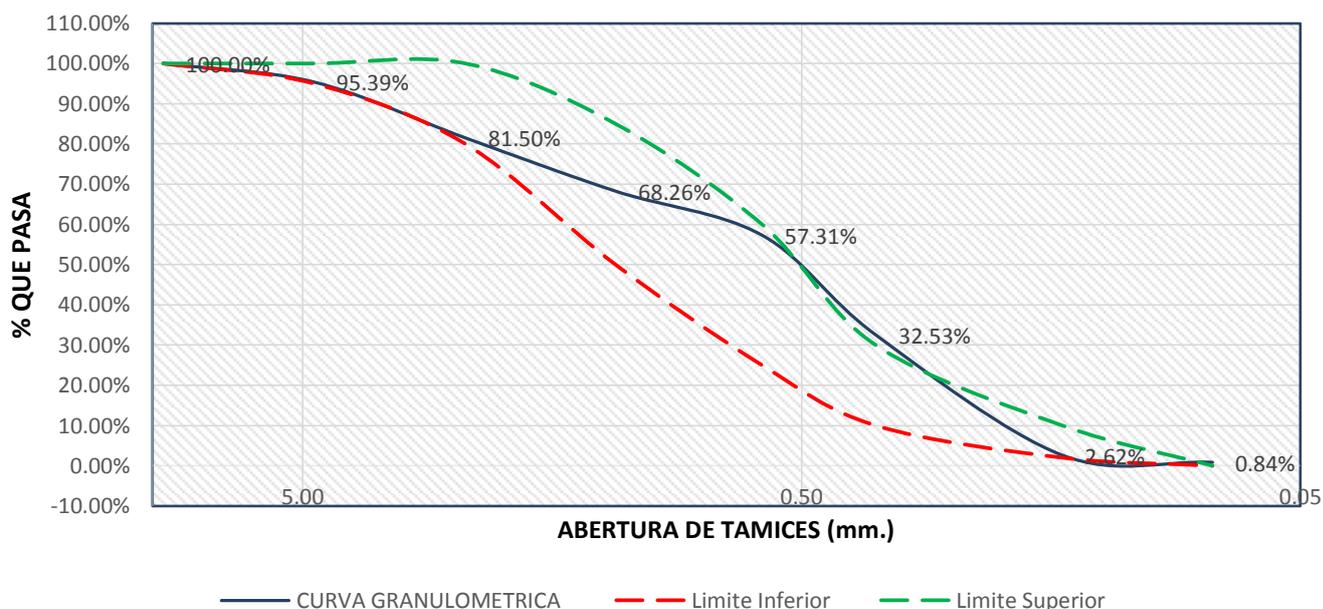
Masa muestra seca inicial (g.)	1200
Masa Retenida Total Tamizada (g.)	1197.80
Pérdida (%)	0.18

TAMICES			RETENIDO				PASA	BANDA	
Tamiz	Abertura (mm.)	Peso tamiz (g)	Peso Muestra + tamiz (g)	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa	Límite Inferior	Límite Superior
3/8"	9.53	512.80	512.80	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%
N° 4	4.75	878.60	933.80	55.20	4.61%	4.61%	95.39%	95%	100%
N° 8	2.36	465.80	632.20	166.40	13.89%	18.50%	81.50%	80%	100%
N° 16	1.18	395.60	554.20	158.60	13.24%	31.74%	68.26%	50%	85%
N° 30	0.60	368.20	499.40	131.20	10.95%	42.69%	57.31%	25%	60%
N° 50	0.36	347.80	644.50	296.70	24.77%	67.47%	32.53%	10%	30%
N° 100	0.15	323.30	681.60	358.30	29.91%	97.38%	2.62%	2%	10%
N° 200	0.075	346.60	367.90	21.30	1.78%	99.16%	0.84%		
Bandeja	-	370.20	380.30	10.10	0.84%	100.00%	0.00%		

Total Peso Retenido
1197.80

CALCULO DE MODULO DE FINURA=	2.62
------------------------------	------

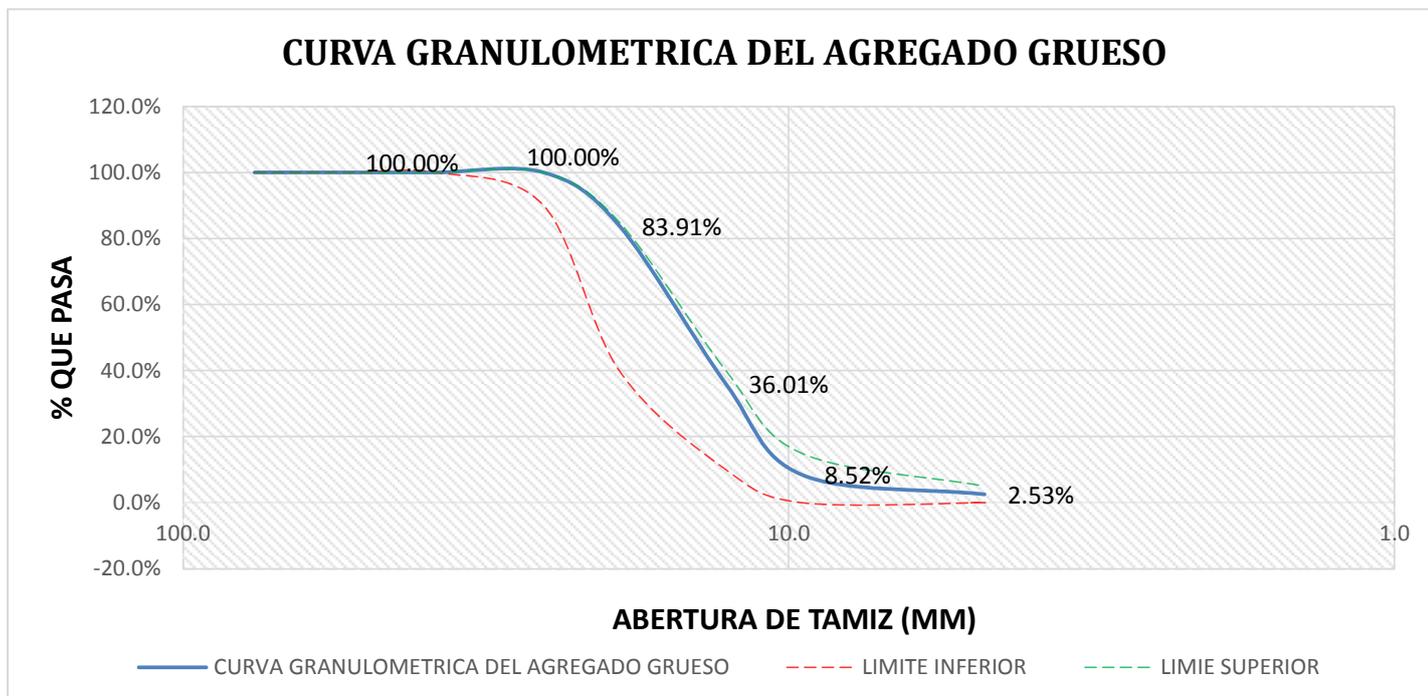
CURVA GRANULOMETRICA DEL AGREGADO FINO



ANALISIS GRANULOMÉTRICO (NTP 400.012) AGREGADO GRUESO

Masa muestra seca inicial (g.)	3100
Masa Retenida Total Tamizada (g.)	3095.90
Pérdida (%)	0.13

TAMICES		RETENIDOS			PASA	BANDAS	
Tamiz	Abertura (mm.)	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa	Límite Inferior	Limite Superior
3"	76.20	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%	- 100%
2 1/2"	63.50	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%	- 100%
2"	50.80	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%	- 100%
1 1/2"	38.10	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%	- 100%
1"	25.40	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	90%	- 100%
3/4"	19.05	498.20	16.09%	16.09%	83.91%	40%	- 85%
1/2"	12.70	1482.90	47.90%	63.99%	36.01%	10%	- 40%
3/8"	9.53	850.90	27.48%	91.48%	8.52%	0%	- 15%
N°4	4.75	185.70	6.00%	97.47%	2.53%	0%	5%
Bandeja		78.20	2.53%	100.00%	0.00%	0%	0%



B.) ANALISIS DE LA CENIZA VOLANTE

ANALISIS FISICO Y QUIMICO DE LA CENIZA VOLANTE



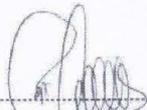
RCC 006-11

ANALISIS FISICO Y QUIMICO

MUESTRA : CENIZA "TRUPAL"

Óxido de Silicio, SiO ₂ , %	41.20
Oxidos de Aluminio, Al ₂ O ₃ , %	24.47
Oxido Ferrico, Fe ₂ O ₃ , %	2.20
Oxido de Calcio, CaO, %	0.62
Óxido de Magnesio, MgO, %	0.59
Trióxido de Azufre, SO ₃ , %	0.09
Oxido de Sodio (Na ₂ O), %	0.00
Oxido de Potasio (K ₂ O), %	1.89
Cloro (Cl), %	0.01
Oxido de Titanio (TiO ₂), %	1.28
Pentóxido de Fosforo (P ₂ O ₅), %	0.14
Trióxido de Cromo (Cr ₂ O ₃), %	0.01
Oxido de Manganeso (MnO), %	0.02
Oxido de Estroncio (SrO), %	0.01
Oxido de Zinc (ZnO), %	0.01
Pérdida por Ignición, P.F %	26.76
Humedad, %	1.10
Poder Calorífico Superior, kcal/kg	1916

Arequipa, 09 de Julio del 2011



Ing. Shyano Quispe
Jefe de Control de Calidad
Yura S.A.

C.) CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA DEL ACERO UTILIZADO

En las siguientes fotos metalográficas microestructural corresponde al acero ASTM A615 utilizado en la tesis donde se puede apreciar la ferrita (parte blanca) y la Perlita (color negro u oscuro) con presencia de granos equiaxiales y uniformes.

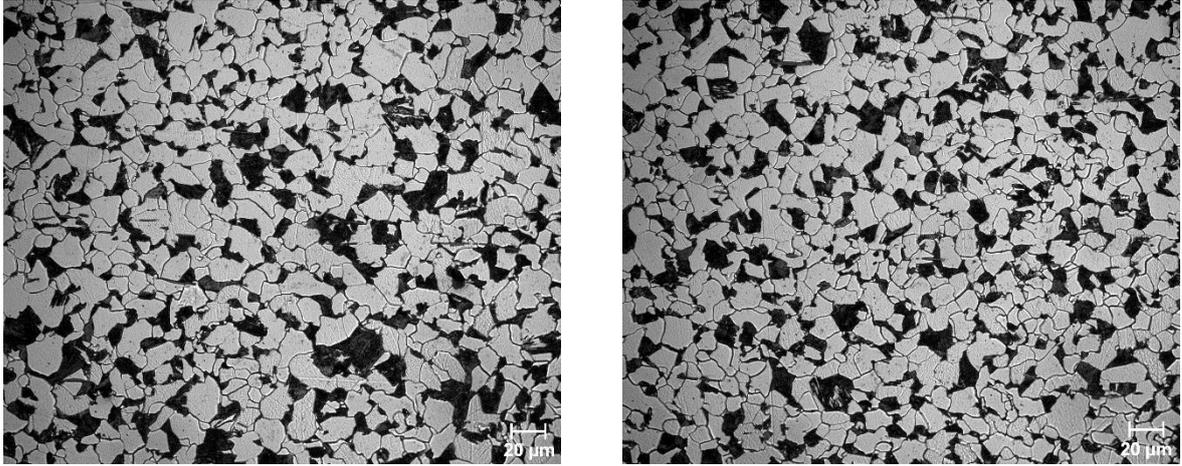


Figura 01: Fotografía metalográfica tomada a 20 μ m.

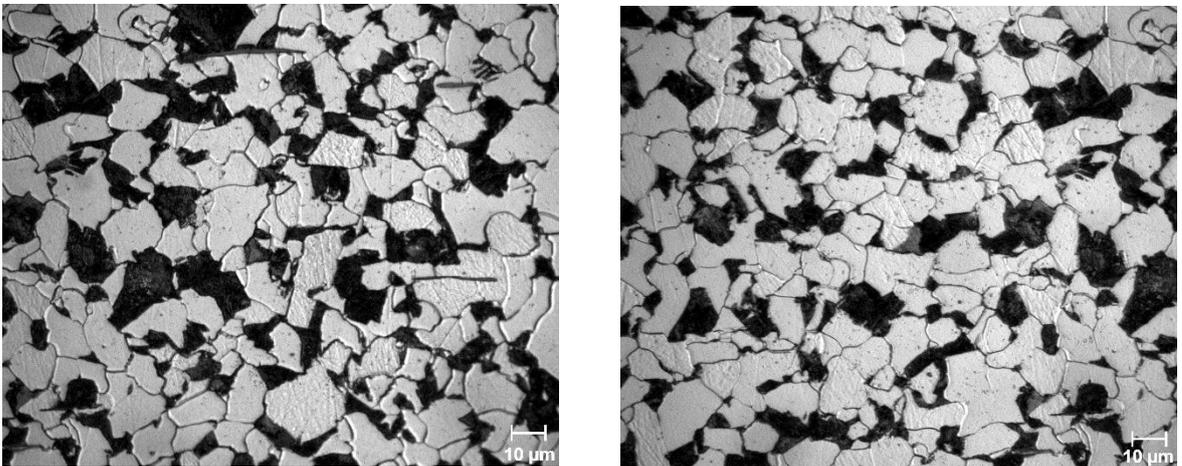


Figura 02: Fotografía metalográfica tomada a 10 μ m.

ANEXO 02

A.) DISEÑO DE MEZCLAS

Características de los Agregados			
	Arena		Piedra
Módulo de Fineza	2.624		
Tamaño Max. Nominal			1/2"
% Contenido de Humedad	1.078		0.732
% Absorción	1.77		1.48
Peso Específico (Kg/m ³)	2554.86		2473.96
Peso Unitario Suelto (Kg/m ³)	1603.63		1568.54
Peso Unitario Compactado (Kg/m ³)	1756.82		1672.35
Características del Cemento			
Tipo	Cemento Portland tipo I		
Peso Específico (Kg/m ³)	3150		
Requerimiento del Concreto			
Relación A/C	0.50		
Slump	3" a 4"		
Análisis según método ACI			
Agua (Lt)	216.00	Vaire (m ³)	0.025
Cemento (Kg)	432.00	Vagua (m ³)	0.216
Piedra (Kg)	949.89	Vcemento (m ³)	0.137
Arena (Kg)	633.14	Vpiedra (m ³)	0.378
		Varena (m ³)	0.244
Cantidad de Material x m³			
Agua (lts)	216.00		
Cemento (Kg)	432.00		
Piedra (Kg)	949.89		
Arena (Kg)	633.14		
Corrección por Humedad			
Humedad arena	639.92		
Humedad piedra	956.83		
Aporte o Disminución de Agua			
Agua que aporta la arena	-4.432		
Agua que aporta la piedra	-7.167		
Agua de obra	227.61		
Cantidad de Material x m³ (Peso en obra)			Proporción
Cemento (Kg)	432		1
Arena (Kg)	639.92		1.48
Piedra (Kg)	956.83		2.21
Agua (Kg)	227.61		0.53
Peso de probeta	14 Kg	Factor	0.006204703
Material Requerido para 1 probeta			
Cemento (Kg)	2.40		
Arena (Kg)	3.56		
Piedra (Kg)	5.33		
Agua (Kg)	1.27		

Proporciones para Relación a/c = 0.50

Materiales	
Cemento (kg/m3) =	432.00
Ag. Fino (kg/m3) =	639.92
Ag. Grueso (kg/m3) =	956.83
Agua (lts/m3) =	227.61

V probeta con acero (m3)	0.00165
Con Ceniza 0%, #Probetas=	3
Cemento (kg) =	2.1375
Ag. Fino (kg) =	3.1663
Ag. Grueso (kg) =	4.7344
Agua (lts) =	1.1262
Con Ceniza 5%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	2.0307
Ceniza 5%	0.1069
Ag. Fino (kg) =	3.1663
Ag. Grueso (kg) =	4.7344
Agua (lts) =	1.1262
Con Ceniza 10%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	1.9238
Ceniza 10%	0.2138
Ag. Fino (kg) =	3.1663
Ag. Grueso (kg) =	4.7344
Agua (lts) =	1.1262
Con Ceniza 15%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	1.8169
Ceniza 15%	0.3206
Ag. Fino (kg) =	3.1663
Ag. Grueso (kg) =	4.7344
Agua (lts) =	1.1262

V probeta sin acero (m3)	0.00557
Con Ceniza 0%	3
Cemento (kg) =	7.21
Ag. Fino (kg) =	10.69
Ag. Grueso (kg) =	15.98
Agua (lts) =	3.80
Con Ceniza 5%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	6.8535
Ceniza 5%	0.3607
Ag. Fino (kg) =	10.6863
Ag. Grueso (kg) =	15.9786
Agua (lts) =	3.8009
Con Ceniza 10%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	6.4928
Ceniza 10%	0.7214
Ag. Fino (kg) =	10.6863
Ag. Grueso (kg) =	15.9786
Agua (lts) =	3.8009
Con Ceniza 15%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	6.1321
Ceniza 15%	1.0821
Ag. Fino (kg) =	10.6863
Ag. Grueso (kg) =	15.9786
Agua (lts) =	3.8009

DISEÑO DE MEZCLAS

Características de los Agregados			
		Arena	Piedra
Módulo de Fineza		2.624	
Tamaño Max. Nominal			1/2"
% Contenido de Humedad		1.078	0.732
% Absorción		1.77	1.48
Peso Específico (Kg/m ³)		2554.86	2473.96
Peso Unitario Suelto (Kg/m ³)		1603.63	1568.54
Peso Unitario Compactado (Kg/m ³)		1756.82	1672.35
Características del Cemento			
Tipo		Cemento Portland tipo I	
Peso Específico (Kg/m ³)		3150	
Requerimiento del Concreto			
Relación A/C		0.55	
Slump		3" a 4"	
Análisis según método ACI			
Agua (Its)	216.00	Vaire (m ³)	0.025
Cemento (Kg)	392.73	Vagua (m ³)	0.216
Piedra (Kg)	949.89	Vcemento (m ³)	0.125
Arena (Kg)	665.56	Vpiedra (m ³)	0.378
		Varena (m ³)	0.256
Cantidad de Material x m³			
Agua (Its)		216.00	
Cemento (Kg)		392.73	
Piedra (Kg)		949.89	
Arena (Kg)		665.56	
Corrección por Humedad			
Humedad arena		672.68	
Humedad piedra		956.83	
Aporte o Disminución de Agua			
Agua que aporta la arena		-4.659	
Agua que aporta la piedra		-7.167	
Agua de obra		227.84	
Cantidad de Material x m³ (Peso en obra)			Proporción
Cemento (Kg)		392.73	1
Arena (Kg)		672.68	1.48
Piedra (Kg)		956.83	2.44
Agua (Kg)		227.84	0.58
Peso de probeta	14 Kg	Factor	0.00622203
Material Requerido para 1 probeta			
Cemento (Kg)		2.19	
Arena (Kg)		3.74	
Piedra (Kg)		5.33	
Agua (Kg)		1.27	

Proporciones para Relación a/c = 0.55

Materiales	
Cemento (kg/m ³) =	392.73
Ag. Fino (kg/m ³) =	672.68
Ag. Grueso (kg/m ³) =	956.83
Agua (lts/m ³) =	227.84

V probeta con acero (m³)	0.00165
Con Ceniza 0%, #Probetas=	3
Cemento (kg) =	1.9432
Ag. Fino (kg) =	3.3284
Ag. Grueso (kg) =	4.7344
Agua (lts) =	1.1273
Con Ceniza 5%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	1.8461
Ceniza 5%	0.0972
Ag. Fino (kg) =	3.3284
Ag. Grueso (kg) =	4.7344
Agua (lts) =	1.1273
Con Ceniza 10%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	1.7489
Ceniza 10%	0.1943
Ag. Fino (kg) =	3.3284
Ag. Grueso (kg) =	4.7344
Agua (lts) =	1.1273
Con Ceniza 15%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	1.6517
Ceniza 15%	0.2915
Ag. Fino (kg) =	3.3284
Ag. Grueso (kg) =	4.7344
Agua (lts) =	1.1273

V probeta sin acero (m³)	0.00557
Con Ceniza 0%	3
Cemento (kg) =	6.56
Ag. Fino (kg) =	11.23
Ag. Grueso (kg) =	15.98
Agua (lts) =	3.80
Con Ceniza 5%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	6.2304
Ceniza 5%	0.3279
Ag. Fino (kg) =	11.2334
Ag. Grueso (kg) =	15.9786
Agua (lts) =	3.8047
Con Ceniza 10%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	5.9025
Ceniza 10%	0.6558
Ag. Fino (kg) =	11.2334
Ag. Grueso (kg) =	15.9786
Agua (lts) =	3.8047
Con Ceniza 15%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	5.5746
Ceniza 15%	0.9838
Ag. Fino (kg) =	11.2334
Ag. Grueso (kg) =	15.9786
Agua (lts) =	3.8047

DISEÑO DE MEZCLAS

Características de los Agregados			
		Arena	Piedra
Módulo de Fineza		2.624	
Tamaño Max. Nominal			1/2"
% Contenido de Humedad		1.078	0.732
% Absorción		1.77	1.48
Peso Específico (Kg/m ³)		2554.86	2473.96
Peso Unitario Suelto (Kg/m ³)		1603.63	1568.54
Peso Unitario Compactado (Kg/m ³)		1756.82	1672.35
Características del Cemento			
Tipo		Cemento Portland tipo I	
Peso Específico (Kg/m ³)		3150	
Requerimiento del Concreto			
Relación A/C		0.60	
Slump		3" a 4"	
Análisis según método ACI			
Agua (Its)	216.00	Vaire (m ³)	0.025
Cemento (Kg)	360.00	Vagua (m ³)	0.216
Piedra (Kg)	949.89	Vcemento (m ³)	0.114
Arena (Kg)	692.57	Vpiedra (m ³)	0.378
		Varena (m ³)	0.266
Cantidad de Material x m³			
Agua (Its)		216.00	
Cemento (Kg)		360.00	
Piedra (Kg)		949.89	
Arena (Kg)		692.57	
Corrección por Humedad			
Humedad arena		699.98	
Humedad piedra		956.83	
Aporte o Disminución de Agua			
Agua que aporta la arena		-4.848	
Agua que aporta la piedra		-7.167	
Agua de obra		228.02	
Cantidad de Material x m³ (Peso en obra)		Proporción	
Cemento (Kg)		360.00	1
Arena (Kg)		699.98	1.94
Piedra (Kg)		956.83	2.66
Agua (Kg)		228.02	0.63
Peso de probeta	14 Kg	Factor	0.00623654
Material Requerido para 1 probeta			
Cemento (Kg)		2.00	
Arena (Kg)		3.90	
Piedra (Kg)		5.33	
Agua (Kg)		1.2693	

Proporciones para Relación a/c = 0.60

Materiales	
Cemento (kg/m ³) =	360.00
Ag. Fino (kg/m ³) =	699.98
Ag. Grueso (kg/m ³) =	956.83
Agua (lts/m ³) =	228.02

V probeta con acero (m³)	0.00165
Con Ceniza 0%, #Probetas=	3
Cemento (kg) =	1.7813
Ag. Fino (kg) =	3.4635
Ag. Grueso (kg) =	4.7344
Agua (lts) =	1.1283
Con Ceniza 5%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	1.6922
Ceniza 5%	0.0891
Ag. Fino (kg) =	3.4635
Ag. Grueso (kg) =	4.7344
Agua (lts) =	1.1283
Con Ceniza 10%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	1.6032
Ceniza 10%	0.1781
Ag. Fino (kg) =	3.4635
Ag. Grueso (kg) =	4.7344
Agua (lts) =	1.1283
Con Ceniza 15%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	1.5141
Ceniza 15%	0.2672
Ag. Fino (kg) =	3.4635
Ag. Grueso (kg) =	4.7344
Agua (lts) =	1.1283

V probeta sin acero (m³)	0.00557
Con Ceniza 0%	3
Cemento (kg) =	6.01
Ag. Fino (kg) =	11.69
Ag. Grueso (kg) =	15.98
Agua (lts) =	3.8079
Con Ceniza 5%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	5.7112
Ceniza 5%	0.3006
Ag. Fino (kg) =	11.6894
Ag. Grueso (kg) =	15.9786
Agua (lts) =	3.8079
Con Ceniza 10%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	5.4106
Ceniza 10%	0.6012
Ag. Fino (kg) =	11.6894
Ag. Grueso (kg) =	15.9786
Agua (lts) =	3.8079
Con Ceniza 15%, #Probetas :	3
Cemento (kg) =	5.1101
Ceniza 15%	0.9018
Ag. Fino (kg) =	11.6894
Ag. Grueso (kg) =	15.9786
Agua (lts) =	3.8079

B) COSTOS UNITARIOS DE MEZCLA CON CENIZA Y SIN CENIZA

COSTOS UNITARIOS PARA DISEÑO DE MEZCLA PARA UN CONCRETO A/C= 0.50

Materiales	Peso (kg)	Equivale a:
Cemento	432.00	10.16 Bolsas
Agregado Grueso	956.83	0.38 m3
Agua	227.61	0.23 m3
Agregado Fino	639.92	0.27 m3

**Al realizar un reemplazo porcentual de ceniza por
Cemento al 5%**

Partida: CONCRETO EN ZAPATAS DE MEZCLA CONTROL						
Rendimiento: 25 m3/dia			Costo Unitario Directo por: m3			
Código	Descripción	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
Mano de Obra						
470101	Capataz	h-h	0.1	0.032	S/. 13.13	S/. 0.42
470102	Operario	h-h	2	0.64	S/. 10.94	S/. 7.00
470103	Oficial	h-h	1	0.32	S/. 9.82	S/. 3.14
470104	Peón	h-h	8	2.56	S/. 8.86	S/. 22.68
470022	Operador de equipo liviano		1	0.32	S/. 9.82	S/. 3.14
						S/. 36.39

Partida: CONCRETO EN ZAPATAS CON REEMPLAZO DE CENIZA AL 5%						
Rendimiento: 25 m3/dia			Costo Unitario Directo por: m3			
Código	Descripción	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
Mano de Obra						
470101	Capataz	h-h	0.1	0.032	S/. 13.13	S/. 0.42
470102	Operario	h-h	2	0.64	S/. 10.94	S/. 7.00
470103	Oficial	h-h	1	0.32	S/. 9.82	S/. 3.14
470104	Peón	h-h	8	2.56	S/. 8.86	S/. 22.68
470022	Operador de equipo liviano		1	0.32	S/. 9.82	S/. 3.14
						S/. 36.39

Materiales						
230101	Cemento Portland Tipo I	bls.		10.16	S/. 19.35	S/. 196.69
050031	Piedra chancada de 1/2"	m3		0.38	S/. 48.74	S/. 18.58
390500	Agua	m3		0.23	S/. 8.00	S/. 1.82
050104	Arena Gruesa	m3		0.25	S/. 20.17	S/. 4.96
010004	Aceite para Motor SAE-30	gal.		0.03	S/. 38.25	S/. 0.11
340000	Gasolina 84 Octanos	gal.		0.22	S/. 11.50	S/. 2.53
						S/. 224.69
Equipos y Herramientas						
370101	Herramientas Manuales	%MO		3	S/. 36.39	S/. 1.09
490704	Vibrador de Concreto 4HP 2.40"	h-m	1	0.32	S/. 7.25	S/. 2.32
491007	Mezcladora Concreto Tambor 11 p3	h-m	1	0.32	S/. 23.20	S/. 7.42
						S/. 10.84
COSTO DE LA PARTIDA SIN IGV. DE MEZCLA CONTROL					S/. 271.92	

Materiales						
230101	Cemento Portland Tipo I	bls.		9.65	S/. 19.35	S/. 186.77
230102	Ceniza Volante Tipo C	bls.		0.51	S/. 1.00	S/. 0.51
050031	Piedra chancada de 1/2"	m3		0.38	S/. 48.74	S/. 18.58
390500	Agua	m3		0.23	S/. 8.00	S/. 1.82
050104	Arena Gruesa	m3		0.25	S/. 20.17	S/. 4.96
010004	Aceite para Motor SAE-30	gal.		0.003	S/. 38.25	S/. 0.11
340000	Gasolina 84 Octanos	gal.		0.22	S/. 11.50	S/. 2.53
						S/. 215.28
Equipos y Herramientas						
370101	Herramientas Manuales	%MO		3	S/. 36.39	S/. 1.09
490704	Vibrador de Concreto 4HP 2.40"	h-m	1	0.32	S/. 7.25	S/. 2.32
491007	Mezcladora Concreto Tambor 11 p3	h-m	1	0.32	S/. 23.20	S/. 7.42
						S/. 10.84
COSTO DE LA PARTIDA SIN IGV. CON REEMPLAZO DE CENIZA AL 5%					S/. 262.50	

COSTOS UNITARIOS DE DISEÑO DE MEZCLA PARA UN CONCRETO A/C=0.55

Materiales	Peso (kg)	Equivale a:
Cemento	392.73	9.24 Bolsas
Agregado Grueso	956.83	0.38 m3
Agua	227.84	0.23 m3
Agregado Fino	672.68	0.28 m3

**Al realizar un reemplazo porcentual de ceniza por
Cemento al 5%**

Partida: CONCRETO EN ZAPATAS DE MEZCLA CONTROL						
Rendimiento:	25	m3/dia	Costo Unitario Directo por: m3			
Código	Descripción	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
Mano de Obra						
470101	Capataz	h-h	0.1	0.032	S/. 13.13	S/. 0.42
470102	Operario	h-h	2	0.64	S/. 10.94	S/. 7.00
470103	Oficial	h-h	1	0.32	S/. 9.82	S/. 3.14
470104	Peón	h-h	8	2.56	S/. 8.86	S/. 22.68
470022	Operador de equipo liviano		1	0.32	S/. 9.82	S/. 3.14
						S/. 36.39
Materiales						

Partida: CONCRETO EN ZAPATAS CON REEMPLAZO DE CENIZA AL 5%						
Rendimiento:	25	m3/dia	Costo Unitario Directo por: m3			
Código	Descripción	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
Mano de Obra						
470101	Capataz	h-h	0.1	0.032	S/. 13.13	S/. 0.42
470102	Operario	h-h	2	0.64	S/. 10.94	S/. 7.00
470103	Oficial	h-h	1	0.32	S/. 9.82	S/. 3.14
470104	Peón	h-h	8	2.56	S/. 8.86	S/. 22.68
470022	Operador de equipo liviano		1	0.32	S/. 9.82	S/. 3.14
						S/. 36.39
Materiales						

230101	Cemento Portland Tipo I	bls.		9.24	S/. 19.35	S/. 178.81
050031	Piedra chancada de 1/2"	m3		0.38	S/. 48.74	S/. 18.58
390500	Agua	m3		0.23	S/. 8.00	S/. 1.82
050104	Arena Gruesa	m3		0.26	S/. 20.17	S/. 5.22
010004	Aceite para Motor SAE-30	gal.		0.003	S/. 38.25	S/. 0.11
340000	Gasolina 84 Octanos	gal.		0.22	S/. 11.50	S/. 2.53
S/. 207.07						
Equipos y Herramientas						
370101	Herramientas Manuales	%M O		3	S/. 36.39	S/. 1.09
490704	Vibrador de Concreto 4HP 2.40"	h-m	1	0.32	S/. 7.25	S/. 2.32
491007	Mezcladora Concreto Tambor 11 p3	h-m	1	0.32	S/. 23.20	S/. 7.42
S/. 10.84						
COSTO DE LA PARTIDA SIN IGV.					S/. 254.29	

230101	Cemento Portland Tipo I	bls.		8.78	S/. 19.35	S/. 169.85
230102	Ceniza Volante Tipo C	bls.		0.46	S/. 1.00	S/. 0.46
050031	Piedra chancada de 1/2"	m3		0.38	S/. 48.74	S/. 18.58
390500	Agua	m3		0.23	S/. 8.00	S/. 1.82
050104	Arena Gruesa	m3		0.28	S/. 20.17	S/. 5.73
010004	Aceite para Motor SAE-30	gal.		0.003	S/. 38.25	S/. 0.11
340000	Gasolina 84 Octanos	gal.		0.22	S/. 11.50	S/. 2.53
S/. 198.58						
Equipos y Herramientas						
370101	Herramientas Manuales	%MO		3	S/. 36.39	S/. 1.09
490704	Vibrador de Concreto 4HP 2.40"	h-m	1	0.32	S/. 7.25	S/. 2.32
491007	Mezcladora Concreto Tambor 11 p3	h-m	1	0.32	S/. 23.20	S/. 7.42
S/. 10.84						
COSTO DE LA PARTIDA SIN IGV.					S/. 245.80	

COSTOS UNITARIOS DE DISEÑO DE MEZCLA PARA UN CONCRETO A/C=0.60

Materiales	Peso (kg)	Equivalencia:
Cemento	360.00	8.47 Bolsas
Agregado Grueso	956.83	0.38 m3
Agua	228.02	0.23 m3
Agregado Fino	699.98	0.27 m3

**Al realizar un reemplazo porcentual de ceniza por
Cemento al 5%**

Partida: CONCRETO EN ZAPATAS DE MEZCLA CONTROL						
Rendimiento:	25	m3/dia	Costo Unitario Directo por: m3			
Código	Descripción	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
Mano de Obra						
470101	Capataz	h-h	0.1	0.032	S/. 13.13	S/. 0.42
470102	Operario	h-h	2	0.64	S/. 10.94	S/. 7.00
470103	Oficial	h-h	1	0.32	S/. 9.82	S/. 3.14
470104	Peón	h-h	8	2.56	S/. 8.86	S/. 22.68
470022	Operador de equipo liviano		1	0.32	S/. 9.82	S/. 3.14
						S/. 36.39
Materiales						

Partida: CONCRETO EN ZAPATAS CON REEMPLAZO DE CENIZA AL 5%						
Rendimiento:	25	m3/dia	Costo Unitario Directo por: m3			
Código	Descripción	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
Mano de Obra						
470101	Capataz	h-h	0.1	0.032	S/. 13.13	S/. 0.42
470102	Operario	h-h	2	0.64	S/. 10.94	S/. 7.00
470103	Oficial	h-h	1	0.32	S/. 9.82	S/. 3.14
470104	Peón	h-h	8	2.56	S/. 8.86	S/. 22.68
470022	Operador de equipo liviano		1	0.32	S/. 9.82	S/. 3.14
						S/. 36.39
Materiales						

230101	Cemento Portland Tipo I	bls.		8.47	S/. 19.35	S/. 163.91
050031	Piedra chancada de 1/2"	m3		0.38	S/. 48.74	S/. 18.58
390500	Agua	m3		0.23	S/. 8.00	S/. 1.82
050104	Arena Gruesa	m3		0.27	S/. 20.17	S/. 5.43
010004	Aceite para Motor SAE-30	gal.		0.003	S/. 38.25	S/. 0.11
340000	Gasolina 84 Octanos	gal.		0.22	S/. 11.50	S/. 2.53
S/. 192.38						
Equipos y Herramientas						
370101	Herramientas Manuales	%MO		3	S/. 36.39	S/. 1.09
490704	Vibrador de Concreto 4HP 2.40"	h-m	1	0.32	S/. 7.25	S/. 2.32
491007	Mezcladora Concreto Tambor 11 p3	h-m	1	0.32	S/. 23.20	S/. 7.42
S/. 10.84						
COSTO DE LA PARTIDA SIN IG.V.				S/. 239.60		

230101	Cemento Portland Tipo I	bls.		8.78	S/. 19.35	S/. 169.85
230102	Ceniza Volante Tipo C	bls.		0.42	S/. 1.00	S/. 0.42
050031	Piedra chancada de 1/2"	m3		0.38	S/. 48.74	S/. 18.58
390500	Agua	m3		0.23	S/. 8.00	S/. 1.82
050104	Arena Gruesa	m3		0.27	S/. 20.17	S/. 5.43
010004	Aceite para Motor SAE-30	gal.		0.003	S/. 38.25	S/. 0.11
340000	Gasolina 84 Octanos	gal.		0.22	S/. 11.50	S/. 2.53
S/. 198.75						
Equipos y Herramientas						
370101	Herramientas Manuales	%MO		3	S/. 36.39	S/. 1.09
490704	Vibrador de Concreto 4HP 2.40"	h-m	1	0.32	S/. 7.25	S/. 2.32
491007	Mezcladora Concreto Tambor 11 p3	h-m	1	0.32	S/. 23.20	S/. 7.42
S/. 10.84						
COSTO DE LA PARTIDA SIN IG.V.				S/. 245.98		

ANEXO 03

A) RESUMEN FOTOGRÁFICO DEL PROCESO DE ELABORACIÓN, CURADO, ENSAYO DE COMPRESIÓN.



Figura A.03.1: Determinación del asentamiento del concreto en estado fresco.



(a)



(b)

Figura A.03.2: (a) Mezclado de concreto (b) Llenado de probetas



(a)



(b)

Figura A.03.3: (a) Llenado de probetas (b) Curado de Probetas



Figura A.03.4: Probetas para Ensayar Resistencia a la Compresión.



(a)



(b)

Figura A.03.5: (a) Probeta lista para ensayarla

(b) Probeta ensayada

**B) RESUMEN FOTOGRÁFICO DEL PROCESO DE ELABORACIÓN, CURADO
ENSAYO DE LA MEDIA CELDA.**



(a)

Figura B.03.1: (a) Mezclando los materiales



(b)

(b) Probetas conformadas



(a)

Figura B.03.2: (a) Probetas confeccionadas



(b)

(b) Probetas listas para el curado



Figura B.03.3: Probetas curándose para después del ensayo.

ANEXO 04

PROCESAMIENTO DE DATOS



Figura 04.1: Verificando el electrodo de referencia Cu/CuSO₄



Figura 04.2: Midiendo el Potencial de Corrosión del Acero



Figura 04.3: Midiendo el Potencial de Corrosión del Acero

ANEXO 05:**PROCESO DE CÁLCULO PARA LA OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA
PROMEDIO****RELACIÓN A/C = 0.50**

DOSIFICACIÓN (%)	PROBETAS	CARGA (Kg)	PROMEDIO (Kg)	RESISTENCIA (Kg/Cm²)	PROMEDIO (Kg/Cm²)
0	1	53674.50	51983.40	303.70	294.10
	2	50292.30		284.50	
	3	51983.40		294.10	
5	1	51529.9	51640.5	291.60	292.23
	2	51848.0		293.40	
	3	51547.6		291.70	
10	1	45504.30	45057.23	257.50	255.07
	2	44040.10		249.20	
	3	45527.30		258.50	
15	1	43338.70	40697.00	245.20	230.03
	2	38321.10		216.20	
	3	40431.20		228.70	

RELACIÓN A/C = 0.55

DOSIFICACIÓN (%)	PROBETAS	CARGA (Kg)	PROMEDIO (Kg)	RESISTENCIA (Kg/Cm²)	PROMEDIO (Kg/Cm²)
0	1	43211.8	44206.50	243.4	250.2
	2	44693.5		252.9	
	3	44914.2		254.3	
5	1	42408.8	43465.03	238.2	245.8
	2	42540.2		242.8	
	3	45346.1		256.4	
10	1	34670.4	36615.60	196.2	207.20
	2	37975.9		214.9	
	3	37198.4		210.5	
15	1	24721.2	24468.83	139.9	138.43
	2	22375.6		126.5	
	3	26309.7		148.9	

RELACIÓN A/C = 0.60

DOSIFICACIÓN (%)	PROBETAS	CARGA (Kg)	PROMEDIO (Kg)	RESISTENCIA (Kg/Cm²)	PROMEDIO (Kg/Cm²)
0	1	40228.2	42685.90	227.6	241.53
	2	43615.3		246.8	
	3	44214.2		250.2	
5	1	37757.7	36496.77	213.6	206.50
	2	36563.3		206.9	
	3	35169.3		199.0	
10	1	27938.8	31225.40	158.1	176.70
	2	31225.4		179.7	
	3	34512		195.3	
15	1	26560.8	29564.35	150.3	167.30
	2	30023.8		169.9	
	3	32109.4		181.7	

ANEXO 06:

PROCESO DE CÁLCULO PARA LA OBTENCIÓN DE POTENCIALES DE CORROSIÓN PROMEDIO

RELACIÓN A/C = 0.50

Días de Exposición		0		7		14		21		28		35		42		49		56		63	
DOSIFICACIÓN	0%	-152.0	-157.2	-168.1	-172.0	-226.0	-212.0	-283.0	-278.0	-475.0	-462.0	-490.0	-475.0	-309.0	-315.0	-315.0	-311.0	-317.0	-314.0	-300.0	-290.0
		-150.0	-166.6	-186.0	-184.0	-214.0	-223.0	-279.0	-276.0	-472.0	-475.0	-481.0	-485.0	-318.0	-310.0	-316.0	-310.0	-310.0	-315.0	-328.0	-336.0
		-162.5	-166.5	-172.8	-191.0	-218.0	-223.0	-281.0	-279.0	-473.0	-477.0	-486.0	-490.0	-310.0	-311.0	-320.0	-314.0	-318.0	-310.0	-323.0	-335.0
	5%	-166.4	-162.2	-182.0	-182.4	-210.0	-225.0	-276.0	-270.0	-480.0	-491.0	-493.0	-507.0	-280.0	-281.0	-280.0	-281.0	-290.0	-261.0	--	--
		-169.7	-168.0	-182.4	-180.8	-223.0	-218.0	-289.0	-285.0	-484.0	-489.0	-504.0	-500.0	-285.0	-279.0	-279.0	-275.0	-256.0	-251.0	-276.0	-278.0
		-164.5	-162.1	-183.4	-184.2	-217.0	-222.0	-286.0	-282.0	-492.0	-491.0	-506.0	-510.0	-287.0	-285.0	-274.0	-278.0	-261.0	-258.0	-268.0	-271.0
	10%	-148.7	-142.8	-183.5	-188.4	-232.0	-251.0	-301.0	-299.0	-495.0	-492.0	-510.0	-501.0	-288.0	-298.0	-290.0	-287.0	-291.0	-280.0	-319.0	-301.0
		-167.5	-183.4	-188.5	-187.4	-243.0	-236.0	-307.0	-289.0	-507.0	-494.0	-515.0	-508.0	-297.0	-314.0	-290.0	-299.0	-260.0	-283.0	-330.0	-328.0
		-178.1	-178.8	-185.3	-186.7	-241.0	-232.0	-298.0	-300.0	-502.0	-506.0	-515.0	-511.0	-301.0	-297.0	-309.0	-306.0	-281.0	-293.0	-311.0	-312.0
	15%	-181.8	-177.5	-196.7	-197.3	-253.0	-245.0	-311.0	-310.0	-517.0	-517.0	-522.0	-529.0	-310.0	-307.0	-315.0	-308.0	-316.0	-319.0	-328.0	-336.0
		-150.6	-157.5	-195.8	-194.2	-251.0	-254.0	-310.0	-315.0	-522.0	-531.0	-529.0	-546.0	-306.0	-311.0	-310.0	-314.0	-320.0	-318.0	-303.0	-310.0
		-177.4	-169.5	-197.3	-194.6	-254.0	-254.0	-305.0	-318.0	-513.0	-538.0	-546.0	-550.0	-310.0	-318.0	-307.0	-312.0	-310.0	-315.0	--	--

Días de exposición		0	7	14	21	28	35	42	49	56	63
DOSIFICACIÓN	0%	-159.13	-178.98	-219.33	-279.33	-472.33	-484.50	-312.17	-314.33	-314.00	-318.67
	5%	-165.48	-182.53	-219.17	-281.33	-487.83	-503.33	-282.83	-277.83	-262.83	-273.25
	10%	-166.55	-186.63	-239.17	-299.00	-499.33	-510.00	-299.17	-296.83	-281.33	-316.83
	15%	-169.05	-195.98	-251.83	-311.50	-523.00	-537.00	-310.33	-311.00	-316.33	-319.25

RELACIÓN A/C = 0.55

Días de Exposición		0		7		14		21		28		35		42		49		56		63	
DOSIFICACIÓN	0%	-149.7	-145.5	-188.7	-190.1	-228.0	-229.0	-288.0	-283.0	-500.0	-490.0	-503.0	-500.0	-340.0	-336.0	-320.0	-326.0	-321.0	-327.0	-449.0	-434.0
		-143.3	-146.3	-186.5	-187.1	-224.0	-226.0	-289.0	-286.0	-499.0	-508.0	-506.0	-508.0	-310.0	-318.0	-319.0	-318.0	-325.0	-323.0	-383.0	-362.0
		-147.2	-146.4	-189.4	-187.7	-228.0	-224.0	-288.0	-279.0	-501.0	-502.0	-505.0	-504.0	-318.0	-304.0	-315.0	-310.0	-320.0	-322.0	-388.0	-356.0
	5%	-145.8	-147.5	-188.1	-189.8	-233.0	-238.0	-290.0	-284.0	-520.0	-515.0	-503.0	-530.0	-281.0	-283.0	-292.0	-293.0	-300.0	-306.0	-285.0	-289.0
		-145.7	-153.4	-187.9	-186.1	-235.0	-226.0	-292.0	-285.0	-515.0	-496.0	-513.0	-502.0	-296.0	-299.0	-296.0	-300.0	-301.0	-292.0	-265.0	-261.0
		-150.5	-142.8	-189.4	-180.1	-228.0	-232.0	-289.0	-292.0	-508.0	-501.0	-513.0	-509.0	-278.0	-257.0	-281.0	-297.0	-306.0	-302.0	-307.0	-329.0
	10%	-147.7	-158.0	-193.4	-194.2	-253.0	-246.0	-302.0	-301.0	-516.0	-519.0	-517.0	-529.0	-321.0	-327.0	-328.0	-325.0	-322.0	-365.0	--	--
		-151.3	-154.3	-194.9	-193.8	-243.0	-261.0	-305.0	-294.0	-514.0	-520.0	-513.0	-524.0	-330.0	-320.0	-327.0	-330.0	-330.0	-320.0	-319.0	-333.0
		-186.3	-187.1	-193.1	-193.7	-235.0	-246.0	-299.0	-301.0	-504.0	-518.0	-514.0	-511.0	-336.0	-324.0	-330.0	-334.0	-328.0	-318.0	-317.0	-324.0
	15%	-142.7	-146.8	-198.1	-197.5	-240.0	-252.0	-312.0	-321.0	-519.0	-525.0	-524.0	-535.0	-356.0	-337.0	-330.0	-335.0	-328.0	-375.0	-370.0	-374.0
		-161.8	-163.7	-197.8	-198.1	-248.0	-244.0	-315.0	-316.0	-533.0	-523.0	-543.0	-553.0	-324.0	-326.0	-329.0	-329.0	-322.0	-318.0	-350.0	-356.0
		-167.3	-163.3	-198.6	-197.0	-249.0	-238.0	-314.0	-317.0	-530.0	-535.0	-541.0	-555.0	-348.0	-356.0	-349.0	-357.0	-345	-351	-354.0	-346.0

Días de exposición		0	7	14	21	28	35	42	49	56	63
DOSIFICACIÓN	0%	-146.40	-188.25	-226.50	-285.50	-500.00	-504.33	-321.00	-318.00	-323.00	-395.33
	5%	-147.62	-186.90	-232.00	-288.67	-509.17	-511.67	-282.33	-293.17	-301.17	-289.33
	10%	-164.12	-193.85	-247.33	-300.33	-515.17	-518.00	-326.33	-329.00	-330.50	-323.25
	15%	-157.60	-197.85	-245.17	-315.83	-527.50	-541.83	-341.17	-338.17	-339.83	-358.33

RELACIÓN A/C = 0.60

Días de Exposición		0		7		14		21		28		35		42		49		56		63	
DOSIFICACIÓN	0%	-152.2	-151.4	-190.1	-189.9	-221.0	-231.0	-281.0	-289.0	-501.0	-497.0	-570.0	-582.0	-370.0	-376.0	-378.0	-380.0	-381.0	-398.0	-429.0	-431.0
		-150.1	-151.7	-187.1	-190.4	-235.0	-232.0	-281.0	-287.0	-509.0	-496.0	-569.0	-576.0	-364.0	-375.0	-370.0	-371.0	-378.0	-366.0	-400.0	-399.0
		-148.8	-147.4	-191.7	-181.4	-228.0	-233.0	-280.0	-279.0	-572.0	-528.0	-562.0	-558.0	-377.0	-368.0	-371.0	-372.0	-389.0	-375.0	--	--
	5%	-158.6	-147.7	-195.7	-196.3	-222.0	-229.0	-295.0	-298.0	-520.0	-523.0	-490.0	-513.0	-325.0	-329.0	-328.0	-334.0	-322.0	-316.0	-314.0	-328.0
		-151.4	-154.2	-190.1	-186.6	-237.0	-231.0	-287.0	-292.0	-521.0	-515.0	-501.0	-513.0	-320.0	-318.0	-324.0	-328.0	-342.0	-323.0	-338.0	-325.0
		-157.3	-155.4	-187.0	-186.2	-222.0	-232.0	-289.0	-285.0	-522.0	-523.0	-492.0	-493.0	-326.0	-328.0	-328.0	-323.0	-305.0	-322.0	-333.0	-320.0
	10%	-157.0	-155.6	-198.4	-198.9	-248.0	-249.0	-301.0	-297.0	-530.0	-535.0	-532.0	-532.0	-329.0	-334.0	-340.0	-339.0	-346.0	-341.0	-365.0	-387.0
		-154.0	-154.8	-197.1	-197.8	-257.0	-245.0	-315.0	-320.0	-535.0	-538.0	-535.0	-528.0	-337.0	-339.0	-343.0	-338.0	-354.0	-350.0	-364.0	-374.0
		-168.2	-176.1	-198.7	-198.4	-242.0	-250.0	-294.0	-310.0	-536.0	-536.0	-525.0	-536.0	-336.0	-337.0	-347.0	-341.0	-344.0	-355.0	--	--
	15%	-177.5	-186.8	-201.5	-199.9	-245.0	-252.0	-310.0	-326.0	-536.0	-530.0	-531.0	-530.0	-339.0	-327.0	-346.0	-338.0	-361.0	-359.0	-396.0	-390.0
		-178.5	-187.9	-200.4	-199.7	-245.0	-247.0	-308.0	-320.0	-579.0	-525.0	-549.0	-534.0	-357.0	-325.0	-349.0	-341.0	-351.0	-353.0	-445.0	-448.0
		-167.6	-172.8	-199.7	-199.8	-249.0	-257.0	-324.0	-318.0	-527.0	-525.0	-537.0	-535.0	-346.0	-340.0	-348	-345	-367	-357	-353	-383

Días de exposición		0	7	14	21	28	35	42	49	56	63
DOSIFICACIÓN	0%	-150.27	-188.43	-230.00	-282.83	-517.17	-569.50	-371.67	-373.67	-381.17	-414.75
	5%	-154.10	-190.32	-228.83	-291.00	-520.67	-500.33	-324.33	-327.50	-321.67	-326.33
	10%	-160.95	-198.22	-248.50	-306.17	-535.00	-531.33	-335.33	-341.33	-348.33	-372.50
	15%	-178.52	-200.17	-249.17	-317.67	-537.00	-536.00	-339.00	-344.50	-358.00	-402.50

ANEXO 07:

A) APLICACIÓN DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO (ANOVA) DE DATOS

CONCRETO CON CEMENTO PORTLAND TIPO I

a) ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CON A/C=0.50

Tabla A.1. Datos obtenidos para el ensayo de Resistencia a la Compresión, indicando los niveles y el porcentaje de Ceniza Volante en la elaboración de las probetas de concreto.

FACTOR A (Porcentaje de Ceniza Volante)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/Cm ²)		
	1	2	3
0	303.70	284.50	294.10
5	291.60	293.40	291.70
10	257.50	249.20	258.50
15	245.20	216.20	228.70

Grados de libertad:

a= 4 y n (número de réplicas) = 3

Grados de libertad del error:

(a) *(n-1)= 8

Tabla A.2 Cálculos para el análisis de varianza.

FACTOR A (Porcentaje de Ceniza Volante)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/Cm ²)				
	1	2	3	$\sum Y_i$	$Y_{promedio}$
0	303.70	284.50	294.10	882.30	294.10
10	291.60	293.40	291.70	876.70	292.23
20	257.50	249.20	258.50	765.20	255.07
30	245.20	216.20	228.70	690.10	230.03

Cálculo del término de corrección

$$C = \frac{(\sum Y_i)^2}{N}$$

$$C = \frac{(303.70 + 284.50 + 294.10 + \dots + 216.20 + 228.70)^2}{4 * 3}$$

$$C = 860977.04$$

Cálculo de la suma del total de cuadrados (SST)

$$SS_T = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 Y_{ij}^2 - C$$

$$SS_T = [(303.70)^2 + (284.50)^2 + (294.10)^2 + \dots + (216.20)^2 + (228.70)^2] - 860977.04$$

$$SS_T = 9293.0292$$

Calculo de la suma de cuadrados debido a los tratamientos (SS_{trat})

$$SS_{Trat} = \frac{\sum_{i=1}^4 Y_i^2}{n} - C$$

$$SS_{Trat} = \frac{(882.30)^2 + (876.70)^2 + (690.10)^2 + (765.20)^2}{4} - 860977.04$$

$$SS_{Trat} = 8631.3692$$

Cálculo de la suma de cuadrados debido al error (SS_E)

$$SS_E = SS_T - SS_{Trat}$$

$$SS_E = 9293.0292 - 8631.3692$$

$$SS_E = 661.66$$

Cálculo de la media de la suma de cuadrados debido a los tratamientos (MS_{trat})

$$MS_{Trat} = \frac{SS_{Trat}}{a - 1}$$

$$MS_{Trat} = \frac{8631.3692}{4 - 1}$$

$$MS_{Trat} = 2877.1231$$

Calculo de la media de la suma de cuadrados debido al error (MS_E)

$$MS_E = \frac{SS_E}{N - a}$$

$$MS_E = \frac{661.66}{12 - 4}$$

$$MS_E = 82.7075$$

Cálculo de la función Fo

$$F_0 = \frac{MS_{Trat}}{MS_E}$$

$$F_0 = \frac{2877.1231}{82.7075}$$

$$F_0 = 34.786725$$

Tabla A.3 Resultados del ANAVA al 95% de la influencia del porcentaje de Ceniza Volante sobre la resistencia a la Compresión de un mortero.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	Fo	F _{0.05, 3, 24}
Porcentaje	3	8631.369167	2877.123056	34.786725	4.0661806
Error	8	661.66	82.7075		
Total	11	9293.029167			

$$F_0 = 34.786725$$

Concluimos que sí existe interacción entre el factor analizado (porcentaje de ceniza volante), así mismo el factor por sí mismo afecta la resistencia a la compresión del concreto; todo esto es debido a que los Fisher experimentales hallados son mucho más grandes que los Fisher teóricos de tabla.

b) ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CON A/C=0.55

Tabla B.1. Datos obtenidos para el ensayo de Resistencia a la Compresión, indicando los niveles y el porcentaje de Ceniza Volante en la elaboración de las probetas de concreto.

FACTOR A (Porcentaje de Ceniza Volante)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/Cm ²)		
	1	2	3
0	243.40	252.90	254.30
5	238.20	242.80	256.40
10	196.20	214.90	210.50
15	139.90	126.50	148.90

Grados de libertad:

a= 4 y n (número de réplicas) = 3

Grados de libertad del error:

(a) *(n-1)= 8

Tabla B.2 Cálculos para el análisis de varianza.

FACTOR A (Porcentaje de Ceniza Volante)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (kg/cm ²)				
	1	2	3	$\sum Y_i$	$Y_{promedio}$
0	243.40	252.90	254.30	750.60	250.20
10	238.20	242.80	256.40	737.40	245.80
20	196.20	214.90	210.50	621.60	207.20
30	139.90	126.50	148.90	415.30	138.43

Cálculo del término de corrección

$$C = \frac{(\sum Y_i)^2}{N}$$

$$C = \frac{(243.40 + 252.90 + 254.30 + \dots + 126.50 + 148.90)^2}{4 * 3}$$

$$C = 531260.001$$

Cálculo de la suma del total de cuadrados (SST)

$$SS_T = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 Y_{ij}^2 - C$$

$$SS_T = [(243.40)^2 + (252.90)^2 + \dots + (126.50)^2 + (148.90)^2] - 531260.001$$

$$SS_T = 24774.6692$$

Calculo de la suma de cuadrados debido a los tratamientos (SS_{trat})

$$SS_{Trat} = \frac{\sum_{i=1}^4 Y_i^2}{n} - C$$

$$SS_{Trat} = \frac{(750.60)^2 + (737.40)^2 + (621.60)^2 + (415.30)^2}{4} - 531260.001$$

$$SS_{Trat} = 24079.9225$$

Cálculo de la suma de cuadrados debido al error (SS_E)

$$SS_E = SS_T - SS_{Trat}$$

$$SS_E = 24774.6692 - 24079.9225$$

$$SS_E = 694.746667$$

Cálculo de la media de la suma de cuadrados debido a los tratamientos (MS_{trat})

$$MS_{Trat} = \frac{SS_{Trat}}{a - 1}$$

$$MS_{Trat} = \frac{24079.9225}{4 - 1}$$

$$MS_{Trat} = 8026.64083$$

Calculo de la media de la suma de cuadrados debido al error (MS_E)

$$MS_E = \frac{SS_E}{N - a}$$

$$MS_E = \frac{694.746667}{12 - 4}$$

$$MS_E = 86.843333$$

Cálculo de la función Fo

$$F_0 = \frac{MS_{Trat}}{MS_E}$$

$$F_0 = \frac{8026.64083}{86.843333}$$

$$F_0 = 92.42667$$

Tabla B.3 Resultados del ANAVA al 95% de la influencia del porcentaje de Ceniza Volante sobre la resistencia a la Compresión de un mortero.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	F_o	F_{0.05, 3, 24}
Porcentaje	3	24079.9225	8026.64083	92.42667	4.0661806
Error	8	694.746667	86.84.3333		
Total	11	24774.6692			

$$F_0 = 92.42667$$

Concluimos que sí existe interacción entre el factor analizado (porcentaje de ceniza volante), así mismo el factor por sí mismo afecta la resistencia a la compresión del concreto; todo esto es debido a que los Fisher experimentales hallados son mucho más grandes que los Fisher teóricos de tabla.

c) ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CON A/C=0.60

Tabla C.1. Datos obtenidos para el ensayo de Resistencia a la Compresión, indicando los niveles y el porcentaje de Ceniza Volante en la elaboración de las probetas de concreto.

FACTOR A (Porcentaje de Ceniza Volante)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/Cm ²)		
	1	2	3
0	227.60	246.80	250.20
5	213.60	206.90	199.00
10	158.10	176.70	195.30
15	150.30	169.90	181.70

Grados de libertad:

a= 4 y n (número de réplicas) = 3

Grados de libertad del error:

(a) *(n-1)= 8

Tabla C.2 Cálculos para el análisis de varianza.

FACTOR A (Porcentaje de Ceniza Volante)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (kg/cm ²)				
	1	2	3	$\sum Y_i$	$Y_{promedio}$
0	227.60	246.80	250.20	724.60	241.53
10	213.60	206.90	199.00	619.50	206.50
20	158.10	176.70	195.30	530.10	176.70
30	150.30	169.90	181.70	501.90	167.30

Cálculo del término de corrección

$$C = \frac{(\sum Y_i)^2}{N}$$

$$C = \frac{(227.60 + 246.80 + \dots + 169.90 + 181.70)^2}{4 * 3}$$

$$C = 470487.60$$

Cálculo de la suma del total de cuadrados (SST)

$$SS_T = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 Y_{ij}^2 - C$$

$$SS_T = [(227.60)^2 + (246.80)^2 + (250.20)^2 + \dots + (169.90)^2 + (181.70)^2] - 470487.60$$

$$SS_T = 11689.59$$

Calculo de la suma de cuadrados debido a los tratamientos (SS_{trat})

$$SS_{Trat} = \frac{\sum_{i=1}^4 Y_i^2}{n} - C$$

$$SS_{Trat} = \frac{(724.60)^2 + (619.50)^2 + (530.10)^2 + (501.90)^2}{4} - 470487.60$$

$$SS_{Trat} = 10090.74$$

Cálculo de la suma de cuadrados debido al error (SS_E)

$$SS_E = SS_T - SS_{Trat}$$

$$SS_E = 11689.59 - 10090.74$$

$$SS_E = 1598.847$$

Cálculo de la media de la suma de cuadrados debido a los tratamientos (MS_{trat})

$$MS_{Trat} = \frac{SS_{Trat}}{a - 1}$$

$$MS_{Trat} = \frac{10090.74}{4 - 1}$$

$$MS_{Trat} = 3363.581$$

Calculo de la media de la suma de cuadrados debido al error (MS_E)

$$MS_E = \frac{SS_E}{N - a}$$

$$MS_E = \frac{1598.847}{12 - 4}$$

$$MS_E = 199.8558$$

Cálculo de la función Fo

$$F_0 = \frac{MS_{Trat}}{MS_E}$$

$$F_0 = \frac{3363.581}{199.8558}$$

$$F_0 = 16.83004$$

Tabla C.3 Resultados del ANAVA al 95% de la influencia del porcentaje de Ceniza Volante sobre la resistencia a la Compresión de un mortero.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	F_o	F_{0.05, 3, 24}
Porcentaje	3	10090.74	3363.581	16.83004	4.0661806
Error	8	1598.847	199.8558		
Total	11	11689.59			

$$F_0 = 16.83004$$

Concluimos que sí existe interacción entre el factor analizado (porcentaje de ceniza volante), así mismo el factor por sí mismo afecta la resistencia a la compresión del concreto; todo esto es debido a que los Fisher experimentales hallados son mucho más grandes que los Fisher teóricos de tabla.

B) APLICACIÓN DE LA CONFIBILIDAD ESTADÍSTICA (ALFA CRONBACH)

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CON A/C=0.50

Probetas	Resistencia a la Compresión (Kg/cm ²)				
	0 %	5 %	10 %	15 %	Sumatoria
1	303.7	291.6	257.5	245.2	1098
2	284.5	293.4	249.2	216.2	1043.3
3	294.1	291.7	258.5	228.7	1073

Promedio 0% = 294.10 Kg/cm²

Varianza = 92.16 Kg/cm²

Promedio 5% = 292.23 Kg/cm²

Varianza = 1.023 Kg/cm²

Promedio 10% = 255.06 Kg/cm²

Varianza = 26.063 Kg/cm²

Promedio 15% = 230.03 Kg/cm²

Varianza = 211.583 Kg/cm²

Sumatoria de Varianzas (0% + 5% + 10% + 15%) = 330.83 Kg/cm²

Promedio Total = 1071.4333 Kg/cm²

Varianza Total = 749.86333 Kg/cm²

$$\alpha = \left[\frac{4}{4 - 1} \right] * \left[1 - \frac{330.83}{749.8633} \right]$$

$\alpha = 0.74508$

⇒ Se concluye que tiene una confiabilidad del **74.508%** de la muestra en los resultados.

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CON A/C=0.55

Probetas	Resistencia a la Compresión (Kg/cm ²)				
	0 %	5 %	10 %	15 %	Sumatoria
1	243.4	238.2	196.2	139.9	817.7
2	252.9	242.8	214.9	126.5	837.1
3	254.3	256.4	210.5	148.9	870.1

Promedio 0% = 250.20 Kg/cm²

Varianza = 35.17 Kg/cm²

Promedio 5% = 245.80 Kg/cm²

Varianza = 89.56 Kg/cm²

Promedio 10% = 207.20 Kg/cm²

Varianza = 95.593 Kg/cm²

Promedio 15% = 138.43 Kg/cm²

Varianza = 127.053 Kg/cm²

Sumatoria de Varianzas (0% + 5% + 10% + 15%) = 347.3733 Kg/cm²

Promedio Total = 841.6333 Kg/cm²

Varianza Total = 701.8533 Kg/cm²

$$\alpha = \left[\frac{4}{4-1} \right] * \left[1 - \frac{347.3733}{701.8533} \right]$$

$\alpha = 0.67342$

⇒ Se concluye que tiene una confiabilidad del **67.342%** de la muestra en los resultados.

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CON A/C=0.60

Probetas	Resistencia a la Compresión (Kg/cm ²)				
	0 %	5 %	10 %	15 %	Sumatoria
1	227.6	213.6	158.1	150.3	749.6
2	246.8	206.9	176.7	169.9	800.3
3	250.2	199	195.3	181.7	826.2

Promedio 0% = 241.53 Kg/cm²

Varianza = 148.4933 Kg/cm²

Promedio 5% = 206.50 Kg/cm²

Varianza = 53.41 Kg/cm²

Promedio 10% = 176.70 Kg/cm²

Varianza = 345.96 Kg/cm²

Promedio 15% = 167.30 Kg/cm²

Varianza = 251.56 Kg/cm²

Sumatoria de Varianzas (0% + 5% + 10% + 15%) = 799.42333 Kg/cm²

Promedio Total = 792.0333 Kg/cm²

Varianza Total = 1518.143 Kg/cm²

$$\alpha = \left[\frac{4}{4-1} \right] * \left[1 - \frac{799.4233}{1518.143} \right]$$

$\alpha = 0.63123$

⇒ Se concluye que tiene una confiabilidad del **63.123%** de la muestra en los resultados.