

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA DE POSGRADO**



**INFLUENCIA DEL CEMENTO COMBINADO CON CENIZA Y  
PUZOLANA, EN LA CORROSIÓN DEL ACERO UTILIZADO  
PARA CONCRETO REFORZADO**

**PRESENTADO POR:**

**MANUEL ANTONIO ESCALANTE AGUILAR**

**LUIS CLAYTON MARTINEZ RIVERA**

**PARA OPTAR AL TITULO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERIA ESTRUCTURAL**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2022**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR:

**MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIO GENERAL:

**MSc. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO:

**PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA**

SECRETARIO:

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

DIRECTOR:

**MSc. MANUEL ROBERTO MONTEJO SANTOS**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA DE POSGRADO**

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**MAESTRO EN INGENIERIA ESTRUCTURAL**

Título:

**INFLUENCIA DEL CEMENTO COMBINADO CON CENIZA  
Y PUZOLANA, EN LA CORROSIÓN DEL ACERO  
UTILIZADO PARA CONCRETO REFORZADO**

Presentado por:

**MANUEL ANTONIO ESCALANTE AGUILAR**

**LUIS CLAYTON MARTINEZ RIVERA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

**MSc. ADRY VIVINA FLORES ALVARADO**

**SAN SALVADOR, SEPTIEMBRE DE 2022**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

**MSc. ADRY VIVINA FLORES ALVARADO**

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a Dios Todopoderoso por permitirnos culminar este proceso de manera satisfactoria, a la Maestra Adry Vivina Flores Alvarado por su disposición para guiarnos en todo el desarrollo de este trabajo de investigación, por el tiempo que nos dedicó y el valioso aporte de sus observaciones que permitieron enriquecer este trabajo, al Laboratorio de Suelos y materiales de la Universidad de El Salvador de la Facultad Multidisciplinaria Oriental, por prestarnos sus instalaciones para hacer las probetas, especialmente al encargado del laboratorio Ingeniero Humberto Moreira, al laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, especialmente al Ingeniero Evelio López y la colaboración de Carlos Morataya para el ensayo de prismas, al Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto por permitirnos utilizar sus equipos para medición de potencial de corrosión, especialmente al Ing. Marlon Vigil.

**Los Autores.**

## DEDICATORIA

Doy gracias a mi Señor Jesucristo, por haberme dado la fortaleza para culminar esta maestría, ya que con El todo es posible, así también con mucho amor y cariño doy gracias a mi esposa Miladys del Carmen Palomo de Escalante, por haberme apoyado a lograr este triunfo y de manera muy especial, pero muy especial, le dedico también este logro, a mi amado hijo Manuel Antonio Escalante Palomo, quien ya no se encuentra con nosotros debido al abuso de autoridad de los militares de El Salvador, hecho ocurrido el 12 de agosto de 2021 a sus 30 años de edad, a una cuadra de su casa de habitación; quiero dar a conocer cómo te dedicaste al estudio, al trabajo, al servicio del prójimo, llevándoles a los niños con cáncer y a sus padres en el Hospital Bloom, la palabra de Dios, alimentación, vestuario, etc. así como también diversión a través del teatro de títeres que habías montado, en cuanto a tus logros profesionales, cabe mencionar que trabajaste en Avianca, en Datum y por ultimo habías logrado tu sueño de trabajar con un empresa radicada en Europa, llamada Acronis, quienes valoraron tus conocimientos de informática e inglés, también dedico este trabajo de graduación, a todos tus excompañeros de trabajo, amigos de infancia, vecinos, hermanos en Cristo que te conocieron y que expresaron verbalmente y por escrito, las cualidades del gran ser humano que fuiste; le dedico este triunfo también a tu novia Katherine Aracely Mena Portillo con quien ibas a casarte próximamente, a quien le tenemos un cariño muy especial, ya que sabemos cuánto tú la amabas; estamos confiados en la palabra de Dios que dice bienaventurados los que tenemos hambre y sed de justicia, porque seremos saciados, así también el versículo que nos ha fortalecido a tu madre y a mí, dice: Y la

paz de Dios que sobrepasa todo entendimiento guardará nuestros corazones y pensamientos en Cristo Jesús; siempre te recordaremos con mucho cariño y amor cada día de nuestras vidas, mi amado “viejo” sé que estás con nuestro Dios, que mejor lugar donde nadie, absolutamente nadie, te puede hacer más daño y cuando Dios decida llamarnos a tu madre y a mí, nos reuniremos contigo nuevamente, hasta pronto mi amado y único hijo.

**Manuel Antonio.**

## DEDICATORIA

La honra y la gloria sea para el Eterno el Altísimo Jehová quien hasta aquí me ha sostenido con su gracia y su misericordia y darle las gracias por permitirme culminar, a mi amada esposa Gloria gracias por su comprensión en todos esos momentos que deje de compartir a tu lado, gracias a mis padres Amanda y Pablo que todos los días me enseñan a ser mejor persona, sin su guía y apoyo no podría escribir estas pocas letras, por temor a que olvide a alguien no podría nombrar a todas las personas que han impactado positivamente en mi vida, pero ellos saben que siempre les agradeceré el que sean parte de mi vida.

**Luis Clayton.**



## ÍNDICE DE CONTENIDO.

CONTENIDO.	PAG.
<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1: GENERALIDADES</b>	
<b>1.1 ANTECEDENTES .....</b>	<b>6</b>
<b>1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>7</b>
<b>1.3 JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>10</b>
<b>1.4 OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
1.4.1 OBJETIVO GENERAL .....	12
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES.....</b>	<b>14</b>
1.5.1 ALCANCES.....	14
<b>1.6 HIPÓTESIS.....</b>	<b>17</b>
1.6.1 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN .....	18
1.6.2 HIPÓTESIS NULA .....	18
1.6.3 HIPÓTESIS ALTERNATIVA .....	18
<b>CAPÍTULO 2: MARCO REFERENCIAL.</b>	
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 MATERIALES PARA ELABORAR CONCRETO REFORZADO .....</b>	<b>20</b>
2.1.1 CEMENTO PARA CONCRETO .....	20
2.1.2 AGREGADOS PARA CONCRETO.....	23
2.1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS.....	24
2.1.2.2 FUNCIÓN DE LOS AGREGADOS EN EL CONCRETO .....	28

2.1.2.3	ESPECIFICACIONES PARA AGREGADOS .....	30
<b>2.2</b>	<b>LAS PUZOLANAS .....</b>	<b>31</b>
2.2.1	CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA.....	32
2.2.1.1	GENERALIDADES.....	32
2.2.1.2	PROCESO DE GENERACIÓN DE CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA.....	32
2.2.1.3	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA.....	33
2.2.1.4	CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA COMO SUSTITUCIÓN DE MATERIAL CEMENTANTE EN EL CONCRETO .....	35
2.2.2	LA TOBA VOLCÁNICA.....	36
2.2.2.1	GENERALIDADES.....	36
2.2.2.2	PROCESO DE GENERACIÓN DE LA TOBA VOLCANICA. ....	37
2.2.2.3	COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	37
2.2.2.4	LA TOBA VOLCÁNICA COMO SUSTITUCIÓN DE MATERIAL CEMENTANTE EN EL CONCRETO. ....	38
<b>2.3</b>	<b>EL ACERO DE REFUERZO.....</b>	<b>39</b>
2.3.1	GENERALIDADES .....	39
2.3.2	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO.....	40
2.3.2.1	RANGO DE COMPORTAMIENTO ELÁSTICO .....	41
2.3.2.2	ESFUERZO DE FLUENCIA .....	42
2.3.2.3	RESISTENCIA A LA ROTURA: .....	44
2.3.2.4	MÓDULO DE ELASTICIDAD .....	45

2.3.2.5 DUCTILIDAD.....	46
<b>2.4 EL CONCRETO .....</b>	<b>46</b>
2.4.1 DEFINICIÓN.....	46
2.4.2 COMPONENTES DEL CONCRETO.....	47
2.4.3 CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONES DE LOS COMPONENTES DEL CONCRETO.....	47
2.4.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO.....	48
<b>2.5 EL CONCRETO REFORZADO .....</b>	<b>49</b>
2.5.1 DEFINICIÓN.....	49
2.5.2 INTERACCIÓN ENTRE EL ACERO DE REFUERZO Y EL CONCRETO.....	50
<b>2.6 EL FENÓMENO DE LA CORROSIÓN.....</b>	<b>51</b>
2.6.1 CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO .....	51
2.6.1.1 FASES DE LA CORROSIÓN.....	51
2.6.1.2 TERMODINÁMICA DE LA CORROSIÓN.....	52
2.6.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN .....	54
2.6.3 TIPOS DE CORROSIÓN.....	58
2.6.3.1 CORROSIÓN POR CARBONATACIÓN .....	59
2.6.3.2 CORROSIÓN POR CLORUROS.....	60
2.6.4 POTENCIAL DE CORROSIÓN.....	61
2.6.5 DAÑOS POR CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO.....	63
2.6.5.1 DEGRADACIÓN DEL CONCRETO ESTRUCTURAL.....	64
2.6.5.2 AGRIETAMIENTO.....	80

2.6.6 PRINCIPALES ENSAYOS DE CORROSIÓN SEGÚN SU NORMATIVA DE PROCEDENCIA.....	80
2.6.6.1 NORMAS NACE.....	81
2.6.6.2 NORMAS ASTM.....	82
2.6.6.3 NORMAS ISO .....	83

### **CAPÍTULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL.**

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>86</b>
<b>3.1 ENSAYO DE AGREGADOS PARA CONCRETO. ....</b>	<b>89</b>
3.1.1 PESO VOLUMÉTRICO DE LOS AGREGADOS (ASTM C 29).....	90
3.1.2 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS (ASTM C 127, C 128).....	93
3.1.2.1 GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS AGREGADOS.....	93
3.1.2.2 ABSORCIÓN Y CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS (ASTM-C128): .....	94
3.1.3 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS PARA CONCRETO (ASTM C 136).....	101
<b>3.2 DISEÑO DE MEZCLA.....</b>	<b>108</b>
3.2.1 GENERALIDADES.....	108
3.2.2 MÉTODO ACI 211.1.....	109
<b>3.3 DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS SIN ADICIÓN DE PUZOLANAS.....</b>	<b>112</b>
<b>3.4 DOSIFICACIONES DE MEZCLAS CON CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA (CBC) PARA LOS PORCENTAJES DE 5%, 10%, 15% Y 20%.....</b>	<b>114</b>
3.4.1 DOSIFICACIÓN PARA EL 5% DE CBC.....	114

3.4.2 DOSIFICACIÓN PARA EL 10% DE CBC. ....	116
3.4.3 DOSIFICACIÓN PARA EL 15% DE CBC. ....	117
3.4.4 DOSIFICACIÓN PARA EL 20% DE CBC. ....	118
<b>3.5 DOSIFICACIONES DE MEZCLAS CON TOBA VOLCÁNICA (TV) PARA LOS PORCENTAJES DE 5%, 10%, 15% Y 20%. ....</b>	<b>119</b>
3.5.1 DOSIFICACIÓN PARA EL 5% DE TV.....	119
3.5.2 DOSIFICACIÓN PARA EL 10% DE TV.....	120
3.5.3 DOSIFICACIÓN PARA EL 15% DE TV.....	121
3.5.4 DOSIFICACIÓN PARA EL 20% DE TV.....	122
<b>3.6 ELABORACIÓN DE MEZCLAS PARA LA FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES DE PRUEBA. ....</b>	<b>123</b>
3.6.1 PREPARACIÓN DE LA PUZOLANA. ....	124
3.6.2 FABRICACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO SIN SUSTITUCIÓN Y CON SUSTITUCIÓN DE PUZOLANA.....	125
3.6.3 ENSAYOS AL CONCRETO FRESCO.....	126
3.6.3.1 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL ENSAYO DE REVENIMIENTO AL CONCRETO FRESCO (ASTM C-94).....	126
3.6.3.2 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL ENSAYO DE TEMPERATURA AL CONCRETO FRESCO. ....	128
3.6.3.3 RESULTADOS DE ENSAYOS AL CONCRETO FRESCO. ....	129
3.6.4 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES DE PRUEBA. ....	129
<b>3.7 ENSAYOS DE ESPECÍMENES DE CONCRETO.....</b>	<b>136</b>

3.7.1 ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE A CILINDROS DE CONCRETO (ASTM C-39).....	136
3.7.2 ENSAYO DE POTENCIAL DE CORROSIÓN (ASTM C 876).....	138
3.7.2.1 CORROSIÓN DE LAS VIGUETAS:.....	138
3.7.2.2 EQUIPO .....	139
3.7.2.3 PROCEDIMIENTO:.....	140
3.7.3 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA ADHERENCIA (PULL-OUT) (NORMA RILEM RC6). .....	142
3.7.4 ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGUETAS DE CONCRETO CON CARGA AL CENTRO (ASTM C-293).....	144

#### **CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>158</b>
<b>4.1 ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE.....</b>	<b>158</b>
4.1.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN ENTRE CILINDROS DE CONCRETO SIN PUZOLANA (SP) Y CON SUSTITUCIONES DE CBC. ....	159
4.1.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN ENTRE CILINDROS DE CONCRETO SIN PUZOLANA (SP) Y CON SUSTITUCIONES DE TV.....	160
4.1.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN ENTRE CILINDROS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE CBC Y CON SUSTITUCIÓN DE TV. ....	161

<b>4.2 ANÁLISIS DE POTENCIAL DE CORROSIÓN EN VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO.</b> .....	<b>163</b>
4.2.1 ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DEL POTENCIAL DE CORROSIÓN CON RESPECTO A LOS CICLOS DE INMERSIÓN PARA VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN SUSTITUCIÓN DE PUZOLANA (SP).....	163
4.2.2 ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DEL POTENCIAL DE CORROSIÓN CON RESPECTO A LOS CICLOS DE INMERSIÓN PARA CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE PUZOLANAS (CBC Y TV). .....	164
4.2.2.1 VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON 5% DE CBC.....	164
4.2.2.2 VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON 10% DE CBC...	165
4.2.2.3 VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON 15% DE CBC...	166
4.2.2.4 VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON 20% DE CBC...	167
4.2.2.5 VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON 5% DE TV. ....	168
4.2.2.6 VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON 10% DE TV. ....	169
4.2.2.7 VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON 15% DE TV. ....	170
4.2.2.8 VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON 20% DE TV. ....	171
4.2.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE POTENCIAL DE CORROSIÓN ENTRE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN PUZOLANAS (SP) Y CON SUSTITUCIONES DE CBC.....	172
4.2.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE POTENCIAL DE CORROSIÓN ENTRE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN PUZOLANA (SP) Y CON SUSTITUCIONES DE TV.....	173

4.2.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE POTENCIAL DE CORROSIÓN ENTRE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON SUSTITUCIÓN DE CBC Y CON SUSTITUCIÓN DE TV. ....	174
<b>4.3 ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA ADHERENCIA EN CUBOS DE CONCRETO.....</b>	<b>175</b>
4.3.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA ADHERENCIA ENTRE PRISMAS DE CONCRETO SIN PUZOLANA (SP) Y CONCRETOS CON SUSTITUCIÓN DE PUZOLANAS SIN CORROSIÓN. ....	175
4.3.1.1 ANÁLISIS DE PRISMAS DE CONCRETO SIN PUZOLANA (SP) Y CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE CBC . ....	175
4.3.1.2 ANÁLISIS DE PRISMAS DE CONCRETO SIN PUZOLANA (SP) Y CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE TV . ....	177
4.3.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA ADHERENCIA ENTRE CONCRETO SIN PUZOLANA (SP) Y CONCRETOS CON SUSTITUCIÓN DE PUZOLANAS CON CORROSIÓN. ....	178
4.3.2.1 ANÁLISIS DE PRISMAS DE CONCRETO SIN PUZOLANA (SP) Y CONCRETOS CON SUSTITUCIÓN DE CBC. ....	178
4.3.2.2 ANÁLISIS DE PRISMAS DE CONCRETO SIN PUZOLANA (SP) Y CONCRETOS CON SUSTITUCIÓN DE TV.....	179
4.3.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA ADHERENCIA ENTRE CONCRETOS CON SUSTITUCIÓN DE PUZOLANAS, SOMETIDOS A CORROSIÓN Y NO SOMETIDOS A CORROSIÓN.....	180



4.3.3.1 ANÁLISIS DE PRISMAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE CBC.....	180
4.3.3.2 ANÁLISIS DE PRISMAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE TV.....	181
4.3.3.3 ANÁLISIS DE PRISMAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE TV Y CBC SIN CORROSIÓN. ....	182
4.3.3.4 ANÁLISIS DE PRISMAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE TV Y CBC CON CORROSIÓN. ....	183
<b>4.4 ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO, Y SU COMPORTAMIENTO SIN Y CON CORROSIÓN....</b>	<b>184</b>
4.4.1.1 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN PUZOLANA (SP) Y CONCRETOS CON SUSTITUCIÓN DE CBC SIN CORROSIÓN. ....	184
4.4.1.2 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN PUZOLANA (SP) Y CONCRETOS CON SUSTITUCIÓN DE TV SIN CORROSIÓN.....	186
4.4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE CARGA DE ROTURA REAL ENTRE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN PUZOLANA (SP) Y CON SUSTITUCIÓN DE PUZOLANAS CON CORROSIÓN. ....	187
4.4.2.1 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN PUZOLANAS (SP) Y CON SUSTITUCIÓN DE CBC CON CORROSIÓN.....	187

4.4.2.2 ANÁLISIS VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN PUZOLANAS (SP) Y CON SUSTITUCIÓN DE TV CON CORROSIÓN.....	188
4.4.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE CARGA DE ROTURA ENTRE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON SUSTITUCIÓN DE PUZOLANAS SIN Y CON CORROSIÓN.....	189
4.4.3.1 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON SUSTITUCIÓN DE CBC. ....	189
4.4.3.2 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON SUSTITUCIÓN DE TV. ....	190
4.4.3.3 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN CORROSIÓN CON SUSTITUCIONES DE PUZOLANAS (CBC Y TV). ....	191
4.4.3.4 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON CORROSIÓN Y SUSTITUCIONES DE PUZOLANAS (TV Y CBC). .....	192
<b>4.5 ANÁLISIS DE PESO VOLUMÉTRICO Y ABSORCIÓN DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON Y SIN CORROSIÓN.....</b>	<b>193</b>
4.5.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE PESO VOLUMETRICO ENTRE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON SUSTITUCIONES DE PUZOLANAS (CBC Y TV).....	194
4.5.1.2 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON SUSTITUCIÓN DE TV CON Y SIN CORROSIÓN. ....	195

4.5.1.3 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN CORROSIÓN CON SUSTITUCIONES DE CBC Y TV .....	196
4.5.1.4 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON CORROSIÓN Y SUSTITUCIONES DE CBC Y TV. ....	197
4.5.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE ABSORCIÓN ENTRE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON SUSTITUCIONES DE PUZOLANAS (CBC Y TV). ....	198
<b>4.6 CUADRO RESUMEN. ....</b>	<b>199</b>
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	
<b>5.1 CONCLUSIONES.....</b>	<b>201</b>
<b>5.2 RECOMENDACIONES.....</b>	<b>207</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>208</b>
<b>ANEXOS.</b>	
<b>ANEXO 1: RESULTADOS DE LABORATORIO PARA ENSAYOS DE COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO (CAPITULO3).....</b>	<b>213</b>
<b>Tabla A1-1:</b> Resultados de ensayos de compresión a cilindros de concreto sin sustitución de puzolana.....	213
<b>Tabla A1-2:</b> Resultados de ensayos de compresión a cilindros con 5% de sustitución de CBC .....	214
<b>Tabla A1-3:</b> Resultados de ensayos de compresión a cilindros con 10% de sustitución de CBC .....	215

<b>Tabla A1-4:</b> Resultados de ensayos de compresión a cilindros con 15% de sustitución de CBC .....	216
<b>Tabla A1-5:</b> Resultados de ensayos de compresión a cilindros con 20% de sustitución .....	217
<b>Tabla A1-6:</b> Resultados de ensayos de compresión a cilindros con 5% de sustitución de TV .....	218
<b>Tabla A1-7:</b> Resultados de ensayos de compresión a cilindros con 10% de sustitución de TV .....	219
<b>Tabla A1-8:</b> Resultados de ensayos de compresión a cilindros con 15% de sustitución de TV .....	220
<b>Tabla A1-9:</b> Resultados de ensayos de compresión a cilindros con 20% de sustitución de TV .....	221
<b>ANEXO 2: RESULTADOS DE LABORATORIO PARA ENSAYOS DE POTENCIAL DE CORROSIÓN (CAPITULO 3).....</b>	<b>222</b>
<b>Tabla A2-1:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas sin puzolana y con puzolana que no fueron sometidas a corrosión.....	222
<b>Tabla A2-2:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas sometidas a corrosión sin sustitución de puzolana.....	227
<b>Tabla A2-3:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 5% CBC .....	231
<b>Tabla A2-4:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 10% CBC .....	235

<b>Tabla A2-5:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 15% CBC .....	239
<b>Tabla A2-6:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 20% CBC .....	243
<b>Tabla A2-7:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 5% TV.....	247
<b>Tabla A2-8:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 10% TV.....	251
<b>Tabla A2-9:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 15% TV.....	255
<b>Tabla A2-10:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 20% TV .....	259
<b>ANEXO 3: RESULTADOS DE LABORATORIO PARA ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA ADHERENCIA (CAPITULO 3).....</b>	<b>263</b>
<b>Tabla A3-1:</b> Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas sin sustitución de puzolana (A1, A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión). .....	263
<b>Tabla A3-2:</b> Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas con 5% de sustitución de CBC (A1, A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión)..	263
<b>Tabla A3-3:</b> Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas con 10% de sustitución de CBC (A1, A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión). .	263
<b>Tabla A3-4:</b> Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas con 15% de sustitución de CBC (A1, A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión)..	263

<b>Tabla A3-5:</b> Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas con 20% de sustitución de CBC (A1,A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión)..	....264
<b>Tabla A3-6:</b> Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas con 5% TV. (A1, A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión).	.....264
<b>Tabla A3-7:</b> Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas con 10% de sustitución de TV (A1, A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión).	.....264
<b>Tabla A3-8:</b> Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas con 15% de sustitución de TV (A1, A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión).	.....264
<b>Tabla A3-9:</b> Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas con 20% de sustitución de TV (A1, A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión).	.....265
<b>Tabla A3-10:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión en prismas de concreto sin sustitución de puzolana y con sustitución de puzolana para ensayo de resistencia a la adherencia no sometidos a corrosión.	.....265
<b>Tabla A3-11:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión en prismas de concreto sin sustitución de puzolana y con sustitución de puzolana para ensayo de resistencia a la adherencia sometidos a corrosión.	.....267
<b>ANEXO 4: CALCULO DE ROTURA TEORICA PARA VIGUETAS DE CONCRETO (CAPITULO 3)</b>	<b>.....269</b>
<b>Tabla A4-1:</b> Calculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto sin sustitución de puzolana	.....269
<b>Tabla A4-2:</b> Calculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (5% CBC)	.....271

<b>Tabla A4-3:</b> Calculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (10% CBC) .....	273
<b>Tabla A4-4:</b> Calculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (15% CBC) .....	275
<b>Tabla A4-5:</b> Calculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (20% CBC) .....	277
<b>Tabla A4-6:</b> Calculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (5% TV).....	279
<b>Tabla A4-7:</b> Calculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (10% TV).....	281
<b>Tabla A4-8:</b> Calculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (15% TV).....	283
<b>Tabla A4-9:</b> Calculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (20% TV).....	285
<b>ANEXO 5: CALIDAD DEL ACERO USADO EN LA INVESTIGACION (CAPITULO 3).....</b>	<b>287</b>
<b>ANEXO 6: ANALISIS DE COSTOS UNITARIOS (CONCLUSIONES).....</b>	<b>287</b>

## ÍNDICE DE TABLAS.

### CAPÍTULO 2: MARCO REFERENCIAL.

<b>Tabla 2.1:</b> Composición química del cemento.....	20
<b>Tabla 2.2:</b> Límites de granulometría para agregado fino según especificaciones de ASTM C 33 .....	30

<b>Tabla 2.3:</b> Rangos de clasificación del agregado fino según el módulo de Finura.....	31
<b>Tabla 2.4:</b> Composición química de la ceniza del bagazo de caña cubano. ....	33
<b>Tabla 2.5:</b> Composición química de cenizas de bagazo de caña de azúcar realizada por varios investigadores. ....	34
<b>Tabla 2.6:</b> Resultados de las pruebas químicas de la ceniza de bagazo de caña proporcionada por el ingenio Chaparrastique.....	35
<b>Tabla 2.7:</b> Composición química de la toba volcánica. ....	37
<b>Tabla 2.8:</b> Composición química de la toba volcánica. ....	38
<b>Tabla 2.9:</b> Características y funciones de los componentes.....	47
<b>Tabla 2.10:</b> Características de las Propiedades del Concreto .....	48
<b>Tabla 2.11:</b> Condición de corrosión relativa a las medidas del potencial de media celda. .....	63
<b>Tabla 2.12:</b> Normas NACE de corrosión.....	81
<b>Tabla 2.13:</b> Normas ASTM de corrosión.....	82
<b>Tabla 2.14:</b> Normas ISO de corrosión. ....	83
<b>CAPÍTULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL.</b>	
<b>Tabla 3.1:</b> Total de viguetas de ensayo con diferentes porcentajes de CBC. ....	87
<b>Tabla 3.2:</b> Total de viguetas de ensayo con diferentes porcentajes de TV.....	89
<b>Tabla 3.3:</b> Ensayo para el estudio preliminar de los agregados.....	89
<b>Tabla 3.4:</b> Capacidad del medidor para prueba de peso unitario suelto y peso unitario varillado. ....	90
<b>Tabla 3.5:</b> Resultados del ensayo de peso volumétrico del agregado grueso, procedente de cantera “La Hulera”. ....	93



<b>Tabla 3.6:</b> Resultados del ensayo de gravedad específica y absorción del agregado fino procedente del rio Lempa. ....	97
<b>Tabla 3.7:</b> Peso mínimo de muestra de ensayo según tamaño nominal de agregado. .	99
<b>Tabla 3.8:</b> Resultados del ensayo de gravedad específica y absorción del agregado grueso procedente de la cantera “La Hulera”. ....	100
<b>Tabla 3.9:</b> Requisitos de granulometría para agregado fino. ....	102
<b>Tabla 3.10:</b> Requisitos de granulometría para agregado grueso. ....	102
<b>Tabla 3.11:</b> Módulo de finura. ....	103
<b>Tabla 3.12:</b> Resultados del ensayo de granulometría para agregado fino procedente del rio Lempa. ....	106
<b>Tabla 3.13:</b> Resultados del ensayo de granulometría para agregado grueso procedente de cantera “La Hulera”. ....	107
<b>Tabla 3.14:</b> Resistencia a la compresión promedio requerida, cuando no se dispone de datos para establecer una desviación estándar. ....	109
<b>Tabla 3.15:</b> Revenimientos recomendados para diversos tipos de estructuras. ....	109
<b>Tabla 3.16:</b> Requisitos aproximados para el contenido de agua de mezclado. ....	110
<b>Tabla 3.17:</b> Relación entre la resistencia a la compresión del concreto y la relación a/c. ....	110
<b>Tabla 3.18:</b> Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto. ....	111
<b>Tabla 3.19:</b> Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto sin sustitución de puzolanas. ....	112
<b>Tabla 3.20:</b> Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo sin sustitución de puzolanas. ....	114

<b>Tabla 3.21:</b> Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto con sustitución del 5% de cemento por CBC. ....	114
<b>Tabla 3.22:</b> Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo con sustitución del 5% de cemento por CBC. ....	115
<b>Tabla 3.23:</b> Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto con sustitución del 10% de cemento por CBC. ....	116
<b>Tabla 3.24:</b> Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo con sustitución del 10% de cemento por CBC. ....	116
<b>Tabla 3.25:</b> Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto con sustitución del 15% de cemento por CBC. ....	117
<b>Tabla 3.26:</b> Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo con sustitución del 15% de cemento por CBC. ....	117
<b>Tabla 3.27:</b> Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto con sustitución del 20% de cemento por CBC. ....	118
<b>Tabla 3.28:</b> Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo con sustitución del 20% de cemento por CBC. ....	111
<b>Tabla 3.29:</b> Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto con sustitución del 5% de cemento por TV. ....	119
<b>Tabla 3.30:</b> Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo con sustitución del 5% de cemento por TV. ....	120
<b>Tabla 3.31:</b> Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto con sustitución del 10% de cemento por TV. ....	120

<b>Tabla 3.32:</b> Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo con sustitución del 10% de cemento por TV.....	121
<b>Tabla 3.33:</b> Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto con sustitución del 15% de cemento por TV.....	121
<b>Tabla 3.34:</b> Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo con sustitución del 15% de cemento por TV.....	122
<b>Tabla 3.35:</b> Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto con sustitución del 20% de cemento por TV.....	122
<b>Tabla 3.36:</b> Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo con sustitución del 20% de cemento por TV.....	123
<b>Tabla 3.37:</b> Resultados de ensayos de revenimiento y temperatura. ....	129
<b>Tabla 3.38:</b> Número de capas requeridas para moldear distintos tipos de especímenes. ....	132
<b>Tabla 3.39:</b> Diámetro de varilla y número de pisoneadas que deben aplicarse al moldear especímenes. ....	133
<b>Tabla 3.40:</b> Penetración de la varilla compactadora según espesor de capa.....	134
<b>Tabla 3.41:</b> Resultados de ensayos de compresión a cilindros de concreto. ....	138
<b>Tabla 3.42:</b> Resultados de ensayos de medición de potencial de corrosión en viguetas. ....	142
<b>Tabla 3.43:</b> Resultados ensayos de resistencia a la adherencia (pull-out). ....	144
<b>Tabla 3.44:</b> Propiedades de los materiales utilizados en el análisis de la vigueta en el software seismostruct .....	148

<b>Tabla 3.45:</b> Resultados del análisis de la vigueta en el software seismostruct en comparación con resultados de ensayos .....	155
---	-----

## **CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

<b>Tabla 4.1:</b> Resultados de ensayos de resistencia a la compresión simple de concreto a los 28 días para concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de CBC. ....	159
---	-----

<b>Tabla 4.2:</b> Resultados de ensayos de resistencia a la compresión simple de concreto a los 28 días para concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de TV. ....	160
--	-----

<b>Tabla 4.3:</b> Resultados de ensayos de resistencia a la compresión simple de concreto a los 28 días para concreto con sustituciones de CBC y concreto con sustituciones de TV. ....	162
---	-----

<b>Tabla 4.4:</b> Resultados de ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto sin sustitución de puzolanas (SP).....	163
--	-----

<b>Tabla 4.5:</b> Resultados de ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 5% CBC.....	165
---	-----

<b>Tabla 4.6:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 10% CBC.....	166
---	-----

<b>Tabla 4.7:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 15% CBC.....	167
---	-----

<b>Tabla 4.8:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 20% CBC.....	168
---	-----

<b>Tabla 4.9:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 5% TV. ....	169
<b>Tabla 4.10:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 10% TV. ....	170
<b>Tabla 4.11:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 15% TV. ....	171
<b>Tabla 4.12:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 20% TV. ....	172
<b>Tabla 4.13:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión para el último ciclo de inmersión-secado en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de CBC.....	173
<b>Tabla 4.14:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión para el último ciclo de inmersión-secado en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de TV. ....	174
<b>Tabla 4.15:</b> Resultados ensayos de potencial de corrosión para el último ciclo de inmersión-secado en concreto con sustituciones de CBC y concreto con sustituciones de TV. ....	175
<b>Tabla 4.16:</b> Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de CBC (concreto sin corrosión) .....	168
<b>Tabla 4.17:</b> Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de TV (concreto sin corrosión).....	177

<b>Tabla 4.18:</b> Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de CBC (concreto con corrosión)....	178
<b>Tabla 4.19:</b> Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de TV (concreto con corrosión). .....	179
<b>Tabla 4.20:</b> Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto con sustituciones de CBC (concreto sin corrosión y concreto con corrosión). .....	180
<b>Tabla 4.21:</b> Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto con sustituciones de TV (concreto sin corrosión y concreto con corrosión). .....	181
<b>Tabla 4.22:</b> Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto sin corrosión). .....	182
<b>Tabla 4.23:</b> Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto con corrosión). .....	183
<b>Tabla 4.24:</b> Resultados de comparación de ensayos a flexión y cargas teóricas en viguetas de concreto reforzado sin puzolana (SP) y concretos con sustituciones de CBC (concreto sin corrosión).....	185
<b>Tabla 4.25:</b> Resultados de ensayos a flexión y cargas teóricas en viguetas de concreto reforzado sin puzolana (SP) y concretos con sustituciones de TV (concreto sin corrosión). .....	186
<b>Tabla 4.26:</b> Resultados de ensayos a flexión y cargas teóricas en viguetas de concreto reforzado sin puzolana (SP) y con sustituciones de CBC (concreto con corrosión).....	187

<b>Tabla 4.27:</b> Resultados de ensayos a flexión y cargas teóricas en viguetas de concreto reforzado sin puzolana (SP) y con sustituciones de TV (concreto con corrosión).....	188
<b>Tabla 4.28:</b> Resultados de ensayos a flexión en viguetas de concreto reforzado con sustituciones de CBC (concreto sin corrosión y con corrosión).....	190
<b>Tabla 4.29:</b> Resultados de ensayos a flexión en viguetas de concreto reforzado con sustituciones de TV (concreto sin corrosión y con corrosión). ....	191
<b>Tabla 4.30:</b> Resultados de ensayos a flexión en viguetas de concreto reforzado con sustituciones de CBC y TV (concreto sin corrosión). ....	192
<b>Tabla 4.31:</b> Resultados de ensayos a flexión en viguetas de concreto reforzado con sustituciones de CBC y TV (concreto con corrosión). ....	193
<b>Tabla 4.32:</b> Resultado de peso volumétrico en concreto con sustituciones de CBC (concreto sin corrosión y con corrosión). ....	194
<b>Tabla 4.33:</b> Resultado de peso volumétrico en viguetas de concreto con sustituciones de TV (concreto sin corrosión y con corrosión). ....	195
<b>Tabla 4.34:</b> Resultados de peso volumétrico en viguetas de concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto sin corrosión). ....	196
<b>Tabla 4.35:</b> Resultados de peso volumétrico en viguetas de concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto con corrosión).....	197
<b>Tabla 4.36:</b> Resultados de absorción en viguetas de concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto con corrosión).....	198

<b>Tabla 4.37:</b> Tabla resumen de resultados de ensayo para probetas de concreto sin sustitución de puzolana y con sustitución de puzolana, con y sin corrosión. .....	200
---	-----

## ÍNDICE DE FIGURA.

### CAPÍTULO 2: MARCO REFERENCIAL.

<b>Figura 2.1:</b> Presentación comercial de cemento GU. ....	22
<b>Figura 2.2:</b> Presentación comercial de cemento equivalente al tipo I, pero de alto desempeño. ....	22
<b>Figura 2.3:</b> Presentación comercial de cemento equivalente al tipo III.....	22
<b>Figura 2.4:</b> Presentación comercial de cemento equivalente al tipo V.....	23
<b>Figura 2.5:</b> Fragmentación natural del agregado .....	24
<b>Figura 2.6:</b> Fragmentación mecánica del agregado .....	24
<b>Figura 2.7:</b> Ubicación de la cantera de donde se obtuvo el agregado grueso.....	25
<b>Figura 2.8:</b> Ubicación de la cantera de donde se obtuvo el agregado fino.....	26
<b>Figura 2.9:</b> Distribución del tamaño de partículas en agregado fino.....	26
<b>Figura 2.10:</b> Curvas esfuerzo-deformación para diferentes grados de acero. ....	41
<b>Figura 2.11:</b> Rango elástico representado en curva esfuerzo-deformación.....	41
<b>Figura 2.12:</b> Esfuerzo de fluencia de acero dúctil representado en curva esfuerzo-deformación.....	42
<b>Figura 2.13:</b> Esfuerzo de fluencia de acero frágil representado en curva esfuerzo-deformación.....	43



<b>Figura 2.14:</b> Esfuerzo de fluencia para diferentes grados de acero, representado en curva esfuerzo-deformación. ....	43
<b>Figura 2.15:</b> Esfuerzo de rotura para diferentes grados de acero dúctil, representado en curva esfuerzo-deformación. ....	44
<b>Figura 2.16:</b> Esfuerzo de rotura para diferentes grados de acero frágil, representado en curva esfuerzo-deformación. ....	45
<b>Figura 2.17:</b> Identificación del módulo de elasticidad en curva esfuerzo-deformación .....	45
<b>Figura 2.18:</b> Componentes del concreto. ....	47
<b>Figura 2.19:</b> Modelo determinístico de la corrosión del acero de refuerzo. ....	52
<b>Figura 2.20:</b> Tipos de corrosión en las armaduras y los factores que la generan. ....	59
<b>Figura 2.21:</b> Representación esquemática de las medidas del potencial de circuito eléctrico. ....	62
<b>Tabla 2.11:</b> Condición de corrosión relativa a las medidas del potencial de media celda. ....	63
<b>Figura 2.22:</b> Ejemplo de daños por abrasión, .....	64
<b>Figura 2.23:</b> Fallas en estructuras daños por abrasión.....	65
<b>Figura 2.24:</b> Edificio de concreto dañado por las mareas en la playa. ....	66
<b>Figura 2.25:</b> Daño de un pilar por impacto.....	66
<b>Figura 2.26:</b> Daño del concreto por exposición a altas temperaturas.....	67
<b>Figura 2.27:</b> Daño en estructuras de concreto debido al congelamiento y deshielo....	68
<b>Figura 2.28:</b> Daño en estructuras de concreto causado por incendios.....	69
<b>Figura 2.29:</b> Daño en estructuras de concreto causado por sobrecargas.....	70

<b>Figura 2.30:</b> Daño en estructuras de concreto causado por asentamiento .....	71
<b>Figura 2.31:</b> Daño en estructuras de concreto causado por cargas cíclicas .....	72
<b>Figura 2.32:</b> Daño en estructuras de concreto causado por alcalinidad de agregados.	74
<b>Figura 2.33:</b> Daño en estructuras de concreto causado por la acidez de agentes agresivos .....	74
<b>Figura 2.34:</b> Daño en estructuras de concreto causado por sulfatos.....	75
<b>Figura 2.35:</b> Daño en estructuras de concreto causado por agua salada.....	76
<b>Figura 2.36:</b> Daño en estructuras de concreto causado por hongos.....	77
<b>Figura 2.37:</b> Corrosión localizada por iones de cloruro .....	78
<b>Figura 2.38:</b> Daños por carbonatación en estructuras de concreto .....	78
<b>Figura 2.39:</b> Causas de deterioro de estructuras de concreto reforzado. ....	79

### **CAPÍTULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL.**

<b>Figura 3.1:</b> Flujograma de orden lógico del trabajo experimental .....	88
<b>Figura 3.2:</b> Esquema de vigueta terminada. ....	130
<b>Figura 3.3:</b> Detalle de estribo. ....	130
<b>Figura 3.4:</b> Detalle de armadura. ....	131
<b>Figura 3.5:</b> Esquema de probeta para ensayo de pull-out.....	135
<b>Figura 3.6:</b> Tipos de falla en ensayos a compresión de cilindros de concreto. ....	137
<b>Figura 3.7:</b> Esquema para ensayo de potencial de corrosión.....	139
<b>Figura 3.8:</b> Esquema de distribución para medición de potencial de corrosión (para una cara). ....	140
<b>Figura 3.9:</b> Sección transversal típica de vigueta doblemente reforzada .....	145

<b>Figura 3.10:</b> Modelo matemático de la vigueta en el software seismostruct.....	147
<b>Figura 3.11:</b> Sección transversal de la vigueta .....	148
<b>Figura 3.12:</b> Modelo de inelasticidad .....	149
<b>Figura 3.13:</b> Modelado de carga en el análisis de inestabilidad .....	149
<b>Figura 3.14:</b> Vigueta de Concreto Reforzado SP ( $F'c= 231.55 \text{ Kg/cm}^2$ ).....	150
<b>Figura 3.15:</b> Vigueta de Concreto Reforzado 5% CBC ( $F'c=162.46 \text{ Kg/cm}^2$ ).....	151
<b>Figura 3.16:</b> Vigueta de Concreto Reforzado 10% CBC ( $F'c= 146.73 \text{ Kg/cm}^2$ ).....	151
<b>Figura 3.17:</b> Vigueta de Concreto Reforzado 15% CBC ( $F'c= 128.29 \text{ Kg/cm}^2$ ).....	152
<b>Figura 3.18:</b> Vigueta de Concreto Reforzado 20% CBC ( $F'c= 116.05 \text{ Kg/cm}^2$ ).....	152
<b>Figura 3.19:</b> Vigueta de Concreto Reforzado 5% TV ( $F'c= 209.81 \text{ Kg/cm}^2$ ).....	153
<b>Figura 3.20:</b> Vigueta de Concreto Reforzado 10% TV ( $F'c= 189.03 \text{ Kg/cm}^2$ ).....	153
<b>Figura 3.21:</b> Vigueta de Concreto Reforzado 15% TV ( $F'c= 162.83 \text{ Kg/cm}^2$ ).....	154
<b>Figura 3.22:</b> Vigueta de Concreto Reforzado 20% TV ( $F'c=153.63 \text{ Kg/cm}^2$ ).....	154

## ÍNDICE DE GRAFICAS.

### CAPÍTULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL.

<b>Gráfica 3.1:</b> Distribución gráfica de los materiales para $1\text{m}^3$ de concreto sin sustitución de puzolanas .....	113
<b>Gráfica 3.2:</b> Distribución gráfica de los materiales para $1\text{m}^3$ de concreto con el 5% de sustitución de cemento por CBC. ....	115
<b>Gráfica 3.3:</b> Distribución gráfica de los materiales para $1\text{m}^3$ de concreto con el 10% de sustitución de cemento por CBC. ....	116
<b>Gráfica 3.4:</b> Distribución gráfica de los materiales para $1\text{m}^3$ de concreto con el 15% de sustitución de cemento por CBC. ....	117

<b>Gráfica 3.5:</b> Distribución gráfica de los materiales para 1m <sup>3</sup> de concreto con el 20% de sustitución de cemento por CBC. ....	118
<b>Gráfica 3.6:</b> Distribución gráfica de los materiales para 1m <sup>3</sup> de concreto con el 5% de sustitución de cemento por TV. ....	119
<b>Gráfica 3.7:</b> Distribución gráfica de los materiales para 1m <sup>3</sup> de concreto con el 10% de sustitución de cemento por TV. ....	121
<b>Gráfica 3.8:</b> Distribución gráfica de los materiales para 1m <sup>3</sup> de concreto con el 15% de sustitución de cemento por TV. ....	122
<b>Gráfica 3.9:</b> Distribución gráfica de los materiales para 1m <sup>3</sup> de concreto con el 20% de sustitución de cemento por TV. ....	123

#### **CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

<b>Gráfica 4.1:</b> Comparación resultados de resistencia a la compresión entre concreto sin puzolana (SP) y con sustituciones de CBC .....	160
<b>Gráfica 4.2:</b> Comparación resultados de resistencia a la compresión entre concreto sin puzolana (SP) y con sustituciones de TV. ....	161
<b>Gráfica 4.3:</b> Comparación resultados de resistencia a la compresión entre concreto con sustituciones de CBC y con sustituciones de TV. ....	162
<b>Gráfica 4.4:</b> Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto sin sustitución de puzolana (SP). ....	164
<b>Gráfica 4.5:</b> Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 5% CBC. ....	165

<b>Gráfica 4.6:</b> Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 10% CBC. ....	166
<b>Gráfica 4.7:</b> Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 15% CBC. ....	167
<b>Gráfica 4.8:</b> Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 20% CBC. ....	168
<b>Gráfica 4.9:</b> Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 5% TV. ....	169
<b>Gráfica 4.10:</b> Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 10% TV. ....	170
<b>Gráfica 4.11:</b> Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 15% TV. ....	171
<b>Gráfica 4.12:</b> Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 20% TV. ....	172
<b>Gráfica 4.13:</b> Comparación resultados de potencial de corrosión para el último ciclo de inmersión-secado entre concreto sin puzolana (SP) y con sustituciones de CBC. ....	173
<b>Gráfica 4.14:</b> Comparación resultados de potencial de corrosión para el último ciclo de inmersión-secado entre concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de TV. ....	174
<b>Gráfica 4.15:</b> Comparación resultados de ensayos de potencial de corrosión para el último ciclo de inmersión-secado en concreto con sustituciones de CBC y concreto con sustituciones de TV. ....	175

<b>Gráfica 4.16:</b> Comparación de resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de CBC (concreto sin corrosión). .....	176
<b>Gráfica 4.17:</b> Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de TV (concreto sin corrosión).....	177
<b>Gráfica 4.18:</b> Comparación de resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de CBC (concreto con corrosión). .....	179
<b>Gráfica 4.19:</b> Comparación de resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de TV (concreto con corrosión). .....	180
<b>Gráfica 4.20:</b> Comparación de resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto con sustituciones de CBC (concreto sin corrosión y concreto con corrosión).....	181
<b>Gráfica 4.21:</b> Comparación de resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto con sustituciones de TV (concreto sin corrosión y concreto con corrosión).....	182
<b>Gráfica 4.22:</b> Comparación de resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto sin corrosión).....	183
<b>Gráfica 4.23:</b> Comparación de resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto con corrosión).....	184

<b>Gráfica 4.24:</b> Comparación de resultados de ensayos a flexión y cargas teóricas en viguetas de concreto reforzado sin puzolana (SP) y concretos con sustituciones de CBC (concreto sin corrosión).....	185
<b>Gráfica 4.25:</b> Comparación de resultados de ensayos a flexión y cargas teóricas en viguetas de concreto reforzado sin puzolana (SP) y concretos con sustituciones de TV (concretos sin corrosión).....	186
<b>Gráfica 4.26:</b> Comparación de resultados de ensayos a flexión y cargas teóricas en viguetas de concreto reforzado sin puzolana (SP) y con sustitución de CBC (concreto con corrosión).....	188
<b>Gráfica 4.27:</b> Comparación de resultados de ensayos a flexión y cargas teóricas en viguetas de concreto reforzado sin puzolana (SP) y con sustitución de TV (concreto con corrosión).....	189
<b>Gráfica 4.28:</b> Comparación de resultados de ensayos de resistencia a la flexión en concreto con sustitución de CBC (concreto sin corrosión y con corrosión). .....	190
<b>Gráfica 4.29:</b> Comparación de resultados de ensayos a flexión en viguetas de concreto reforzado con sustitución de TV (concreto sin corrosión y con corrosión). .....	191
<b>Gráfica 4.30:</b> Comparación de resultados de ensayos a flexión en viguetas de concreto reforzado con sustituciones de CBC y TV (concreto sin corrosión). ....	192
<b>Gráfica 4.31:</b> Comparación de resultados de ensayos a flexión en viguetas de concreto reforzado con sustituciones de CBC y TV (concreto con corrosión). ....	193

<b>Gráfica 4.32:</b> Comparación de resultados de peso volumétrico en viguetas de concreto con sustitución de CBC (concreto sin corrosión y con corrosión). .....	194
<b>Gráfica 4.33:</b> Comparación de peso volumétrico en viguetas de concreto con sustitución de TV (concreto sin corrosión y con corrosión).....	195
<b>Gráfica 4.34:</b> Comparación de resultados de peso volumétrico en viguetas de concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto sin corrosión). .....	196
<b>Gráfica 4.35:</b> Comparación de resultados peso volumétrico en viguetas de concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto con corrosión). .....	197
<b>Gráfica 4.36:</b> Comparación de resultados de absorción en viguetas de concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto con corrosión). .....	198

## **ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.**

### **CAPÍTULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL.**

<b>Fotografías 3.1:</b> Procedimiento para la elaboración del ensayo de gravedad específica del agregado grueso por el método de la canastilla y del agregado fino por el método del picnómetro. ....	100
<b>Fotografías 3.2:</b> Procedimiento para el ensayo de granulometría. ....	105
<b>Fotografías 3.3:</b> Preparación de la puzolana.....	124
<b>Fotografías 3.4:</b> Dosificación y fabricación de las mezclas de concreto.....	127
<b>Fotografías 3.5:</b> Ensayo de revenimiento del concreto. ....	127
<b>Fotografía 3.6:</b> Ensayo de temperatura con termómetro de vástago. ....	128
<b>Fotografías 3.7:</b> Corte y preparación de armadura de acero. ....	131
<b>Fotografías 3.8:</b> Elaboración de especímenes de prueba.....	135
<b>Fotografías 3.9:</b> Ensayos de resistencia a la compresión de cilindros.....	137



<b>Fotografía 3.10:</b> Esquema para ensayo de potencial de corrosión. ....	139
<b>Fotografías 3.11:</b> Ensayos de potencial de corrosión .....	141
<b>Fotografías 3.12:</b> Ensayos de resistencia de adherencia (pull-out). ....	143
<b>Fotografías 3.13:</b> Ensayos de resistencia a la flexión en viguetas de concreto. ....	155
<b>Fotografías 3.14:</b> Preparación de las viguetas. ....	156

## **ABREVIATURA Y DEFINICIONES.**

**ACI:** American Concrete Institute o Instituto Americano del Concreto.

**Agregado fino:** Nombre técnico que se le da a la arena en tecnología del concreto

**Agregado grueso:** Nombre técnico que se le da a la grava en tecnología del concreto

**ASTM:** American Society for Testing Materials, o sea Sociedad Americana para el

Ensayo de Materiales.

**ASR:** Anti-Slip Regulation o sistema de control de tracción

**CBC:** Ceniza de bagazo de caña

**CEB:** Comité Européen du Béton o Comité Europeo del concreto

**CRM RCC:** Carga de rotura máxima real con corrosión

**CRM RSC:** Carga de rotura máxima real sin corrosión

**CRMT:** Carga de rotura máxima teórica

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono

**ECON:** Equipos de Construcción S.A. de C.V

**E<sub>s</sub>:** Módulo de elasticidad del acero

**F<sub>r</sub>:** Esfuerzo de rotura del acero

**F<sub>y</sub>:** Esfuerzo de fluencia del acero

**GU:** Cemento portland de uso general

**ISO:** International Organization for standardization u Organización internacional de  
normalización

**MPa:** Mega Pascales ( $10 \times 10^6$  Pa)

**NACE:** The National Association of Corrosion Engineers o La Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión (EE.UU.)

**NSC:** No sometidos a corrosión

**pH:** Medida del grado de acidez o alcalinidad de una sustancia o una solución

**RILEM:** Reunión internacional de laboratorios de ensayo y de investigación para materiales de construcción

**SC:** Sometidos a corrosión

**SCE:** Sociedad Científica española

**SP:** Sin puzolana

**TV:** Toba volcánica

**UNE:** Especificaciones técnicas creadas por la Asociación Española de Normalización y Certificación.

## **RESUMEN.**

El concreto hidráulico reforzado es el material de construcción con mayor uso en el mundo, sin embargo, presenta problemas de durabilidad, los cuales se han tratado de disminuir con el uso de adiciones minerales, las incorporaciones de estas pueden tener repercusiones en las propiedades en su estado endurecido y su comportamiento en el tiempo, además el empleo de estos materiales puede ser útil desde el punto de vista ambiental y económico.

La aplicación de adiciones minerales (ceniza de bagazo de caña y toba volcánica) también llamadas puzolanas, tienen efectos importantes en las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto reforzado; su uso se ha propuesto con la finalidad de mitigar el problema de su deterioro prematuro a causa de la corrosión.

Por razones técnicas, ambientales y económicas, el uso de las puzolanas obtenidas como subproductos (desechos) agroindustriales en las mezclas de concreto, están siendo el centro de atención de nuevas investigaciones a nivel mundial; actualmente son escasos los trabajos reportados sobre este tema en nuestro país, de aquí proviene la importancia de esta investigación, en la cual se analizó la influencia de la sustitución de ceniza de bagazo de caña (CBC) y toba volcánica (TV), en las propiedades del concreto reforzado, específicamente en el índice de corrosión, resistencia a la compresión, flexión y adherencia.

La presente investigación tuvo la finalidad principal de evaluar la incidencia de las puzolanas en el índice de corrosión, en el cemento utilizado en el concreto armado, para lo cual se hizo la sustitución en proporciones de 0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de ceniza de bagazo de caña (CBC), e iguales porcentajes de toba volcánica (TV), lo que permitió

comparar las diferentes muestras entre sí y con respecto a la muestra patrón (0%). Con estas sustituciones de puzolanas, se obtiene un concreto con diferentes propiedades mecánicas, por lo cual fue necesario evaluar su variación en el estado fresco y endurecido.

**En el capítulo 1:** Se presentan las generalidades que se plantearon en el anteproyecto que se elaboró previo a este trabajo de investigación, tales como antecedentes, planteamiento del problema, objetivos, alcances y limitaciones e hipótesis.

**En el capítulo 2:** Se muestra la sustentación teórica y el marco de referencia en el cual se basó este trabajo de investigación, se abordaron las definiciones teóricas y las normativas respectivas, relacionadas a los ensayos de laboratorio que se realizaron a los materiales que se utilizaron, para la elaboración de las probetas de concreto simple y reforzado.

**En el capítulo 3:** Se realizó un diseño de mezcla usando el método ACI 211.1-91, con una resistencia de  $210 \text{ kg/cm}^2$ , el agua que se utilizó para la fabricación fue potable según establece el ACI 318-14; se evaluó la resistencia a la compresión de cada una de las mezclas, para lo cual se fabricaron 6 cilindros de cada proporción (0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 %) y por cada tipo de material sustituido (TV y CBC), para los cuales se realizaron los ensayos de resistencia a los 7, 14 y 28 días de edad; al final se compararon las resistencias de las mezclas con sustitución de puzolanas con las que no tuvieron sustitución y por cada edad; en total se fabricaron 54 probetas, esto de acuerdo a la norma ACI 318-14.

Para evaluar la corrosión del acero de refuerzo mediante el monitoreo de los potenciales de corrosión, de acuerdo a la norma ASTM C-876, se fabricaron 4 viguetas de concreto

armado de cada proporción de 0 % ,5 % , 10 % , 15% y 20 % de CBC y TV haciendo un total de 36 viguetas, de las cuales 2 de cada proporción fueron sometidas a ambiente marino (se utilizó agua de mar proveniente de la playa El Espino), durante 98 días, en 7 ciclos de inmersión-secado, cada ciclo tuvo una duración de 14 días, al final de cada ciclo se midió el potencial de corrosión y por último se evaluó la resistencia a la flexión en el último ciclo establecido, luego se compararon los resultados entre los especímenes que fueron sometidos a corrosión (SC) y los que no (NSC), para determinar en cuál de todas el efecto del ambiente corrosivo fue menos dañino. Para la evaluación del potencial de corrosión, serán las mismas para el ensayo a flexión.

Por último, se evaluó el efecto de la corrosión en la adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo, para esto se fabricaron 4 cubos de concreto con una barra embebida para cada dosificación, de estos, 2 fueron sometidos al ambiente corrosivo y los otros 2 no, al final se ensayaron los especímenes a tracción y se compararon los resultados. En total se fabricaron 36 probetas y se ensayaron a los 98 días.

**En el capítulo 4:** Con toda la información obtenida se analizó el comportamiento mecánico de las diferentes probetas, con respecto a los diferentes porcentajes de sustitución de cemento por puzolanas; con todos los resultados obtenidos se realizan conclusiones y recomendaciones que se muestran al final de este trabajo de investigación.

**En el capítulo 5:** Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas indican que las sustituciones de puzolanas por cemento, reducen el riesgo de la presencia del fenómeno de la corrosión en las estructuras de concreto reforzado; es importante hacer notar que

estas sustituciones de puzolana ocasionan variaciones en la propiedad mecánica del concreto, que también fueron evaluadas en este trabajo de investigación.

# **CAPÍTULO 1:**

# **GENERALIDADES**



## **1.1 ANTECEDENTES.**

La inclusión de elementos metálicos en el concreto dio lugar a una de las patologías más comunes por degradación de los materiales: El fenómeno de la corrosión de la armadura en el concreto.

La corrosión es un fenómeno que provoca la degradación de todo tipo de materiales ferrosos, por tanto, se presenta en casi todos los ámbitos de la Ingeniería. En particular el estudio de la corrosión del acero es importante, dado que es más utilizado en la actualidad en construcciones de concreto armado, debido a las buenas propiedades mecánicas que posee y su abundancia; provocando este fenómeno la reducción de la vida útil de las infraestructuras, e incrementando los costos de mantenimiento de estas.

La corrosión afecta de manera notable el acero al carbono de diferentes maneras, esta se define como el deterioro que sufre un material a causa de reacciones químicas y electroquímicas provocadas por su entorno. El acero presenta el problema de su fácil corrosión cuando se encuentra expuesto a un ambiente agresivo, el concreto sitúa a la armadura de acero en un entorno que la protege contra la corrosión de forma natural; la difusión de los agentes químicos agresivos hasta la armadura metálica, pueden producir reacciones que desprotejan el acero de refuerzo y que propicien la corrosión de la armadura, afectando seguidamente la resistencia de los elementos de concreto reforzado.

La corrosión de las armaduras del concreto armado, es el principal problema de durabilidad y uno de los problemas aún no resueltos satisfactoriamente por la tecnología del concreto. Los esfuerzos de los investigadores hoy en día son muy notables, con numerosos trabajos por año publicados en revistas especializadas, cantidad de congresos y sesiones de trabajo para discutir sobre el tema a nivel mundial.

El estudio de la corrosión, su prevención y tratamiento involucra distintas áreas de la Ingeniería y Ciencias, principalmente de la ciencia de los materiales y la electroquímica, pero también de la Química, Ingeniería Química y de la Biología, debido a que existen compuestos anticorrosivos orgánicos e inorgánicos; en cuanto a las bacterias, que tienen capacidad de producir corrosión, se están realizando estudios para poder utilizarlas, a futuro, como anticorrosivos<sup>1</sup>

Desde la década de 1960 varios investigadores iniciaron el desarrollo de materiales y métodos para el control de la corrosión. El uso de materiales poliméricos como recubrimiento de la varilla de acero, fue ampliamente difundido en los años 70, con la intención de formar una barrera que impidiera el contacto del acero con agentes agresivos y así evitar que la corrosión provoque daños en el concreto. En la actualidad existen diferentes metodologías para evaluar el deterioro por corrosión en el acero de refuerzo del concreto, principalmente por cloruros y carbonatación. Sin embargo, realizar estudios sobre corrosión en concreto conlleva mucho tiempo, por lo que realizar simulaciones aceleradas reduce el tiempo de estudio y aporta información útil en esta rama<sup>2</sup>.

## **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

El proceso de corrosión en el acero de refuerzo en su fase inicial genera la aparición de pequeñas fisuras en el concreto, cuya ubicación coincide con las barras de refuerzo. Estas fisuras originadas por las tensiones internas que produce el óxido expansivo, formado alrededor de las barras de refuerzo van abriéndose paso en el concreto con el tiempo.

La velocidad con la que avanza la corrosión y se incrementa la fisuración, depende del medio ambiente que rodea el concreto, teniendo así variables como el acceso del oxígeno, la presencia de humedad, el grado de carbonatación, el contenido de iones de cloruro y la relación agua-cemento,

---

<sup>1</sup> García et. al., “Revista internacional de contaminación ambiental”.

<sup>2</sup> Peralta (2015) et al: “Técnicas aceleradas para evaluar la susceptibilidad a corrosión de aceros embebidos en morteros con adiciones minerales expuestos a cloruros (pag 140 y 141)”.

siendo más acelerada la corrosión en ambientes marinos, hacia lo cual está orientado el presente estudio.

La corrosión en el acero de refuerzo al llegar a niveles más avanzados produce desprendimientos de porciones de concreto, por delaminación en el recubrimiento de este, disminuyéndose así la capacidad mecánica del concreto.

Por efecto de la corrosión se produce entonces pérdida de sección en las armaduras, disminuyendo su capacidad resistente al cortante y confinamiento, a la vez que desaparece la adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo, provocando así también disminución del área útil del concreto, debido a los agrietamientos y desprendimientos, lo que provoca reducción de la capacidad resistente del concreto.

Todo esto trae consigo la progresiva pérdida de resistencia, durabilidad y funcionalidad en las estructuras, pudiendo llegarse a niveles críticos que atenten contra la estabilidad de las edificaciones.

La corrosión del acero dentro del concreto en ambientes marinos es una de las principales causas de degradación, destrucción e incremento del costo en reparación de dichas estructuras.

El fenómeno de la corrosión genera pérdidas económicas, puesto que se ve interrumpida la producción, invirtiendo en mantenimiento, reposición de materiales, entre otros. En términos económicos se estima que entre el 3-4% del producto interno bruto de un país industrializado se gasta en prevenir y corregir los problemas de corrosión<sup>3</sup>.

Se calcula un costo de 300,000 millones de dólares anuales por fallas en la infraestructura en los Estados Unidos de América. Así mismo, se estima que, de esa cantidad, es posible evitar pérdidas

---

<sup>3</sup> Gómez et al. (2012): “Determinación de la corrosión en probetas de hormigón sumergidas en solución salina” (pág. 28)

por alrededor de 100,000 millones de dólares anuales tomando medidas de prevención contra la corrosión<sup>4</sup>.

En Colombia la corrosión genera gastos que oscilan los \$17 billones de pesos anuales (unos \$5 billones de dólares estadounidenses), en reparaciones y demoliciones de estructuras dañadas por corrosión<sup>5</sup>.

En El salvador, el fenómeno de la corrosión es más notable en la zona costera, donde la mayoría de las estructuras muestran un alto grado de deterioro, debido a que están expuestas al ion cloruro del agua marina.

No existe un estudio detallado de cuanto es la inversión o las pérdidas económicas que el fenómeno de la corrosión causa en El Salvador, sin embargo, Menjívar Benítez, realizó un estudio de los niveles de corrosión en diferentes atmosferas en El Salvador<sup>6</sup>.

Esta investigación se realizó durante un año, en la cual se estudió el comportamiento de la corrosión atmosférica del acero al carbono y del aluminio, en diferentes tipos de atmósferas (rural, urbana, industrial, marina y combinaciones de estas) con el fin de clasificarlas de acuerdo con su agresividad, para así caracterizar los productos de corrosión obtenidos y construir el primer mapa de corrosión de El Salvador.

En cuanto a la velocidad de corrosión Menjívar Benítez concluye que las atmósferas marinas evaluadas varían significativamente en la agresividad, siendo San Blas la más corrosiva con 716.5 g/m<sup>2</sup> x año, seguida de Acajutla con 573.8 g/m<sup>2</sup> x año, y en tercer lugar La Puntilla con 208.7 g/m<sup>2</sup> x año. En ambientes marinos, los cloruros están presentes tanto en la propia agua de mar

---

<sup>4</sup>De León et al. (2007): “Tiempo estimado para mantenimiento de un puente de concreto reforzado expuesto a corrosión en el valle de Toluca aplicando criterios probabilistas (artículo)”

<sup>5</sup> Gómez et al. (2012): “Determinación de la corrosión en probetas de hormigón sumergidas en solución salina” (pág. 29)

<sup>6</sup> Menjívar (2020) “Corrosión del acero al carbono y del aluminio en diferentes tipos de atmósferas de El Salvador (artículo)”

como en la humedad de la atmosfera, estos cloruros van penetrando a través de la red de poros y de las fisuras del concreto y cuando alcanzan el acero, producen la rotura local de la capa pasiva del acero<sup>7</sup> que lo protege.

Debido a lo anterior y los tiempos para realizar este estudio, se decidió someter los especímenes de concreto a un proceso acelerado de corrosión en un ambiente marino.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN.**

La corrosión de las armaduras embebidas en el concreto es la patología más común en las estructuras de concreto armado. Es también responsable de graves deterioros en la infraestructura urbana, industrial y marina, afectando la seguridad y funcionalidad de las estructuras.

El grado de protección de las armaduras frente a la corrosión es definido por la calidad y el espesor del concreto de recubrimiento. El período de vida útil de la estructura respecto a la corrosión de armaduras es definido por este nivel de protección.

Prolongar la vida útil de las estructuras, o concebirla para períodos extensos, contribuye a la disminución del empleo de recursos no renovables para la ejecución de concretos. Esto origina reducciones indirectas de los costos de mantenimiento y reparación.

En las estructuras de concreto armado ubicadas en atmósferas marinas, el cloruro es el principal responsable del fenómeno de corrosión localizada en las barras de acero. El cloruro puede ser incorporado al concreto durante la etapa de elaboración con alguno de los materiales componentes, o bien ingresar por diferentes procesos como el de difusión, permeabilidad o capilaridad cuando el material se encuentra expuesto a atmósferas, aguas o suelos húmedos que lo contengan.

En El Salvador, en el tema de la corrosión, existen pocos estudios que proporcionen información acerca de cómo es el comportamiento del mencionado fenómeno, ya que, hasta cierto punto, se

---

<sup>7</sup> Ventura et al (1987) “La agresividad ambiental y la durabilidad de las estructuras de hormigón (artículo)” (pág. 18)

desconoce la verdadera importancia de este tema, se ignoran los costos económicos y ambientales provocados por la corrosión en el país y no se tiene suficientes datos que permitan conocer el comportamiento de los materiales ante el ambiente marino de El Salvador.

Por lo que en esta investigación se plantea el estudio de materiales puzolánicos, sustituidos en porcentajes de cemento, como una alternativa para disminuir la corrosión en las estructuras de acero embebidas en el concreto.

Las puzolanas son materiales naturales o artificiales que contienen sílice y/o alúmina. No son cementosas en sí, pero cuando son molidos finamente y mezcladas con cal, la mezcla fraguará y endurecerá a temperaturas normales en presencia de agua, como el cemento. Las puzolanas pueden reemplazar de 15 % a 40 % del cemento portland sin reducir significativamente la resistencia del concreto<sup>8</sup>; su utilización puede ayudar a reducir la contaminación ambiental y costos en la industria de la construcción.

Se espera que con esta investigación se pueda dar un aporte en cuanto al tema de corrosión, para poder tener una reducción significativa de este fenómeno al usar las puzolanas en mezclas para estructuras de concreto armado, esperando que al hacer uso de este material se puedan tener ventajas como:

1. Mayor durabilidad del concreto.
2. Mejorar la resistencia frente al agua de mar.
3. Mejorar la defensa ante la carbonatación y cloruros.
4. Aumentar la resistencia del acero a la corrosión.
5. Reducir la contaminación ambiental.

---

<sup>8</sup> Stulz et al. (1993): “Materiales de construcción apropiados” (pág. 147).

## **1.4 OBJETIVOS.**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL.**

- ✓ Evaluar la incidencia de la sustitución de una parte de cemento por puzolanas (CBC y TV), en las propiedades de un concreto armado, cuyo acero de refuerzo es sometido a corrosión acelerada por medio del ataque de cloruros.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- ✓ Caracterizar los agregados del concreto: Arena, grava, cemento, mediante los procedimientos establecidos en las normativas ASTM y ACI.
- ✓ Determinar si los agregados son óptimos para la elaboración del concreto por medio de los ensayos granulométricos para agregados fino y grueso, bajo las normas: ASTM C136<sup>9</sup> y ASTM C33<sup>10</sup>.
- ✓ Determinar las características físicas de los agregados, por medio de los ensayos de peso volumétrico, gravedad específica y absorción del agregado fino y grueso, bajo las normas: ASTM C29<sup>11</sup>, ASTM C128<sup>12</sup> y ASTM C127<sup>13</sup> respectivamente.
- ✓ Caracterizar las puzolanas (CBC y TV) para su empleo en la sustitución de cemento en el concreto.
- ✓ Realizar el diseño de la mezcla para la elaboración del concreto, con y sin sustitución de puzolanas, a utilizarse en la fabricación de los especímenes de prueba mediante el método: ACI 211.1<sup>14</sup>.
- ✓ Evaluar las propiedades de temperatura y revenimiento para el concreto fresco. De acuerdo

---

<sup>9</sup> Método estándar de ensayo para análisis por tamizado de agregados fino y grueso (2004).

<sup>10</sup> Especificación estándar para agregados de concreto (2004).

<sup>11</sup> Método estándar de ensayo para la determinación del peso unitario y vacíos en los agregados (2004).

<sup>12</sup> Método estándar para la determinación de la densidad relativa y absorción de agregado fino (2004).

<sup>13</sup> Método estándar para la determinación de la densidad relativa y absorción de agregado grueso (2004).

<sup>14</sup> Practica estándar para la selección de proporciones de concreto normal.

con las normas ASTM C1064 y ASTM C143<sup>15</sup> respectivamente.

- ✓ Elaboración de cilindros y viguetas de prueba bajo las normativas siguientes: ASTM C94<sup>16</sup>, ASTM C1064<sup>17</sup> y ASTM C192<sup>18</sup>.
- ✓ Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto, bajo la norma: ASTM C39<sup>19</sup>.
- ✓ Evaluar las propiedades del concreto reforzado endurecido, cuyo acero ha sido sometido a un proceso acelerado de corrosión
- ✓ Determinación del potencial de corrosión acelerada mediante ciclos de inmersión-secado para viguetas con refuerzo, bajo los siguientes parámetros: Corrosión acelerada<sup>20</sup> y ASTM C 876<sup>21</sup>.
- ✓ Determinar la adherencia entre el acero y el concreto mediante la prueba de arrancamiento, bajo la norma: RILEM-CEB RC6<sup>22</sup>, para evaluar sus propiedades mecánicas.
- ✓ Determinar la carga de resistencia a la flexión de viguetas de concreto armado, sometidas a corrosión acelerada, bajo la normativa: ASTM C-293<sup>23</sup>, para evaluar sus propiedades mecánicas.

Los objetivos anteriores permitieron determinar la incidencia de la sustitución de puzolanas por cemento en las propiedades del concreto reforzado en su estado fresco y endurecido, logrando así recolectar información para proceder a analizarla y en base a ella, llegar a

---

<sup>15</sup> Ensayo de revenimiento del concreto fresco (2004).

<sup>16</sup> Especificaciones normalizadas para el concreto premezclado (2004).

<sup>17</sup> Ensayo de temperatura del concreto fresco (2004).

<sup>18</sup> Método de fabricación y curado de especímenes de concreto en el laboratorio (2004).

<sup>19</sup> Ensayo de testigos de concreto (2004).

<sup>20</sup> Peralta et al. (2015): "Técnicas aceleradas para evaluar la susceptibilidad a corrosión de aceros embebidos en morteros con adiciones minerales expuestos a cloruros".

<sup>21</sup> Ensayo de potencial de corrosión (2004).

<sup>22</sup> Ensayo de adherencia acero-concreto mediante el método del arrancamiento (1983).

<sup>23</sup> Ensayo de resistencia a la flexión de viguetas testigos de concreto (2004).



conclusiones y recomendaciones, que puedan ser útiles para ser aplicadas en la construcción en nuestro país.

## **1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES.**

### **1.5.1 ALCANCES.**

- ✓ La investigación se basó en la sustitución de puzolanas (CBC y TV) en la fabricación de concreto simple (cilindros) y se centró en el fenómeno de la corrosión en concreto reforzado (viguetas y cubos), se evaluó la sustitución de cemento por diferentes proporciones de puzolanas (CBC y TV) en las propiedades del concreto fresco y endurecido de los especímenes; los ensayos a los cilindros de concreto simple dieron la variación a la resistencia a la compresión (ASTM C39), los ensayos en las viguetas dieron la variación en la resistencia a flexión (ACI 318-19) y los ensayos en los cubos dieron la variación del esfuerzo cortante (RILEM RC6); de estos dos últimos especímenes, una parte de ellos, fueron previamente sometidos a un proceso acelerado de corrosión, para evaluar la incidencia de ataque de los cloruros en el acero de refuerzo. Con estos resultados se establecieron conclusiones desde el punto de vista patológico y estructural.
- ✓ Este trabajo de investigación no contempló la evaluación de estructuras existentes, ni la construcción en campo de sistemas estructurales sometidos a corrosión, ya que esta investigación se enfocó en especímenes sometidos a corrosión en un ambiente controlado de laboratorio.
- ✓ Los pétreos gruesos utilizados en este trabajo de investigación se obtuvieron del banco de materiales de la “Hulera”, propiedad del Grupo ECON, ubicado en la ciudad de Usulután y el material pétreo fino se obtuvo del Rio Lempa. La caracterización de las propiedades

de estos agregados se realizó en el Laboratorio de Suelos y Materiales de la Universidad de El Salvador, Facultad Multidisciplinaria Oriental (San Miguel).

- ✓ Los diseños de mezclas se realizaron siguiendo el procedimiento establecido por el Comité ACI 211.1, para “concretos de peso normal” (2,240 a 2,400 kg/m<sup>3</sup>), considerando la resistencia a la compresión ( $f'c$ ) a los 28 días de edad, la cual es de 20.60 MPa (210kg/cm<sup>2</sup>), realizando cuatro porcentajes (5 %,10 %, 15 % y 20 %) de sustitución de cemento por cada una de las puzolanas, obteniéndose así 8 tipos de mezclas, más una mezcla patrón sin puzolana, por lo que se obtuvieron en total 9. De estas puzolanas se utilizó el material que se retuvo y paso la malla #200.
- ✓ El valor utilizado en el revenimiento para el diseño de mezcla de concreto sin sustitución de puzolana fue de 4” (10 cm), que es el valor máximo permisible por el ACI-211.1 para vigas y muros reforzados; se utilizó el método ACI 211.1, con una resistencia requerida de 210 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días, haciendo uso de la tabla 6.3.4 del ACI 211.1 y para una resistencia de diseño de 20.60 MPa (210kg/cm<sup>2</sup>) más un factor de seguridad de 8.34 MPa (85 kg/cm<sup>2</sup>) recomendado por el ACI 318, 5.3.2.2, con ello se evaluó la relación agua/cemento (a/c) que se utilizó.
- ✓ Para los ensayos realizados al concreto en estado fresco, se consideró la realización de la prueba de revenimiento, siguiendo la norma ASTM C143; el control de temperatura se hizo conforme lo estipula la norma ASTM C1064, para cada proporción de mezcla.
- ✓ El tipo de cemento empleado fue HOLCIM Fuerte, fabricado bajo la norma ASTM C1157 Tipo GU, el cual es un cemento hidráulico de uso general, que alcanza resistencias mayores a 29 MPa (295.90 kg/cm<sup>2</sup>) a los 28 días de edad.
- ✓ Los especímenes de ensayo (6 cilindros, 4 viguetas y 4 cubos para cada mezcla) se hicieron

y curaron, siguiendo la norma ASTM C192. En total, se realizaron 54 cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto, así como también 36 viguetas con sección transversal de 15 cm x 15 cm y con una longitud de 60 cm. y 36 cubos de dimensiones de 20 cm x 20 cm de sección y 10 cm de altura.

- ✓ En cuanto a los ensayos al concreto en estado endurecido, se ensayaron a compresión 2 cilindros para cada edad (7, 14 y 28 días), según lo establecido en la norma ASTM C39; en cuanto a las viguetas y cubos se ensayaron 4 de cada uno por las sustituciones del 0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de CBC y TV, 2 sometidas a un proceso acelerado de corrosión y las otras 2 no, para determinar así la resistencia a flexión bajo la norma ASTM C78 para las viguetas y la resistencia al esfuerzo cortante en los cubos bajo la norma RILEM-CEB RC6 (1983).
- ✓ Se sumergieron las viguetas por un tiempo de 7 días en agua de mar, luego fueron expuestas al ambiente de laboratorio por 7 días más, completando un ciclo de Inmersión-Secado (I-S) en 14 días, se realizó este proceso hasta completar 7 ciclos en un lapso de 98 días<sup>24</sup>.
- ✓ El acero de refuerzo para las viguetas se colocó con un recubrimiento mínimo de 2.5 cm, el ACI 318, 7.7.1 (b) exige un recubrimiento mínimo de 4.0 cm para refuerzo de acero en concreto expuesto a agentes corrosivos, pero para este estudio principalmente interesó observar el comportamiento del acero ante el ataque de cloruros.

### **1.5.2 LIMITACIONES.**

Las limitaciones para esta investigación son las siguientes:

---

<sup>24</sup> Peralta et al. (2015): “Técnicas aceleradas para evaluar la susceptibilidad a corrosión de aceros embebidos en morteros con adiciones minerales expuestos a cloruros (artículo)”.

- ✓ Las puzolanas utilizadas fueron toba volcánica (TV) y ceniza de bagazo de caña (CBC), que son las que se encuentran disponibles en todo El Salvador.
- ✓ De acuerdo con la literatura de ensayos a corrosión en el concreto armado, estos pueden durar desde un aproximado de 3 meses<sup>25</sup> hasta más de 2 años<sup>26</sup>, para esta investigación por efecto de tiempo, las probetas de ensayo fueron sometidas a corrosión acelerada mediante ciclos de inmersión-secado en agua de mar por un periodo de 98 días, de este procedimiento existen estudios previos en otros países como México, Perú y Argentina.
- ✓ Esta investigación no contempló el uso de aditivos para evitar que se vean involucradas otras variables de estudio, puesto que la investigación se centró específicamente a la incidencia de la puzolana en la corrosión del acero de refuerzo.
- ✓ El agente corrosivo presente en el agua de mar que se utilizó para los ensayos de corrosión acelerada, se obtuvo de la playa El Espino ubicada en la zona costera del departamento de Usulután, El Salvador.
- ✓ Los resultados que se obtuvieron en el presente estudio podrán ser aplicados a las construcciones que se encuentran en un ambiente marino ubicadas en las costas de nuestro país.

## **1.6 HIPÓTESIS.**

De acuerdo con los objetivos el estudio está orientado a verificar si la sustitución parcial de puzolana por cemento, en el diseño de mezcla, influye en la resistencia mecánica del concreto y si puede ser utilizado o no para minimizar el daño por corrosión en el mismo.

Por lo descrito anteriormente, se plantean las siguientes hipótesis:

---

<sup>25</sup> Muñoz et al. (2015): “Técnicas aceleradas para evaluar la susceptibilidad la corrosión de aceros embebidos en morteros con adiciones minerales expuestos a cloruros (artículo)”

<sup>26</sup> Vera et al. (2004) “Estudio de la corrosión de hormigón armado con acero y acero galvanizado en ambiente salino (pág 83)”.

### **1.6.1 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN.**

La sustitución de cemento por diferentes porcentajes de puzolanas para la fabricación de concreto reforzado sometido a corrosión, es inversamente proporcional al índice de corrosión en el acero de refuerzo.

### **1.6.2 HIPÓTESIS NULA.**

La sustitución de cemento por diferentes porcentajes de puzolanas para la fabricación de concreto reforzado sometido a corrosión, es directamente proporcional al índice de corrosión en el acero de refuerzo.

### **1.6.3 HIPÓTESIS ALTERNATIVA.**

La sustitución de diferentes porcentajes de puzolanas en el cemento empleado para la fabricación de concreto reforzado sometido a corrosión, es directamente proporcional a la adquisición de resistencia a la compresión.

La sustitución de diferentes porcentajes de puzolanas en el cemento empleado para la fabricación de concreto reforzado sometido a corrosión, es directamente proporcional a la adquisición de resistencia a la flexión.

**CAPÍTULO 2:**  
**MARCO**  
**REFERENCIAL**

## INTRODUCCIÓN.

El estudio de la corrosión en esta investigación contempló la fabricación de especímenes de concreto simple y reforzado; este capítulo trata sobre las propiedades y características de los materiales que se utilizaron para la fabricación de los especímenes; se mencionan los diferentes tipos de cemento utilizados en el país; en cuanto a los agregados se señala su procedencia y para las puzolanas se describen los procesos de su generación, composición química y los beneficios posibles al emplearla como sustituto del cemento. En cuanto al acero y el concreto se describen sus propiedades mecánicas. Sobre el fenómeno de la corrosión se describen los daños que pueden originarse en las estructuras de concreto armado y se presentan las normas vigentes sobre la corrosión.

### 2.1 MATERIALES PARA ELABORAR CONCRETO REFORZADO.

El concreto a emplearse en este trabajo de investigación se elaboró con los componentes principales que son cemento, agregado grueso y fino, agua y además se hizo la sustitución de cemento por diferentes porcentajes de puzolanas (CBC y TV), con este concreto se fabricaron especímenes de concreto simple y reforzado.

#### 2.1.1 CEMENTO PARA CONCRETO.

##### Composición química del cemento.

La composición química se muestra en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1:** Composición química del cemento.

Composición química.		
Nombre.	Composición de óxido.	Abreviatura.
Silicato tricálcico	$3\text{CaOSiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaOSiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

**Fuente:** Alvarado, et al (2016): "Estudio del empleo de cenizas producidas en ingenios azucareros como sustituto parcial del cemento portland en el diseño de mezclas de concreto" ( pág.22).

El cemento posee propiedades adhesivas y cohesivas, dichas características le dan la capacidad de aglutinar los agregados para formar el concreto.

El concreto con resistencia de 210 Kg/cm<sup>2</sup>, elaborado con cemento portland normal alcanza su resistencia de diseño después de 28 días, y posteriormente continúa ganando resistencia a un menor ritmo.

La American Society for Testing and Materials (ASTM) clasifica los cementos portland en cinco tipos:

- ✓ **Tipo I.** Es el cemento normal usado en la mayoría de las construcciones y es de uso general.
- ✓ **Tipo II.** Cemento modificado que tiene menor calor de hidratación que el tipo I y que puede resistir alguna exposición al ataque de sulfatos.
- ✓ **Tipo III.** Un cemento de fraguado rápido que produce en las primeras horas un concreto con una resistencia aproximadamente el doble de la resistencia del cemento tipo I; este cemento produce calor de hidratación muy alto.
- ✓ **Tipo IV.** Es un cemento de bajo calor de hidratación, que produce un concreto que disipa muy lentamente el calor. Se usa en estructuras de concreto de gran tamaño.
- ✓ **Tipo V.** Usado para concretos que van a estar expuestos a altas concentraciones de sulfatos.

En El Salvador el tipo de cemento más comúnmente usado es el tipo I, comercializado por Holcim y se denomina Fuerte tipo GU, ASTM C-1157, es el cemento hidráulico para uso general de mayor tradición en El Salvador, este tipo de cemento es el que se empleó en la fabricación de los especímenes de este estudio. Por sus componentes se utiliza para la elaboración de mezclas de concreto estructural en zapatas, soleras de fundación, columnas, vigas, entrepisos, nervios, etc. Pueden elaborarse además mezclas para mortero, suelo cemento convencional y suelo cemento fluido entre otros.



El cemento Holcim fuerte posee la misma composición del tipo I, pero con la adición de puzolana y caliza activada en proporciones específicas en la molienda final, este es un cemento puzolánico con características de moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos. Como lo muestra la figura 2.1.

**Figura 2.1:** Presentación comercial de cemento GU.



**Fuente:** *Holcim El Salvador.*

Otros tipos de cemento son comercializados, pero mediante pedidos especiales y grandes volúmenes, presentándose los siguientes:

Cemento tipo I, de alto desempeño, como lo muestra la figura 2.2.

**Figura 2.2:** Presentación comercial de cemento equivalente al tipo I, pero de alto desempeño.



**Fuente:** *Holcim El Salvador.*

A.R.I 5000: Equivalente al cemento tipo III, como lo muestra la figura 2.3.

**Figura 2.3:** Presentación comercial de cemento equivalente al tipo III.



**Fuente:** *Holcim El Salvador.*

Marino A.R.S: Equivalente al cemento tipo V, como lo muestra la figura 2.4.

**Figura 2.4:** Presentación comercial de cemento equivalente al tipo V.



**Fuente:** *Holcim El Salvador.*

Si el cemento requerido no se encuentra entre los cinco tipos mencionados, existen alternativas con respecto a los aditivos que modifican las propiedades del cemento tipo I, a las condiciones deseadas.

Las propiedades mecánicas del cemento se consideran una parte fundamental para el uso del material en obra; ya que ayuda a aglutinar los agregados gruesos con los finos, eliminando también por medio de una buena vibración los vacíos que puedan generarse al depositar el concreto

### **2.1.2 AGREGADOS PARA CONCRETO.**

Los agregados en el concreto ocupan aproximadamente tres cuartas partes del volumen del concreto. Como el costo de los agregados es menor que el del cemento, es deseable usar la mayor cantidad de ellos que sea posible.

Los agregados son todos aquellos materiales que tienen una propia resistencia, no perturban ni afectan el proceso de endurecimiento del cemento hidráulico.

Dichos materiales deben ser fuertes, durables y limpios. Si se encuentra en ellos polvo u otras partículas, puede interferir en la adherencia entre la pasta de cemento y los agregados. La resistencia de los agregados tiene un efecto importante en la resistencia del concreto y las propiedades de los agregados afectan considerablemente la durabilidad de este.

### 2.1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS.

Los agregados se pueden clasificar de muchas maneras, siendo las más usadas según su procedencia, por el tamaño de sus partículas, por sus características petrográficas y por su densidad. Tales clasificaciones sirven principalmente como una ayuda para la familiarización con los diferentes tipos de agregados o en la identificación de rasgos particulares.

#### ✓ **Clasificación por modo de fragmentación.**

Esta clasificación de agregados se basa en la forma en que ocurre el proceso de fragmentación de los materiales, los que desde este punto de vista pueden ser:

- 1- **Naturales:** Fragmentados por procesos naturales (erosión). Ver fig. 2.5

**Figura 2.5:** Fragmentación natural del agregado.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

- 2- **Manufacturados (triturados):** Fragmentados por procesos artificiales (mecánicos). Ver figura 2.6

**Figura 2.6:** Fragmentación mecánica del agregado.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

3- **Mixtos:** son la combinación de materiales fragmentados tanto por procesos naturales como artificiales. Este tipo de división no valida ninguna característica físico - química del agregado.

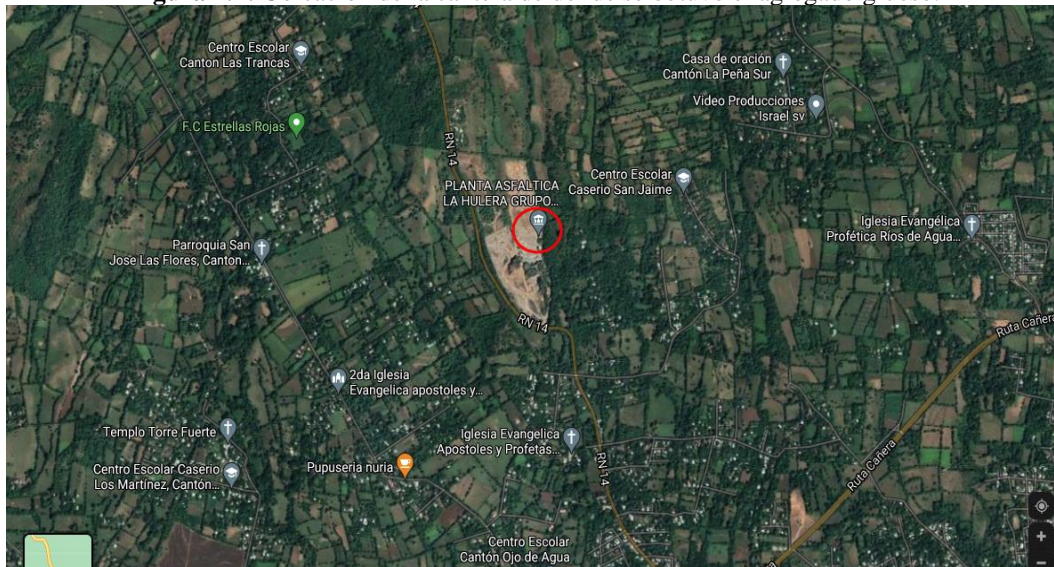
✓ **Clasificación por tamaño de partícula (ASTM C-33).**

Los agregados gruesos y finos deben cumplir lo siguiente:

1- **Agregado grueso:** Agregado retenido de modo predominante por el tamiz No. 4 (de 4.75mm); o bien, aquella porción de un agregado que es retenida por el tamiz No. 4 (de 4.75 mm). El agregado grueso utilizado en nuestro medio es denominado “Grava”, que resulta de la desintegración y abrasión naturales de la roca o procede de la trituración mecánica de esta.

La procedencia del agregado grueso fue de la cantera “La Hulera”, ubicada en el kilómetro 115 carretera El Litoral, 1.75 km desde By Pass de Usulután carretera Santiago de María, lado derecho, cantón Ojo de Agua, municipio y departamento de Usulután. Ver figura 2.7.

**Figura 2.7:** Ubicación de la cantera de donde se obtuvo el agregado grueso.



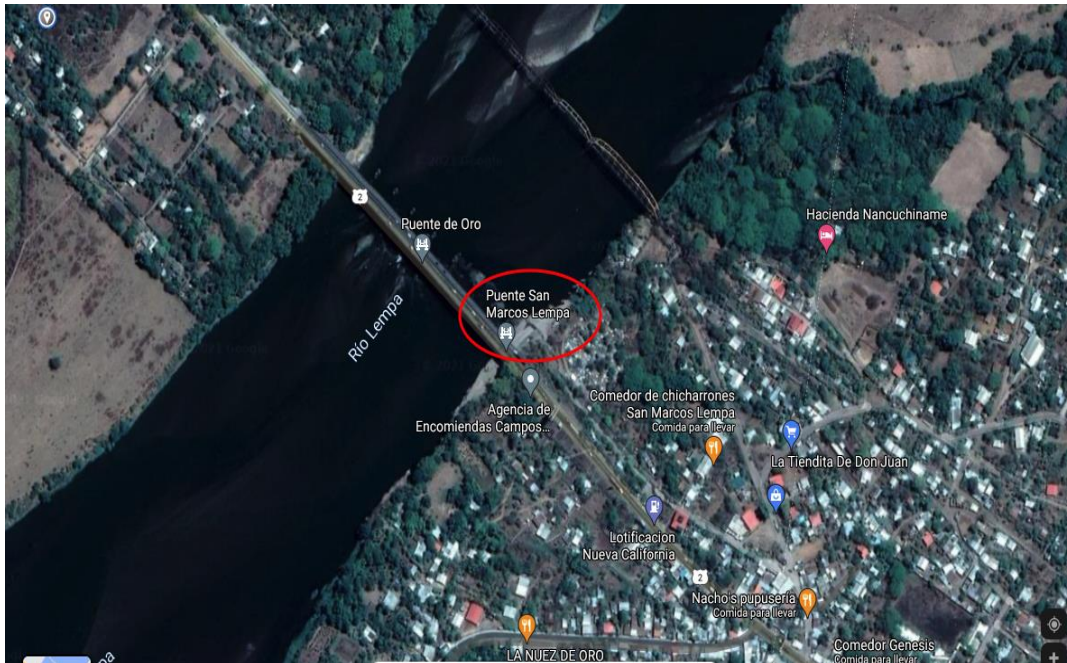
Fuente: Google Maps.

**2- Agregado fino:** Agregado que pasa por el tamiz de 3/4 in (9.5 mm) y casi pasa por completo por el tamiz No. 4 (de 4.75 mm). Y es retenido de modo predominante por el tamiz No. 200 (de 75  $\mu$ m); o bien, aquella porción de un agregado que pasa por el tamiz No. 4 (de 4.75 mm) y es retenida de modo predominante por el No. 200 (de 75  $\mu$ m).

El agregado fino utilizado en nuestro medio se denomina “Arena”, este resulta de la desintegración y abrasión naturales de la roca o procede de la trituración mecánica de esta.

La procedencia del agregado fino será del Rio Lempa, en el departamento de Usulután. Ver fig.2.8.

**Figura 2.8** Ubicación de la cantera de donde se obtuvo el agregado fino.



**Fuente:** Google Mapos.

**Figura 2.9:** Distribución del tamaño de partículas en agregado fino.



**Fuente:** Elaboración propia.

A continuación, se mencionan algunos de los bancos de proveedores de materiales pétreos mayormente conocidos en nuestro país:

La mayoría de distribuidores de materiales pétreos son conocidos en su zona de mercado, así en la zona oriental, central u occidental del país, pero de forma general en cuanto a agregado fino se sabe que los mayores proveedores de este se encuentran en las riberas del Rio Lempa y el Rio Jiboa, son los más comúnmente conocidos a nivel nacional, existe además empresas que prestan su servicios de comercialización de materiales pétreos, las cuales se anuncia en el manual del constructor que es una revista de distribución nacional:

- Cantera “La Florida”.
- Pavicon.
- Corten.

Los bancos de proveedores de materiales pétreos más conocidos en la zona oriental son:

- Arenera “Sinaí”: Ubicada en el kilómetro 149 y medio de la carretera Panamericana, en el cantón Miraflores, departamento de San Miguel.
- Cantera “La Hulera”, ubicada en el kilómetro 115 carretera El Litoral, a 1.75 km desde el By Pass de Usulután carretera a Santiago de María, lado, cantón Ojo de Agua, municipio y departamento de Usulután.
- Cantera “ProBlock S.A. DE C.V”: Ubicada en el camino que conduce al Cantón Cerro Bonito, a 350 metros de la intersección de la carretera que de San Miguel conduce a La Unión, Cantón Valle Nuevo, municipio y departamento de San Miguel.
- Cantera “El Ángel”: Ubicada sobre antigua calle a cantón Talpetate, municipio de El Sauce, departamento de La Unión, aproximadamente a 8 kilómetros a partir del mojón 190 de la carretera Panamericana (CA-1).

### **2.1.2.2 FUNCIÓN DE LOS AGREGADOS EN EL CONCRETO.**

En esta investigación el componente principal a evaluar es el concreto y en su mayor porcentaje está compuesto por los agregados, que puede decirse que conforman el esqueleto granular del concreto, que está formado por los agregados que son elementos inertes, generalmente más resistentes que la pasta cementante y además económicos; por lo tanto conviene colocar la mayor cantidad posible de agregados para lograr un concreto resistente, que no presente grandes variaciones dimensionales y sea económico y al mismo tiempo no afecte la trabajabilidad. Pero, aunque la economía es uno de los factores principales para reemplazar la pasta de cemento por agregados, sus propiedades tienen una acción determinante sobre las características del concreto, tanto en estado fresco como en estado endurecido.

Se debe optimizar la proporción de cada material de forma tal que se logren las propiedades deseadas en el concreto al mínimo costo. La arena tiene múltiples influencias sobre el concreto, lo que viene a constituir la importancia en el conocimiento de tal agregado, para el uso como ingrediente en dichas mezclas, en este trabajo de investigación se hizo el diseño de mezcla para una resistencia a la compresión de  $210 \text{ Kg/cm}^2$ .

La forma, el tamaño, la limpieza, la textura, dureza, etc. son las características físicas de la arena que más intervienen en la calidad del concreto. La arena se puede considerar como el segundo en importancia en la obtención de una mejor calidad del concreto, lo que viene a afirmar o asegurar que puede ocasionar dificultades y puede tener una participación más decisiva en la resistencia y durabilidad del concreto que el agregado grueso; así, por ejemplo, la arena que tiene materia orgánica o extraña en gran proporción resulta muy perjudicial si no es neutralizada la acción de dicha sustancia.

La arena tiene dos funciones importantes que desempeñar en el concreto:

- 1- La de actuar como un relleno de los vacíos que existen en el mismo, incidiendo en su economía.
- 2- La de actuar como lubricante del agregado grueso distribuyéndose en toda la masa del concreto.

La cantidad mínima de arena que cumpla las dos funciones anteriores, es la que deberá usarse para obtener resultados satisfactorios, ya que si se usa una cantidad mayor la superficie que deberá cubrirse con la pasta de cemento será aumentada, lo que trae como consecuencia aumento en el costo de la mezcla final del concreto.

Es de señalar que la capacidad de la mezcla para llenar totalmente los encofrados y cubrir completamente las armaduras de refuerzo con los medios de compactación adecuados, depende en gran parte del tamaño máximo del agregado grueso.

Otra de las funciones importantes de los agregados es la de aportar parte de la resistencia propia a la resistencia a la compresión del concreto. En muchas ocasiones el peso del concreto es el factor más importante, en este caso en el peso de los agregados se convierte en factor fundamental para la estabilidad de la estructura.

Algunos ejemplos en los que la densidad de los agregados es primordial son: los contrapesos y macizos de anclaje o estructuras diseñadas para aislamiento acústico y protección contra radiaciones.

La arena puede estar contaminada con sílice, la cual al combinarse con los álcalis del cemento, produce expansiones pequeñas del concreto, lo que trae como consecuencia aberturas y agrietamientos que son formas de desintegración del concreto debido a agregados sucios y sobre arenosos (exceso de finos) los cuales requieren relaciones agua-cemento altas para obtener manejabilidades satisfactorias, lo que ocasiona un incremento en la permeabilidad y en el



contenido de humedad del concreto, esto afecta directamente la durabilidad del concreto que incide en las patologías de carbonatación y afectación por cloruros.

Cuando el concreto se encuentra sometido a exposiciones severas, como es el caso de humedecimiento y secado, aguas o suelos agresivos, exposición a los ácidos, etc., los agregados como componentes de él, aportan su durabilidad propia al conjunto.

### 2.1.2.3 ESPECIFICACIONES PARA AGREGADOS.

Los agregados que se emplean en la fabricación de concreto deben cumplir normas y especificaciones requeridas las cuales se muestran a continuación:

#### **Descripción de la ASTM C 33 (Especificación estándar para agregados de concreto).**

Esta especificación define los requisitos para la clasificación y la calidad de agregado fino y grueso (que no sea ligero o un agregado muy pesado) para su uso en el concreto, por lo que se considera adecuada para determinar si el material es satisfactorio y apto en la utilización como agregado de un concreto para obra civil.

#### **Graduación.**

Según la ASTM C-33, la muestra de agregado se hace pasar por diferentes mallas ordenadas desde la de 3/8 pulg. hasta la No 100, calculando los porcentajes en peso que pasan en cada una de ellas y comparando estos valores con los porcentajes que establece la norma de acuerdo a la tabla 2.2 :

**Tabla 2.2:** Límites de granulometría para agregado fino según especificaciones de ASTM C 33.

<b>Tamaño de la malla.</b>	<b>Porcentaje que pasa en peso.</b>
9.52mm. (3/8)	100
4.75mm.(N°4)	95 a 100
2.36mm.(N°8)	80 a 100
1.18mm.(N°16)	50 a 85
0.60mm.(N°30)	25 a 60
0.30mm.(N°50)	10 a 30
0.15mm.(N°100)	2 a 10

**Fuente:** ASTM C 33.

El agregado fino no podrá tener más del 45% del material que pasa por cualquier tamiz y retenido en el tamiz consecutivo siguiente de las indicadas en la tabla 2.2 y su módulo de finura no será inferior a 2.0 ni superior a 3.2, como lo muestra a continuación, la tabla 2.3:

**Tabla 2.3:** Rangos de clasificación del agregado fino según el módulo de Finura.

<b>Módulo de finura.</b>	<b>Clasificación.</b>
Menor que 2.0	Muy fina
<b><u>2.0 – 2.3</u></b>	<b><u>Fina</u></b>
2.3 – 2.6	Medianamente fina
2.6 – 2.9	Mediana
<b><u>2.9 – 3.2</u></b>	<b><u>Medianamente gruesa</u></b>
3.2 – 3.5	Gruesa
Mayor que 3.5	Muy gruesa

**Fuente:** ASTM C 33.

## **2.2 LAS PUZOLANAS.**

Debido a que las puzolanas en este trabajo de investigación fue la variante a evaluar en el comportamiento del concreto, se vuelve necesario conocer su origen y la normativa aplicable.

La norma ASTM C 618, define a las puzolanas como materiales naturales o artificiales de silíceo - amorfos o aluminio – silíceos, quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente son una especie de cemento natural y estando en presencia del agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes, como morteros hidráulicos.

Las puzolanas naturales calcinadas son materiales del mismo origen, pero activados térmicamente. Están compuestas esencialmente por dióxido de silicio reactivo ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), además de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros óxidos. Los materiales puzolánicos no endurecen por sí mismos cuando se amasan con agua, pero finamente molidos reaccionan con la portlandita formada en el proceso de hidratación del cemento Portland, dando como resultado final compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio.

## **2.2.1 CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA.**

### **2.2.1.1 GENERALIDADES.**

La ceniza de bagazo de caña (CBC) es un residuo agrícola generado por la industria de la azúcar y el etanol. La ceniza que queda después de que el bagazo se quema, es el último residuo generado por la cadena de la caña de azúcar; 25 kg de ceniza son generados por cada tonelada de bagazo quemado. La utilización de las cenizas de bagazo de caña en diversos campos, como agricultura y ahora, en la construcción, será de gran aprovechamiento. Su propiedad como material cementante permite utilizarlo como cemento puzolánico. Además, hay que conocer que la fibra de la caña de azúcar representa entre un 40-50% de su volumen de toda la planta.

Una alternativa para hacer uso de este residuo que se genera en grandes cantidades es incorporarlo a la matriz conglomerante de concretos y morteros.

Numerosos estudios se han realizado con respecto al uso de la CBC como adición puzolánica, se han analizado aspectos como la reactividad, la resistencia mecánica del concreto, las propiedades reológicas y la durabilidad. De igual manera se han realizado investigaciones para su uso en concretos autocompactable, así como concretos de alta resistencia.

### **2.2.1.2 PROCESO DE GENERACIÓN DE CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA.**

Para la obtención de la caña de azúcar desde su siembra hasta su cosecha, tarda de 12 a 14 meses. El medio utilizado para el corte de la caña es a través de maquinaria o manual. Si se corta de forma manual, antes de cortarla, el cañal es quemado para proteger a los trabajadores de los cortes que puede ocasionar la hoja de la caña.

Luego de cortarla es transportada por camiones al ingenio más cercano de la región y se almacena en el patio del ingenio para su transformación en azúcar. La caña es depositada en unas bandas

transportadoras que la conduce a unas cuchillas, para su picado en fibras. Así, los molinos hacen mucho más fácil extraer el jugo de las fibras a base de presión, para dejar solo el bagazo.

El bagazo es el material fibroso de la caña que es almacenado generalmente bajo techo. A continuación, el bagazo con la ayuda de cintas transportadoras se lleva hasta un horno donde es quemado para la generación de vapor y energía eléctrica. En el fondo del horno se deposita la ceniza de bagazo de caña, éste se limpia periódicamente y esta es llevada a los terrenos que son ocupados para la siembra de caña de azúcar, donde es utilizada como abono.

### 2.2.1.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA.

En un estudio realizado por Betancourt, en las provincias centrales de Villa Clara, Cienfuegos, Sancti Espíritus, y Ciego de Ávila en Cuba, se puede considerar según la composición Química media la ceniza de bagazo de caña de azúcar presenta un mayor contenido de óxidos fundamentales ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). El estudio de Ríos señala una composición química de ceniza para el bagazo de caña cubano que se aprecia en la Tabla 2.4:

**Tabla 2.4:** Composición química de la ceniza del bagazo de caña cubano.

COMPUESTO CONSTITUTIVO		PORCENTAJE
NOMBRE	FORMA ABREVIADA	
Sílice	$\text{SiO}_2$	56.40 %
Óxido Férrico + Aluminio	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$	5.15 %
Óxido de Calcio + Óxido de Magnesio	$\text{Ca} + \text{MgO}$	9.08 %
Álcalis	$\text{Na}_2\text{O}$ y $\text{K}_2\text{O}$	12.6 %

**Fuente:** Ríos (2011) "Empleo de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto porcentual del agregado fino en la elaboración del concreto hidráulico".

La Tabla 2.5 muestra las composiciones químicas en estudios elaborados por Martirena, Ganesan y Oliveira de Paula donde se aprecia que los óxidos fundamentales  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  son los que predominan en las cenizas de bagazo de caña.

**Tabla 2.5:** Composición química de cenizas de bagazo de caña de azúcar realizada por varios investigadores.

Compuesto.	Investigadores.		
	Martirena.	Ganesan.	Oliveira.
$SiO_2$	72.74	64.15	83.77
$Al_2O_3$	5.26	9.05	-
$Fe_2O_3$	3.92	5.52	6.53
$TiO_2$	0.32	-	1.16
$CaO$	7.99	8.14	1.18
$MgO$	2.78	2.28	-
$SO_3$	0.13	-	0.68
$K_2O$	3.47	1.35	6.146
$Na_2O$	0.84	0.92	-
$P_2O_5$	1.59	-	-
Perdida por ignición	0.77	0.90	-

**Fuente:** Ríos (2011) “Empleo de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto porcentual del agregado fino en la elaboración del concreto hidráulico”.

Por su composición química la CBCA tiene altos contenidos de materiales puzolánicos como el dióxido de silicio ( $SiO_2$ ) y otros óxidos que producen la actividad puzolánica.

La actividad puzolánica de las cenizas depende de algunos parámetros tales como: el tamaño de las partículas, la temperatura de calcinación, amorfo / naturaleza cristalina y la composición química.

En la tabla 2.6, se presentan los resultados de la composición química de la ceniza de bagazo de caña del Ingenio Chaparrastique; esta tabla muestra de acuerdo la norma ASTM D6349, las cantidades en porcentajes de los compuestos químicos principales que son: El óxido de sílice ( $SiO_2$ ), óxido férrico ( $Fe_2O_3$ ) y óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ), estos porcentajes de acuerdo a la tabla 2.5 muestran ser muy parecidos a la variedad de caña de azúcar estudiada por Ganesan, vale aclarar que el Ingenio Chaparrastique posee diferentes variedades de caña, distribuidas en un área aproximada de 2,000 hectáreas, por lo que los datos varían con respecto al estudio contra el cual se ha comparado.

**Tabla 2.6:** Resultados de las pruebas químicas de la ceniza de bagazo de caña proporcionada por el Ingenio Chaparrastique, San Miguel.

<b>REPORTE DE ANALISIS CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA.</b>			
<b>Método de prueba</b>	<b>Parámetro</b>	<b>UDM</b>	<b>Base Seca</b>
ASTM D6357	Cromo Cr	ppm	45
ASTM D4208	Cloro Cl	%w	0.11
<b>Método de prueba</b>	<b>Parámetro</b>	<b>UDM</b>	<b>Base Ignición</b>
ASTM D6349	SiO <sub>2</sub>	%w	67.33
ASTM D6349	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%w	14.14
ASTM D6349	TiO <sub>2</sub>	%w	0.49
ASTM D6349	Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	%w	4.95
ASTM D6349	CaO	%w	3.80
ASTM D6349	MgO	%w	1.65
ASTM D6349	K <sub>2</sub> O	%w	4.15
ASTM D6349	Na <sub>2</sub> O	%w	2.12
ASTM D6349	SO <sub>3</sub>	%w	0.24
ASTM D6349	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%w	0.88
ASTM D6349	SrO	%w	0.02
ASTM D6349	BaO	%w	0.07
ASTM D6349	MnO	%w	0.15
	<b>% Indeterminado</b>		0.01
ASTM D6349	ZnO	ppm	15.40

**Fuente:** Análisis de laboratorio perteneciente al Ingenio Chaparrastique San Miguel.

#### **2.2.1.4 CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA COMO SUSTITUCIÓN DE MATERIAL CEMENTANTE EN EL CONCRETO.**

La actividad puzolánica de las cenizas depende de algunos parámetros tales como: el tamaño de las partículas, la temperatura de calcinación, de su naturaleza cristalina y de la composición química. Estudios recientes han demostrado que los desechos de la industria azucarera, principalmente la ceniza bagazo de caña de azúcar, tienen actividad puzolánica derivado de su alto contenido de sílice amorfo en este material.

Por su composición química la CBC tiene altos contenidos de materiales puzolánicos como el dióxido de silicio ( $SiO_2$ ) y otros óxidos que producen la actividad puzolánica. Los estudios indican que el cemento o cal y la CBC, pueden modificar las propiedades mecánicas y puede mejorar otras como la penetración de la humedad hacia los concretos. En décadas anteriores el estudio de las CBC se realizó en países como Brasil, India, Alemania, etc.

Las investigaciones que se realizaron en estos países son significativas porque tratan de crear un cemento puzolánico para modificar las propiedades del cemento. Los avances son significativos desde la utilización de la CBC como aditivo para el concreto autocompactable. Los investigadores están haciendo esfuerzos para crear un nuevo cemento puzolánico, que cumplan con las normas internacionales. En Cuba se realizó una investigación el 2002 que trata de describir con modelos científicos, con conductividad eléctrica, la reacción puzolánica en la hidratación del CBC en el concreto, pero todo ha quedado en experimentos. Esto es fundamental, porque conocer la reacción que provoca sobre el concreto o mortero, puede tener resultados favorables a ambientes agresivos. Se hizo una investigación en países como Brasil, España y Cuba (2008), donde se analiza la actividad puzolánica de la CBC y sus causas físicas en el mortero o concreto. La morfología, temperatura de calcinación, tamaño de las partículas y la composición química de la CBC, son factores que pueden afectar la actividad puzolánica.

## **2.2.2 LA TOBA VOLCÁNICA.**

### **2.2.2.1 GENERALIDADES.**

La toba volcánica se forma por la acumulación de cenizas volcánicas y fragmentos de tamaño menor de 2 mm. La textura puede ser muy variada y el tono no es ni muy claro ni muy oscuro. Puede confundirse con riolitas, traquitas o andesitas. Se genera a partir de la roca cuarteada y separada en partículas diminutas durante un episodio de actividad volcánica explosiva. La naturaleza normalmente violenta de una erupción, incluyendo chorros de vapor de agua (erupción freática), produce como resultado una gran cantidad de magma y tal vez roca sólida que rodea el viento volcánico, torneando las partículas hasta reducirlas al tamaño de granos de arena.

De acuerdo con sus características los piroclastos de proyección aérea se dispersan y caen a tierra siguiendo simplemente la fuerza de la gravedad o según las leyes de la balística. A mayor altura

de las columnas eruptivas, mayor será la dispersión de los piroclastos.

Por su tamaño se distinguen clásicamente tres categorías en la toba volcánica:

- Cenizas: Partículas de menos de 2 mm de eje. Pueden ser microscópicas.
- Lapilli: Fragmentos de entre 2 y 64 mm.
- Bombas volcánicas: fragmentos de más de 64 mm.

#### **2.2.2.2 PROCESO DE GENERACIÓN DE LA TOBA VOLCANICA.**

La toba volcánica es una roca ígnea extrusiva (roca volcánica) que se forma por la consolidación y litificación de productos volcánicos que han sido expulsados desde un volcán, típicamente por una erupción volcánica explosiva. Está constituida principalmente por ceniza volcánica y puede contener fragmentos de partículas del tamaño de polvo a partículas del tamaño de una roca y estar compuesta de diferentes tipos de materiales.

#### **2.2.2.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA.**

La toba volcánica puede estar constituida por una gran variedad de minerales, esto la diferencia de otro tipo de rocas. Individualmente, los granos que la conforman pueden ser cristalinos, vítreos o cenizos. La toba al provenir de erupciones explosivas, significa que está asociada con magmas ácidos, lo que hace que sea común que contenga en su interior augita, biotita, plagioclasas, cuarzo, feldespatos potásicos, moscovita y leucita, pero la variedad de minerales puede ser más amplia; en la tabla 2.7 se presenta la composición química de la toba en forma general.

**Tabla 2.7** Composición química de la toba volcánica.

<b>Composición.</b>	<b>Porcentaje.</b>
SiO <sub>2</sub>	46.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.46
MgO	8.67
CaO	11.76
Pérdidas por calcinación	0.19

**Fuente:** Valencia et al (2012) “Estudio de durabilidad y corrosión en morteros armados adicionados con toba volcánica y ceniza de bagazo de caña de azúcar”.



La tabla 2.8 muestra la composición química de la toba volcánica procedente del Cantón el Delirio, San Miguel, El Salvador, la cual fue usado en esta investigación.

**Tabla 2.8:** Composición química de la toba volcánica.

Composición.	Porcentaje.
SiO <sub>2</sub>	79.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.98
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.64

**Fuente:** *Larios, et al (2019) “Propuesta metodológica de caracterización y evaluación de puzolanas de origen volcánico y derivados del proceso de la calcinación de ladrillo de barro en la capacidad reactiva de formación de compuestos cementicos”.*

#### 2.2.2.4 LA TOBA VOLCÁNICA COMO SUSTITUCIÓN DE MATERIAL CEMENTANTE EN EL CONCRETO.

Los materiales de origen volcánico tales como las tobas han sido igualmente objeto de estudio y se incluyen dentro de la clasificación de puzolanas naturales (tipo N) en la Norma ASTM C618. Básicamente están compuestas por material vítreo y otros minerales; sus características físicas y químicas, así como sus efectos al incorporarse al cemento como adición están directamente relacionados con la fuente de origen.

Acorde a las características físicas de la toba, particularmente el contenido vítreo, se han desarrollado materiales cementicos con elevados porcentajes de adición (50%) que presentan propiedades mecánicas comparables al concreto sin adición y mejores desempeños en ambientes agresivos<sup>27</sup>.

Las ventajas que ofrece el uso de la toba volcánica al emplearla como sustituto del cemento en la fabricación del concreto, se detallan a continuación:

---

<sup>27</sup> J.C Restrepo, O.J Restrepo: “Efectos de la adición de metacaolín en el cemento Pórtland”, Colombia, 2006 (pág. 136).

- Mayor defensa frente a los sulfatos y cloruros.
- Mayor resistencia frente al agua de mar.
- Aumento de la impermeabilidad ante la reducción de grietas en el fraguado.
- Reducción del calor de hidratación.
- Incremento en la resistencia a la compresión.
- Incrementa la resistencia del acero a la corrosión.
- Aumenta la resistencia a la abrasión.
- Aumento en la durabilidad del concreto.
- Disminuye la necesidad de agua.

## **2.3 EL ACERO DE REFUERZO.**

El ataque de la corrosión en las estructuras de concreto reforzado se origina específicamente en el acero de refuerzo, afectando posteriormente las propiedades mecánicas del concreto, a continuación, se ampliará la descripción de este.

### **2.3.1 GENERALIDADES.**

El acero usado en la industria de la construcción es el llamado acero estructural y existe hoy en día una amplia gama de estos, en donde las características mecánicas controladas cuidadosamente son:

- Resistencia a la tensión.
- Ductilidad.
- Tenacidad.
- Soldabilidad.

Antiguamente el acero para refuerzo se limitaba solo al de bajo-medio carbono (0.2-0.45%); para después utilizar varillas de refuerzo de alta resistencia. Esto se logró, incrementando el contenido de carbono en el acero o introduciendo dureza mecánica por torcido o estirado.

A finales de los años cincuenta aparecieron en el mercado los aceros de alta resistencia y baja aleación, los cuales reúnen las propiedades mecánicas de los aceros de alto contenido de carbono, con las propiedades de los aceros de bajo carbono.

El acero para reforzar concreto se utiliza en distintas formas, la más común es la barra o varilla corrugada que se fabrica de acero laminado en caliente; los diámetros usuales de las barras producidas varían de  $\frac{1}{4}$ " a  $1\frac{1}{4}$  "".

En nuestro país los diámetros usados en varillas de acero más comúnmente van desde las de  $\frac{1}{4}$ " hasta  $\frac{5}{8}$ " y desde la  $\frac{3}{4}$ " hasta la  $1\frac{1}{4}$ " se fabrican por pedidos y cantidades específicas y de gran volumen.

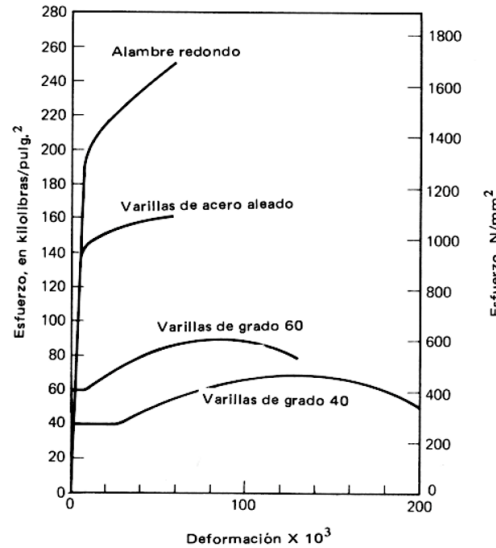
En otros países se usan diámetros aún mayores. Generalmente el tipo de acero se caracteriza por el límite o esfuerzo de fluencia, este límite se aprecia claramente en las curvas esfuerzo-deformación de barras laminadas en caliente. El acero trabajado en frío no tiene un límite de fluencia bien definido; en este caso, el límite de fluencia suele definirse trazando una paralela a la parte recta de la curva esfuerzo-deformación, desde un valor de la deformación unitaria de 0.0002; la intersección de esta paralela con la curva define el límite de fluencia. Una propiedad importante que debe tenerse en cuenta en refuerzos con detalles soldados es la soldabilidad. La soldadura de aceros trabajados en frío debe hacerse con cuidado. Otra propiedad importante es la facilidad de doblado, que es una medida indirecta de ductilidad.

### **2.3.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO.**

La descripción más completa de las propiedades mecánicas de los aceros (propiedades utilizadas en el diseño estructural) se realiza mediante sus curvas esfuerzo – deformación (ver figura 2.10) bajo cargas de tracción, las mismas que varían dependiendo de la composición química del material y de sus procesos de fabricación.

Por regla general, las propiedades mecánicas que se deben analizar en el acero son la resistencia a la tracción y a la fluencia, el alargamiento y el doblado.

**Figura 2.10:** Curvas esfuerzo-deformación para diferentes grados de acero.



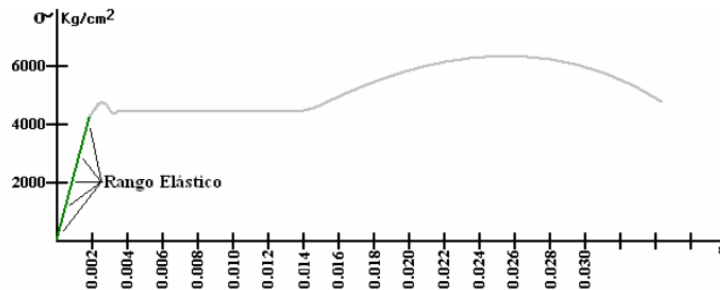
**Fuente:** *Presentación de Concreto Armado I, profesor Miguel Sambrano.*<sup>28</sup>

### 2.3.2.1 RANGO DE COMPORTAMIENTO ELÁSTICO.

Es el rango de esfuerzos, a partir de la carga nula, en que el acero se deforma por cargas de tracción, pero cuando se retira tal carga recupera su geometría inicial.

En la curva esfuerzo – deformación ese rango coincide con la recta que parte desde el punto de esfuerzo y deformación nulos (ver figura 2.11).

**Figura 2.11:** Rango elástico representado en curva esfuerzo-deformación.



**Fuente:** *Proañol (2008): "Temas de Hormigón Armado".*<sup>29</sup>

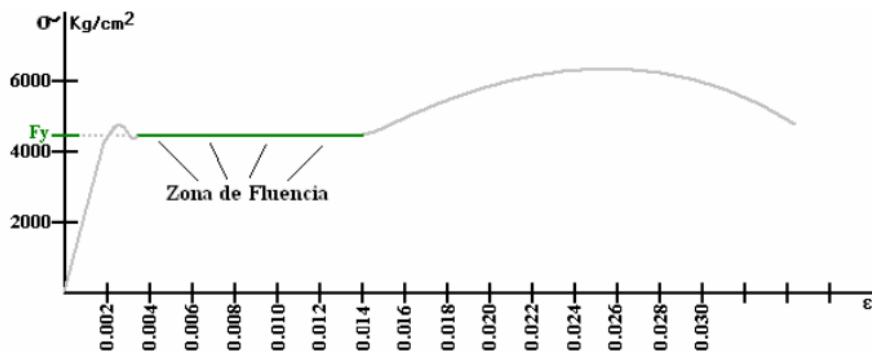
<sup>28</sup> Sambrano (2015) "Concreto Armado I" Universidad Católica Andrés Bello, sección 4.1.

<sup>29</sup> Proañol (2008) "Temas de Hormigón Armado" Escuela Politécnica del Ejército del Ecuador, pág. 17.

### 2.3.2.2 ESFUERZO DE FLUENCIA.

Se define como el esfuerzo bajo el cual el acero continúa deformándose sin necesidad de incrementar las cargas de tracción. En el diagrama esfuerzo – deformación (ver figura 2.12) de los aceros tradicionales, la fluencia coincide con una recta horizontal (o casi horizontal), a continuación del rango elástico y de un pequeño tramo de transición. El esfuerzo asociado se identifica como “ $F_y$ ”.

**Figura 2.12:** Esfuerzo de fluencia de acero dúctil representado en curva esfuerzo-deformación.



Fuente: Proañol (2008): “Temas de Hormigón Armado”.<sup>30</sup>

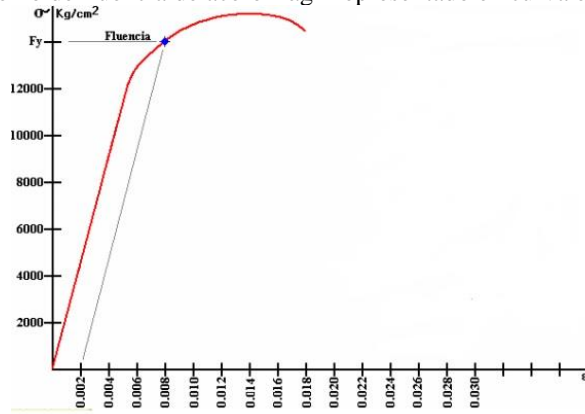
Existen aceros estructurales, trabajados en frío para lograr una mayor resistencia, que no revelan la presencia de una zona de fluencia, en cuyo caso ASTM recomienda trazar una recta paralela a la de comportamiento elástico, que arranque en el eje de las deformaciones unitarias con una deformación de 0.002.

El punto de cruce de esa recta con la curva esfuerzo – deformación definirá el esfuerzo teórico de fluencia del material (ver figura 2.13).

El ACI, por su parte, especifica que, si el esfuerzo de fluencia observado gráficamente (ver figura 2.14) supera los 4,200 Kg/cm<sup>2</sup>, el esfuerzo de fluencia deberá obtenerse de la curva esfuerzo-deformación para una deformación unitaria de 0.0035 (ACI 3.5.3.2).

<sup>30</sup> Proañol (2008) “Temas de Hormigón Armado” Escuela Politécnica del Ejército del Ecuador pág. 19.

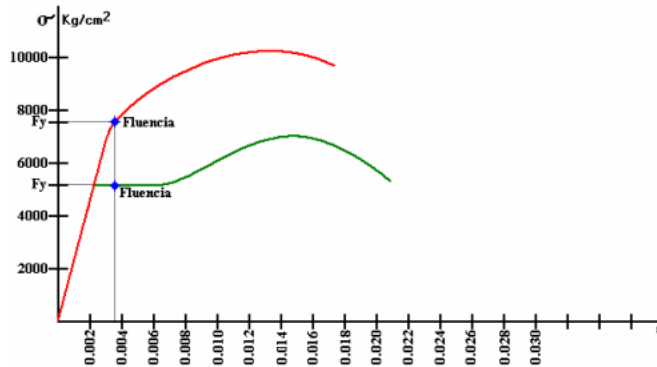
**Figura 2.13:** Esfuerzo de fluencia de acero frágil representado en curva esfuerzo-deformación.



**Fuente:** Proañol (2008): “Temas de Hormigón Armado”<sup>31</sup>.

No se podrá utilizar en diseño un esfuerzo de fluencia superior a 5,500 Kg/cm<sup>2</sup> (ACI 9.4), con excepción del refuerzo en espiral, en cuyo caso podrá llegar hasta 7,000 Kg/cm<sup>2</sup> (ACI 10.9.3). Los materiales frágiles en la curva esfuerzo-deformación, representan una mayor pendiente que los materiales dúctiles, esto indica que los primeros tienen propiedades elásticas menores, provocando así una ruptura a menor deformación, por lo que en el área de construcción no se suele utilizar, ya que se busca siempre una mayor ductilidad.

**Figura 2.14:** Esfuerzo de fluencia para diferentes grados de acero, representado en curva esfuerzo-deformación.



**Fuente:** Proañol (2008): “Temas de Hormigón Armado”<sup>32</sup>.

Los grados de acero mayormente usados en nuestro país son el acero grado 40 y el grado 60.

<sup>31</sup> Proañol (2008) “Temas de Hormigón Armado” Escuela Politécnica del Ejercito del Ecuador pág. 19.

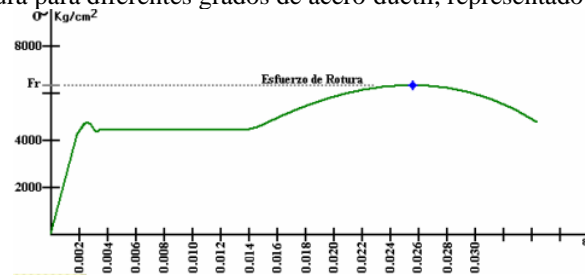
<sup>32</sup> Proañol (2008) “Temas de Hormigón Armado” Escuela Politécnica del Ejercito del Ecuador pág. 20.

### 2.3.2.3 RESISTENCIA A LA ROTURA.

La resistencia a la rotura es el mayor esfuerzo que puede soportar el acero previo al proceso de colapso del material; dentro del diagrama esfuerzo – deformación del material, el inicio del colapso queda identificado mediante el punto de mayor ordenada, que se representa por “ $F_r$ ”.

El esfuerzo de rotura es siempre superior al esfuerzo de fluencia, para todo tipo de acero estructural (ver figura 2.15 y 2.16). En concreto armado, la reserva de capacidad entre el esfuerzo de fluencia y el de rotura no es utilizada directamente en el diseño, debido a las grandes deformaciones que se requerirían para alcanzar ese esfuerzo mayor, por lo que se utiliza como elemento de diseño exclusivamente al esfuerzo de fluencia y así tendrá que ser ya que se trata de dar seguridad a las estructuras de concreto armado, para que trabajen en un rango elástico, permitiendo así la deformación en dichas estructuras, de manera que permitan la evacuación de las personas que se encuentren dentro de las edificaciones, evitando así que alcancen la rotura y provoquen además de daños materiales, daños físicos.

**Figura 2.15:** Esfuerzo de rotura para diferentes grados de acero dúctil, representado en curva esfuerzo-deformación.



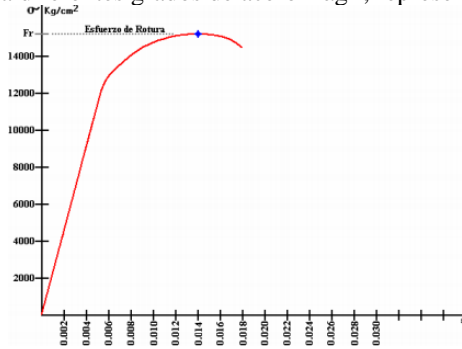
Fuente: Proañol (2008): “Temas de Hormigón Armado”<sup>33</sup>.

Durante su vida útil el acero puede sufrir algún tipo de deterioro por efectos de la corrosión o la fractura por fatiga. Estos desperfectos son ocasionados por diversos factores:

- Físicos.
- Químicos, o una combinación de ambos.

<sup>33</sup> Proañol (2008) “Temas de Hormigón Armado” Escuela Politécnica del Ejército del Ecuador pág. 20.

**Figura 2.16:** Esfuerzo de rotura para diferentes grados de acero frágil, representado en curva esfuerzo-deformación.



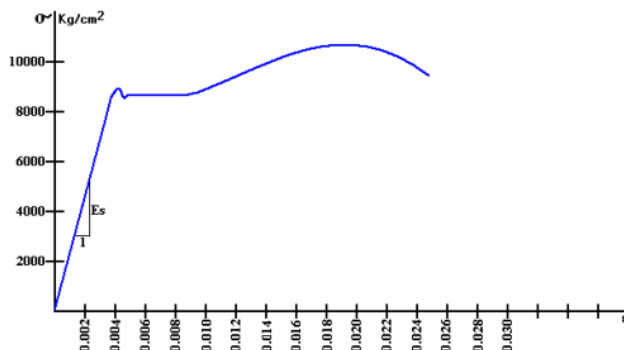
**Fuente:** Proañol (2008): “Temas de Hormigón Armado”<sup>34</sup>.

### 2.3.2.4 MÓDULO DE ELASTICIDAD.

Es la pendiente de la recta que identifica al rango elástico de comportamiento de los materiales, y en el caso del acero se representa “ $E_s$ ”, desde el punto de vista estructural este rango es el intervalo de diseño para resistir las cargas de servicio. Numéricamente el módulo de elasticidad es el cociente entre el esfuerzo y la deformación unitaria dentro del rango elástico.

En los aceros estructurales sólidos en barra o en perfil, utilizados en el concreto armado, prácticamente en todos los casos se tiene un único módulo de elasticidad, lo que en las curvas esfuerzo – deformación (ver figura 2.17) se refleja en la pendiente única de los aceros con características diferentes (ACI 8.5.2).

**Figura 2.17:** Identificación del módulo de elasticidad en curva esfuerzo-deformación.



**Fuente:** Proañol (2008): “Temas de Hormigón Armado”<sup>35</sup>.

<sup>34</sup> Proañol (2008) “Temas de Hormigón Armado” Escuela Politécnica del Ejercito del Ecuador pág. 17.

<sup>35</sup> Proañol (2008) “Temas de Hormigón Armado” Escuela Politécnica del Ejercito del Ecuador pág. 17.



### **2.3.2.5 DUCTILIDAD.**

Es una de las propiedades mecánicas del acero estructural que consiste en la capacidad de deformarse prácticamente sin romperse; decimos que una estructura es dúctil cuando, al estar sujeta a una combinación máxima de fuerzas durante su vida útil, será capaz de resistirlas y podrá formar rotulas plásticas en las vigas, garantizando la disipación de energía proveniente de dicha combinación y evitando el colapso de la estructura.

## **2.4 EL CONCRETO.**

Una vez evaluados los componentes del concreto se vuelve necesario conocer cómo se comporta mecánicamente como un solo elemento.

### **2.4.1 DEFINICIÓN.**

Se define al concreto como una mezcla homogénea de tres componentes fundamentales, un aglutinante (el cemento), el agente activante del aglutinante (agua), y un conjunto de partículas minerales de diferentes tamaños ligadas por la pasta cementante, que son los agregados.

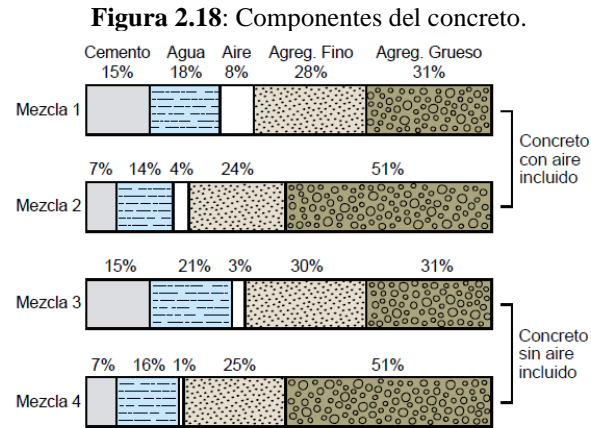
La mezcla de los componentes del concreto crea una masa que puede ser moldeada con facilidad, pero poco a poco pierde esta característica hasta que se torna rígida, para convertirse finalmente en el material resistente conocido como concreto endurecido.

El concreto presenta un comportamiento típico de los materiales cerámicos, esto es, muy buena resistencia a la compresión, pero muy escasa a la tracción.

El concreto reforzado surge al unir el acero con el concreto gracias a la elevada adherencia entre ambos, lo que produce una correcta transferencia de propiedades mecánicas, buena resistencia a la tracción del primero y resistencia a la compresión del segundo. La utilización del acero embebido en concreto ofrece una gran mejora en cuanto a resistencia.

## 2.4.2 COMPONENTES DEL CONCRETO.

Como se mencionó anteriormente el concreto está compuesto por los siguientes elementos: cemento, agua, agregado fino y agregado grueso, como se muestra en la figura 2.18.



**Fuente:** Sánchez (2001): “Tecnología del concreto y del mortero”<sup>36</sup>.

## 2.4.3 CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONES DE LOS COMPONENTES DEL CONCRETO.

En la tabla 2.9 se presenta un resumen de las principales características y funciones de los componentes del concreto, siendo estos componentes; el cemento, agua, aire, agregados y en algunos casos especiales aditivos, cuando se requiera modificar algunas condiciones de la mezcla de concreto.

**Tabla 2.9:** Características y funciones de los componentes.

COMPONENTES.	CARACTERÍSTICAS.	FUNCIONES.
<b>Cemento</b>	Fraguar al contacto con el agua.	Aglutinar.
<b>Agua</b>	Libre de agentes contaminantes.	Hidratar agregados y cemento.
<b>Aire</b>	Forma de burbujas en la mezcla.	Puede impermeabilizar controlándose adecuadamente.
<b>Agregados</b>	Densos, resistentes a desgastes mecánicos.	Forman un esqueleto resistente dentro del concreto, controlan la retracción por fraguado.
<b>Aditivos</b>	Componentes orgánicos.	Reductores de agua, inclusores de aire retardantes de fraguado, acelerantes de fraguado.

**Fuente:** Sánchez (2001): “Tecnología del concreto y del mortero”<sup>37</sup>.

<sup>36</sup> Sánchez 2001 “Tecnología del concreto y del mortero” Universidad Javeriana, pág. 22.

<sup>37</sup> Sánchez 2001 “Tecnología del concreto y del mortero” Universidad Javeriana, pág. 23.

## 2.4.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO.

Las propiedades mecánicas del concreto le brindan la capacidad de ganar fuerza con el tiempo; debido a su capacidad para seguir siendo un material de alta calidad, con poca o ninguna necesidad de reconstrucción o mantenimiento, pues resiste la descomposición y la oxidación, proporcionando un entorno estable y seguro.

En el concreto en estado fresco las propiedades más importantes son la manejabilidad, la viscosidad y la temperatura. Así mismo, el calor de hidratación como una propiedad térmica generada por la reacción de contacto entre el agua y el cemento, genera en la mezcla una serie de cristales endurecidos que conglomeran la mezcla, generando en ella una resistencia mecánica durante el proceso de hidratación.

En la tabla 2.10 se describen las características de cada una de las propiedades principales del concreto, su definición y algunos factores que influyen en estas propiedades.

**Tabla 2.10:** Características de las Propiedades del Concreto.

PROPIEDAD.	CARACTERÍSTICAS.
<b>Manejabilidad</b>	<b>Definición</b> Capacidad de mantener un estado plástico desde su elaboración hasta su colocación en obra.
	<b>Factores que influyen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Condiciones ambientales “temperatura, humedad”.</li> <li>- Contenido de agua en la mezcla.</li> <li>- Fluidez de la pasta contenido de aire.</li> <li>- Gradación y textura de los agregados.</li> <li>- Aditivos.</li> </ul>
<b>Resistencia del concreto</b>	<b>Definición</b> Capacidad de asumir esfuerzos mecánicos a compresión dependiendo de las características que componen la mezcla.
	<b>Factores que influyen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Relación Agua / material cementante.</li> <li>- Contenido de aire.</li> </ul>
	<b>Influencia de agregados</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Curado.</li> <li>- Ataques químicos externos.</li> <li>- Condiciones ambientales “temperatura, humedad”.</li> <li>- Calidad de materiales.</li> </ul>

<b>Durabilidad</b>	<b>Definición</b> Resistencia a la exposición del clima y factores químicos del entorno que ocasionan abrasiones en su estructura en el tiempo transcurrido durante su uso y vida útil.
	<b>Factores que influyen</b> - Humedecimiento y secado. - Congelamiento y deshielo. - Exposición a sustancias químicas agresivas. - Reacciones químicas de los agregados.

**Fuente:** *Sánchez (2001): "Tecnología del concreto y del mortero"*<sup>38</sup>.

## **2.5 EL CONCRETO REFORZADO.**

### **2.5.1 DEFINICIÓN.**

El concreto reforzado es una combinación de concreto y acero en la que el refuerzo de acero proporciona la resistencia a la tensión de que carece el concreto.

El concreto reforzado es el más popular y desarrollado de estos materiales, ya que aprovecha en forma muy eficiente las características de buena resistencia en compresión, durabilidad, resistencia al fuego y moldeabilidad del concreto, junto con las propiedades de alta resistencia en tensión y ductilidad del acero, para formar un material compuesto que reúne muchas de las ventajas de ambos materiales.

Manejando de manera adecuada la posición y cuantía del refuerzo, se puede lograr un comportamiento notablemente dúctil en elementos sujetos a flexión. Por el contrario, el comportamiento es muy poco dúctil cuando la falla está regida por otros estados límite como cortante, torsión, adherencia y carga axial de compresión. En este último caso puede eliminarse el carácter totalmente frágil de la falla si se emplea refuerzo transversal en forma de estribo.

El concreto está sujeto a deformaciones importantes por contracción y flujo plástico que hacen que sus propiedades de rigidez varíen con el tiempo; estos fenómenos deben ser considerados en el diseño, modificando adecuadamente los resultados de los análisis elásticos y deben tomarse

---

<sup>38</sup> Sánchez 2001 "Tecnología del concreto y del mortero" Universidad Javeriana, pág. 111.

precauciones en la estructuración y el dimensionamiento para evitar que se presenten flechas excesivas o agrietamientos por cambios volumétricos.

### **2.5.2 INTERACCIÓN ENTRE EL ACERO DE REFUERZO Y EL CONCRETO.**

El concreto es un material compuesto por los agregados y la pasta que es producto de la reacción del cemento y el agua. La estructura y composición de la pasta de cemento, determina la durabilidad y el funcionamiento del concreto a largo plazo.

El concreto comúnmente es reforzado con barras de acero. La protección que el concreto le proporciona al acero y su capacidad para soportar diferentes tipos de degradación, también depende de su estructura. Entre las características que posee este material, que lo hacen ser el más usado en la industria de la construcción, se puede mencionar: Resistencia mecánica, poca variación volumétrica, baja conductividad térmica y resistente a la penetración del agua, a los ataques químicos y al desgaste, requiere poco mantenimiento cuando se fabrica apropiadamente.

El concreto reforzado, además de poseer características mecánicas muy amplias, ha demostrado poseer una durabilidad adecuada para la mayoría de los usos a los que se le destina. Esta durabilidad de las estructuras de concreto reforzado es el resultado natural de la acción protectora, que el concreto ejerce sobre el acero. Debido a las reacciones de hidratación del cemento con el agua, el concreto resulta un sólido compacto y denso, pero poroso. Entonces, aunque el recubrimiento del acero supone una barrera física, ésta es permeable en cierta medida y permite el acceso de elementos agresivos hasta el acero.

En cuanto a la alcalinidad del concreto, es debida, principalmente al hidróxido cálcico que se forma durante la hidratación de los silicatos del cemento y a los álcalis que pueden estar incorporados como sulfatos en el Clinker. Estas sustancias sitúan el pH de la fase acuosa contenida en los poros en valores entre 12.6 y 14, es decir, en el extremo más alcalino de la escala de pH. A estos valores de pH y en presencia de una cierta cantidad de oxígeno, los aceros de las armaduras se encuentran

pasivadas, es decir, recubiertas de una capa de óxidos transparente, compacta y continua que lo mantiene protegido por periodos indefinidos, aún en presencia de humedades elevadas en el concreto.

## **2.6 EL FENÓMENO DE LA CORROSIÓN.**

### **2.6.1 CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO.**

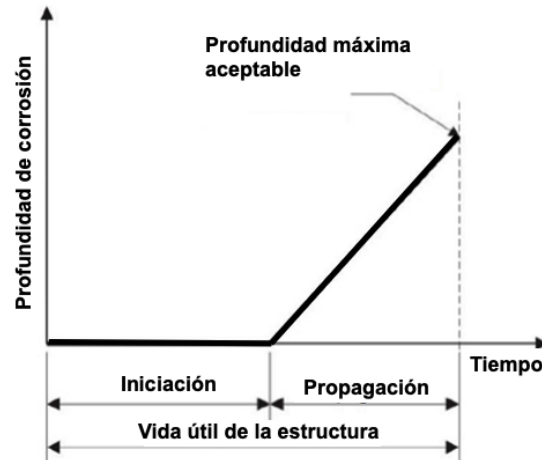
La corrosión es un fenómeno que se lleva a cabo a través de un comportamiento electroquímico, en el que hay un intercambio de electrones por medio de una reacción química, llevándose a cabo la pérdida de estos para que ocurra la oxidación. El proceso de corrosión del acero dentro del concreto puede desarrollarse en dos procesos individuales: el proceso anódico, que es la disolución del acero y se produce cuando la capa protectora del acero se elimina por un ambiente ácido, o se hace permeable por la acción de los iones cloruro; y el proceso catódico, el cual se produce hasta el momento en que la superficie del acero dispone de una cantidad suficiente de oxígeno y agua, los cuales al combinarse con los electrodos suministrados por el ánodo dan lugar a la formación de iones de hidroxilo.

#### **2.6.1.1 FASES DE LA CORROSIÓN.**

Desde el punto de vista de la corrosión de estructuras de concreto reforzado, Tuutti definió un modelo de vida útil que representa el tiempo que tarda una estructura de concreto reforzado, tal como lo muestra la fig. 2.19, en la que se relaciona la vida útil de la estructura con la profundidad de corrosión, mediante un modelo determinístico en el cual se establecen dos fases principales. La primera fase es la iniciación en la cual el acero de refuerzo está pasivado, pero la penetración de sustancias agresivas ( $\text{CO}_2$ , cloruros) a través de la superficie de concreto, puede generar la pérdida de esta pasividad. La duración de la fase de iniciación depende del espesor del recubrimiento, de la relación agua cemento, del método adecuado de compactación del concreto, de la velocidad de

penetración de los agentes agresivos, así como de su concentración necesaria para despasivar el acero y de las condiciones del medio ambiente donde se desarrolle la construcción de las edificaciones.

**Figura 2.19.** Modelo determinístico de la corrosión del acero de refuerzo.



**Fuente:** Flores (2014): “Efecto de la ceniza volante en las propiedades mecánicas y de durabilidad de morteros de reparación expuestos a ambiente industrial y a condiciones controladas de laboratorio”.

La fase de iniciación se termina con la despasivación del acero y da paso a la segunda fase: Propagación de la corrosión, la cual inicia una vez que se ha destruido la capa protectora y propaga la herrumbre por el desarrollo de las reacciones de oxidación en la superficie de las armaduras. Esta fase termina cuando se alcanza un estado a partir del cual las consecuencias de la corrosión no se pueden tolerar más. La corrosión solo tendrá lugar si están presentes el agua y el oxígeno en la superficie del acero de refuerzo.

### **2.6.1.2 TERMODINÁMICA DE LA CORROSIÓN.**

Esta provee la comprensión de los cambios de energía involucrados en las reacciones electroquímicas, así también puede mostrar bajo qué condiciones ocurre o no la corrosión, sin embargo, no es capaz de predecir la velocidad a la cual se llevan a cabo las reacciones. Un concepto

importante es la variación de energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ), que bajo condiciones estándar (temperatura y presión constante) se tiene que:

$$\Delta G = -n \times F \times E$$

Donde:

$\Delta G$ : Incremento de energía libre de Gibbs.

$n$ : Es el número de electrones intercambiados en la reacción.

$F$ : Es la constante de Faraday.

$E$ : Es el potencial de toda la reacción.

Y también bajo condiciones estándar  $\Delta G$ , para una reacción oxidación-reducción, puede calcularse así:

$$\Delta G = \Delta H - T \times \Delta S$$

Donde:

$\Delta G$ : Energía libre de Gibbs o entalpía libre (es la fracción del total de energía, que si puede ser aprovechable como trabajo útil).

$\Delta H$ : Factor de entalpía (energía total del sistema).

$T$ : Temperatura.

$\Delta S$ : Incremento de entropía.

$T \times \Delta S$ : Es la energía no aprovechable del sistema (no se puede utilizar para realizar un trabajo).

En el caso de la entalpía si es negativa, indica que es exotérmico (expulsa energía) y en el caso de la entropía si es negativa, disminuye el desorden y si es positiva se está desordenando (aumenta la entropía), por lo que se tienen 3 casos de energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ):

- ✓  $\Delta G < 0$ , se encuentra ante una reacción espontánea y es negativa, donde el metal no reacciona y es indiferente a los agentes agresivos del medio.



- ✓  $\Delta G > 0$ , en este caso se tiene una reacción no espontánea, el metal es activo y puede corroerse.
- ✓  $\Delta G = 0$ , se tiene un proceso en equilibrio, el metal no reacciona, es indiferente a los agentes agresivos del medio, es un proceso que no es “espontáneo” ni “no espontáneo”.

Para calcular la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ) en estos casos, analíticamente, se dan la entalpia y la entropía de los minerales.

Otro concepto importante, es el potencial Redox, es una forma de medir la energía química de oxidación reducción mediante un electrodo, convirtiéndola en energía eléctrica, este representa la habilidad de aceptar o donar electrones para una reacción oxido reducción; este potencial esta tabulado para varias semirreacciones, las cuales se encuentran en los metales más usados, sin embargo, dicho potencial está determinado bajo condiciones estándar (determinada temperatura, presión y pH).

Los diagramas de Pourbaix, son una representación gráfica de la estabilidad termodinámica de las especies de un metal en un medio específico, que se utilizan para ayudar en la predicción de los estados más estables de un metal, sus productos de corrosión y sus iones asociados en una solución acuosa, son gráficos cuyas abscisas están ocupadas por el potencial y las ordenadas por el pH, por este motivo también son conocidos como diagramas de potencial-pH.

### **2.6.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN.**

Según ASTM G-44, los tres factores más importantes que influyen en la corrosión de una superficie metálica son:

- **pH:** Dependiendo del rango de pH en el que una solución se encuentra, así cambiará la influencia que éste ejerza sobre una superficie metálica, estos rangos son los siguientes:

- **Condiciones muy ácidas ( $\text{pH} < 5$ ):** En dichas condiciones, la relación que mantiene el pH con la velocidad de corrosión es bastante compleja, puesto que dicha relación depende de las especies presentes y del metal involucrado. Estas condiciones favorecen la corrosión por picaduras, corrosión por grietas y corrosión bajo tensión.
- **Condiciones casi neutras ( $5 < \text{pH} < 9$ ):** Cuando el pH de una solución se mantiene en valores cuya tendencia es a ser neutro, la velocidad de corrosión provocada por una solución acuosa a una aleación es independiente al pH. En estas condiciones, la corrosión es mayormente gobernada por la reducción del oxígeno disuelto. De aquí que, a diferencia de condiciones ácidas, se forman capas de pasivación de magnetita en la superficie de hierro y no se logran disolver.

Se debe tomar en cuenta que, aunque el pH no juega un papel importante en la corrosión, aún puede afectar la solubilidad y equilibrio de otros iones que si pudieran tener un rol importante en esta problemática.

- **Condiciones muy básicas ( $\text{pH} > 9$ ):** En muchos casos, una solución con pH muy básico puede aumentar la velocidad de corrosión o causar corrosión a pesar de que no existiera un pH menor. Dicha condición se mantiene hasta alcanzar un pH elevado y propicia la corrosión bajo tensión en el acero al carbono.
- **Temperatura:** En términos generales, el incremento de la temperatura en un medio acuoso que propicie la oxidación de un metal incrementa la velocidad de corrosión. A manera de ejemplo la corrosión del hierro en presencia de oxígeno disuelto en solución tanto en sistemas abiertos como cerrados.

En un sistema cerrado, en donde el oxígeno no deja el líquido, la velocidad de corrosión aumenta casi linealmente desde 40 °C a 160 °C. Por otro lado, en un sistema abierto, la

velocidad aumenta hasta los 80 °C, luego empieza a decrecer; esto se debe a que la solubilidad del oxígeno disminuye a menor temperatura. Volviendo al sistema cerrado, al aumentar la temperatura la presión del vapor también lo hace, lo que tiende a mantener al oxígeno aun disuelto. La temperatura también condiciona la constante de ionización del agua: esta aumenta con la temperatura, lo que significa que el pH disminuye si la temperatura aumenta.

- **Velocidad de flujo:** Este factor es una variable compleja, es decir, depende en gran medida del sistema en el que se aplica (material, constituyentes del fluido, propiedades físicas del fluido, geometría y mecanismo de corrosión). En varios sistemas, la velocidad de corrosión está regida por la velocidad de transferencia de los agentes corrosivos entre el fluido y la superficie del material. Cuando esto sucede, la velocidad de corrosión se convierte en una función del gradiente de concentración<sup>39</sup>.

Los procesos de deterioro mayormente considerados por los códigos de construcción son: congelamiento y deshielo, exposición a agentes químicos agresivos, abrasión, corrosión de los metales y otros materiales embebidos en el concreto y reacciones químicas de los agregados. Dentro de la categoría de exposición a agentes químicos agresivos, se encuentra el deterioro por carbonatación, fenómeno que propicia corrosión en las barras de acero embebidas en el concreto. La corrosión de la armadura en general es la causa más común del deterioro de las estructuras del concreto, y el problema más grave de durabilidad en la Ingeniería de la Construcción.

Las causas externas de carácter no estructural que suelen afectar la durabilidad de una estructura de concreto son consecuencia principalmente de sus condiciones de exposición y servicio.

---

<sup>39</sup> Gonzalo et al. (2016): “Caracterización del potencial de corrosión en instalaciones superficiales de los pozos A-1 y A-2 de un campo geotérmico” (pág. 29).

Las condiciones de exposición se refieren básicamente a las del medio ambiente y el medio de contacto con el concreto en el sitio.

El medio ambiente, la temperatura y la humedad son características ambientales cuyas magnitudes y variaciones pueden afectar la obtención de propiedades y el desempeño del concreto en sus diferentes modalidades y etapas, desde recién mezclado hasta completamente endurecido.

El concreto en la estructura puede tener contacto permanente, cíclico o eventual con diversos medios, dependiendo de aspectos tales como la localización, tipo y funciones de la estructura y de su posición dentro de ésta. No necesariamente todos los medios de contacto ejercen acciones que afectan la durabilidad del concreto, ni tampoco un mismo medio debe juzgarse siempre igual. Más bien lo que procede es identificar los agentes que pueden dañar al concreto, evaluar el grado de concentración en que son dañinos y cuantificar su existencia en el medio de contacto. A continuación, se muestran diferentes medios de contacto a los cuales puede estar sujeta una estructura:

- Suelo y agua freática.
- Aguas superficiales.
- Agua de mar.
- Aguas residuales.
- Salmueras.
- Aire atmosférico.
- Sustancia químicas.

Las condiciones de servicio son inherentes a las funciones operativas de cada estructura, en particular se deben tomar en cuenta las prácticas constructivas recomendadas, previas, durante y posteriores a la colocación de los diferentes materiales, hierro, concreto, etc. Las condiciones de

servicio no deben ser alteradas con el fin de cambiar el uso para el que fueron diseñadas las estructuras, así también para que las condiciones de servicio prolonguen la vida útil de la estructura, se debe dar el adecuado mantenimiento a la misma, para evitar el apareamiento de condiciones tempranas que generen el inicio de la corrosión en el acero de refuerzo de las estructuras, provocando un prematuro deterioro de esta. Puesto que el deterioro de un elemento de concreto tiene causas muy variadas y que pueden ocurrir a un mismo tiempo, por lo cual es necesario identificarlas todas y reconocer su posible procedencia, más aún, es necesario saber sus mecanismos de ocurrencia y la magnitud de los daños que pueden provocar, ya que el establecimiento de todas estas condiciones es vital para poder prolongar la vida útil de cualquier estructura.

### **2.6.3 TIPOS DE CORROSIÓN.**

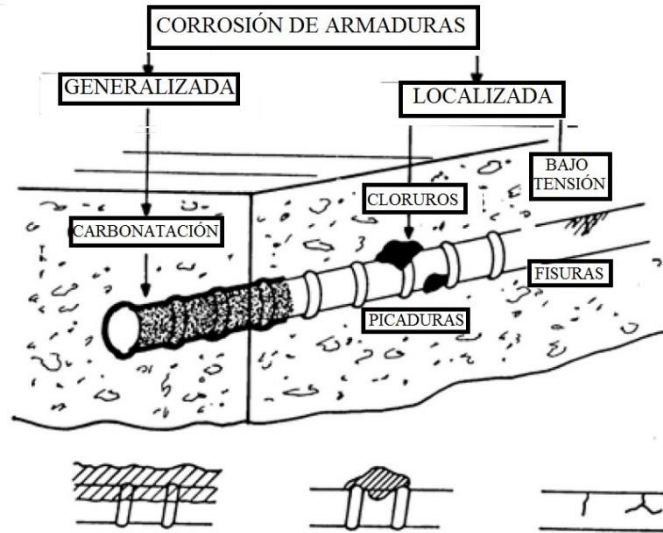
La corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto ocurre por la destrucción de la capa pasivante, debido a los siguientes factores:

- La presencia de una cantidad suficiente de cloruros (añadidos durante la fabricación del concreto o por la penetración del exterior) u otros iones despasivantes en contacto con el acero.
- La disminución de la alcalinidad del concreto cuando éste reacciona con sustancias acidas del medio ambiente.

Las formas que puede adoptar la corrosión son diversas, generalmente se clasifican por la extensión del área atacada, las más frecuentes son: generalizada, localizada por picadura y por fisura.

De acuerdo a la cantidad de área corroída, se pueden considerar dos tipos de corrosión: generalizada y localizada, los iones despasivantes dan lugar a la corrosión localizada.

**Figura 2.20:** Tipos de corrosión en las armaduras y los factores que la generan.



**Fuente:** Flores (2014): “Efecto de la ceniza volante en las propiedades mecánicas y de durabilidad de morteros de reparación expuestos a ambiente industrial y a condiciones controladas de laboratorio” (pág. 14).

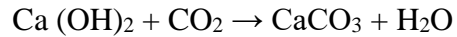
Es decir la corrosión bajo tensión, esta se caracteriza porque en la superficie del metal donde comienza la fisuración se incuba una microgrieta a veces sin casi pérdida de material, orientada perpendicularmente a la dirección de aplicación de la fuerza, la corrosión por cloruros tiene su efecto en la superficie del concreto y se detectan por la fisuración irregular, debido a la despasivación de las armaduras y la corrosión de las mismas, con la consiguiente desintegración del concreto; mientras que la reducción de pH genera la disolución completa de la capa pasivante, dando lugar a una corrosión generalizada, denominada carbonatación, la cual se genera debido a la naturaleza porosa propia del concreto, facilitando así la filtración del  $\text{CO}_2$  acompañado de humedad, generándose así la pérdida de pH, lo cual facilita la corrosión tal como se muestra en la figura 2.20.

### 2.6.3.1 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, este proceso se representa así:

**Ecuación 2.5:** Cambio del hidróxido de calcio a carbonato de calcio.



**Fuente:** *Martínez Martínez, 2004.*

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). El método tradicional para monitorear la carbonatación del concreto está basado en el método colorimétrico, utilizando el indicador de fenolftaleína. La solución normalmente es preparada mediante una proporción de polvo de fenolftaleína diluida en alcohol y agua, el método RILEM CPC-18 recomienda una solución de 1% de fenolftaleína y 70% etanol. El cambio de pH es detectado mediante la aplicación de la solución sobre un corte fresco de concreto, la coloración violeta o morado indica un concreto sin carbonatación. Se ha reportado (Berke, NS. and Schiessl, P., 1988) que el mínimo valor de pH requerido para mantener la capa pasiva del acero embebido en el concreto es de 11.5.

### **2.6.3.2 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 mezcla 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<sup>40</sup>. 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.

#### **2.6.4 POTENCIAL DE CORROSIÓN.**

La tendencia de cualquier metal para reaccionar con el ambiente es indicativa del potencial que desarrolla en contacto con el ambiente.

---

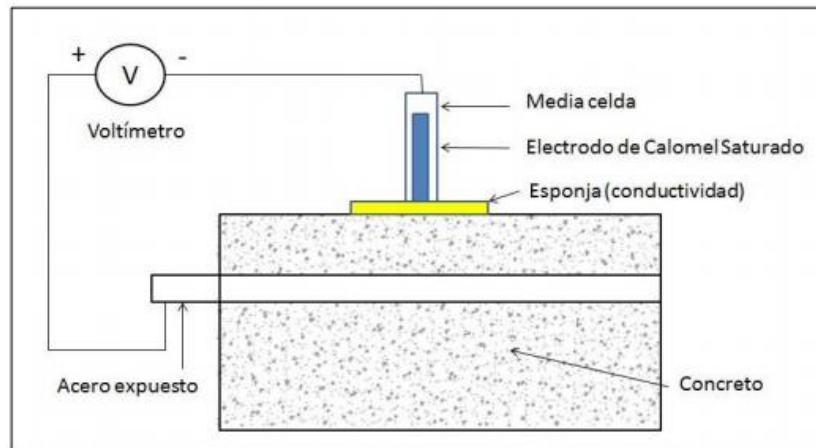
<sup>40</sup> Genescá, et al (1987): “*Más allá de la Herrumbre II*”, Fondo de Cultura Económica, Primera Edición. (pág.12)



En estructuras de concreto reforzado, el concreto actúa como electrolito y el refuerzo desarrollará un potencial dependiendo del ambiente al que este expuesto el concreto, lo cual podría variar de lugar a lugar.

El diagrama esquemático para las mediciones del potencial de circuito abierto consta de una media celda, un electrodo de referencia que puede ser de cobre/sulfato de cobre (empleado en esta investigación), plata/cloruro de plata, electrodo estándar de hidrogeno, calomel cloruro de mercurio, un voltímetro y la probeta a analizar; el esquema es mostrado en la figura 2.21.

**Figura 2.21:** Representación esquemática de las medidas del potencial de circuito eléctrico.



**Fuente:** Aguilar (2013): “Influencia del deterioro por corrosión del acero sobre la realcalinización del concreto reforzado carbonatado” pág. 64.

El principio envolvente en esta técnica es esencialmente las medidas de potencial de corrosión de la barra de refuerzo con respecto a un electrodo estándar de referencia, como el electrodo de calomel (SCE), el electrodo de cobre/sulfato de cobre, el electrodo de plata/cloruro de plata, etc, la probabilidad de corrosión del refuerzo es mostrada en la tabla 2.11.

La medida del potencial de corrosión en una estructura es una magnitud que indica aproximadamente la situación de corrosión o pasividad del acero medido directamente sobre la armadura. Se trata de un parámetro termodinámico, por lo que entrega indicaciones meramente cualitativas que conviene utilizarlas como complemento con otro tipo de ensayos.

**Tabla 2.11:** Condición de corrosión relativa a las medidas del potencial de media celda.

Cobre/Sulfato de Cobre	Plata/Cloruro de Plata/4M KCl	Electrodo Standard de Hidrógeno	Calomel Cloruro de Mercurio	Condición de la Corrosión
> -200 mV	>-106 mV	>+116 mV	>-126 mV	Bajo (10% riesgo de corrosión)
-120 a -350 mV	-106 a -265 mV	+116 a -34 mV	-126 a -276 mV	Intermedio riesgo de corrosión
<-350 mV	< -256 mV	< -34 mV	< -276 mV	Alto (-90% riesgo de corrosión)
<-500 mv	< -406 mV	< -184 mV	< -426 mV	Corrosión severa

**Fuente:** Aguilar (2013). “Influencia del deterioro por corrosión del acero sobre la realcalinización del concreto reforzado carbonatado” pág. 65.

## 2.6.5 DAÑOS POR CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO.

La corrosión es una preocupación en la industria de la construcción debido al deterioro del acero, que se traduce en daños estructurales. Sin embargo, la mayoría de los problemas de corrosión en estructuras de concreto reforzado, no se debe a la pérdida del acero sino al crecimiento del óxido, esto causa la formación de grietas y el desprendimiento del recubrimiento de concreto. La reducción de la capacidad portante de un elemento de concreto reforzado, afectado por la corrosión del acero se debe fundamentalmente a los siguientes efectos que son consecuencias de la corrosión:

- Pérdida de sección efectiva del concreto debido a la fisuración y al desprendimiento del recubrimiento.
- Disminución de la sección y de la ductilidad del acero.
- Pérdida de adherencia concreto-acero.

El mayor o menor progreso de estos factores, es función de la velocidad a la que se desarrolle el proceso, que a su vez depende del tipo de agente agresivo y de las condiciones ambientales. El problema más común generado por la corrosión es el desprendimiento del recubrimiento de concreto, el cual se genera por la formación de óxidos (no densos), que ocupan un volumen muy

grande en la superficie del acero, de hasta diez veces el volumen del acero<sup>41</sup>. Lo anterior combinado a la baja resistencia a la tensión del concreto causa la rotura de este.

### 2.6.5.1 DEGRADACIÓN DEL CONCRETO ESTRUCTURAL.

Los procesos de degradación en el concreto se pueden clasificar como: mecánicos, físicos, estructurales, químicos, biológicos cloruros y carbonatación.

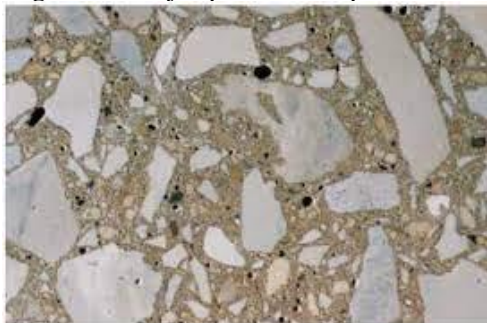
#### 1. Mecánicos: Abrasión, erosión, impacto y explosión.

- **Abrasión:** Se define como resistencia a la abrasión, al grado de oposición de una superficie de concreto a ser desgastada por la fricción. La resistencia a la abrasión del concreto por lo general se ha evaluado dependiendo de la acción específica que se espera que cause el daño en la superficie del material, por lo que no hay un único método para determinarla.

Causas de daños por abrasión:

- **Por frotamiento:** En pavimentos de concreto, debido al tráfico peatonal, camiones ligeros y arrastre, raspadura y deslizamiento de objetos sobre la superficie (frotamiento) como se muestra en la figura 2.22.

Figura 2.22. Ejemplo de daños por abrasión,



Fuente: Arango: “Patología del concreto: Causa de daño en concreto” pág. 160.

- **Por fricción:** En pavimentos de concreto debido a montacargas, camiones pesados y automóviles, con o sin cadenas (frotamiento, raspadura y percusión)

---

<sup>41</sup> Taylor et al (2007) “Corrosion of steel in concrete: Understanding, investigation and repair” (pág 3)

Un concreto con mayor capacidad de compresión tiene más resistencia a abrasión, que el concreto con menor capacidad de compresión. Como la capacidad de compresión depende de la relación agua-cemento y curado, una relación agua-cemento baja y el curado adecuado se hacen necesarios para una mejor resistencia a abrasión.

La resistencia a la abrasión también tiene relación con la granulometría del agregado y la resistencia al desgaste de este, combinado con un buen vibrado del concreto en obra.

En la figura 2.23 se aprecian daños por abrasión en las fundaciones de un puente.

**Figura 2.23.** Fallas en estructuras daños por abrasión.



**Fuente:** Artículo 1979 “Erosión en pilas de puentes” pág. 2.

- **Erosión:** Se define como el deterioro causado por la acción abrasiva de fluidos o sólidos en movimiento, la magnitud depende del número, velocidad, tamaño, perfil, densidad y dureza de las partículas en movimiento por unidad de tiempo. Siendo producido por acciones mecánicas debido al oleaje, ver figura 2.24.

**Figura 2.24.** Edificio de concreto dañado por las mareas en la playa.



**Fuente:** Cotecno: “Corrosión del refuerzo de acero en hormigón: Causas y protección” publicación en línea pág. 2.

- **Impacto:** En la figura 2.25 se observa el estado en el que quedó un pilar de la planta baja de una estructura, tras sufrir el impacto de una losa de concreto que se desplazó como consecuencia de la riada, provocada por la rotura de un depósito de agua. Tras el fuerte golpe el pilar pasó a trabajar a tracción, estado tensional para el que no estaba diseñado, además de sufrir pequeños desprendimientos de concreto dejando las armaduras al aire.

**Figura 2.25.** Daño de un pilar por impacto.



**Fuente** Instituto Superior Técnico: "Patologías del Hormigón Armado: Anomalías y Mecanismos de Deterioro" pág. 58.

- **Explosión:** Una vez que el concreto se calienta, el cemento dentro del concreto se deshidrata y termina perdiendo parte del contenido de agua en forma de vapor. Este vapor

de agua comienza a alejarse de la fuente de calor, pero queda atrapado dentro de la estructura de concreto. Esta es la razón por la cual el concreto explota a altas temperaturas, como lo muestra la figura 2.26.

**Figura 2.26.** Daño del concreto por exposición a altas temperaturas.



**Fuente:** Arango: *“Introducción a la patología rehabilitación y refuerzo del hormigón estructural”* pág 21.

**2. Físicos: Debido a variaciones térmicas naturales, tales como los ciclos de hielo-deshielo, o artificiales, tales como los producidos por los incendios.**

- **Hielo-deshielo:** Una de las causas principales de la degradación del concreto en regiones frías, es el efecto provocado por los ciclos hielo-deshielo. La transición del hielo al deshielo está acompañada por cambios dimensionales y cambio de la tensión interna, pudiendo causar la pérdida de la capacidad resistente del concreto.

En ambientes sujetos a grandes variaciones de temperatura, que nos llevarán a ciclos de hielo-deshielo, el concreto será susceptible al descascarillado y al daño microestructural interno. Para evitar este fenómeno y que no se produzcan tensiones peligrosas es necesario que la pasta que conforma el hormigón contenga aire ocluido en su interior.

En los países de clima continental el deterioro por ciclos repetidos de hielo-deshielo, es causa frecuente del deterioro del concreto. Este problema se ve incrementado por el uso de las sales fundentes empleadas en los pavimentos, ver figura 2.27.

**Figura 2.27:** Daño en estructuras de concreto debido al congelamiento y deshielo.



**Fuente:** Arango: “*Patología del concreto: Causa de daño en concreto*” pág. 85.

- Incendios: Cuando el concreto aumenta de temperatura, se produce una disminución de las propiedades mecánicas, que causa la reducción de la capacidad de carga de un elemento y se producen transformaciones en la microestructura de la pasta de cemento y agregados, cambios de volumen inducidos por tensiones térmicas, además de generar expansiones, tensiones, deformaciones y reducción de resistencia en los componentes estructurales.

A esto se suma la degradación de la adherencia en el acero inducida por la temperatura que influye en la propagación de grietas en el concreto y que tiene un efecto sobre la integridad de este, ver figura 2.28.

El concreto es un material de construcción con un coeficiente de conductividad térmica relativamente bajo, por lo que el calor se extiende lentamente, pero puede producirse un gradiente térmico significativo dentro del elemento, debido a la diferencia de temperatura entre la superficie expuesta y el interior de este.

El daño por incendio también puede resultar inapreciable en un primer momento y manifestarse claramente unos días después del accidente. Para ello es necesaria una intervención inmediata de descontaminación y detención de los procesos oxidativos.

**Figura 2.28:** Daño en estructuras de concreto causado por incendios.



**Fuente:** Arango: “*Patología del concreto: Causa de daño en concreto*” pág. 82.

### **3. Estructurales: Sobrecargas, asentamientos y cargas cíclicas.**

- **Sobrecargas:** Se refiere a las fisuras y daños que aparecen en el concreto, como consecuencia de las tensiones que han rebasado su capacidad resistente. Dichas tensiones (fuerzas por unidad de superficie) son causadas por cargas, tales como los pesos propios de los elementos estructurales, sobrecargas gravitatorias, etc. Para el estudio de las fisuras hay que partir del hecho de que el concreto no es un material homogéneo, por tanto, su comportamiento mecánico varía en función no solo de las características mecánicas de concreto y acero, sino de la situación y cantidad relativa de cada uno de ellos en las diferentes secciones del elemento, así como las condiciones de adherencia de ambos, incidiendo en este caso la relación agua cemento, la granulometría del agregado, falta de vibración en el concreto y el curado de este.

En la figura 2.29 se logra apreciar daños por sobrecarga en estructuras de concreto.



**Figura 2.29:** Daño en estructuras de concreto causado por sobrecargas.



**Fuente:** Arango: *“Introducción a la patología rehabilitación y refuerzo del hormigón estructural”* pág. 21.

- **Asentamientos:** La función de todo cimiento es la de soportar y transmitir al terreno, sobre el que descansa la combinación de cargas debidas al peso propio y a las sobrecargas, de forma que no se produzcan asentamientos diferenciales u otros movimientos que puedan comprometer la estabilidad o causar daños. El subsuelo sobre el que descansa el cimiento es comprimido y reacciona ejerciendo una presión hacia arriba para resistir la carga del cimiento. De esta forma se crea un equilibrio de fuerzas entre estructura, cimiento y suelo, pero cuando alguno de estos tres factores se desequilibra, sufre alguna variación, se rompiéndose este equilibrio y surge el riesgo de producirse asentamientos, pudiendo generarse fisuras en las estructuras, provocando esto la penetración de elementos extraños que puedan afectar al concreto y al acero, ocasionando la degradación de estos. En la figura 2.30 se presentan daños ocasionados por asentamientos en del suelo, una carga mayor a la capacidad portante del suelo generara esfuerzos de tensión en el concreto, provocando

fisuras en este, permitiendo que agentes corrosivos penetren por estas, provocando de esta manera el inicio de la corrosión en el acero de refuerzo.

**Figura 2.30:** Daño en estructuras de concreto causado por asentamiento.



**Fuente:** Arango: “*Patología del concreto: Causa de daño en concreto*” pág. 75.

- **Cargas Cíclicas:** Todas las estructuras acumulan daño gradualmente durante su vida útil. En general, cualquier estructura es susceptible de presentar fallas, ya que las condiciones reales de servicio y/o las características de los materiales, pueden discrepar de las que esperaba el diseñador. Una de las acciones a las que se atribuyen las fallas en diversas estructuras es la fatiga. Esta se define como el daño de un material resultante de la aplicación de esfuerzos repetitivos provenientes de cargas cíclicas (Torres, 2007). El deterioro por fatiga se inicia con defectos o microgrietas que actúan como zonas de concentración de esfuerzos, generando la aparición y propagación de grietas. Específicamente una grieta de fatiga se puede iniciar en cualquier lugar de un componente, donde el esfuerzo y la deformación sean lo suficientemente altos para causar un

deslizamiento alterno continuo, luego sigue un periodo de propagación, también por deslizamiento alterno, hasta que la grieta alcanza un tamaño crítico, ver figura 2.31.

**Figura 2.31:** Daño en estructuras de concreto causado por cargas cíclicas.



Fuente: *Publicación en línea "Fallas en Estructuras (20fr.com)"*.

**4. Químicos: reacciones álcali-agregado, ataque por ácidos, ataque por sulfatos y ataque por agua.**

- **Reacciones álcali-agregado (RAA):** Esta es una reacción de los áridos silíceos reactivos con los constituyentes alcalinos del concreto, en presencia de agua. La reacción álcali agregado se identificó por primera vez como causa del deterioro del concreto hace más de

60 años (Stanton, 1940). Desde este descubrimiento, se han conocido muchos casos a lo largo de todo el mundo, también se la conoce como “cáncer del concreto”.

Está ampliamente aceptado que los tres componentes necesarios para que se produzca la ASR en una estructura de concreto son:

- Sílice reactiva (de los áridos).
- Álcalis suficientes (principalmente del cemento Portland, pero también de otros constituyentes del concreto).
- Humedad suficiente.

En la primera etapa, los álcalis que provienen principalmente del cemento migran hacia la solución acuosa de los poros y entran en contacto con los áridos reactivos, formando un gel silíceo alcalino.

En una segunda etapa de la reacción, este gel silíceo reacciona con la cal libre presente en el concreto, para formar un nuevo tipo de gel que puede absorber una gran cantidad de agua y por lo tanto tiene una alta propiedad de hinchamiento. Este efecto genera fuerzas de expansión en el concreto endurecido, como lo muestra la figura 2.32. Los modelos típicos de daño por RAA aparecen en forma de una superficie fisurada superficialmente con formas caprichosas. Pero esa fisuración se propaga hacia el interior del concreto con el tiempo y la expansión continúa indefinidamente mientras el agua siga absorbiendo el gel reactivo.

Las sales de magnesio en el agua marina son las más agresivas. La causa de la degradación sigue siendo principalmente la formación de etringita que genera la expansión del concreto dando lugar a la fisuración. El ataque comienza desde la superficie y penetra a lo largo del tiempo hacia el corazón de la estructura de forma lenta.

**Figura 2.32:** Daño en estructuras de concreto causado por alcalinidad de agregados.



**Fuente:** *Reparación del hormigón armado “deterioro por ataques químicos” publicación en línea pág. 1.*

- **Ataques por ácidos:** En condiciones normales el concreto (de recubrimiento) provee de un ambiente protector al acero de refuerzo ya que su elevada alcalinidad ( $\text{pH} > 12,5$ ), hace que el acero se encuentre en un estado denominado pasivo, siendo su velocidad de corrosión despreciable. No obstante, la presencia de agentes agresivos, cloruros, sulfatos y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la superficie de las armaduras, causan la pérdida de pasividad del acero y crea condiciones propicias para el inicio de la corrosión de las armaduras, ver figura 2.33.

**Figura 2.33:** Daño en estructuras de concreto causado por la acidez de agentes agresivos.

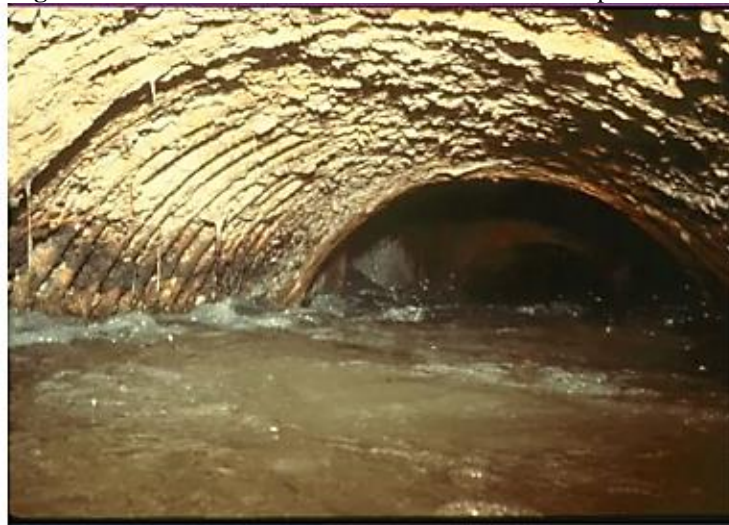


**Fuente:** Argos 360: *“Corrosión del acero de refuerzo” publicación en línea, pág. 2.*

- **Ataques por sulfatos:** Los sulfatos están siempre presentes en el cemento y forman la etringita (cristales en forma de agujas) durante las primeras etapas. Esto es debido principalmente al yeso (sulfato cálcico) añadido en la planta de cemento, que reacciona con los aluminatos del cemento (reguladores de fraguado), durante las primeras horas después del amasado con el agua para la producción de concreto. Los agentes expansivos a base de sulfatos también se suelen añadir cuando se hacen concreto o morteros con retracción compensada.

Los daños en el concreto por reacciones con sulfatos surgen cuando penetran en el concreto o hay adición posterior de sulfatos. Este fenómeno se denomina “formación diferida de etringita” o “etringita secundaria”. Ocurre de una manera heterogénea y muy posterior (después de meses o incluso años). Estas reacciones expansivas pueden producir también fisuración, desprendimientos del concreto y pérdida de resistencia, ver figura 2.34, puesto que ocurren cuando el concreto ya está endurecido y es un cuerpo rígido.

**Figura 2.34:** Daño en estructuras de concreto causado por sulfatos.



**Fuente:** Arango: “*Patología del concreto: Causa de daño en concreto*” pág. 96.

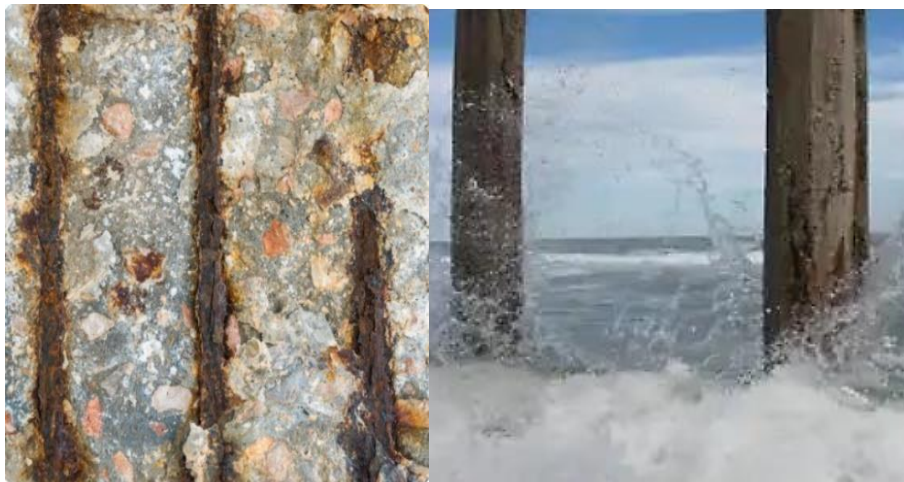
- **Ataques por agua:** El agua de mar es una fuente principal de cloruros que pueden atacar el concreto. Su ataque proviene de una reacción más o menos simultánea de sulfatos,

cloruros y otros constituyentes del cemento. Las sales de magnesio en el agua marina son las más agresivas. La causa de la degradación al igual que en el ataque por sulfatos, sigue siendo principalmente la formación de etringita que genera la expansión del concreto, dando lugar a la fisuración, ver figura 2.35.

El ataque comienza desde la superficie y penetra a lo largo del tiempo hacia la estructura. Las áreas con más riesgo en las estructuras marinas son las situadas en la zona de carrera de marea, puesto que la acción mecánica del oleaje se añade a la reacción química, eliminando más concreto dañado, y suministrando acceso a más cantidad de cloruros (aparte del efecto dañino de los ciclos de sequedad-humedad).

El agua limpia o blanda produce un ataque menos común, pero que puede ocurrir particularmente en zonas montañosas o con condiciones de agua ácida / blanda en el terreno, por ejemplo, en zonas con rocas muy densas tales como el granito o en la parte inferior de las losas de los puentes, donde se puede producir condensación. El ataque por aguas blandas produce daños debidos al deslavado de la portlandita y cal libre de la matriz de cemento.

**Figura 2.35:** Daño en estructuras de concreto causado por agua salada.



**Fuente:** Tecnología del hormigón armado “Hormigón armado en ambientes marinos” pág. 2.

**5. Biológicos: Ataque por hongos:** Los hongos son organismos que al igual que los mohos, proliferan ampliamente en superficies húmedas. Durante su ciclo de vida, expulsan diversos ácidos orgánicos que se combinan con los diferentes compuestos del concreto, generando óxidos y oxalatos como lo muestra la figura 2.36.

**Figura 2.36:** Daño en estructuras de concreto causado por hongos.



**Fuente:** “La poliuria protegiendo el hormigón” texto en línea pág. 1.

En la práctica se pueden presentar simultáneamente estos procesos, con frecuencia dando lugar a la acción sinérgica.

## **6. Cloruros y Carbonatación.**

- **Cloruros:** La corrosión puede ser desencadenada por iones cloruro presentes en la superficie del acero, con una concentración crítica en peso de 0,4 %, respecto al contenido de cemento en el concreto. Siendo éstos los principales causantes de la corrosión de las armaduras en estructuras expuestas al ambiente ácido y en estructuras construidas con materiales contaminados, los iones cloruro pueden penetrar desde el exterior a través de la red de poros y también los iones cloruros pueden incorporarse al concreto como contaminante de alguno de los componentes de la mezcla con el que se elabora el mismo, los cuales pueden ser: Agregados fino o grueso, agua, aditivos, etc.; como lo muestra la figura 2.37.



**Figura 2.37:** Corrosión localizada por iones de cloruro.



**Fuente:** “Patología en la edificación: carbonatación versus ataque por cloruros” pág. 2.

- **Carbonatación:** Una consecuencia de la carbonatación es la disminución del pH del concreto con un valor de 13, que corresponde a un concreto nuevo y no carbonatado, hasta un valor de 9. El “frente” de carbonatación, que marca la profundidad de penetración del dióxido de carbono y la consecuente reducción de la alcalinidad pasivante, puede llegar a la profundidad de las armaduras, en esta situación el acero ya no está “naturalmente” protegido por la alta alcalinidad del concreto y con la presencia de humedad y oxígeno se produce la corrosión, llevando a fisuración y desprendimiento del recubrimiento de concreto, ver figura 2.38.

**Figura 2.38:** Daños por carbonatación en estructuras de concreto.



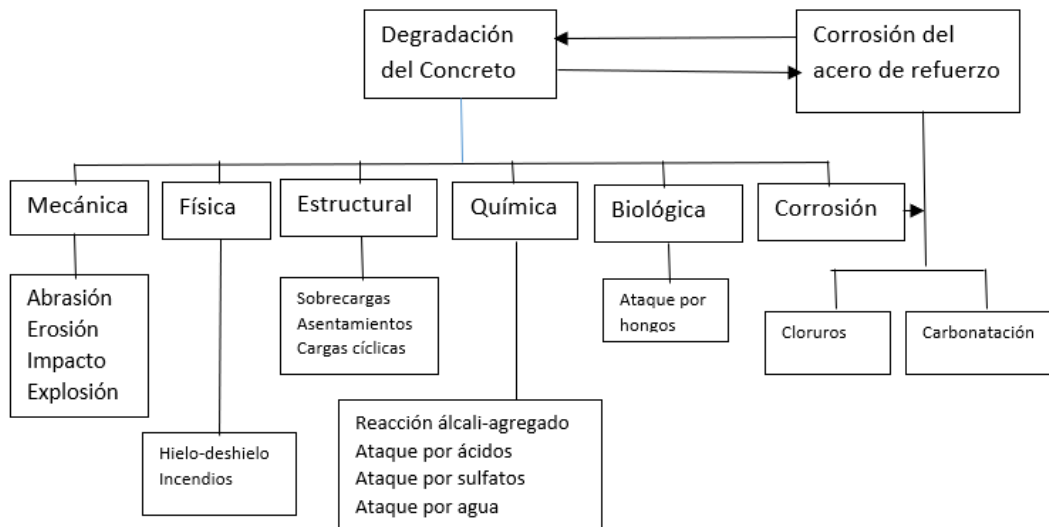
**Fuente:** ANFAPA (Asociación de fabricantes de mortero) “Causas químicas el deterioro del hormigón” pág. 2.

Las alteraciones (agrietamiento por asentamiento plástico, retracción plástica o por secado, retracción térmica) que ocurren en el concreto antes de que la estructura ha sido terminada, es decir, dentro de las primeras horas de su colocación, hasta meses después de la colocación del concreto, comúnmente no se consideran como fenómenos de deterioro, a pesar de que son importantes para la durabilidad de la estructura.

Los mecanismos de deterioro del concreto y la corrosión del acero de refuerzo, están directamente relacionados. Dichos mecanismos generan la destrucción del recubrimiento de concreto o la aparición de micro fisuras que comprometen sus características protectoras, como lo muestra la fig. 2.39.

Además, el fenómeno de la corrosión, debido a la acción expansiva de los productos de corrosión, genera agrietamiento o delaminación del concreto y reduce su adherencia con el acero de refuerzo. La mayoría de las grietas aleatorias que aparecen a edad temprana, aunque son anti estéticas, raramente afectan la integridad estructural o la vida útil del concreto.

**Figura 2.39:** Causas de deterioro de estructuras de concreto reforzado.



**Fuente:** “Efecto de la ceniza volante en las propiedades mecánicas y de durabilidad de morteros de reparación expuestos a ambiente industrial y a condiciones controladas de laboratorio” pág. 10.

### **2.6.5.2 AGRIETAMIENTO.**

La corrosión del refuerzo genera daños variados a estructuras de concreto que influyen en la capacidad de carga; entre estos daños se puede mencionar el agrietamiento del recubrimiento del concreto.

El acero de refuerzo está protegido de la corrosión por una capa pasiva de productos de hidratación del cemento con un ambiente altamente alcalino. Sin embargo, en ambiente marino los iones-cloruro del agua de mar se acumulan en la superficie del concreto y migran lentamente a través del recubrimiento de este hasta llegar a la superficie del refuerzo. Cuando la concentración de iones-cloruro en la superficie del acero de refuerzo alcanza el valor crítico, la capa pasiva protectora del acero se rompe y comienza el proceso de corrosión activo. La generación de la grieta se suele producir en tres etapas:

- 1) Periodo de iniciación del agrietamiento, durante el cual las grietas se desarrollan hasta alcanzar la superficie del concreto.
- 2) Periodo de propagación del agrietamiento, durante el cual crece el ancho de grieta, pudiendo producirse el desprendimiento del recubrimiento del concreto.
- 3) Cuando la propagación puede progresar juntamente con otras grietas para dar lugar al desprendimiento de trozos enteros del recubrimiento.

### **2.6.6 PRINCIPALES ENSAYOS DE CORROSIÓN SEGÚN SU NORMATIVA DE PROCEDENCIA.**

En este apartado clasificaremos algunos de los principales ensayos de corrosión según su organismo de procedencia (ASTM, NACE, ISO o UNE) y haremos una breve descripción de cada ensayo. Los principales organismos son: ASTM que es el organismo de normalización en Estados Unidos, NACE es una sociedad internacional especializada en el control de corrosión y reconocida

mundialmente, ISO es la organización internacional de normalización encargada de promover el desarrollo de normas internacionales de fabricación y finalmente UNE es el organismo del estado español encargado de fijar las normas.

De acuerdo con investigaciones realizadas en este estudio, en El Salvador a esta fecha no se han realizado ensayos aplicando las normas NACE de corrosión, pero se presentan a continuación estas normas aplicadas internacionalmente.

### 2.6.6.1 NORMAS NACE.

**Tabla 2.12:** Normas NACE de corrosión.

Código	Título	Año	Material al que se aplica	Observaciones.
TM0169	“Laboratory Corrosion Testing of Metals”.	1995	Varios	Describe los factores que influyen los ensayos de corrosión en el laboratorio. Incluye preparación de muestras, condiciones de ensayo, métodos de limpieza y evaluación del grado de corrosión.
TM049	“Standard Test Method Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection on Underground or Submerged Metallic Piping Systems”.	2002	Acero	Incluye procedimientos de evaluar la corrosión en acero situado bajo tierra.
RP0775	“Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations”.	2005	Varios	Destaca procedimientos de análisis y control de la corrosión. También incluye como calcular grados de corrosión y como almacenar los datos.
TM0177	“Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H <sub>2</sub> S Environments”.	2005	Acero	Cubre la examinación de la corrosión del acero sometido a esfuerzos en ambiente acuoso ácido, con contenido de H <sub>2</sub> S.

**Fuente:** Martí (2011): “Estudio comparativo de la normativa existente para la evaluación del grado y velocidad de corrosión en aceros para la construcción”.

En El Salvador, se han realizado ensayos de corrosión en niebla salina, según la norma ASTM B-117, donde se realizaron 3 ensayos de corrosión en tres placas de acero dulce con diferentes capas

de pintura y secadas al horno, este fue un estudio realizado en la Universidad de El Salvador, el cual se puede consultar como tesis: “Estudio de corrosión en niebla salina sobre placas de acero dulce pintadas y secadas al horno”, presentado por Saravia M.A, julio del 2020 pagina 42.

A continuación, se presentan las normas ASTM que se usan a nivel internacional.

### 2.6.6.2 NORMAS ASTM

**Tabla 2.13:** Normas ASTM de corrosión.

Código	Título	Año	Material al que se aplica	Observaciones.
ASTM B117	“Standard Practice for Operating Salt Spray Fog Apparatus”.	2009.	Varios.	Ensayo para evaluar la corrosión utilizando una cámara climática.
ASTM C876	“Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”.	2009.	Acero.	Adecuado para evaluar en servicio y para su uso en el desarrollo de futuras investigaciones.
ASTM C1202	“Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”.	2009	Varios.	Método para determinar la resistencia a la penetración de iones cloruro en el hormigón.
ASTM G16	“Standard Guide for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data”.	2004	Varios.	Guía que enseña cómo aplicar análisis estadístico de los datos de corrosión.
ASTM G31	“Standard Practice for Laboratory immersion corrosion testing of metals.”	2004	Varios.	Especifica un ensayo para determinar la corrosión de metales en laboratorio mediante la inmersión de los metales en diferentes soluciones.
ASTM G44	“Standard Practice for Exposure of Metals and alloys by alternate immersion in Neutral 3,5% sodium Chloride Solution.”	2005	Varios.	Método de control de corrosión que consiste en sumergir los metales en una solución del 3,5 % de cloruro sódico alternando unos ciclos.
ASTM G46	“Standard Guide for examination and evaluation of pitting corrosion.”	2005	Varios.	Incluye métodos para evaluar y examinar la corrosión por picadura.
ASTM G101	“Standard Guide for estimating the atmospheric Corrosion Resistance of Low alloy Steels. .”	2010	Acero.	Incluye una guía para estimar la corrosión atmosférica de aceros de baja aleación.

ASTM G103	“Standard Practice for Evaluating Stress-Corrosion Cracking Resistance of Low Copper 7XXX Series Al-Zn-MgCu Alloys in Boiling 6% Sodium Chloride Solution.”	2011	Aleaciones de acero.	Ensayo para evaluar la corrosión en aleaciones mediante la inmersión en solución salina.
--------------	---	------	----------------------	--

**Fuente:** Martí (2011): “Estudio comparativo de la normativa existente para la evaluación del grado y velocidad de corrosión en aceros para la construcción.”

### 2.6.6.3 NORMAS ISO.

En El Salvador se ha realizado la caracterización de la agresividad de las atmosferas sobre el acero al carbono, tales como las rurales, urbanas, industriales y marinas, de acuerdo con la norma ISO 9223, determinando así, que las zonas más agresivas en el país son:

- Zona urbana: El área metropolitana de San Salvador más específicamente en el Bulevar de los Proceres, ya que esta zona representa el flujo vehicular más elevado del AMSS
- Zona rural: Comasagua, los planes de Renderos y San José Villanueva.

Esta información puede ser consultada como investigación técnica: “Corrosión del acero al carbono y del aluminio en diferentes tipos de atmosferas de El Salvador” presentado por la investigadora del departamento de ingeniería de procesos y ciencias ambientales de la UCA, Menjívar C.E, pagina 187.

**Tabla 2.14:** Normas ISO de corrosión.

Código	Título	Año	Material al que se aplica	Observaciones.
ISO 9223	“Corrosion of metals and alloys - corrosivity of atmospheres – Classification.”	1992	Varios.	Define 5 categorías de corrosividad dependiendo de la atmosfera al que éste sometido el metal.
ISO 9224	“Guiding values for the corrosivity categories.”	1992	Varios.	Guía para distinguir los efectos de la corrosión en las categorías de la norma ISO 9223.
ISO 11463	“Evaluation of pitting corrosión.”	1995	Varios.	Guía que enseña cómo tratar la corrosión por picadura.
ISO 17864	“Determination of the critical pitting temperature under potentiostatic control.”	2005	Acero inoxidable.	Ensayo rápido de medida de la temperatura crítica dónde se produce corrosión por picadura.

ISO 16151	“Accelerated cyclic tests with exposure to acidified salt spray, "dry" and "wet" conditions.”	2005	Varios.	Método de evaluación de la corrosión en ambientes exteriores expuestos a ambientes de lluvia ácida.
ISO 8407”	“Removal of corrosion products from corrosion test specimens.	2009	Varios.	Especifica un procedimiento para extraer las partes corroídas sin grandes movimientos del metal base.

**Fuente:** Martí (2011): *“Estudio comparativo de la normativa existente para la evaluación del grado y velocidad de corrosión en aceros para la construcción.”*

**CAPÍTULO 3:**  
**DESARROLLO**  
**EXPERIMENTAL**



## **INTRODUCCIÓN.**

En este capítulo se presentan los ensayos necesarios para la fabricación de los especímenes de prueba, empleados para determinar la incidencia de la sustitución de puzolanas por cemento en la fabricación de concreto, estas pruebas se realizaron en tres etapas, la primera etapa son los ensayos realizados a los materiales empleados para la fabricación del concreto, que son:

1.a Peso volumétrico.

1.b Gravedad específica.

1.c Análisis granulométrico.

Estas pruebas fueron realizadas al agregado fino y grueso, lo cual permitió determinar que los mismos cumplieron con las normas para su uso en la fabricación del concreto.

La segunda etapa consistió en los ensayos realizados al concreto en su estado fresco, que son:

2.a Revenimiento.

2.b Temperatura.

La tercera etapa consistió en los ensayos del concreto en su estado endurecido, que son:

3.a. Ensayo a compresión simple.

3.b Ensayo a resistencia a la flexión.

3.c Ensayo de resistencia a la adherencia.

3.d Ensayo de potencial de corrosión.

Los ensayos de compresión simple fueron 54 probetas para 7, 14 y 28 días, para los ensayos de resistencia a la flexión de viguetas fueron 36 probetas, para la resistencia a la adherencia fueron 36 probetas y los ensayos de potencial de corrosión se realizaron a 36 probetas, dichas probetas fueron elaboradas para evaluar el comportamiento mecánico y patológico del concreto al realizar la sustitución de cemento por diferentes porcentajes de CBC y TV, así como también la elaboración

de especímenes sin adición de puzolanas que fueron analizados como muestra patrón o de referencia como lo muestra las tablas 3.1 y 3.2. Las probetas para el análisis a flexión y adherencia fueron sometidas a inmersión-secado, durante ciclos de 7 días por un lapso de 98 días. Ver tablas 3.1 y 3.2.

**Tabla 3.1:** Total de viguetas de ensayo con diferentes porcentajes de CBC.

<b>PORCENTAJE CBC</b>	<b>0%</b>	<b>5%</b>	<b>10%</b>	<b>15%</b>	<b>20%</b>	<b>TOTAL</b>
VIGUETAS (POTENCIAL DE CORROSIÓN Y FLEXIÓN) *	2	2	2	2	2	10
VIGUETAS (POTENCIAL DE CORROSIÓN Y FLEXIÓN) **	2	2	2	2	2	10
CILINDROS (COMPRESION SIMPLE 7 DIAS)	2	2	2	2	2	10
CILINDROS (COMPRESIÓN SIMPLE 14 DIAS)	2	2	2	2	2	10
CILINDROS (COMPRESIÓN SIMPLE 28 DIAS)	2	2	2	2	2	10
CUBOS (ADHERENCIA)*	2	2	2	2	2	10
CUBOS (ADHERENCIA)**	2	2	2	2	2	10
<b>TOTAL</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>70</b>

\* Sin inmersión en agua de mar.

\*\* Inmersión en agua de mar.

**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Tabla 3.2:** Total de viguetas de ensayo con diferentes porcentajes de TV.

<b>PORCENTAJE CBC</b>	<b>0%</b>	<b>5%</b>	<b>10%</b>	<b>15%</b>	<b>20%</b>	<b>TOTAL</b>
VIGUETAS (POTENCIAL DE CORROSIÓN Y FLEXIÓN) *	0	2	2	2	2	8
VIGUETAS (POTENCIAL DE CORROSIÓN Y FLEXIÓN) **	0	2	2	2	2	8
CILINDROS (COMPRESION SIMPLE 7 DIAS)	0	2	2	2	2	8
CILINDROS (COMPRESIÓN SIMPLE 14 DIAS)	0	2	2	2	2	8
CILINDROS (COMPRESIÓN SIMPLE 28 DIAS)	0	2	2	2	2	8
CUBOS (ADHERENCIA)*	0	2	2	2	2	8
CUBOS (ADHERENCIA)**	0	2	2	2	2	8
<b>TOTAL</b>	<b>0</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>56</b>

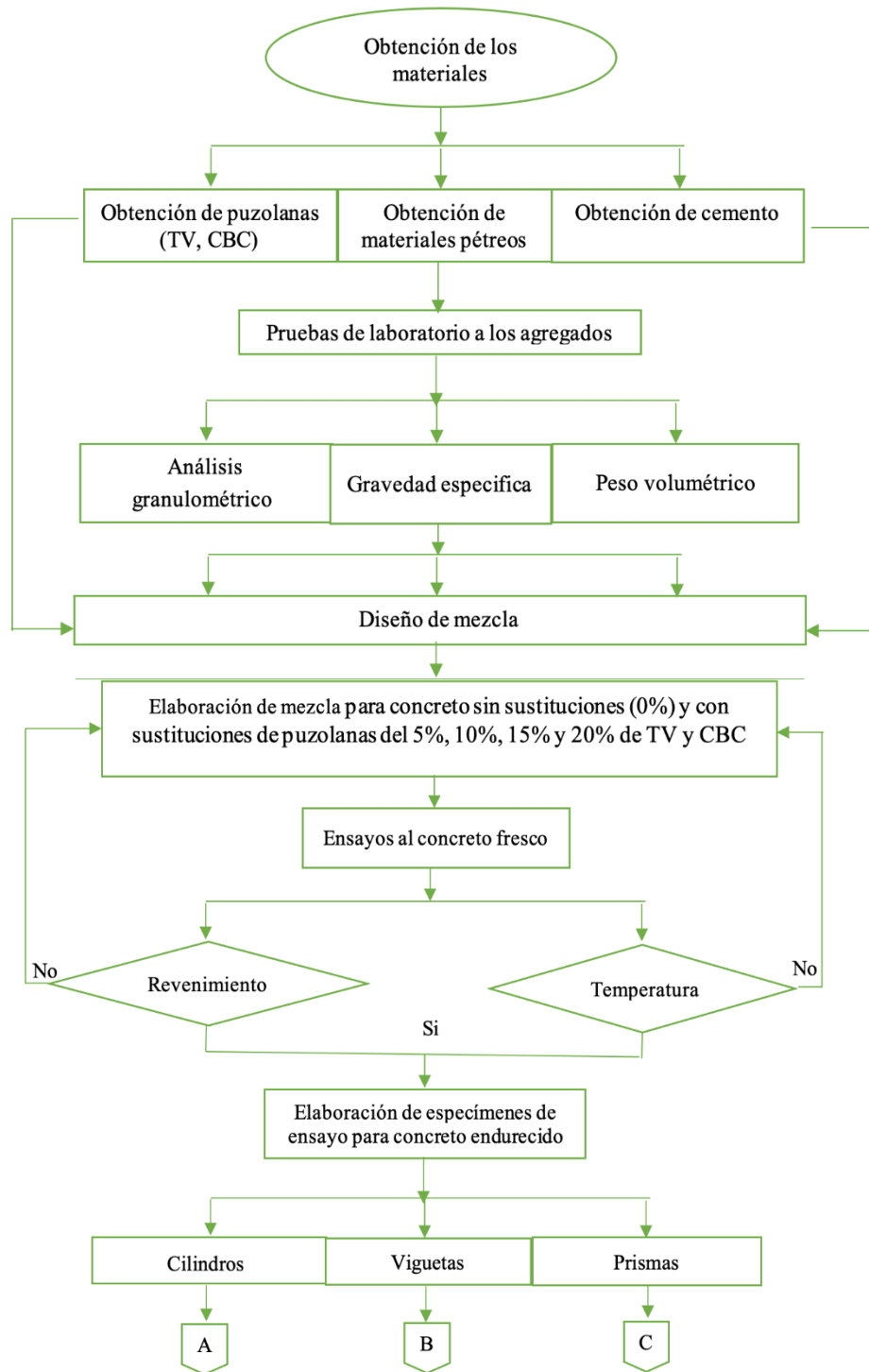
\* Sin inmersión en agua de mar.

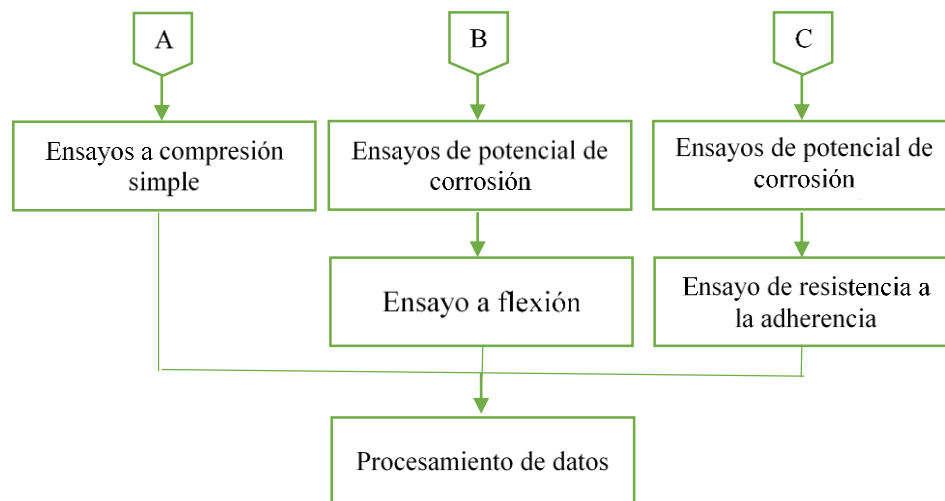
\*\* Inmersión en agua de mar.

**Fuente:** *Elaboración propia.*

En el flujograma que se presenta a continuación se detalla el desarrollo de la investigación.

**Figura 3.1:** Flujograma de orden lógico del trabajo experimental.





**Fuente:** Elaboración propia.

Además, se incluye la caracterización de los agregados pétreos del concreto, que se utilizaron para la fabricación de probetas de ensayo con y sin sustitución de puzolanas, utilizando los siguientes ensayos: peso volumétrico (ASTM-C29), gravedad específica (ASTM-C127), absorción (ASTM-C128) y análisis granulométrico (ASTM-C 136), para posteriormente realizar el diseño de mezclas con las siguientes sustituciones de cemento por puzolanas de: 5%, 10%, 15% y 20% de CBC y TV respectivamente. El método para realizado para el diseño de mezcla se basa en el ACI 211.1(91).

### 3.1 ENSAYO DE AGREGADOS PARA CONCRETO.

A continuación, se presentan la descripción de los ensayos de acuerdo con las normativas muestreadas en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3:** Ensayo para el estudio preliminar de los agregados.

Norma	Descripción
ASTM C 29	Peso volumétrico de los agregados.
ASTM C 127	Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica), y absorción de agregado fino.
ASTM C 128	Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica), y absorción de agregado grueso.
ASTM C 136	Análisis granulométrico del agregado fino y grueso.

**Fuente:** *Elaboración propia.*

### 3.1.1 PESO VOLUMÉTRICO DE LOS AGREGADOS (ASTM C 29).

#### ✓ MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS EN ESTE ENSAYO:

- **Balanza** con 0.05kg de precisión.
- **Varilla apisonadora**, varilla de acero redondeada, con 5/8pulg (16mm) en diámetro y aproximadamente 24pulg. (600mm) en longitud, teniendo el extremo apisonador, o ambos extremos, redondeados a una punta hemisférica, el diámetro de la cual es 5/8 pulg.
- **Medidor**, cilindro metálico, preferiblemente proveído con manijas, tendrá que ser aprueba de agua, con la tapa y el fondo nivelados y constantes, y suficientemente rígidos para mantener su forma. La medición deberá tener una altura aproximadamente igual al diámetro, pero en ningún caso deberá tener una altura menor de 80% ni mayor de 150% del diámetro.

La capacidad de medición tendrá los límites en la tabla 3.4:

**Tabla 3.4:** Capacidad del medidor para prueba de peso unitario suelto y peso unitario varillado.

Tamaño máximo nominal de agregado (Pulg)	Capacidad de medición Lt (m <sup>3</sup> )
½	2.8 (0.0028)
1	9.3 (0.0093)
1 ½	14 (0.014)
3	28 (0.028)
4	70 (0.070)
5	100 (0.100)

Fuente: ASTM C 29.

#### ✓ PROCEDIMIENTO:

##### a) PESO UNITARIO SUELTO EN AGREGADOS.

1. Se mide el molde para obtener su volumen.
2. Se pesa el molde.

3. La operación consiste en llenar el recipiente hasta que rebose, utilizando un cucharón, descargándose el agregado desde una altura que no exceda de 50 mm (2 pulg.) sobre el borde del recipiente.
4. Téngase el cuidado de prevenir hasta donde sea posible la segregación de las partículas de distintos tamaños que componen la muestra.
5. Luego se quita con cuidado el excedente, para que esté al nivel del recipiente. (enrasado).
6. Se limpia el exceso del agregado con la brocha.
7. Finalmente se pesa la muestra.
8. Este procedimiento se repite 3 veces.

✓ **CÁLCULOS:**

**Ecuación 3.1:** Peso unitario suelto.

$$\text{Peso unitario suelto} = \frac{\text{peso de la muestra}}{\text{volumen del medidor}}$$

**Fuente:** ASTM C 29.

**b) PESO UNITARIO VARILLADO EN AGREGADOS.**

1. Ya que se usa el mismo molde empleado para calcular el peso unitario suelto en agregados, no se requiere hacer las medidas del mismo, por lo que en este caso se iniciará llenando el molde hasta 1/3 de su capacidad y se nivela la superficie con los dedos.
2. Luego con la varilla se golpea 25 veces en forma de espiral de afuera hacia adentro.
3. En el varillado de la primera capa, no se permite que la barra golpee fuertemente el fondo del recipiente.
4. Se sigue agregando la muestra hasta los 2/3 de la capacidad del recipiente, nuevamente se nivela la superficie y se golpea 25 veces.

5. En el varillado de la segunda capa se emplea la fuerza suficiente para que la varilla llegue hasta la capa anterior.
6. Se llena el recipiente hasta que desborde y se compacta con 25 golpes.
7. En el varillado de la tercera capa se utiliza la fuerza suficiente para que la varilla llegue hasta la capa anterior.
8. Luego se quita con cuidado el excedente, para que esté a nivel del recipiente.
9. Se limpia el exceso del agregado con la brocha.
10. Finalmente se pesa.

✓ **CÁLCULOS:**

**Ecuación 3.2:** Peso unitario varillado.

$$\text{peso unitario varillado} = \frac{\text{peso de la muestra}}{\text{volumen del medidor}}$$

**Fuente:** ASTM C 29.

**Ecuación 3.3:** Porcentaje de vacíos para el peso volumétrico varillado.

$$\% \text{ de vacíos} = \frac{100 (G_s \gamma_{\text{agua}} - PVV)}{G_s \gamma_{\text{agua}}}$$

**Fuente:** ASTM C 29.

Dónde:

% de vacíos: Porcentaje de vacíos, en %.

$G_s$ : Gravedad específica del agregado (adimensional).

$\gamma_{\text{agua}}$ : Densidad del agua, 62.3 lb/pie<sup>3</sup> o 1000 kg/m<sup>3</sup>.

PVV: Peso volumétrico varillado.

**Ecuación 3.4:** Porcentaje de vacíos para el peso volumétrico suelto.

$$\% \text{ de vacíos} = \frac{100 (G_s \gamma_{\text{agua}} - PVS)}{G_s \gamma_{\text{agua}}}$$

**Fuente:** ASTM C 29.

Dónde:

% de vacíos: Porcentaje de vacíos en %.

$G_s$ : Gravedad específica del agregado (adimensional).

$\gamma_{\text{agua}}$ : Densidad del agua, 62.3 lb/pe<sup>3</sup> o 1000 kg/m<sup>3</sup>.

PVS: Peso volumétrico suelto.

**Tabla 3.5** Resultados del ensayo de peso volumétrico del agregado grueso, procedente de cantera “La Hulera”.

<b>PESO VOLUMÉTRICO Y PORCENTAJE DE VACÍOS DEL AGREGADO GRUESO (ASTM C 29).</b>
<b>PESO VOLUMÉTRICO SUELTO = 1506.53 kg/m<sup>3</sup></b>
<b>PESO VOLUMÉTRICO VARILLADO = 1573.17 kg/m<sup>3</sup></b>
<b>% DE VACÍOS (MÉTODO SUELTO) = 38.59 %</b>
<b>% DE VACÍOS (MÉTODO VARILLADO) = 35.41%</b>

**Fuente:** *Elaboración propia.*

La tabla anterior (tabla 3.5) muestra los valores obtenidos para el agregado grueso, en cuanto a su peso volumétrico y % de vacíos, obteniéndose un mayor peso volumétrico y un menor porcentaje de vacíos al ser varillado.

### **3.1.2 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS (ASTM C 127, C 128).**

#### **3.1.2.1 GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS AGREGADOS.**

La gravedad específica de los agregados es la relación del peso del agregado al peso de un volumen igual de agua, considerando que en el agregado todos los vacíos permeables están llenos de agua, pero sin agua superficial. La gravedad específica del agregado es útil en cálculos, particularmente aquellos para convertir el peso de las partículas irregulares en forma a volumen saturado, superficie seca o a volumen sólido. Hay dos clases de gravedad específica empleada con los agregados: Gravedad específica en masa bruta, que depende del volumen saturado en superficie seca donde los poros de las partículas se consideran como parte del volumen, la otra es la gravedad específica



aparente, que depende del volumen sólido; ambas dependen del peso seco en horno y ambas se calculan como el peso unitario de las partículas de agregados divididos entre el peso unitario del agua.

Su determinación se puede realizar de varios métodos:

Agregados Grueso:

- Método del Sifón.
- Método del Picnómetro.
- Método de la canastilla.

Agregado fino:

- Método del Picnómetro.
- Método de Le Chatellier.
- Método de Matraces.

### **3.1.2.2 ABSORCIÓN Y CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS (ASTM-C128).**

La absorción es la capacidad del agregado para llenar de agua sus poros permeables, por lo que depende del tamaño, continuidad y capacidad total de los mismos.

Hay que diferenciar entre absorción y contenido de humedad, ya que la absorción es un valor constante del agregado y el contenido de humedad es variable en función de la exposición del agregado al intemperismo (sol, lluvia, viento etc.).

#### **✓ MATERIAL Y EQUIPOS UTILIZADOS EN ESTE ENSAYO:**

- Agregado grueso.
- Balanza con una precisión de 0.1 gr.
- Balanza con una precisión de 1 gr.

- Franela o toallas de papel.
- Termómetro.
- Malla No. 4.
- Charolas.
- Baño de María.
- Cuchara de albañil.
- Horno de temperatura constante (110°).
- Agregado fino.
- Placa de vidrio.
- Matraces.

✓ **PROCEDIMIENTO:**

**a) Gravedad específica del agregado fino por el método del picnómetro.**

1. Lavar el picnómetro y ponerlo a secar.
2. Introducir agua al frasco de vidrio, colocarle el empaque y el cono, terminarlo de llenar para verificar si no existen fugas.
3. Cuando el picnómetro este lleno, secarlo por la parte exterior y pesar el conjunto  $W_{f+a}$ .
4. Pesar 500 gr de agregado fino en la condición saturada superficialmente seca.
5. Introducir el agregado fino al picnómetro vacío y llenar con agua hasta alcanzar aproximadamente el 90% del volumen total.
6. Revertir y agitar el picnómetro para eliminar las burbujas de aire, posteriormente llevar el nivel de agua en el picnómetro hasta su capacidad de calibración.
7. Secarlo por la parte exterior, y pesar el conjunto  $W_{f+a+a}$ .

- Retirar el agregado fino del frasco y colocarlo al horno por 24 horas a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C, pasado ese tiempo sacar la muestra del horno, dejarla enfriar a temperatura ambiente por un período de ½ hora y obtener el peso de la muestra  $W_a$ .

✓ **CÁLCULOS:**

**Ecuación 3.5:** Gravedad específica del agregado fino por el Método del Picnómetro.

$$G_s = \frac{W_{sss}}{W_{fa} + W_{sss} - W_{faa}}$$

**Fuente:** *ASTM C 127.*

Dónde:

$G_s$ : Gravedad específica del agregado fino.

$W_{sss}$ : Peso del agregado fino en condición de saturada superficialmente seca.

$W_{fa}$ : Peso del picnómetro + agua a la temperatura.

$W_{faa}$ : Peso del picnómetro + agua + agregado fino.

**b) Absorción del agregado fino.**

- Tomar una muestra (500 gr) que se ha dejado previamente sumergida en el agua durante 24 horas, decantando el exceso de agua con cuidado para evitar pérdida del material más fino.
- Secar el agregado fino superficialmente.
- Utilizando el molde tronco cónico, compactar suavemente con el pisón en tres capas de espesor similar, aplicándole 25 golpes (10, 9, 6) respectivamente.
- Enrasar el agregado fino con el borde del molde.
- Levantar el molde y observar el comportamiento del agregado fino moldeado; si al quitar el molde el agregado fino no presenta ninguna deformación en su base superior, se repetirán los pasos del 4 al 6 hasta que, al quitar el molde, el agregado fino se desmorone formando un

cono, lo que nos indicaría la condición de saturado con superficie seca o de un contenido de humedad menor que esta condición.

6. Inmediatamente se procede a pesar de 200 a 500 gr de agregado fino en esta condición y se anota este peso como  $W_{sss}$ .
7. Colocar la muestra en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 24 horas después de lo cual se procede a sacar del horno la muestra y pesarla, anotando este peso como  $W_s$ .

**Ecuación 3.6:** Absorción del agregado fino.

$$\% \text{ absorcion} = \frac{W_{sss} - W_s}{W_s}$$

**Fuente:** ASTM C 127.

Dónde:

% absorción: Absorción del agregado fino en porcentaje.

$W_{sss}$ : Peso del agregado fino en condición de saturada superficialmente seca.

$W_s$ : Peso del agregado fino en condición seca.

**Tabla 3.6:** Resultados del ensayo de gravedad específica y absorción del agregado fino procedente del río Lempa.

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO (ASTM C 127)
GRAVEDAD ESPECÍFICA = 2.35
ABSORCIÓN = 7.98%

**Fuente:** Elaboración propia.

**c) Gravedad específica del agregado grueso por el método de la canastilla:**

1. Pesar de 3 a 5 kg de material húmedo, el cual ha sido previamente saturado en agua 24 horas antes, desechar el material que pase la malla No. 4.
2. Secar superficialmente el agregado grueso con papel toalla para eliminar el agua superficial y pesarla nuevamente para obtener el peso saturado superficialmente seco  $W_{sss}$ .

3. Colocar el material en la canastilla y sumergirlo en un recipiente con capacidad mínima de 16 lt.
4. Obtener el peso sumergido del material utilizando una balanza,  $W_{sum}$ .
5. Sacar el material de la canastilla y dejarlo secar en el horno durante 24 horas a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .
6. Pesar la muestra después de 24 horas y anotar este como peso seco  $W_s$ .

✓ **CÁLCULOS:**

- Gravedad específica en masa (basado en el agregado seco).

**Ecuación 3.7:** Gravedad específica en masa (Agregado seco).

$$G_s = \frac{W_s}{W_{sss} - W_{sum}}$$

**Fuente:** ASTM C 128.

Dónde:

$G_s$ : Gravedad específica del agregado grueso.

$W_{sss}$ : Peso del agregado grueso en condición de saturada superficialmente seca.

$W_s$ : Peso del agregado grueso en condición seca.

$W_{sum}$ : Peso del agregado grueso en condición sumergido.

- Gravedad específica en masa (basada en el agregado saturado superficialmente seco).

**Ecuación 3.8:** Gravedad específica en masa (Agregado saturado superficialmente seco).

$$G_s = \frac{W_{sss}}{W_{sss} - W_{sum}}$$

**Fuente:** ASTM C 128.

Dónde:

$G_s$ : Gravedad específica del agregado grueso.

$W_{sss}$ : Peso del agregado grueso en condición de saturada superficialmente seca.

$W_{sum}$ : Peso del agregado grueso en condición sumergido.

**Tabla 3.7:** Peso mínimo de muestra de ensayo según tamaño nominal de agregado.

Tamaño nominal máx. pulg. (mm)	Peso mínimo de la muestra (Kg.)
½ (12.5) o menor	2
¼ (19.0)	3
1 (25.0)	4
1 ½ (37.5)	5
2 (50.0)	8
2 ½ (3.0)	12
3 (75.0)	18
3 ½ (90)	25

Fuente: ASTM C 128.

**d) Absorción del agregado grueso.**

1. Cuartear el material para obtener una muestra representativa y colocarla sumergida en un recipiente por 24 horas.
2. Tomar la muestra que se ha dejado sumergida y secarla con una franela.
3. Pesar de 3 a 5 kg, llamando a este  $W_{sss}$ .
4. Colocar la muestra en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 24 horas después de lo cual se procede a sacar del horno la muestra y pesarla, anotando este peso como  $W_s$ .

✓ **CÁLCULOS:**

Calcular el porcentaje de absorción del agregado fino y grueso por medio de la siguiente ecuación.

**Ecuación: 3.9:** Porcentaje de absorción del agregado grueso.

$$\% = \frac{W_{sss} - W_s}{W_s} \times 100$$

Fuente: ASTM C 127.

Dónde:

% absorción: Absorción del agregado grueso en porcentaje.

$W_{sss}$ : Peso del agregado grueso en condición de saturada superficialmente seca.

$W_s$ : Peso del agregado grueso en condición seca.

**Tabla 3.8:** Resultados del ensayo de gravedad específica y absorción del agregado grueso procedente de la cantera “La Hulera”.

**GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO (ASTM C 128).**

**GRAVEDAD ESPECÍFICA = 2.45**

**ABSORCIÓN = 1.70%**

**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Fotografías 3.1:** Procedimiento para la elaboración del ensayo de gravedad específica del agregado grueso por el método de la canastilla y del agregado fino por el método del picnómetro.

a) Material y equipo para los ensayos de gravedad específica de agregados por el método de la canastilla.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

b) Procedimiento para encontrar la gravedad específica de los agregados finos por el método del picnómetro.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

### **3.1.3 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS PARA CONCRETO (ASTM C 136).**

Por granulometría o análisis granulométrico de un material, se entiende como el procedimiento manual o mecánico por medio del cual se pueden separar las partículas que constituyen el material según sus tamaños; de tal manera que se pueda conocer las cantidades en peso de cada tamaño que al sumarlas dan el peso total de la muestra.

En este estudio para separar los tamaños se utilizaron mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionaron el tamaño máximo del material en cada una de ellas. Los pesos de cada tamaño se expresaron como porcentajes retenidos en cada malla con respecto al peso total de la muestra. Estos porcentajes se calcularon tanto parciales como acumulados en cada malla, con los porcentajes acumulados que pasan las mallas se trazó la gráfica de valores del material.

Los estándares de la ASTM C-33 nos muestra los requisitos de granulometrías para agregados finos (ver tabla 3.9) y agregados gruesos (ver tabla 3.10), la que establece el máximo y mínimo, es decir, la zona donde debe estar contenido el diagrama granulométrico para que el material sea aceptable para ser utilizado en la elaboración de concreto.

De la granulometría de agregado grueso se puede obtener el tamaño máximo del agregado, el que se define según la ASTM C 125 y el ACI 116 como el menor tamaño de malla por el cual todo agregado debe de pasar, este término se debe de diferenciar del tamaño máximo nominal, el que se define como el menor tamaño de malla por el cual debe pasar la mayor parte del agregado. La malla de tamaño máximo nominal puede retener de 5% a 15% del agregado.

La granulometría del agregado, o graduación de la mezcla, tiene en cuenta el porcentaje (en peso) total de muestra que pasa por cada uno de los tamices. La granulometría es determinada al calcular



el peso del contenido de cada tamiz, después de haber efectuado el análisis de tamices. Luego se resta el peso del contenido de cada tamiz del peso total de la muestra.

Ahora, La granulometría y el tamaño máximo de los agregados son importantes debido a su efecto en la dosificación, trabajabilidad, economía, porosidad y contracción del concreto.

El ensayo de granulometría de los agregados es de verás importancia para el diseño del concreto debido a la relevante influencia de los agregados en la resistencia del mismo. Se resalta que para diseñar un concreto que supla las necesidades, es menester controlar nuestra variable agregados Comúnmente la granulometría del agregado fino suele identificarse por su módulo de finura, la que es definida por la ASTM C 125 como la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices que van del N°4 al N°100, dividido entre 100, un módulo de finura menor a 2.2 es un indicativo de un agregado demasiado fino y mayor a 3.1 como un agregado demasiado grueso para usarse en el concreto. La tabla 3.11 muestra una clasificación del agregado fino dependiendo de su módulo de finura.

**Tabla 3.9:** Requisitos de granulometría para agregado fino.

Tamaño de la malla	Porcentaje que pasa en peso
9.52mm. (3/8)	100
4.75mm.(N°4)	95 a 100
2.36mm.(N°8)	80 a 100
1.18mm.(N°16)	50 a 85
0.60mm.(N°30)	25 a 60
0.30mm.(N°50)	10 a 30
0.15mm.(N°100)	2 a 10

Fuente: ASTM C 33.

**Tabla 3.10:** Requisitos de granulometría para agregado grueso.

Tamaño de la malla	Porcentaje que pasa en peso
12.5 mm. (1/2)	100
9.5 mm (3/8)	85 a 100
4.75mm.(N°4)	10 a 30
2.36mm.(N°8)	0 a 10
1.18mm.(N°16)	0 a 5
0.60mm.(N°30)	0 a 0

Fuente: ASTM C 33.

**Tabla 3.11:** Módulo de finura.

<b>Módulo de finura</b>	<b>Clasificación</b>
Menor que 2.0	Muy fina
2.0 – 2.3	Fina
2.3 – 2.6	Medianamente fina
2.6 – 2.9	Mediana
2.9 – 3.2	Medianamente gruesa
3.2 – 3.5	Gruesa
Mayor que 3.5	Muy gruesa

**Fuente:** ASTM C 33.

✓ **PROCEDIMIENTO:**

**Agregado Fino:**

1. Para realizar esta práctica es necesario que la muestra esté completamente seca. El secado puede ser: En un horno (24 horas a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ ) o al aire.
2. Tomar 6 Kg. aproximadamente de agregado fino seco y cuartear dos veces el material, por el método de cono o en un cuarteador. Ver fotografía 3.2.
3. Tomar una muestra de acuerdo con el tamaño del agregado, según lo que especifica el apartado donde se hace la preparación de la muestra.
4. Ensámblense las mallas en orden decreciente de abertura de la malla y coloque la muestra en la malla superior, agite las mallas por medio del ROP-TAP durante un tiempo de 15 minutos y posteriormente se deja reposar durante 3 minutos para que el polvo se asiente. Ver fotografía 3.2.
5. Pese la cantidad retenida en cada malla.

**Agregado Grueso:**

1. Para realizar este ensayo es necesario que la muestra esté completamente seca. El secado puede ser: En un horno (24 horas a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ ) o al aire.
2. Tomar una cantidad de acuerdo con el tamaño de la muestra, según el apartado donde se hace referencia a la preparación de la muestra.

3. El tamizado se hace manual, malla por malla, en orden decreciente de abertura.
4. Pese la cantidad retenida en cada malla.

✓ **CÁLCULOS:**

1. Se sumará la cantidad de material retenida en cada malla, lo que nos permitirá detectar cualquier pérdida durante el proceso de tamizado, si se tiene una pérdida de más de 0.5%, con respecto al inicial se considera que el ensayo no es satisfactorio, si es menor se considera válido y se procederá a compensar sumando o restando la diferencia entre el peso total de la muestra antes del tamizado y el peso total de la muestra después del tamizado, al mayor peso retenido, con el fin de obtener el peso inicial de la muestra.
2. Calcular los porcentajes de material retenido en cada tamiz, dividiendo el peso retenido en cada uno de ellos entre el peso total seco.
3. Con los porcentajes retenidos parciales, calcular los porcentajes retenidos acumulados y los porcentajes que pasan.
4. Trazar la curva granulométrica del material en una gráfica, que tiene por abscisa en la escala logarítmica la abertura de las mallas y por ordenadas los porcentajes de material que pasan por dichas mallas, a escala natural.
5. El paso anterior se hará tanto para el agregado fino y grueso.
6. Con referencia al paso número 4, graficar los rangos que establecen las normas en su correspondiente figura, tanto para agregados finos como para agregados gruesos, verificando de esta forma si la granulometría se encuentra dentro del rango que corresponde. Ver tablas 3.12 y 3.13.
7. Calcular el módulo de finura para el agregado fino.

**Ecuación 3.7:** Módulo de finura para agregado fino.

$$M.F = \frac{\% \text{ acumulado retenido desde la malla N}^\circ 4 \text{ a N}^\circ 100}{100}$$

**Fuente:** ASTM C 136.

La experiencia ha demostrado que es posible obtener concretos de calidad empleando agregados con granulometrías discontinuas; es decir excluyentes de determinados tamaños de agregados.

**Fotografías 3.2:** Procedimiento para el ensayo de granulometría.



a) Cuarteo de agregado fino y grueso para ensayos de granulometría.



b) Preparación de muestra en Ro-tap.



c) Distribución de las partículas de agregados en las mallas.

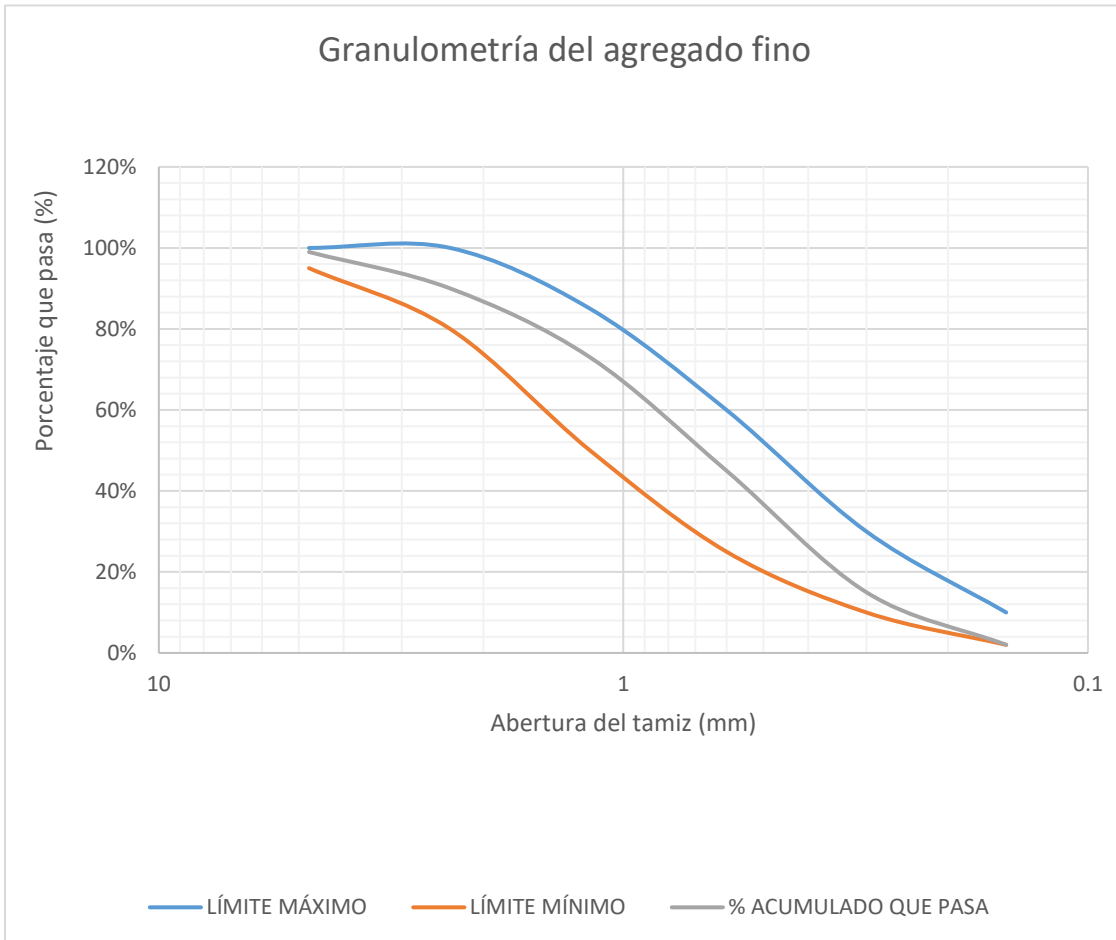
**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 3.12:** Resultados del ensayo de granulometría para agregado fino procedente del río Lempa.

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS PARA CONCRETO (ASTM C 136).**

MALLA	ABERTURA (MM)	LÍMITE MÁXIMO	LÍMITE MÍNIMO	% ACUMULADO QUE PASA	OBSERVACIÓN
No. 4	4.75	100%	95.00%	99.00%	CUMPLE
No. 8	2.36	100%	80.00%	90.00%	CUMPLE
No. 16	1.18	85.00%	50.00%	73.00%	CUMPLE
No. 30	0.60	60.00%	25.00%	45.00%	CUMPLE
No. 50	0.30	30.00%	10.00%	15.00%	CUMPLE
No. 100	0.150	10.00%	2.00%	2.00%	CUMPLE

*M.F = 2.75 MEDIANA*



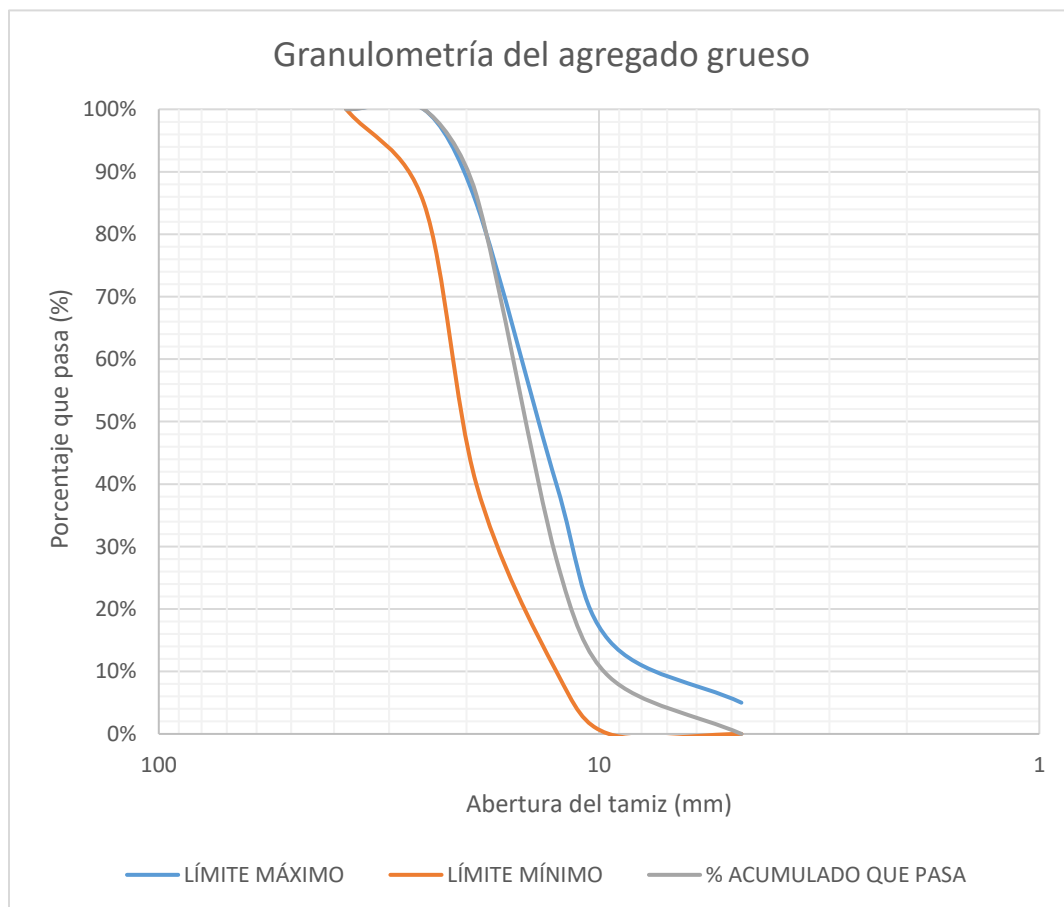
En la gráfica se observa que el agregado fino cumple con el requerimiento granulométrico establecido por la ASTM C-33, por lo cual se recomienda su uso en la elaboración de concreto.

**Fuente:** *Elaboración propia*

**Tabla 3.13:** Resultados del ensayo de granulometría para agregado grueso procedente de cantera “La Hulera”.

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS PARA CONCRETO (ASTM C 136)**

MALLA	ABERTURA (MM)	LÍMITE MÁXIMO	LÍMITE MÍNIMO	% ACUMULADO QUE PASA	OBSERVACIÓN
1"	25	100%	85%	100.00%	CUMPLE
3/4 "	19	85%	40.00%	86.3%	CUMPLE
1/2 "	12.5	40.00%	10.00%	28.0%	CUMPLE
3/8 "	9.5	15.00%	0.00%	9.2%	CUMPLE
No. 4	4.75	5.00%	0.00%	0.00%	CUMPLE



Se puede apreciar que el agregado grueso cumple los requerimientos granulométricos establecidos en la ASTM C-33, para agregado grueso con tamaño máximo de 1pulg. , por lo cual se recomienda su uso en la fabricación de concreto

**Fuente:** *Elaboración propia.*

### **3.2 DISEÑO DE MEZCLA.**

Es importante saber que existen una gran cantidad de trabajos, relacionados con los aspectos teóricos del diseño de mezclas para la elaboración de concreto, en buena parte se entiende que el diseño de mezcla es un procedimiento empírico y aunque hay muchas propiedades importantes del concreto, la mayor parte de procedimientos de diseño están basados principalmente en lograr una resistencia a la compresión para una edad determinada, así como la manejabilidad apropiada para un tiempo determinado, además se diseña para unas propiedades específicas que el concreto debe cumplir cuando se elaboran probetas de ensayo para especímenes de prueba, para nuestro trabajo de investigación se realizó utilizando el método del ACI 211.1.

#### **3.2.1 GENERALIDADES.**

##### **Datos generales para realizar el diseño de mezcla:**

- Tipo de estructura: Vigueta.
- Resistencia requerida:  $210 \text{ kg/cm}^2$ .
- Tipo de cemento: Portland Tipo I.
- Gravedad específica del agregado fino: 2.33.
- Gravedad específica del agregado grueso: 2.45.
- Tamaño máximo del agregado grueso:  $\frac{3}{4}$  pulg.
- Módulo de finura de la arena: 2.75.
- Peso volumétrico varillado del agregado grueso:  $1573.17 \text{ kg/m}^3$ .
- Porcentaje de absorción del agregado fino: 7.98%.
- Porcentaje de absorción del agregado grueso: 1.70%.

Con estos datos y haciendo uso de las tablas del ACI 211.1 podemos iniciar con los cálculos correspondientes y determinar la cantidad de materiales para fabricar  $1\text{m}^3$  de concreto.

Luego se procederá a determinar las cantidades de materiales para el volumen requerido en la fabricación de los especímenes de ensayo.

### 3.2.2 MÉTODO ACI 211.1.

#### Determinación de la resistencia de diseño:

De la tabla 3.14:

**Tabla 3.14:** Resistencia a la compresión promedio requerida, cuando no se dispone de datos para establecer una desviación estándar.

Resistencia a la compresión especificada $f'_c$ , Kg/cm <sup>2</sup> .	Resistencia a la compresión requerida promedio $f'_{cr}$ , Kg/cm <sup>2</sup> .
Menos que 210	$f'_c + 70$
<b><math>210 \leq f'_c \leq 350</math></b>	<b><math>f'_c + 85</math></b>
Mayor que 350	$f'_c + 100$

Fuente: ACI – 318, 5.3.2.2.

Tenemos que para una resistencia especificada de 210 kg/cm<sup>2</sup> la resistencia de diseño será:

$$f'_{cr} = f'_c + 85 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'_{cr} = 210 \text{ kg/cm}^2 + 85 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'_{cr} = 295 \text{ kg/cm}^2$$

#### Obtención del revenimiento:

De la tabla 3.15

**Tabla 3.15:** Revenimientos recomendados para diversos tipos de estructuras.

TIPO DE CONSTRUCCIÓN.	REVENIMIENTO MÁXIMO (cm).	TOLERANCIA ( $\pm$ ) (cm).
Muros de cimentación y zapatas reforzadas	7.5	2.5
Zapatas, campanas y muros de subestructura sencillos	7.5	2.5
<b>Vigas y muros reforzados</b>	<b>10</b>	<b>2.5</b>
Columnas para edificios	10	2.5
Pavimentos y losas	7.5	2.5
Concreto masivo	7.5	2.5

Fuente: ACI 211.1.

El revenimiento seleccionado fue de acuerdo a la tabla 3.15, el recomendado para vigas:

$$\text{Revenimiento máximo permitido} = 10 \text{ cm.}$$

$$\text{Tolerancia permitida} = \pm 2.5 \text{ cm.}$$



### Determinación del agua de mezclado:

Con el revenimiento y el tamaño máximo del agregado grueso, para concreto normal sin inclusión de aire, se determinó la cantidad de agua que se utilizó. Ver tabla 3.16.

**Tabla 3.16:** Requisitos aproximados para el contenido de agua de mezclado.

Revenimiento cm.	Agua, kg/m <sup>3</sup> de concreto, para los tamaños nominales de agregados.							
	10mm (3/8")	12.5mm (1/2")	20mm (3/4")	25mm (1")	40mm (1 1/2")	50mm (2")	70mm (3")	150mm (6")
<b>Concreto sin aire incluido</b>								
De 3 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
<b>De 8 a 10</b>	225	215	<b>200</b>	195	175	170	160	140
De 15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	-
Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto sin inclusión de aire, expresado como %	3	2.5	2	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2

Fuente: ACI 211.1.

De la tabla obtenemos la cantidad de agua:

$$\text{Cantidad de agua} = 200 \text{ kg/m}^3.$$

$$\text{Contenido de aire} = 2.0$$

### Determinación de la relación agua/cemento:

Con el valor de la resistencia de diseño y sabiendo que el concreto será sin inclusores de aire, usando la tabla 3.17 tenemos:

**Tabla 3.17:** Relación entre la resistencia a la compresión del concreto y la relación a/c.

Resistencia a la compresión a los 28 días, Kg/cm <sup>2</sup>	Relación Agua/Cemento, por peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450	0.38	0.31
400	0.43	0.34
350	0.48	0.40
<b>300</b>	<b>0.55</b>	0.46
<b>250</b>	<b>0.62</b>	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.72

Fuente: ACI 211.1.

Para  $f'_{cr} = 295 \text{ kg/cm}^2$ :

Debido a que el valor de resistencia no está en la tabla 3.17, debemos hacer una interpolación entre el valor superior más próximo y el valor inferior más próximo:

$$\frac{a}{c} = 0.56$$

**Determinación de la cantidad de cemento:**

$$\text{cantidad de cemento} = 357.14 \text{ kg/m}^3.$$

**Cálculo de cantidad de agregado grueso:**

Con el tamaño máximo nominal del agregado grueso y el módulo de finura de la arena, usando la tabla 3.18, tenemos el volumen del agregado grueso.

$$T_{\max} = 3/4''$$

$$\text{Módulo de finura} = 2.75$$

**Tabla 3.18:** Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.

Tamaño máximo de agregado en mm. (pul).	Volumen de agregado grueso varillado en seco por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de la arena.			
	2.40	2.60	2.80	3.00
10 (3/8")	0.5	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53
<u>20 (1/4 ")</u>	0.66	<u>0.64</u>	<u>0.62</u>	0.60
25 (1")	0.71	0.69	0.67	0.65
40 (1 1/2")	0.75	0.73	0.74	0.69
50 (2 ")	0.78	0.76	0.74	0.72
70 (3")	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6 ")	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: ACI 211.1.

Nuevamente será necesario

$$\text{vol. agregado grueso} = 0.62$$

La cantidad de agregado grueso será el valor del volumen multiplicado por el peso volumétrico varillado:

$$\text{Cantidad de agregado grueso} = \left( \frac{1573.17\text{kg}}{\text{m}^3} \right) (0.62)$$

$$\text{Cantidad de agregado grueso} = 975.37 \text{ kg/m}^3$$

#### **Determinación del contenido de arena:**

Con las cantidades de agua, cemento, agregado fino y porcentaje de vacíos, podemos estimar la cantidad de arena, restando al metro cubico de concreto las cantidades de materiales que ya conocemos:

$$\text{peso de la arena} = 634.5 \text{ kg/m}^3$$

Una mezcla de concreto contiene necesariamente cemento, agua, agregado fino y agregado grueso. Los agregados ocupan alrededor del 60 – 70% del volumen de hormigón. En este porcentaje, la proporción del 40 al 50% de agregado es agregado fino (arena).

### **3.3 DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS SIN SUSTITUCIÓN DE PUZOLANAS.**

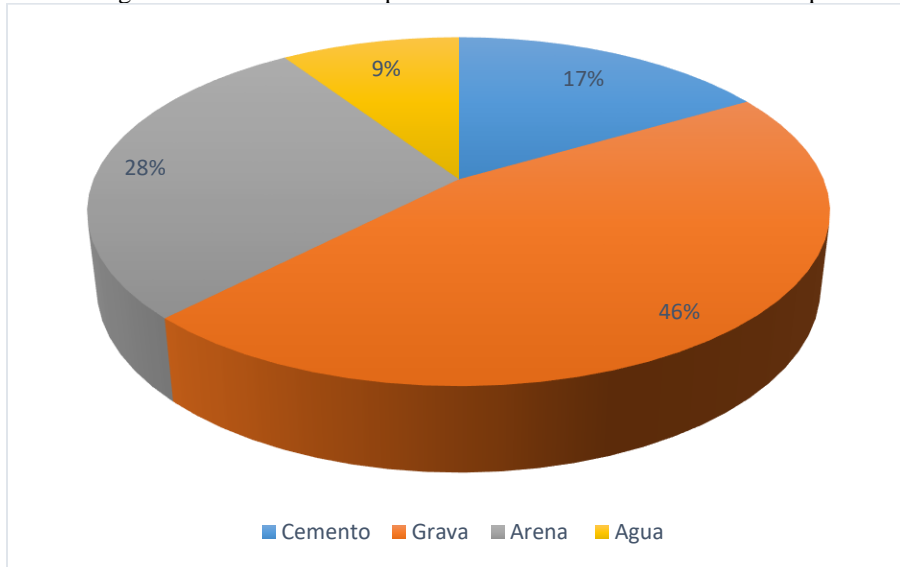
Del diseño de mezcla obtuvimos las cantidades de material a utilizar, para la fabricación de 1 m<sup>3</sup> de concreto como lo muestra la tabla 3.19, con estos valores se calcularon las cantidades para el volumen requerido para la elaboración de las diferentes probetas de ensayo:

**Tabla 3.19:** Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto sin sustitución de puzolanas.

<b>CANTIDADES OBTENIDAS.</b>		
<b>MATERIAL</b>	<b>PESO.</b>	<b>PORCENTAJE.</b>
Cemento	357.14 kg	17.0%
Grava	975.37 kg	46.0%
Arena	634.5 kg	28.0%
Agua	200 kg	9.0%

**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Gráfica 3.1:** Distribución gráfica de los materiales para 1m<sup>3</sup> de concreto sin sustitución de puzolanas.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

Usando los resultados obtenidos del diseño de mezcla para 1 m<sup>3</sup> de concreto y tomando los pesos obtenidos de cemento (357.14 Kg), grava (975.37 Kg), arena (634.5 Kg.) y agua (200 Kg.), se calculó la cantidad de materiales para dosificar el concreto, usado en la fabricación de los especímenes de ensayo sin adición de puzolana, de la siguiente manera:

**Cálculo del volumen necesario para la fabricación de probetas:**

Se fabricaron 6 cilindros para ensayos a compresión, con dimensiones de 0.15 m de diámetro y 0.30 m de altura, además se fabricaron 4 viguetas con las siguientes dimensiones: Sección de 0.15 m por 0.15 m y longitud de 0.60 m.

$$\text{vol} = 0.086 \text{ m}^3$$

Considerando un desperdicio del 25%

$$\text{vol} = \text{volotal} (1.25).$$

$$\text{vol} = 0.086 \text{ m}^3 (1.25).$$

$$\text{vol} = \mathbf{0.10 \text{ m}^3}$$

Para calcular la cantidad de materiales necesarias para la mezcla, multiplicamos el volumen que obtuvimos por las cantidades calculadas en el diseño de mezcla, de esta manera tenemos los resultados de la tabla 3.20.

**Tabla 3.20:** Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo sin sustitución de puzolanas.

<b>CANTIDADES OBTENIDAS.</b>	
<b>MATERIAL</b>	<b>PESO.</b>
Cemento	35.7 kg
Grava	97.5 kg
Arena	63.4 kg
Agua	20.0 kg

**Fuente:** *Elaboración propia.*

### **3.4 DOSIFICACIONES DE MEZCLAS CON CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA (CBC).**

#### **PARA LOS PORCENTAJES DE 5%, 10%, 15% Y 20%.**

En base al diseño de mezcla para un metro cúbico de concreto sin sustitución de puzolana se realizó la dosificación para el 5%,10%,15% Y 20% de sustitución de cemento por la ceniza de bagazo de caña, donde las dosificaciones de la grava, arena y el agua se mantienen.

#### **3.4.1 DOSIFICACIÓN PARA EL 5% DE CBC.**

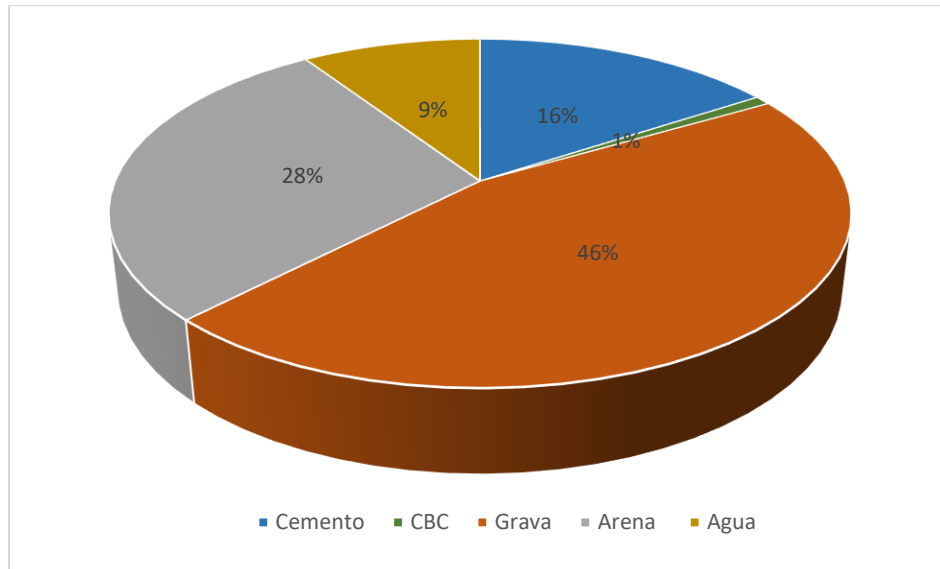
Las tablas 3.21 y 3.22 muestran las cantidades de material para 1m<sup>3</sup> de concreto y 0.1 m<sup>3</sup> de acuerdo con el porcentaje del 5% de sustitución de CBC.

**Tabla 3.21:** Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto con sustitución del 5% de cemento por CBC.

<b>CANTIDADES OBTENIDAS.</b>		
<b>MATERIAL</b>	<b>PESO</b>	<b>PORCENTAJE</b>
Cemento	339.29 kg	16.0%
CBC	17.85 kg	1.0%
Grava	975.37 kg	46.0%
Arena	634.5 kg	28.0%
Agua	200 kg	9.0%

**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Gráfica 3.2:** Distribución gráfica de los materiales para 1m<sup>3</sup> de concreto con el 5% de sustitución de cemento por CBC.



Fuente: *Elaboración propia.*

### Cálculo del volumen necesario para la fabricación de probetas:

Se fabricaron 6 cilindros para ensayos a compresión, con dimensiones de 0.15 m de diámetro y 0.30 m de altura, además se fabricaron 4 viguetas con las siguientes dimensiones: Sección de 0.15 m por 0.15 m y longitud de 0.60 m.

$$v = 0.086 \text{ m}^3$$

Considerando un desperdicio del 25%

$$v = 0.086 \text{ m}^3 (1.25)$$

$$v = 0.10 \text{ m}^3$$

**Tabla 3.22:** Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo con sustitución del 5% de cemento por CBC.

CANTIDADES OBTENIDAS.	
MATERIAL.	PESO.
Cemento	33.92 kg
CBC	1.78 kg
Grava	97.5 kg
Arena	63.4 kg
Agua	20.0 kg

Fuente: *Elaboración propia.*

Este cálculo se repite para los porcentajes siguientes del 10%, 15% y 20% de sustitución CBC.

### 3.4.2 DOSIFICACIÓN PARA EL 10% DE CBC.

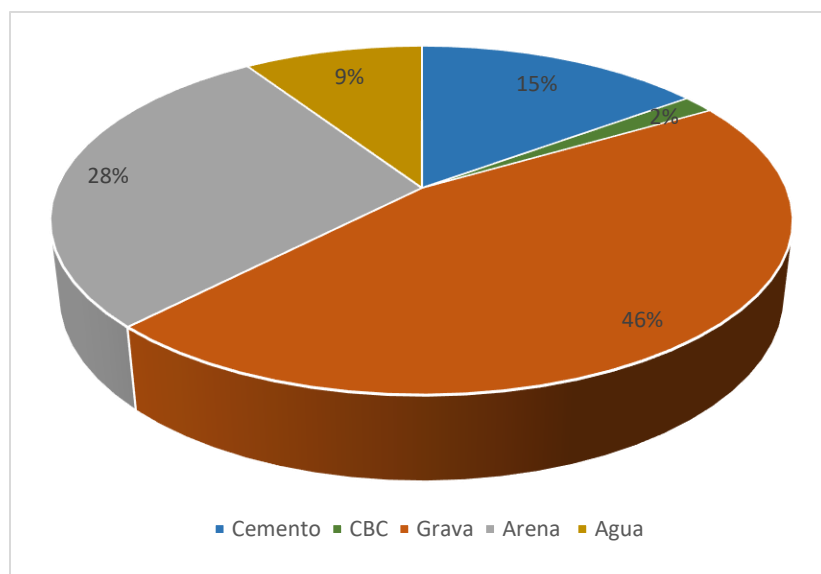
Las tablas 3.23 y 3.24 muestran las cantidades de material para 1m<sup>3</sup> de concreto y 0.1 m<sup>3</sup> de acuerdo con el porcentaje del 10% de sustitución CBC.

**Tabla 3.23:** Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto con sustitución del 10% de cemento por CBC.

CANTIDADES OBTENIDAS.		
MATERIAL	PESO.	PORCENTAJE.
Cemento	321.43 kg	15.0%
CBC	35.71 kg	2.0%
Grava	975.37 kg	46.0%
Arena	634.5 kg	28.0%
Agua	200 kg	9.0%

**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Gráfica 3.3:** Distribución gráfica de los materiales para 1m<sup>3</sup> de concreto con el 10% de sustitución de cemento por CBC.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Tabla 3.24:** Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo con sustitución del 10% de cemento por CBC.

CANTIDADES OBTENIDAS.	
MATERIAL.	PESO.
Cemento	32.14kg
CBC	3.57 kg
Grava	97.5 kg
Arena	63.4 kg
Agua	20.0 kg

**Fuente:** *Elaboración propia.*

### 3.4.3 DOSIFICACIÓN PARA EL 15% DE CBC.

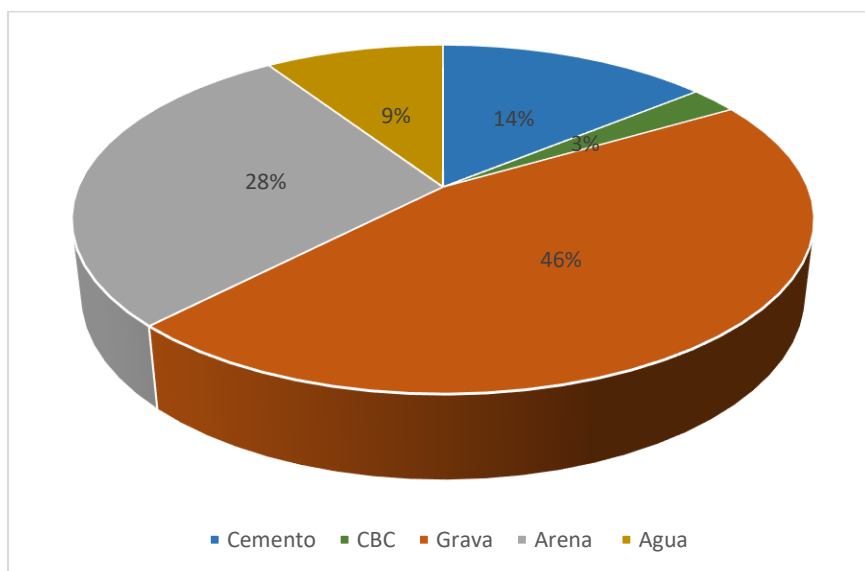
Las tablas 3.25 y 3.26 muestran las cantidades de material para 1m<sup>3</sup> de concreto y 0.1 m<sup>3</sup> de acuerdo con el porcentaje del 15%, de sustitución CBC.

**Tabla 3.25:** Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto con sustitución del 15% de cemento por CBC.

CANTIDADES OBTENIDAS.		
MATERIAL	PESO	Porcentaje
Cemento	303.57 kg	14.0%
CBC	53.57 kg	3.0%
Grava	975.37 kg	46.0%
Arena	634.5 kg	28.0%
Agua	200 kg	9.0%

Fuente: *Elaboración propia.*

**Gráfica 3.4:** Distribución gráfica de los materiales para 1m<sup>3</sup> de concreto con el 15% de sustitución de cemento por CBC.



Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla 3.26:** Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo con sustitución del 15% de cemento por CBC.

CANTIDADES OBTENIDAS.	
MATERIAL.	PESO.
Cemento	30.35 kg
CBC	5.36 kg
Grava	97.5 kg
Arena	63.4 kg
Agua	20.0 kg

Fuente: *Elaboración propia.*



### 3.4.4 DOSIFICACIÓN PARA EL 20% DE CBC.

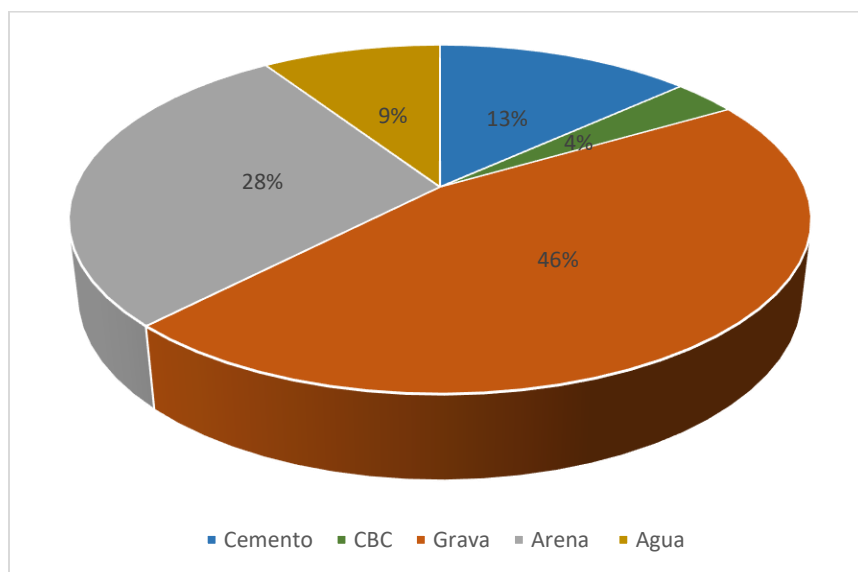
Las tablas 3.27 y 3.28 muestran las cantidades de material para 1m<sup>3</sup> de concreto y 0.1 m<sup>3</sup> de acuerdo al porcentaje del 20% de sustitución CBC.

**Tabla 3.27:** Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto con sustitución del 20% de cemento por CBC.

CANTIDADES OBTENIDAS.		
MATERIAL.	PESO.	PORCENTAJE.
Cemento	285.71 kg	13.0%
CBC	71.43 kg	4.0%
Grava	975.37 kg	46.0%
Arena	634.5 kg	28.0%
Agua	200 kg	9.0%

**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Gráfica 3.5:** Distribución gráfica de los materiales para 1m<sup>3</sup> de concreto con el 20% de sustitución de cemento por CBC.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Tabla 3.28:** Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo con sustitución del 20% de cemento por CBC.

CANTIDADES OBTENIDAS.	
MATERIAL.	PESO.
Cemento	28.57 kg
CBC	7.14 kg
Grava	97.5 kg
Arena	63.4 kg
Agua	20.0 kg

**Fuente:** *Elaboración propia.*

### 3.5 DOSIFICACIONES DE MEZCLAS CON TOBA VOLCÁNICA (TV) PARA LOS PORCENTAJES DE 5%, 10%, 15% Y 20%.

En base al diseño de mezcla para un metro cúbico de concreto sin sustitución de puzolana se realizó la dosificación para el 5%,10%,15% y 20% de sustitución de cemento por toba volcánica, donde las dosificaciones para la grava, arena y el agua se mantuvieron.

#### 3.5.1 DOSIFICACIÓN PARA EL 5% DE TV.

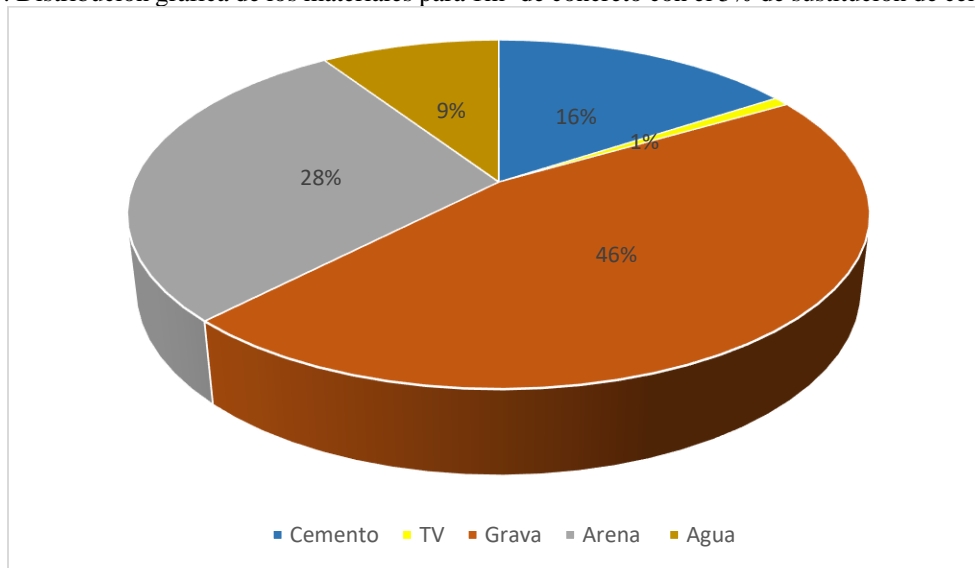
Las tablas 3.29 y 3.30 muestran las cantidades de material para 1m<sup>3</sup> de concreto y 0.1 m<sup>3</sup> de acuerdo con el porcentaje del 5% de sustitución TV.

**Tabla 3.29:** Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto con sustitución del 5% de cemento por TV.

CANTIDADES OBTENIDAS.		
MATERIAL.	PESO.	PORCENTAJE.
Cemento	339.29 kg	16.0%
TV	17.85 kg	1.0%
Grava	975.37 kg	46.0%
Arena	634.5 kg	28.0%
Agua	200 kg	9.0%

**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Gráfica 3.6:** Distribución gráfica de los materiales para 1m<sup>3</sup> de concreto con el 5% de sustitución de cemento por TV.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

#### Cálculo del volumen necesario para la fabricación de probetas:

Se fabricaron 6 cilindros para ensayos a compresión, con dimensiones de 0.15 m de diámetro y 0.30 m de altura, además se fabricaron 4 viguetas con las siguientes dimensiones: Sección de 0.15 m por 0.15 m y longitud de 0.60 m.

$$v = 0.086 \text{ m}^3$$

Considerando un desperdicio del 25%

$$v = 0.086 \text{ m}^3(1.25)$$

$$v = 0.10 \text{ m}^3$$

Para calcular la cantidad de materiales necesarios para la mezcla, multiplicamos el volumen que obtuvimos por las cantidades calculadas en el diseño de mezcla, de esta manera tenemos:

Este cálculo se repite para los porcentajes siguientes del 10%, 15% y 20% de sustitución de TV.

**Tabla 3.30:** Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo con sustitución del 5% de cemento por TV.

<b>CANTIDADES OBTENIDAS.</b>	
<b>MATERIAL.</b>	<b>PESO.</b>
Cemento	33.92 kg
TV	1.78 kg
Grava	97.5 kg
Arena	63.4 kg
Agua	20.0 kg

**Fuente:** *Elaboración propia.*

### 3.5.2 DOSIFICACIÓN PARA EL 10% DE TV.

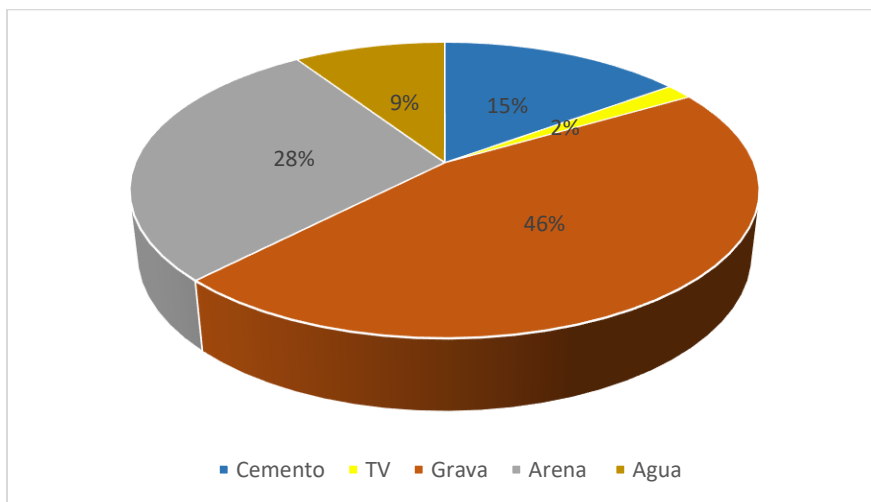
Las tablas 3.31 y 3.32 muestran las cantidades de material para 1m<sup>3</sup> de concreto y 0.1 m<sup>3</sup> de acuerdo al porcentaje del 10% de sustitución de TV.

**Tabla 3.31:** Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto con sustitución del 10% de cemento por TV.

<b>CANTIDADES OBTENIDAS.</b>		
<b>MATERIAL.</b>	<b>PESO.</b>	<b>PORCENTAJE.</b>
Cemento	321.43 kg	15.0%
TV	35.71 kg	2.0%
Grava	975.37 kg	46.0%
Arena	634.5 kg	28.0%
Agua	200 kg	9.0%

**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Gráfica 3.7:** Distribución gráfica de los materiales para 1m<sup>3</sup> de concreto con el 10% de sustitución de cemento por TV.



**Fuente:** Elaboración propia.

Para calcular la cantidad de materiales necesarios para la mezcla, multiplicamos el volumen que obtuvimos, por las cantidades calculadas en el diseño de mezcla, de esta manera tenemos:

**Tabla 3.32:** Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo con sustitución del 10% de cemento por TV.

<b>CANTIDADES OBTENIDAS.</b>	
<b>MATERIAL.</b>	<b>PESO.</b>
Cemento	32.14kg
TV	3.57 kg
Grava	97.5 kg
Arena	63.4 kg
Agua	20.0 kg

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.5.3 DOSIFICACIÓN PARA EL 15% DE TV.

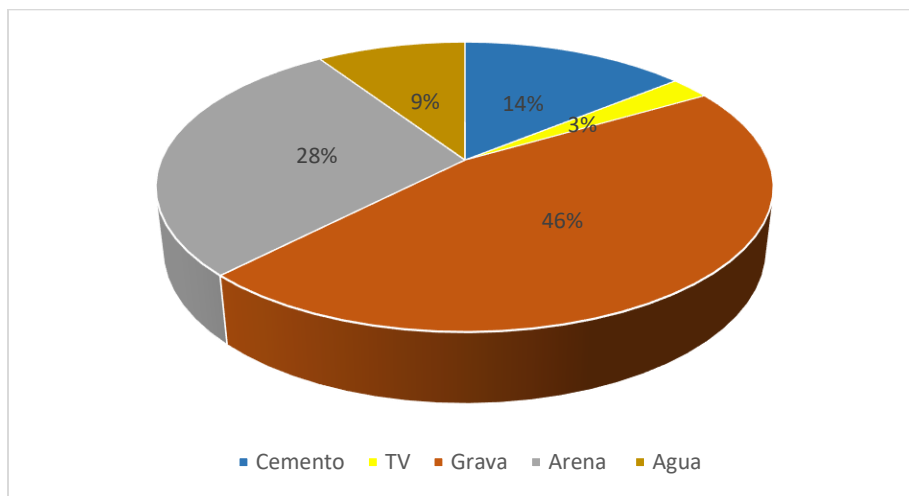
Las tablas 3.33 y 3.34 muestran las cantidades de material para 1m<sup>3</sup> de concreto y 0.1 m<sup>3</sup> de acuerdo con el porcentaje del 15% de sustitución de TV.

**Tabla 3.33:** Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto con sustitución del 15% de cemento por TV.

<b>CANTIDADES OBTENIDAS.</b>		
<b>MATERIAL.</b>	<b>PESO.</b>	<b>PORCENTAJE.</b>
Cemento	303.57 kg	14.0%
TV	53.57 kg	3.0%
Grava	975.37 kg	46.0%
Arena	634.5 kg	28.0%
Agua	200 kg	9.0%

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica 3.8:** Distribución gráfica de los materiales para 1m<sup>3</sup> de concreto con el 15% de sustitución de cemento por TV.



**Fuente:** Elaboración propia.

Para calcular la cantidad de materiales necesarios para la mezcla, multiplicamos el volumen que obtuvimos por las cantidades calculadas en el diseño de mezcla, de esta manera tenemos:

**Tabla 3.34:** Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo con sustitución del 15% de cemento por TV.

CANTIDADES OBTENIDAS.	
MATERIAL.	PESO.
Cemento	30.35 kg
TV	5.36 kg
Grava	97.5 kg
Arena	63.4 kg
Agua	20.0 kg

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.5.4 DOSIFICACIÓN PARA EL 20% DE TV.

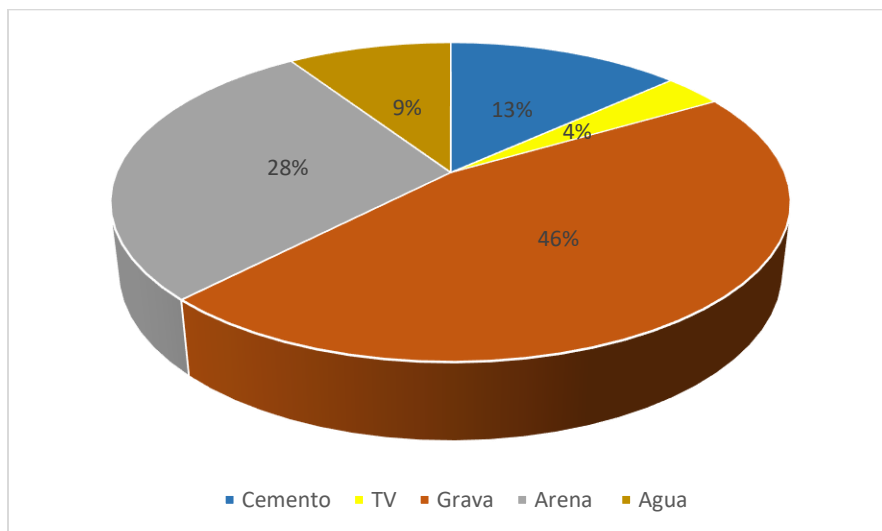
Las tablas 3.35 y 3.36 muestran las cantidades de material para 1m<sup>3</sup> de concreto y 0.1 m<sup>3</sup> de acuerdo al porcentaje del 20% de sustitución de TV.

**Tabla 3.35:** Cantidad de materiales para un metro cúbico de concreto con sustitución del 20% de cemento por TV.

CANTIDADES OBTENIDAS.		
MATERIAL.	PESO.	PORCENTAJE.
Cemento	285.71 kg	13.0%
TV	71.43 kg	4.0%
Grava	975.37 kg	46.0%
Arena	634.5 kg	28.0%
Agua	200 kg	9.0%

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica 3.9:** Distribución gráfica de los materiales para 1m<sup>3</sup> de concreto con el 20% de sustitución de cemento por TV.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

Para calcular la cantidad de materiales necesarios para la mezcla, multiplicamos el volumen que obtuvimos por las cantidades calculadas en el diseño de mezcla, de esta manera tenemos:

**Tabla 3.36:** Cantidad de materiales para fabricación de probeta de ensayo con sustitución del 20% de cemento por TV.

<b>CANTIDADES OBTENIDAS.</b>	
<b>MATERIAL.</b>	<b>PESO.</b>
Cemento	28.57 kg
TV	7.14 kg
Grava	97.5 kg
Arena	63.4 kg
Agua	20.0 kg

**Fuente:** *Elaboración propia.*

### **3.6 ELABORACIÓN DE MEZCLAS PARA LA FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES DE PRUEBA.**

Una vez calculados las cantidades de cemento, arena, grava y agua para la fabricación de las probetas de ensayo se prepararon las cantidades requeridas de CBC y TV en sus diferentes porcentajes, posteriormente se inició el proceso de fabricación del concreto fresco para cada uno de los porcentajes de los diferentes especímenes de prueba.

### 3.6.1 PREPARACIÓN DE LA PUZOLANA.

- 1- Se transportó al laboratorio, las puzolanas desde su lugar de procedencia, la Ceniza de Bagazo de Caña se obtuvo del Ingenio Chaparrastique y la Toba Volcánica procedió de Cantón El Delirio, Departamento de San Miguel.
- 2- Se procedió a secar las muestras, usando el horno del laboratorio de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Materiales de la Universidad de El Salvador, Facultad Multidisciplinaria Oriental, tal como se muestra en las fotografías 3.3; debido a que los materiales puzolánicos presentaban un alto grado de humedad, se dejaron durante 48 horas en el horno a una temperatura de  $100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ .
- 3- Con los materiales puzolánicos ya secos, se procedió a obtener el material a utilizar en la sustitución; para esto se usaron las mallas de tamizado No. 50, No. 100 y No. 200, el material seleccionado para ser usado en la elaboración del concreto fue aquel que pasa y se retiene en la malla No. 200.
- 4- Del material que pasa y se retiene en la malla No. 200, se procedió a pesar las cantidades necesarias para la fabricación de cada una de las mezclas con sustitución de puzolanas.

**Fotografías 3.3:** Preparación de la puzolana.



a) Cuarteo y secado de las puzolanas.



b) Reducción del tamaño de las partículas del material puzolánico utilizando tamices No. 50, No. 100 y No. 200.



c) Obtención del material puzolánico que fue usado en la sustitución de cemento, aquel que se retiene y pasa el tamiz No. 200.

**Fuente:** Elaboración propia.

### **3.6.2 FABRICACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO SIN SUSTITUCIÓN Y CON SUSTITUCIÓN DE PUZOLANA.**

- 1- Las dosificaciones para las sustituciones de puzolanas por cemento fueron realizadas mediante los resultados obtenidos en el apartado 3.5.
- 2- La fabricación de la mezcla se hizo utilizando una mezcladora mecánica y siguiendo los pasos mencionados a continuación (como lo muestra la fotografía 3.4):
  - Para la fabricación de la mezcla de concreto primeramente se obtuvo la humedad de los agregados gruesos y finos para realizar los ajustes por humedad necesarios en el diseño de la mezcla.
  - A partir del diseño de mezcla para cada una de las dosificaciones de cemento, se pesaron los materiales a utilizar haciendo uso de las cubetas previamente pesadas.



- La elaboración de la mezcla se inició humedeciendo el interior de la mezcladora para evitar alterar el contenido de agua de la mezcla.
- Se procedió a incorporar los materiales a la mezcladora, los agregados fueron vertidos dentro de la mezcladora, del más grueso al más fino según se describe en la norma ASTM-C192.
- Se mantuvo mezclándose durante un periodo aproximado de 5 minutos hasta que se logró la homogenización de la mezcla.

### **3.6.3 ENSAYOS AL CONCRETO FRESCO.**

#### **3.6.3.1 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL ENSAYO DE REVENIMIENTO AL CONCRETO FRESCO (ASTM C-94).**

- 1- Se Limpió el cono, se humedeció con agua y se colocó sobre la placa de revenimiento. Como observación la placa para la prueba de revenimiento debe estar limpia, firme, nivelada y no debe ser absorbente.
- 2- Se obtuvo una muestra del concreto recién mezclado.
- 3- Se fijaron firmemente los estribos y se llenó 1/3 del volumen del cono con la muestra, se compactó el concreto varillando 25 veces.
- 4- Luego se llenó a 2/3 y nuevamente se varilló 25 veces, justo hasta la parte superior de la primera capa.
- 5- Se llenó hasta que empezó a derramarse, varillando nuevamente 25 veces, esta vez hasta la parte superior de la segunda capa.
- 6- Se niveló la superficie con la varilla de acero como una acción de rodillo. Se limpió el concreto que queda alrededor de la base y de la parte superior del cono y con ambas manos empujar hacia abajo sobre las asas y se dejó de pisar los estribos.

- 7- Se levantó cuidadosamente el cono hacia arriba perpendicular a la base, asegurándose de que no se moviera el cono hacia los costados.
- 8- Se Colocó el cono al revés y se montó la varilla sobre el cono volteado.
- 9- Se Tomaron varias mediciones con cinta entre la parte inferior de la varilla y la parte superior de la muestra y se promediaron las mediciones. Tal como se muestra en las fotografías 3.5.

**Fotografías 3.4:** Dosificación y fabricación de las mezclas de concreto.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Fotografías 3.5:** Ensayo de revenimiento del concreto.



a) Muestreo del concreto y preparación del cono de revenimiento.



b) Medición del asentamiento del concreto.

**Fuente:** *Elaboración propia.*

### 3.6.3.2 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL ENSAYO DE TEMPERATURA AL CONCRETO FRESCO.

A continuación, se presenta el procedimiento establecido por la norma ASTM C-1064 como requerimiento para los análisis del concreto al estado fresco.

- 1- Se tomó una muestra del concreto recién mezclado en un recipiente hecho de un material no absorbente y tan grande que proporcione al menos 3 pulg. (75 mm.) de concreto en todas direcciones alrededor del sensor del dispositivo medidor de temperatura; el concreto como observación debe poder cubrirlo y también ser al menos tres veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso.
- 2- Se instaló el dispositivo medidor de temperatura en la mezcla de concreto fresco de modo que la porción del sensor de temperatura este sumergido un mínimo de 3 pulg. (75 mm.). Se presionó suavemente el concreto superficial alrededor del dispositivo medidor de temperatura de modo que la temperatura del aire ambiental no afecto la lectura.
- 3- Se dejó el dispositivo medidor de temperatura en la mezcla de concreto fresco por un período mínimo de 2 minutos hasta que la temperatura se estabilizó, entonces se registró la temperatura.
- 4- Se completó la medición de la temperatura en el concreto fresco dentro de los 5 minutos después de obtenida la muestra. Como lo muestra la fotografía 3.6.

**Fotografía 3.6:** Ensayo de temperatura con termómetro de vástago.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

### 3.6.3.3 RESULTADOS DE ENSAYOS AL CONCRETO FRESCO.

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos de revenimiento y temperatura del concreto fresco, para cada una de las mezclas realizadas para los diferentes especímenes a ensayar:

**Tabla 3.37:** Resultados de ensayos de revenimiento y temperatura.

Descripción.	Revenimiento (pulg).	Temperatura (°C).
Mezcla sin sustitución de puzolana	5.0	30
Mezcla con 5% de sustitución de CBC	5.0	31
Mezcla con 10% de sustitución de CBC	4.1/2	31
Mezcla con 15% de sustitución de CBC	4.1/4	30
Mezcla con 20% de sustitución de CBC	4.0	32
Mezcla con 5% de sustitución de TV	5.0	30
Mezcla con 10% de sustitución de TV	4. $\frac{3}{4}$	33
Mezcla con 15% de sustitución de TV	4. $\frac{3}{4}$	31
Mezcla con 20% de sustitución de TV	4. $\frac{1}{2}$	31

**Fuente:** *Elaboración propia.*

### 3.6.4 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES DE PRUEBA.

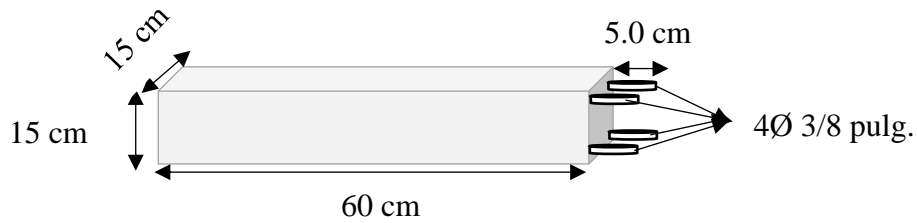
Una vez terminado los ensayos al concreto, se procedió a elaborar los especímenes de prueba con sus diferentes porcentajes de sustitución de puzolanas.

#### a) Preparación de armadura de acero para viguetas de ensayos de corrosión.

La sección y longitud del espécimen para este ensayo, se definió de acuerdo con las medidas requeridas para su posterior ensayo en la máquina de flexión.

- 1- Las viguetas que se fabricaron tienen las características siguientes: sección transversal de 15 cm x 15 cm y una longitud de 60 cm, dejando fuera del concreto terminado una longitud de acero de 5 cm, en cada varilla de refuerzo longitudinal para poder realizar las mediciones de potencial de corrosión.

**Figura 3.2:** Esquema de vigueta terminada.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

- 2- Los diámetros del acero usado para la armadura son: Refuerzo longitudinal acero de 3/8 pulg. ASTM A-615 y los estribos son de 1/4 pulg.
- 3- Se procedió a cortar el acero longitudinal en piezas no menores de 75 cm.
- 4- Se cortó el acero para estribos en piezas de 60 cm.
- 5- Los estribos se fabricaron con dimensiones de 11 cm ( $L_1$  y  $L_2$ ) por lado, dejando ganchos a  $135^\circ$ , con una longitud de 7.62 cm ( $L_3$ ) ( $12db^{42}$ ).

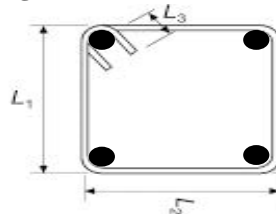
Longitud de gancho = 12 db.

Dónde:

db = diámetro de la varilla = 1/4 pulg. = 0.635 cm.

Longitud de gancho =  $12(0.635 \text{ cm}) = 7.62 \text{ cm}$ .

**Figura 3.3:** Detalle de estribo.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

- 6- Se procedió a realizar la armadura para las viguetas que fueron sometidas a corrosión y a ensayos de flexión. Colocando estribos a cada 10 cm, alternando la posición del gancho y la

---

<sup>42</sup> ACI 318.8.5

longitud de anclaje para el acero longitudinal de 11.43 cm a un lado ( $12db^{43}$ ), como se muestra en la fotografía 3.7.

Longitud de gancho = 12 db.

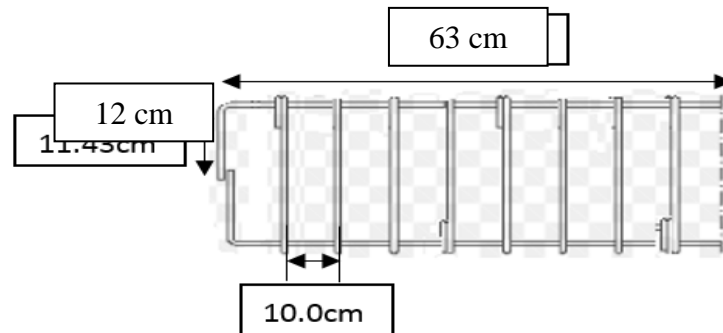
Dónde:

db = diámetro de la varilla = 3/8pulg. = 0.95 cm.

longitud de gancho =  $12(0.95 \text{ cm})$ .

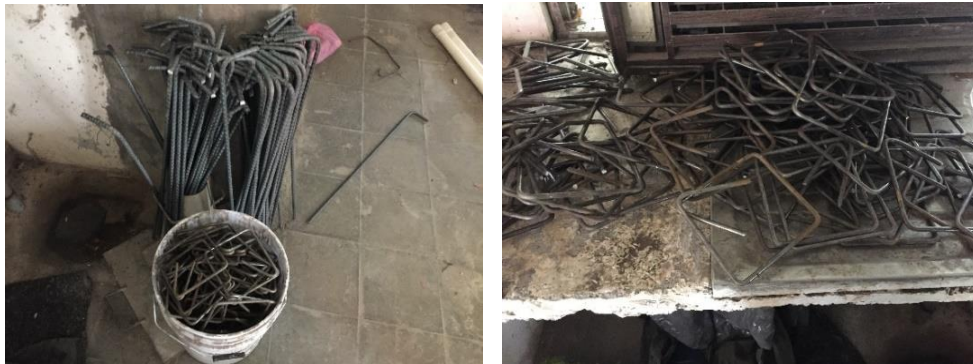
longitud de gancho = 11.43, aprox. 12 cm.

**Figura 3.4:** Detalle de armadura.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Fotografías 3.7:** Corte y preparación de armadura de acero.



a) Refuerzo longitudinal con varilla N°3 y estribos de varillas N°2.

<sup>43</sup> ACI 318.8.5.



b) Preparación y armado del refuerzo según los requerimientos del ACI 318.

Fuente: *Elaboración propia.*

**b) Elaboración de especímenes para prueba de compresión de concreto (ASTM C 39).**

- a. Se limpiaron y engrasaron los moldes donde se hicieron los especímenes, teniendo cuidado de no dejar excedente de grasa.
- b. Se llenaron en tres capas los moldes, de tal manera de que se tuviera un tercio del volumen por capa, cuando se colocó la capa de concreto se movió con el cucharón, alrededor del borde superior, con el objeto de garantizar una distribución uniforme y hacer mínima la segregación del agregado grueso dentro de este. Además, se distribuyó el concreto usando la varilla compactadora antes de iniciar la compactación. Cuando se colocó la capa final, se agregó una cantidad de concreto, de tal forma, que llenase exactamente el molde después de compactarlo.
- c. Número de capas: Para el caso de cilindros de 30 cm de altura se colocaron tres capas, para otros tipos de moldes se usará de acuerdo con la tabla siguiente:

**Tabla 3.38:** Número de capas requeridas para moldear distintos tipos de especímenes.

Dimensión vertical del cilindro, en cm.	Modo de compactación	Número de capas	Espesor aproximado de cada capa en cm.
<u>Hasta 30</u>	<u>Varillado</u>	<u>Iguales</u>	
Más de 30	Varillado	Como se requiera	
Hasta 46	Vibración	Iguales	
Más de 46	Vibración	O más	Tan próximo a 20 como sea posible.

Fuente: *ASTM C 39.*

- d. Compactación con varilla: Después de colocado el concreto en el molde se procedió a compactarlo con el número de golpes según lo establecido en la tabla 3.39 (25 golpes por capa) utilizando el tamaño máximo de varilla de acuerdo con la tabla siguiente:

**Tabla 3.39:** Diámetro de varilla y número de pisoneadas que deben aplicarse al moldear especímenes.

Diámetro del cilindro (cm.).	Diámetro de la varilla en mm. (pulg.).	Número de golpes por capa.
2 a menor de 15	9.5 (3/8)	25
<b>15</b>	<b>15.9 (5/8)</b>	<b>25</b>
20	15.9 (5/8)	50
25	15.9 (5/8)	75

Fuente: *ASTM C 39*.

Los golpes se distribuyeron uniformemente, para permitir que la varilla penetrara aproximadamente 1.0 cm en la capa subyacente, para espesores menores de 10 cm y aproximadamente 2.5 cm para espesores de 10 cm o más.

Si la varilla deja huecos, para cerrarlos debe golpearse ligeramente los lados del molde.

- e. Luego de terminado el proceso de compactación o vibración se procedió a enrasar los moldes con la misma varilla, agregando una porción de concreto si esto fuera necesario.
- f. Una vez endurecida la parte superior del cilindro se procedió a identificarlos con la fecha de elaboración, número correlativo del cilindro e iniciales o nombre del proyecto. Como lo muestran las fotografías 3.8.

**c) Elaboración de viguetas para ensayos de flexión (ASTM C–192).**

- 1- Se limpiaron y engrasaron los moldes, teniendo cuidado de no dejar exceso de grasa.
- 2- El molde se llenó en dos capas iguales y fue varillado.
- 3- Se varilló cada capa a razón de un golpe por cada 13 cm<sup>2</sup> de área superficial del espécimen (para este caso fueron 70 golpes por capa), debiendo penetrar en la capa inferior los valores siguientes:



**Tabla 3.40:** Penetración de la varilla compactadora según espesor de capa.

<b>Espesor.</b>	<b>Penetración.</b>
< 10 cm.	10 mm.
<u>≥ 10 cm.</u>	<u>25 mm.</u>

Fuente: *ASTM C 192.*

Para este caso como la altura es de 15 cm, la penetración en la capa inferior de la vigueta será de 25 mm.

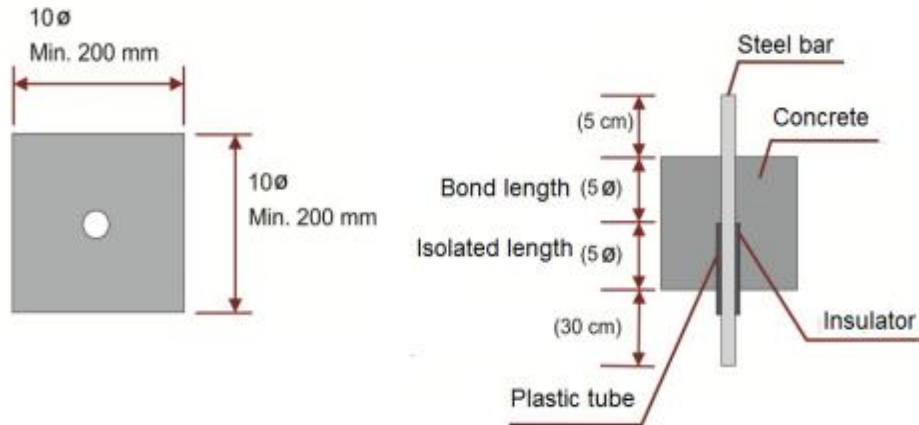
4- Después de compactado el concreto del espécimen se enrasó con la varilla, tratando de que el acabado se realice con la mínima manipulación necesaria para producir una superficie que este a nivel con el borde del molde sin salientes, ni depresiones mayores de 3 mm. Como lo muestran las fotografías 3.8.

5- Después del curado inicial en los moldes, se removieron las viguetas entre 20 y 48 horas después del moldeado y posterior curado a  $23 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$  en condición húmeda hasta su ensayo.

**d) Elaboración de especímenes para ensayos de adherencia acero-concreto, mediante el método de arrancamiento (pull-out) (RILEM-CEB RC6).**

- 1- El objetivo del ensayo fue determinar el esfuerzo de adherencia entre el acero y el concreto.
- 2- Las dimensiones superficiales del molde fueron de 20.0 cm.
- 3- En el centro se colocó una varilla de refuerzo con un extremo libre de 30.0 cm a un lado y 5.0 cm al otro. Como lo muestran las fotografías 3.8.
- 4- La dimensión de la longitud de adherencia dependió del diámetro de la varilla, la relación es  $L_{\text{adherida}} = 5\phi$ , donde  $\phi$  es el diámetro de la varilla que corresponde a 3/8", esta longitud de empotramiento quedó por debajo de los 5.0 cm libres, otra longitud de igual dimensión quedó empotrada en la parte inferior, pero en este caso se colocó una protección de PVC, lo cual impidió el contacto directo con el concreto. En la fig. 3.4 se detalla lo antes expuesto.

**Figura 3.5:** Esquema de probeta para ensayo de pull-out.



**Fuente:** RILEM RC6.

**Fotografías 3.8:** Elaboración de especímenes de prueba.



a) Preparación de moldes para especímenes de ensayo a compresión, flexión y arrancamiento.



b) Elaboración de especímenes de ensayo.



c) Desmoldado y preparación de especímenes para su respectivo curado.

**Fuente:** *Elaboración propia.*

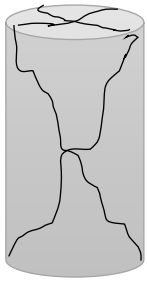
### **3.7 ENSAYOS DE ESPECÍMENES DE CONCRETO.**

#### **3.7.1 ENSAYOS DE COMPRESIÓN SIMPLE A CILINDROS DE CONCRETO (ASTM C-39).**

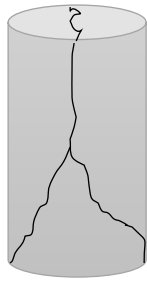
El ensayo a compresión nos permitió determinar la resistencia del concreto a los 7, 14 y 28 días de curado, a continuación, se presenta el procedimiento según la norma.

- 1- Se extrajeron los especímenes del lugar de curado y midieron los diámetros de estos (medir diámetros perpendiculares uno de otro), se midió la altura (promedio de dos alturas perpendiculares) y su peso.
- 2- Se colocó el espécimen sobre la placa inferior.
- 3- Se alineó cuidadosamente el eje del espécimen con respecto al centro de la placa de asiento inferior. A medida esta se apoya sobre el espécimen, se giró suavemente su porción móvil a mano, para obtener un contacto uniforme.
- 4- Se aplicó la carga hasta que el espécimen falló, registrando la carga soportada por el espécimen durante la prueba y anotó el tipo de falla. Tal como lo muestran las figuras 3.5 y las fotografías 3.9.

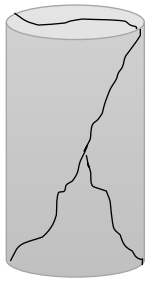
**Figura 3.6:** Tipos de falla en ensayos a compresión de cilindros de concreto.



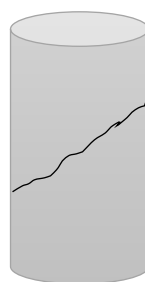
Falla cónica.



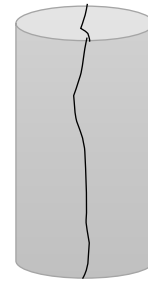
falla cónica y columnar.



falla cónica y cortante.



falla cortante.



Falla columnar.

Planos de falla de cilindros en ensayos a la compresión

**Fuente:** *ASTM C-39.*

**Fotografías 3.9:** Ensayos de resistencia a la compresión de cilindros.



a) Curado y ensayo a la compresión de cilindros.



b) Fallas de cilindros después de ensayos a compresión.

**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Tabla 3.41:** Resultados de ensayos de compresión a cilindros de concreto.

Mezcla	Edad (días)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
SIN PUZOLANA	7	160.66
	14	184.50
	28	231.55
5% CBC	7	75.86
	14	131.36
	28	162.46
10% CBC	7	81.10
	14	95.78
	28	146.73
15% CBC	7	86.15
	14	117.49
	28	128.29
20% CBC	7	64.29
	14	99.10
	28	116.05
5% TV	7	108.23
	14	165.08
	28	209.81
10% TV	7	95.95
	14	130.55
	28	189.03
15% TV	7	106.55
	14	111.91
	28	162.83
20% TV	7	73.23
	14	102.28
	28	153.63

**Fuente:** *Elaboración propia (ver memoria de cálculo y resultados de laboratorio en anexo 1).*

### 3.7.2 ENSAYO DE POTENCIAL DE CORROSIÓN (ASTM C 876).

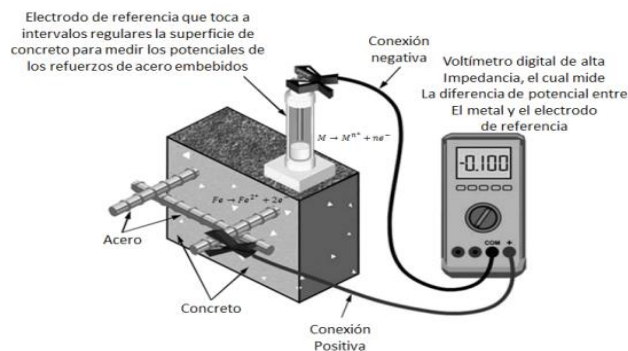
#### 3.7.2.1 CORROSIÓN DE LAS VIGUETAS.

El proceso de corrosión se realizó usando agua de mar natural en la cual se sumergen las viguetas procurando que el agua cubra todo el concreto dejando libres de inmersión los tramos de varilla que se utilizaron para la medición del potencial. Ver fotografía 3.11 literal a.

Se realizaron ciclos de inmersión – secado, ver fotografía 3.11 literal b, dejando las viguetas por siete días inmersas en agua de mar y luego se dejaron secando en el ambiente de laboratorio por otros siete días, al final de cada ciclo se realizaron la medición del potencial de corrosión este procedimiento se repitió durante 7 veces.

### 3.7.2.2 EQUIPO.

**Figura 3.7:** Esquema para ensayo de potencial de corrosión.



**Fuente:** ASTM C-876.

- Una media celda de sulfato de cobre-cobre.
- Recipiente con empalme eléctrico.
- Solución de contacto eléctrico.
- Voltímetro.
- Cables conductores eléctricos. Como lo muestran la figura 3.6 y fotografía 3.10.

**Fotografía 3.10:** Esquema para ensayo de potencial de corrosión.

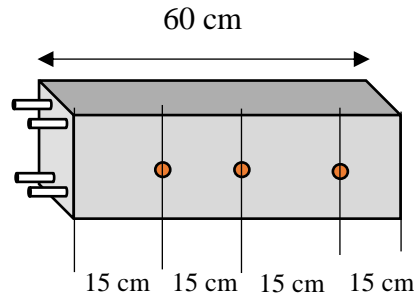


**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.7.2.3 PROCEDIMIENTO.

1. **Espaciamiento entre medidas:** Para nuestro caso se realizaron medidas de corrosión a cada 15 cm en las cuatro caras del elemento. Como se muestra en la figura 3.7 y la fotografía 3.11 literal c.

**Figura 3.8:** Esquema de distribución para medición de potencial de corrosión (para una cara).



**Fuente:** *Elaboración propia.*

2. **Conexión eléctrica para el acero:** Se hizo una conexión eléctrica directa con el acero de refuerzo, por medio de una abrazadera, a una varilla saliente. Para asegurar una conexión de resistencia eléctrica baja, se cepillo 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. Se conectó eléctricamente el acero de refuerzo al terminal positivo del voltímetro.

3. **Conexión eléctrica de la media celda:** Se realizó una conexión eléctrica al final del cable conductor de la media celda y el otro extremo del mismo cable se conectó al terminal negativo del voltímetro.
  - a. Se humedeció la superficie de concreto. Ver fotografía 3.11 literal d.
  - b. Se colocó la media celda en la superficie de concreto y se mantuvo sin moverse.
  - c. Se registraron los potenciales eléctricos de media celda con una precisión de 0.01 Ver fotografía 3.11 literal e.

- d. Se reportaron todos los potenciales de media celda en voltios.
- e. Las medidas de potencial detectaron 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.
- f. Este procedimiento se realizó para cada ciclo de inmersión-secado.

**Fotografías 3.11:** Ensayos de potencial de corrosión.



a) Inmersión de viguetas en agua de mar. b) Secado de viguetas en ambiente de laboratorio.



c) Marcación de viguetas.



d) Humedecimiento de superficies.



e) Medición de potencial de corrosión.

**Fuente:** *Elaboración propia.*



**Tabla 3.42:** Resultados de ensayos de medición de potencial de corrosión en viguetas.

Mezcla	Lecturas de potencial de corrosión (-mV)							
	Inicial	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7
SP	-21.75	-448.92	-474.75	-410.46	-438.54	-415.88	-395.33	-549.96
5% CBC	-27.79	-431.04	-464.88	-450.79	-450.67	-484.04	-479.29	-445.38
10% CBC	-51.54	-425.92	-439.00	-488.21	-455.29	-447.46	-478.00	-471.04
15% CBC	-70.50	-386.13	-421.67	-461.33	-432.21	-452.83	-426.46	-471.96
20% CBC	-72.71	-340.63	-458.25	-480.88	-409.17	-484.58	-525.83	-465.83
5% TV	-46.58	-446.29	-475.79	-471.50	-439.21	-478.17	-395.17	-442.69
10% TV	-87.75	-412.38	-428.63	-440.25	-443.67	-462.25	-449.71	-477.50
15% TV	-22.04	-373.75	-434.08	-463.83	-463.79	-442.88	-485.71	-475.13
20% TV	-63.79	-400.38	-430.63	-466.08	-464.54	-462.38	-498.92	-534.21

**Fuente:** *Elaboración propia (ver memoria de cálculo y resultados de laboratorio en anexo 2).*

### 3.7.3 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA ADHERENCIA (PULL-OUT) (NORMA RILEM RC6).

- 1- Se colocó la probeta sobre la maquina universal, ver fotografía 3.12 literal a, de manera que el tramo de acero de mayor longitud se ubicó sobre las prensas de la máquina, para poder aplicar la fuerza de arrancamiento.
- 2- En el tramo de menor longitud se colocó un deformímetro para medir el desplazamiento que presente la varilla al momento de aplicar la carga.
- 3- Se aplicó la fuerza mediante el mecanismo de la maquina universal y se registró la lectura para la cual se rompe la adherencia entre el concreto y el acero.
- 4- Se registró la lectura del deformímetro para calcular el desplazamiento de la varilla. Ver fotografía 3.12 literal b.
- 5- Se realizaron los cálculos de la siguiente manera:

**Ecuación 3.8:** Calculo del esfuerzo de adherencia.

$$\tau = \frac{P}{\pi \phi l_a}$$

**Fuente:** *Carvalho et al, 2017 “Experimental Investigation of Steel-Concrete Bond for Thin Reinforcing Bars”.*

Dónde:

$\tau$  = Esfuerzo de adherencia.

P = Fuerza de arrancamiento.

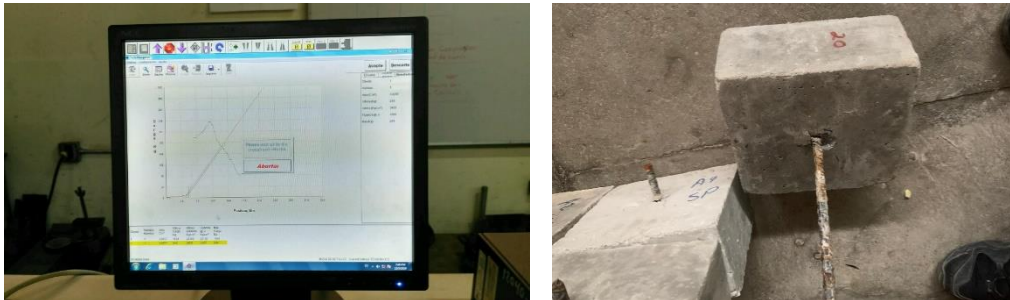
$\phi$  = Diámetro de la varilla.

$L_a$  = Longitud adherida.

**Fotografías 3.12:** Ensayos de resistencia de adherencia (pull-out).



a) Colocación del espécimen en la maquina universal.



c) Obtención de resultados.

**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Tabla 3.43:** Resultados ensayos de resistencia a la adherencia (pull-out).

Mezcla.	Esfuerzo de adherencia (kg/cm <sup>2</sup> ).	
	Sometidos a corrosión.	En ambiente natural.
SP	107.15	121.66
5% CBC	89.63	75.12
10% CBC	54.88	46.24
15% CBC	61.05	60.11
20% CBC	47.51	51.63
5% TV	57.56	72.91
10% TV	68.12	104.20
15% TV	58.94	66.98
20% TV	49.12	69.76

**Fuente:** *Elaboración propia (ver memoria de cálculo y resultados de laboratorio en anexo 3.*

### **3.7.4 ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGUETAS DE CONCRETO CON CARGA AL CENTRO (ASTM C-293).**

El ensayo a la flexión de viguetas es una prueba que se utiliza para calcular el CBR en carreteras, para este ensayo se le agregó un refuerzo de acero a la vigueta con el objeto de determinar la resistencia ultima a la flexión y se determinó la resistencia a la flexión en elementos con y sin corrosión.

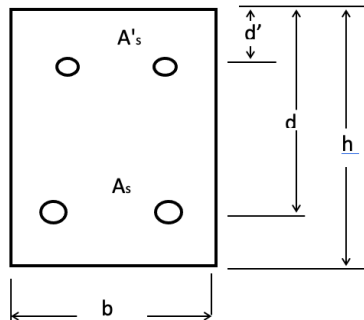
- 1- Se extrajeron los especímenes del lugar de curado y se midió su longitud (l), altura (d) y ancho (b).
- 2- Se dividió y marco la vigueta en tercios, lo que se utilizó de referencia para aplicar la carga.
- 3- Se colocó la base o ancho de la vigueta sobre los rodillos de apoyo.
- 4- Se centró el rodillo de transmisión de carga con respecto al dispositivo de tal manera que se aplicó la fuerza vertical sin excentricidad.

- 5- Se aplicó la carga a la vigueta hasta que fallo. Se registró la carga máxima y el tipo de fractura.
- 6- Se registró el valor de la carga obtenida en el ensayo como la carga máxima real de falla de la probeta y además se calculó la carga de diseño teórica de acuerdo con el ACI y la carga de falla teórica utilizando el programa seismostruct.
- 7- Para calcular la carga de diseño teórica que soporta la vigueta de concreto reforzado, se presenta a continuación la teoría para el diseño de vigas doblemente reforzadas tal como se establece en el ACI 318-14.
- 8- La fórmula para calcular resistencia de momento por diseño es la siguiente:

$$\phi Mn = \phi \left[ A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') \right]$$

La sección de la vigueta que se utilizó en este análisis se tomará la V1 SP, que indica la vigueta número 1 sin adición de puzolanas.

**Figura 3.9:** Sección transversal típica de vigueta doblemente reforzada.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

Donde:

$$A_s = 0.22 \text{ in}^2 \text{ (2 No3).}$$

$$A'_s = 0.22 \text{ in}^2 \text{ (2 No3).}$$

$$F_y = 40,000 \text{ lb/in}^2 \text{ (ver ensayo de calidad del acero en anexo 5).}$$

$$d = 4.68 \text{ in.}$$

$$d' = 1.19 \text{ in.}$$

$$b = 6.08 \text{ in.}$$

Supondremos que el acero a compresión entra en fluencia:

$$f'_s = f_y$$

Escribiendo la ecuación de equilibrio:

$$A_s f_y = 0.85 f'_c b \beta_1 c + A'_s f_y$$

Despejando c:

Se tiene que  $c = 0$  lo que indica que el acero a compresión nunca entra en fluencia, por lo que se aplicó la teoría de las vigas simplemente reforzadas, el procedimiento de cálculo es el siguiente:

- ✓ Revisión del porcentaje de acero:

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{0.22 \text{ in}^2}{6.08 \text{ in} \times 4.68 \text{ in}} = 0.008$$

$$\rho_{\text{máx}} = 0.0181$$

$$\rho_{\text{min}} = 0.0033$$

El porcentaje de acero cumple.

- ✓ Cálculo de la deformación unitaria a tensión  $\epsilon_t$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{0.22 \text{ in}^2 \times 40,000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}}{0.85 \times 3293.42 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \times 6.08 \text{ in}^2} = 0.52 \text{ in}$$

Se utilizó  $\beta_1 = 0.85$  para concretos entre 3,000 lb/in<sup>2</sup> a 4,000 lb/in<sup>2</sup>.

- ✓ Calculando c:

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{0.52}{0.85} = 0.61 \text{ in}$$

- ✓ Calculando la deformación unitaria a tensión  $\epsilon_t$ :

$$\epsilon_t = \frac{d - c}{c} \times 0.003 = \frac{(4.68 - 0.61)}{0.61} \times 0.003 = 0.020$$

De la tabla del libro de Macormack figura 3.5 página 74 se tomó  $\Phi = 0.90$

✓ Calculando el momento nominal  $M_n$ :

$$M_n = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) = 0.22 \text{ in}^2 \times 40,000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \left( 4.68 - \frac{0.52}{2} \right) = 38,896 \text{ pulg. lb}$$

✓ Momento último  $M_u$ :

$$M_u = \phi M_n = 0.90 \times 38,896 \text{ pulg. lb} = 35,006.40 \text{ pulg. lb}$$

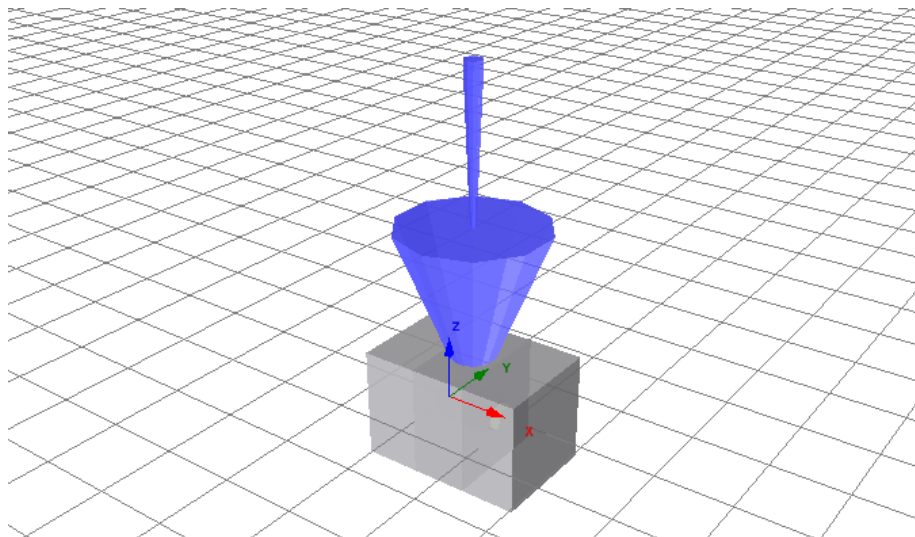
✓ Encontrando carga última  $P_u$ :

$$P_u = \frac{4M_u}{L} = \frac{4 \times 34,939.08 \text{ pulg. lb}}{11.8 \text{ pulg}} = 11,866.6 \text{ lb} = 5,395.7 \text{ Kg}$$

Los cálculos para cada una de las probetas se muestran en el anexo 4.

9- Cálculo de la carga teórica de falla: Para estimar la carga ultima que resistió la vigueta se elaboró un modelo matemático en el software seismostruct, como se muestra en la figura 3.9, con el fin de efectuar un análisis no lineal de la vigueta, para efectos del cálculo se tomaron 2 modelos, el modelo 1 (Sin Puzolanas) y el modelo 2 (5% CBC).

**Figura 3.10:** Modelo matemático de la vigueta en el software seismostruct.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

### Propiedades de los materiales.

Las propiedades de los materiales considerados se muestran a continuación:

En la tabla 3.44 se muestran las propiedades que se utilizaron para el cálculo de la carga última de falla teórica, en las probetas que se ensayaron posteriormente, el valor que cambia es el  $f'_c$  para cada una de las sustituciones de puzolanas, los resultados pueden verse en las figuras 3.15 hasta la 3.21.

**Tabla 3.44:** Propiedades de los materiales utilizados en el análisis de la vigueta en el software seismostruct.

Modelo 1. (S.P.)		Modelo 2. (5% CBC)	
Concreto.		Concreto.	
$f'_c$ (de ensayos)	231 kg/cm <sup>2</sup>	$f'_c$ (de ensayos)	162 kg/cm <sup>2</sup>
Acero.		Acero.	
$f_y$ (nominal)	2800 kg/cm <sup>2</sup>	$f_y$ (nominal)	2800 kg/cm <sup>2</sup>

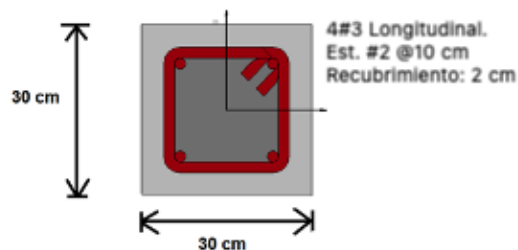
Fuente: *Elaboración propia.*

Para el concreto el módulo de elasticidad se estimó como  $E_c = 15100\sqrt{f'_c}$ .

### Sección transversal.

La sección transversal de estas viguetas es de 30 cm x 30 cm, su longitud es de 60 cm y el armado dispuesto son 4 barras No. 3 como refuerzo longitudinal, con estribos No. 2 a cada 10 cm.

**Figura 3.11:** Sección transversal de la vigueta.

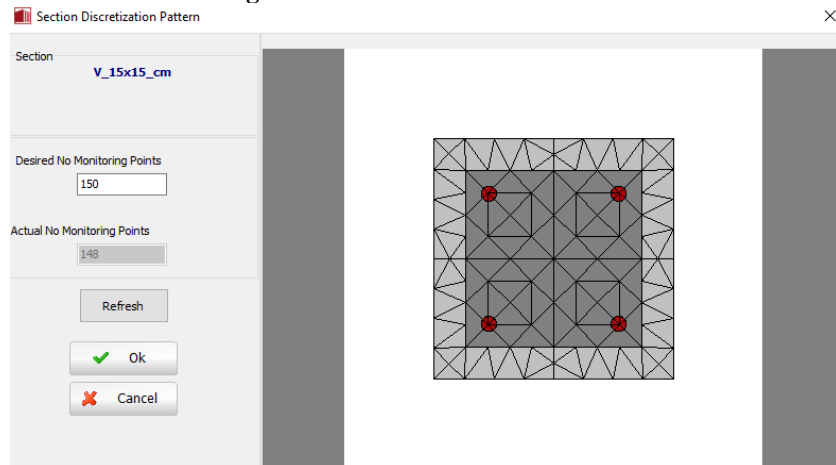


Fuente: *Elaboración propia.*

### Modelación de la inelasticidad.

La vigueta se modeló con inelasticidad distribuida, utilizando elementos inelásticos de marco basados en fuerzas. La discretización se muestra a continuación.

**Figura 3.12:** Modelo de inelasticidad.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

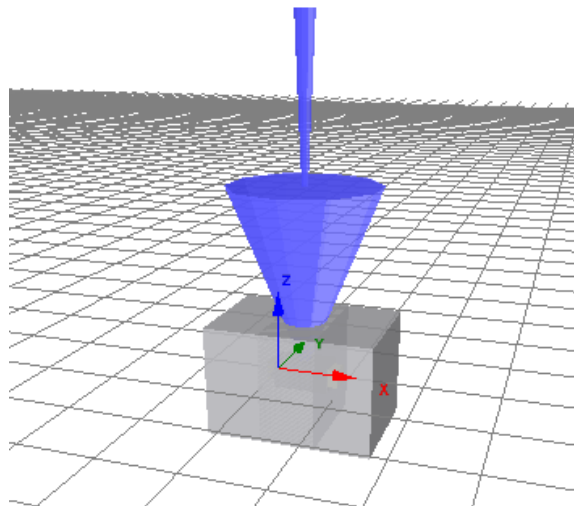
### **\Restricciones.**

A pesar de que la vigueta tiene una longitud total de 60 cm, su claro libre entre apoyos es de 30 cm, siendo esta la distancia tomada para modelar la separación entre apoyos de la vigueta. Los apoyos se modelaron como pasadores simples.

### **Cargas.**

Al igual que en el ensayo, la carga se ubicó al centro del claro libre. Para el modelado, se representó como una carga, la cual se fue incrementando hasta lograr la inestabilidad del modelo.

**Figura 3.13:** Modelado de carga en el análisis de inestabilidad.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

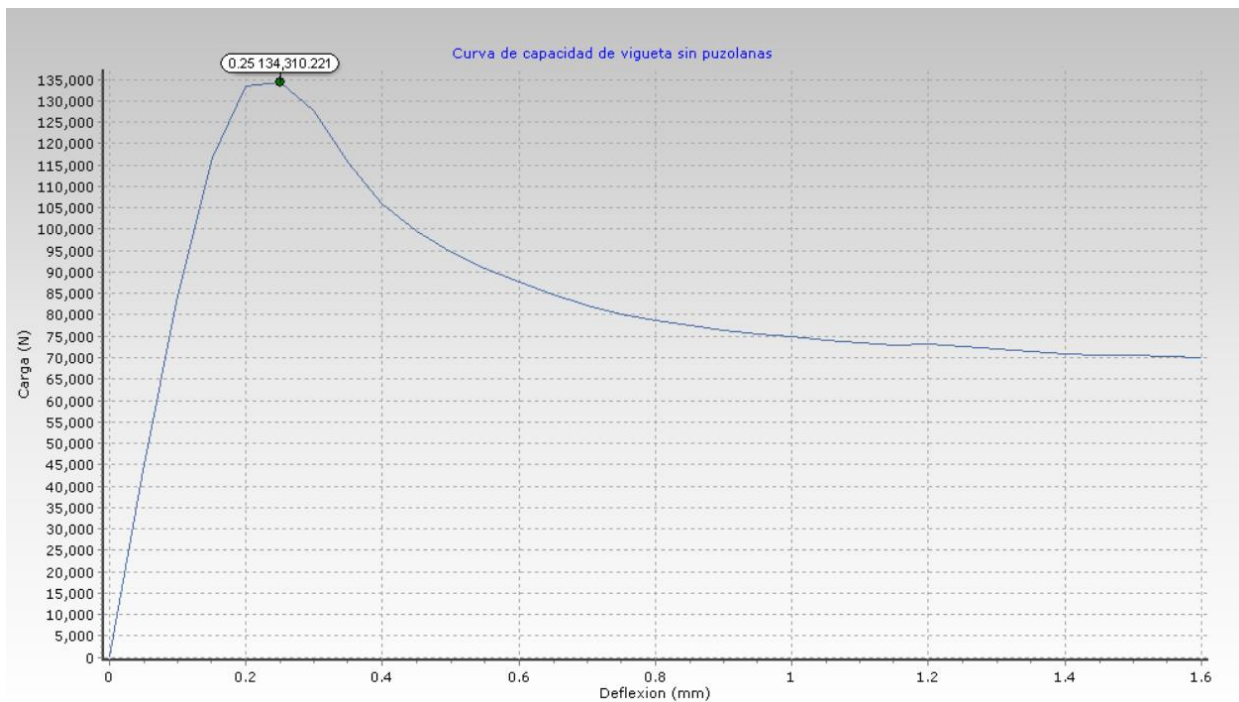


## Resultados.

A continuación, se muestran las curvas de capacidad obtenidas para cada uno de los modelos.

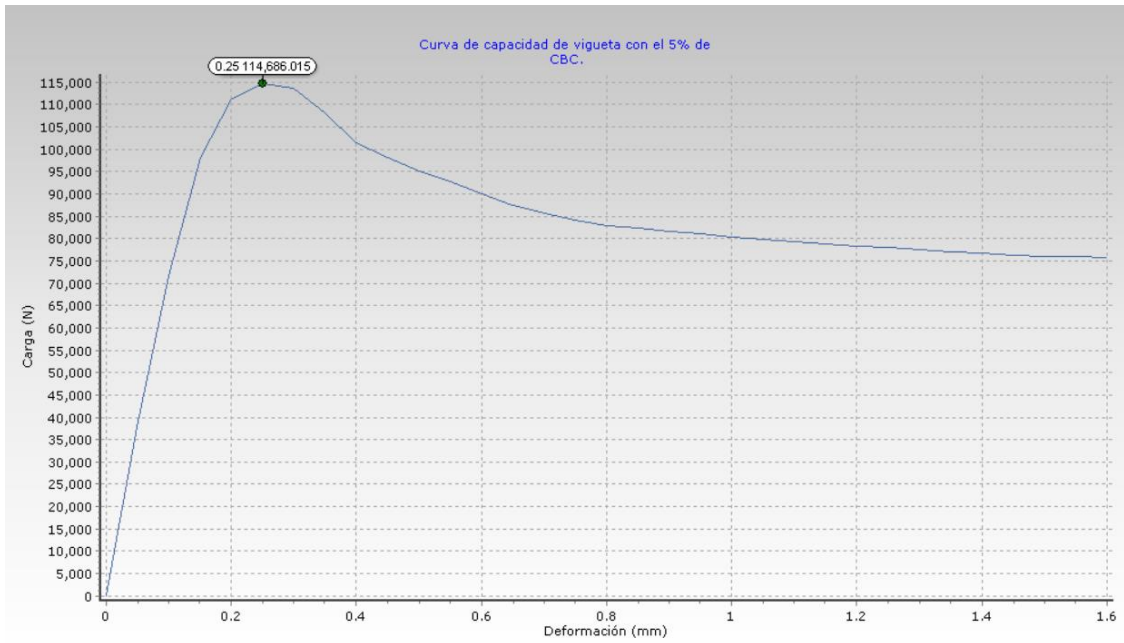
Estas curvas en las abscisas representan la deflexión del elemento y en las ordenadas la carga aplicada en Newton; el análisis utilizado para el cálculo de la falla última, fue con el método de empuje incremental (pushover), el cual es un cálculo estático no lineal para el análisis de elementos estructurales. El patrón de cargas se deduce del cálculo dinámico de cargas equivalentes, estas cargas se incrementan de forma monótona hasta que se alcanza el fallo global del elemento estructural ensayado, que para este estudio fueron las viguetas de concreto reforzado. Las gráficas que se muestran en las siguientes figuras 3.13 hasta la 3.21, muestran las relaciones entre las cargas aplicadas y las respuestas inducidas que reciben el nombre deformaciones.

**Figura 3.14:** Vigueta de Concreto Reforzado SP ( $F'_c = 231.55 \text{ Kg/cm}^2$ ).



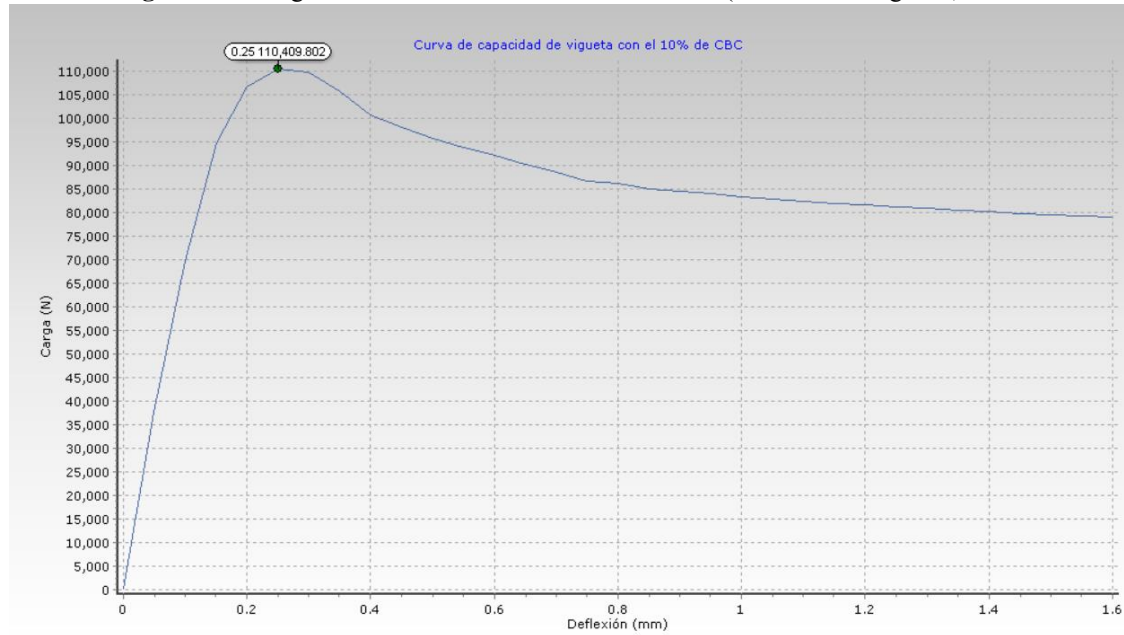
**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Figura 3.15:** Vigueta de Concreto Reforzado 5% CBC ( $F'_c=162.46 \text{ Kg/cm}^2$ ).



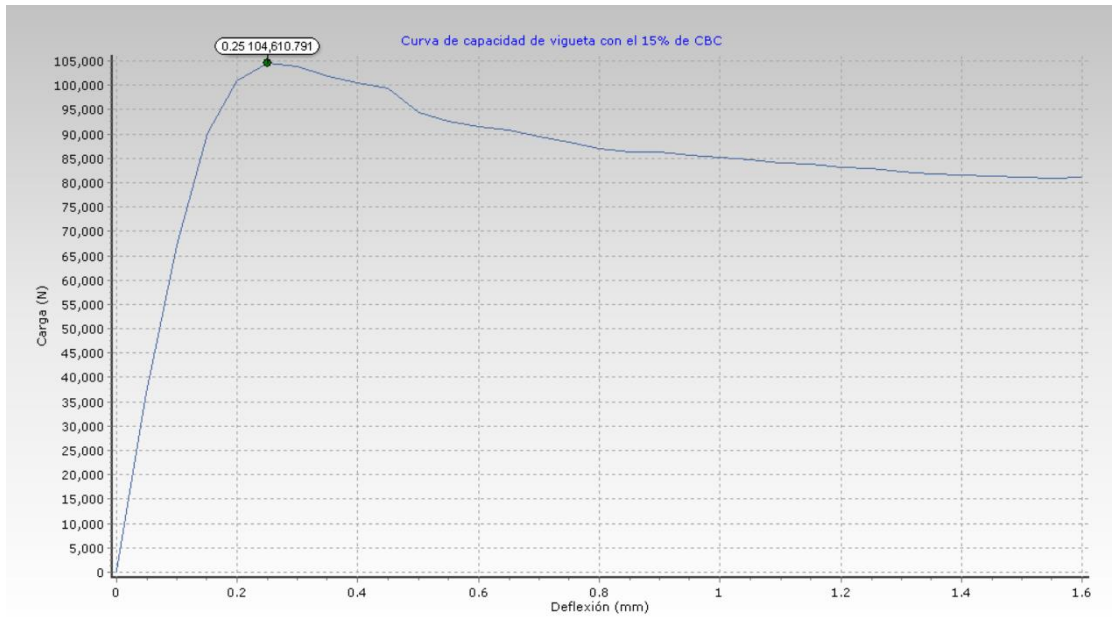
Fuente: *Elaboración propia.*

**Figura 3.16:** Vigueta de Concreto Reforzado 10% CBC ( $F'_c= 146.73 \text{ Kg/cm}^2$ ).



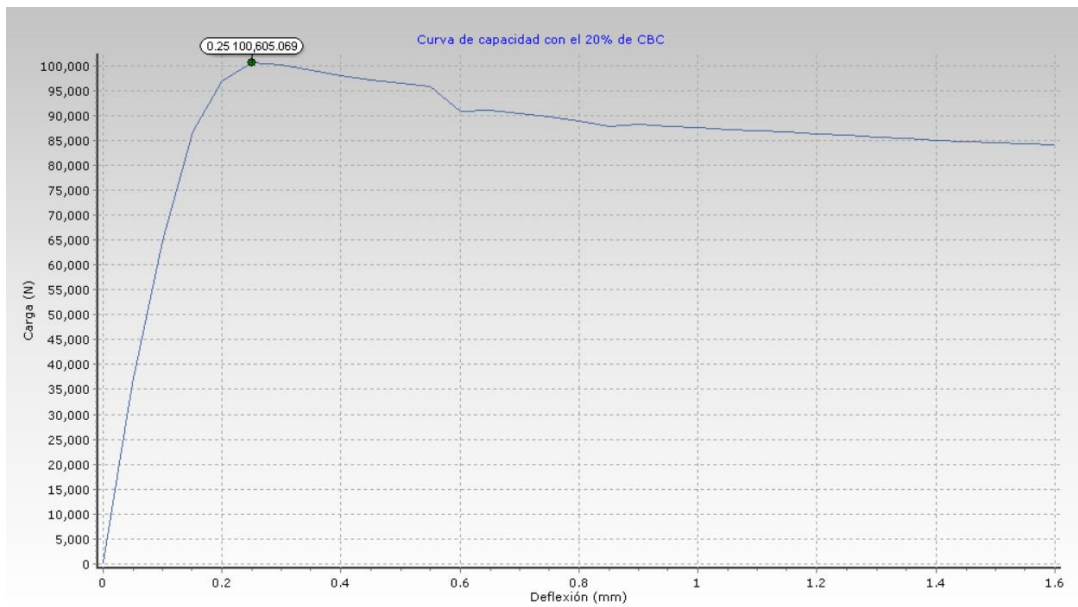
Fuente: *Elaboración propia.*

**Figura 3.17:** Vigueta de Concreto Reforzado 15% CBC ( $F'_c = 128.29 \text{ Kg/cm}^2$ ).



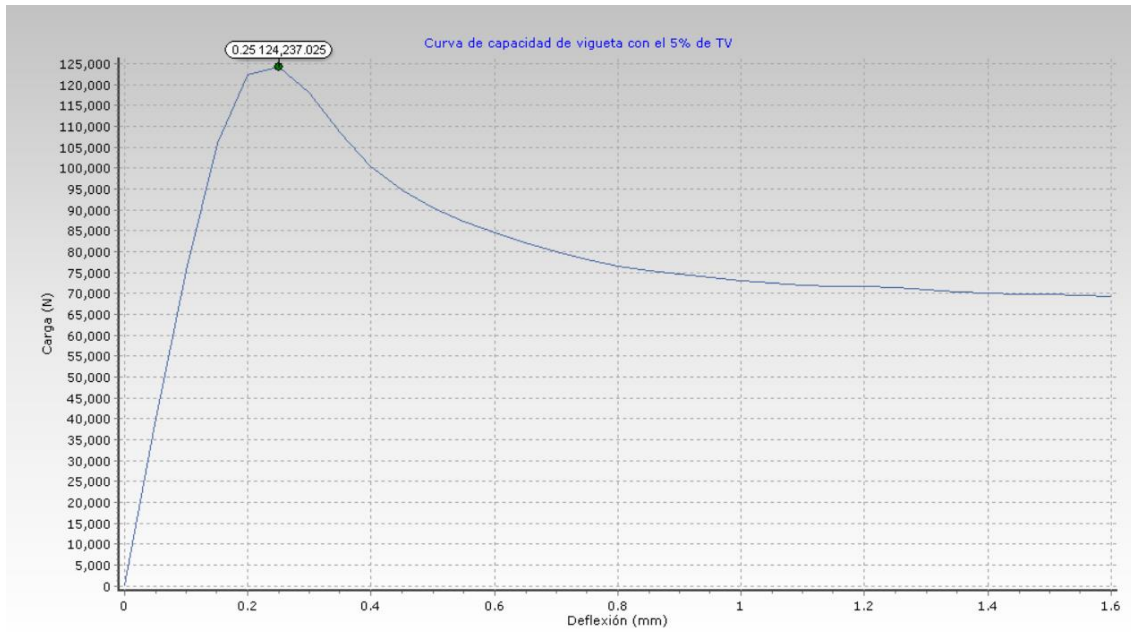
Fuente: *Elaboración propia.*

**Figura 3.18:** Vigueta de Concreto Reforzado 20% CBC ( $F'_c = 116.05 \text{ Kg/cm}^2$ ).



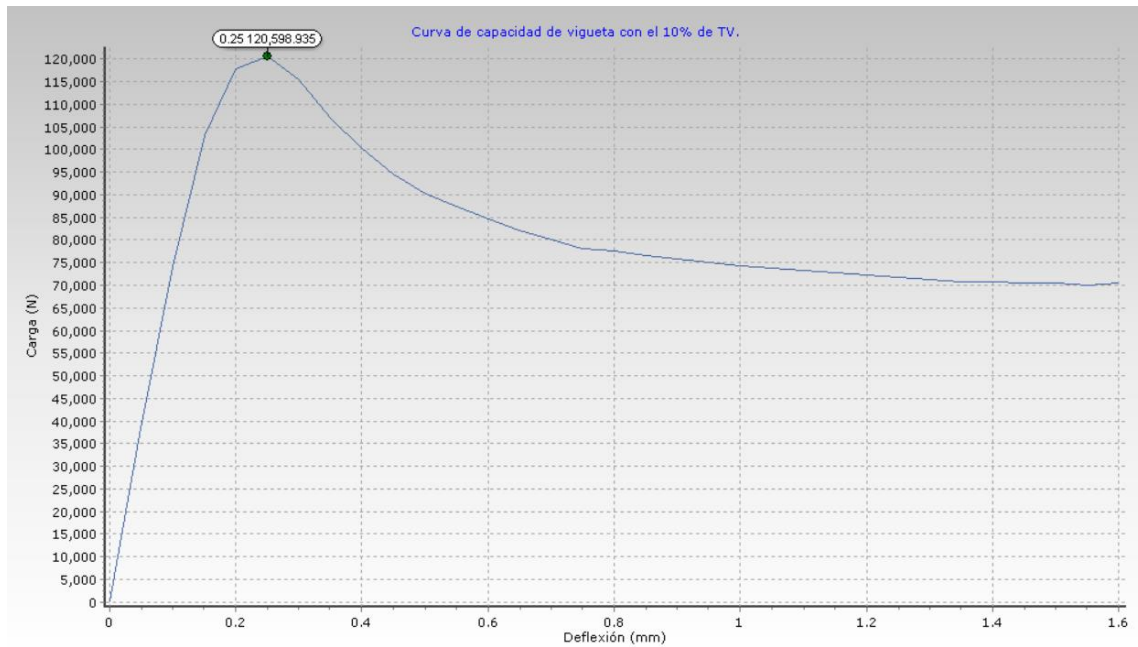
Fuente: *Elaboración propia.*

**Figura 3.19:** Vigueta de Concreto Reforzado 5% TV ( $F'_c = 209.81 \text{ Kg/cm}^2$ ).



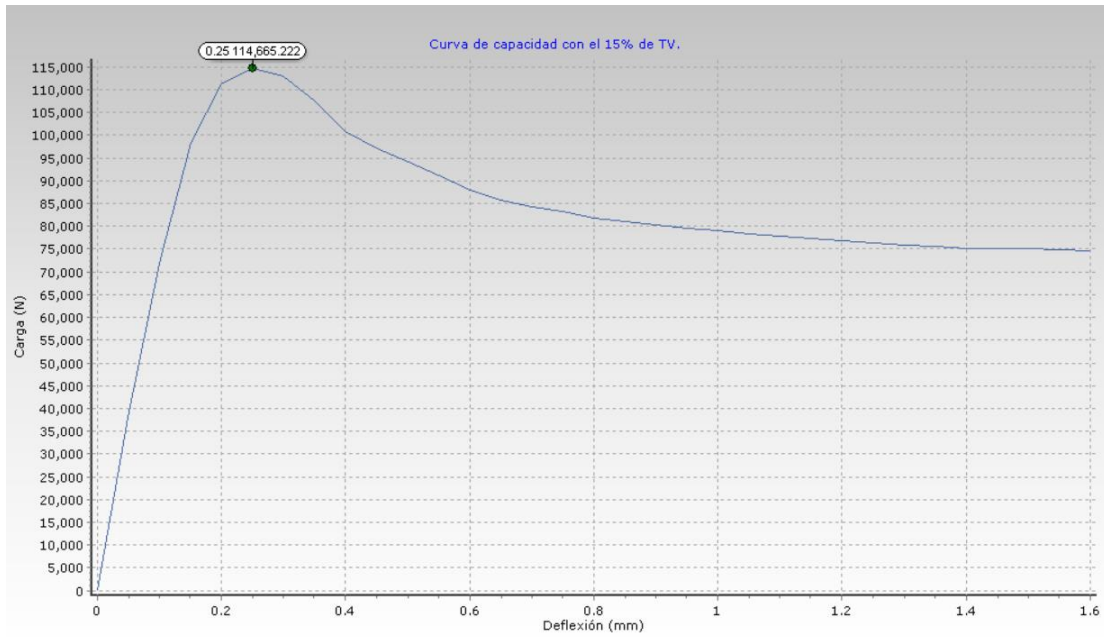
Fuente: *Elaboración propia.*

**Figura 3.20:** Vigueta de Concreto Reforzado 10% TV ( $F'_c = 189.03 \text{ Kg/cm}^2$ ).



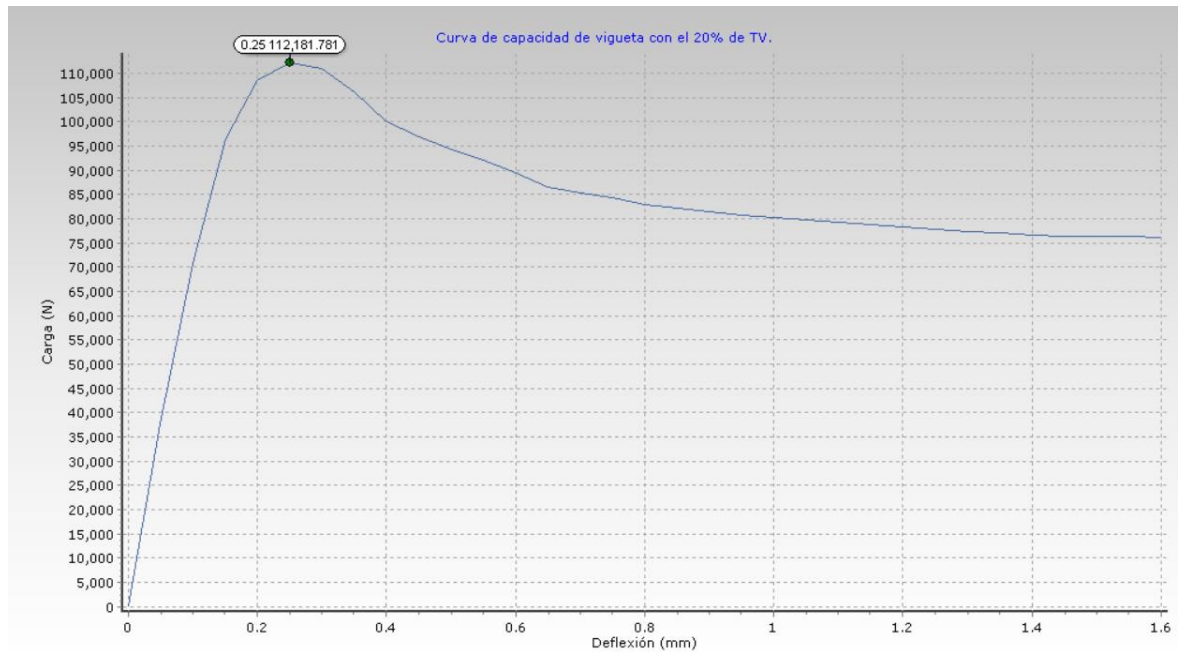
Fuente: *Elaboración propia.*

**Figura 3.21:** Vigueta de Concreto Reforzado 15% TV ( $F'_c= 162.83 \text{ Kg/cm}^2$ ).



Fuente: *Elaboración propia.*

**Figura 3.22:** Vigueta de Concreto Reforzado 20% TV ( $F'_c=153.63 \text{ Kg/cm}^2$ ).



Fuente: *Elaboración propia.*

En la tabla 3.45 se muestra el resumen de los resultados obtenidos de la carga de rotura máxima teórica, calculada con seismostruct, luego la carga de rotura máxima real obtenida del ensayo de flexión para las viguetas con y sin corrosión y por último se presenta la carga de diseño nominal.

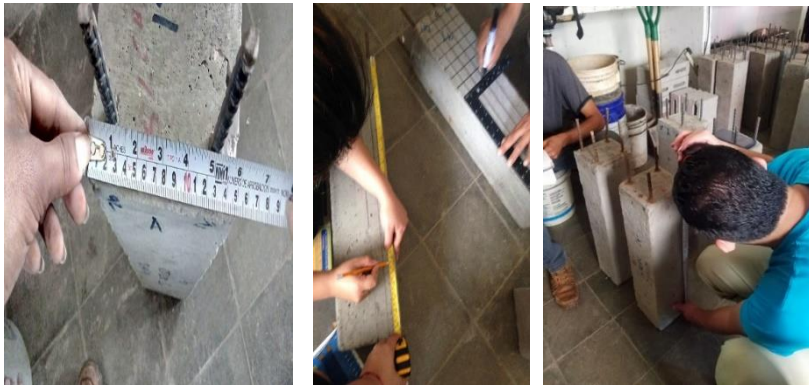
**Tabla 3.45:** Resultados del análisis de la vigueta en el software seismostruct en comparación con resultados de ensayos.

<b>PORCENTAJE PUZOLANAS.</b>	<b>f'c.</b>	<b>Carga rotura máxima teórica.</b>	<b>Carga rotura máxima teórica.</b>	<b>Carga Rotura máxima real sin corrosión.</b>	<b>Carga Rotura máxima real con corrosión.</b>	<b>Carga máxima de diseño.</b>
(%)	Kg/cm <sup>2</sup>	Newton	kg.	kg.	Kg.	kg.
<b>0 % SP (Sin puzolana)</b>	231.55	134,310.22	13,695.88	11,133.34	11,598.00	5,567.20
<b>5% de CBC</b>	162.46	114,686.02	11,694.76	10,569.00	10,941.50	5,773.20
<b>10% de CBC</b>	146.73	110,409.80	11,258.71	9,214.50	11,297.50	5,441.90
<b>15% de CBC</b>	128.29	104,610.79	10,667.37	9,985.50	10,878.00	5,396.30
<b>20% de CBC</b>	116.05	100,605.07	10,258.90	8,736.50	8,678.00	5,518.20
<b>5% de TV</b>	209.81	124,237.03	12,668.70	11,508.50	11,374.00	5,716.90
<b>10% de TV</b>	189.03	120,598.94	12,297.71	10,690.00	12,996.50	5,617.70
<b>15% de TV</b>	162.83	114,665.22	11,692.64	11,500.00	10,000.00	5,575.40
<b>20% de TV</b>	153.63	112,181.78	11,439.40	10,598.50	9,373.50	5,484.20

**Fuente:** *Elaboración propia.*

El procedimiento para el ensayo a flexión de las viguetas consistió en tomar las medidas de la sección y la longitud y marcar a cada 3 cm líneas longitudinales y transversales para identificar el apareamiento de grietas durante el ensayo de flexión como puede apreciarse en las fotografías 3.13, posteriormente se colocó en la máquina de compresión para llevar a la falla el elemento como se puede apreciar en las fotografías 3.14.

**Fotografías 3.13:** Ensayos de resistencia a la flexión en viguetas de concreto.



**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Fotografías 3.14:** Preparación de las viguetas.



Aplicación de carga en la máquina de ensayo de flexión.

**Fuente:** *Elaboración propia.*

# **CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS**



## **INTRODUCCIÓN.**

Para este capítulo se analizaron los resultados obtenidos de los diferentes ensayos, que se obtuvieron en el capítulo 3 los cuales son: Resistencia a la compresión simple, potencial de corrosión en viguetas de concreto reforzado, resistencia a la adherencia en cubos de concreto, carga promedio de rotura en viguetas de concreto reforzado sometidas a flexión, peso volumétrico y absorción de viguetas de concreto reforzado. El análisis de cada uno de los ensayos anteriores consistió en evaluar a través de la comparación de los resultados, la incidencia de la sustitución de cemento por CBC y TV, en incrementos porcentuales; la comparación se realizó entre una muestra patrón sin sustitución de puzolanas y las probetas con sustituciones de puzolanas y también la comparación entre los diferentes porcentajes de sustituciones de puzolanas entre sí; adicionalmente se evaluó la incidencia de la corrosión en el comportamiento de la flexión y la adherencia en probetas de concreto con acero de refuerzo, con y sin sustitución de puzolanas (CBC y TV).

### **4.1 ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE.**

La fabricación del concreto para cada una de las mezclas (sin puzolanas, 5%,10%,15%,20% de CBC Y TV) fue realizada usando una mezcladora mecánica, para cada mezcla se realizaron mediciones de revenimiento y temperatura.

En las mediciones de revenimiento que se muestran en la tabla 3.37, se observó que a medida aumenta la cantidad de puzolana, una leve disminución del revenimiento; el diseño de mezcla se realizó para un revenimiento de  $4 \pm 1$  pulg, obteniendo un revenimiento de 5 pulg. para mezcla sin puzolana (SP) y con el 5% de CBC y TV, llegando a obtener un valor de 4 pulg. para el 20% de CBC, este fue el valor menor, por lo tanto, la trabajabilidad del concreto se mantuvo en los rangos permisibles.

En cuanto a la temperatura de acuerdo con la tabla 3.37, no se mostró mayor variación entre las mezclas, esta se mantuvo entre los valores de 30°C a 32°C, considerando este valor favorable de temperatura para fabricar los especímenes de ensayo. En el anexo 1 se muestran los resultados de todos los especímenes ensayados, así como un esquema de su falla.

#### 4.1.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN ENTRE CILINDROS DE CONCRETO SIN PUZOLANA (SP) Y CON SUSTITUCIONES DE CBC.

Después de realizar los ensayos a compresión simple de los especímenes con sustitución de CBC y compararlo con la muestra elaborada sin CBC, se observó que los resultados de la resistencia a la compresión simple del concreto a los 28 días (231.55 Kg/cm<sup>2</sup>), (que se muestran en la tabla 3.41 del capítulo 3), se reducen conforme aumenta la adición de CBC en la mezcla; la proporción del 20% de CBC (116.05 Kg/cm<sup>2</sup>) tiene una pérdida del 49.9% de su resistencia con respecto a la muestra sin adición de puzolana y el menor valor de sustitución de CBC del 5% (162.46 Kg/cm<sup>2</sup>), se obtuvo una reducción del 29.8% con respecto a la muestra sin adición de puzolana, tal como se muestran los resultados en la tabla 4.1 y gráfica 4.1.

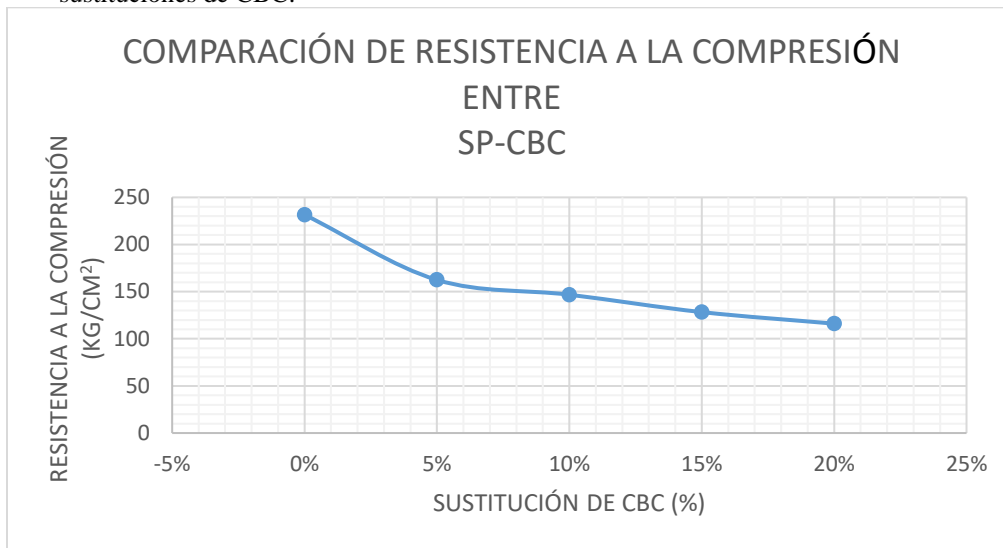
**Tabla 4.1:** Resultados de ensayos de resistencia a la compresión simple de concreto a los 28 días para concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de CBC.

<b>COMPARACIÓN RESISTENCIA SP-CBC.</b>	
<b>PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN.</b>	<b>RESISTENCIA DE COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS (KG/CM<sup>2</sup>).</b>
<b>0%</b>	<b>231.55</b>
<b>5%</b>	<b>162.46</b>
10%	146.73
15%	128.29
<b>20%</b>	<b>116.05</b>

**Fuente:** *Elaboración propia.*

En general se puede observar que mientras se aumenta la sustitución de puzolana (CBC) por cemento, la disminución de la resistencia se incrementa.

**Gráfica 4.1:** Comparación resultados de resistencia a la compresión entre concreto sin puzolana (SP) y con sustituciones de CBC.



**Fuente:** Elaboración propia.

#### **4.1.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN ENTRE CILINDROS DE CONCRETO SIN PUZOLANA (SP) Y CON SUSTITUCIONES DE TV.**

Después de realizar los ensayos a compresión simple de los especímenes con sustitución de TV y compararlo con la muestra elaborada sin TV, se observó que los resultados de la resistencia a la compresión simple a los 28 días de la muestra sin TV (231.55 Kg/cm<sup>2</sup>), (que se muestra en la tabla 3.41 del capítulo 3), se reducen conforme aumenta la adición de TV en la mezcla; la proporción del 20% de TV (153.63 Kg/cm<sup>2</sup>) tuvo una pérdida del 33.7% de su resistencia con respecto a la muestra sin adición de puzolana y el menor valor de sustitución de TV del 5% (209.81 Kg/cm<sup>2</sup>), tuvo una pérdida del 9.4%, con respecto a la muestra sin adición de puzolana, tal como se muestran los resultados en la tabla 4.2 y gráfica 4.2

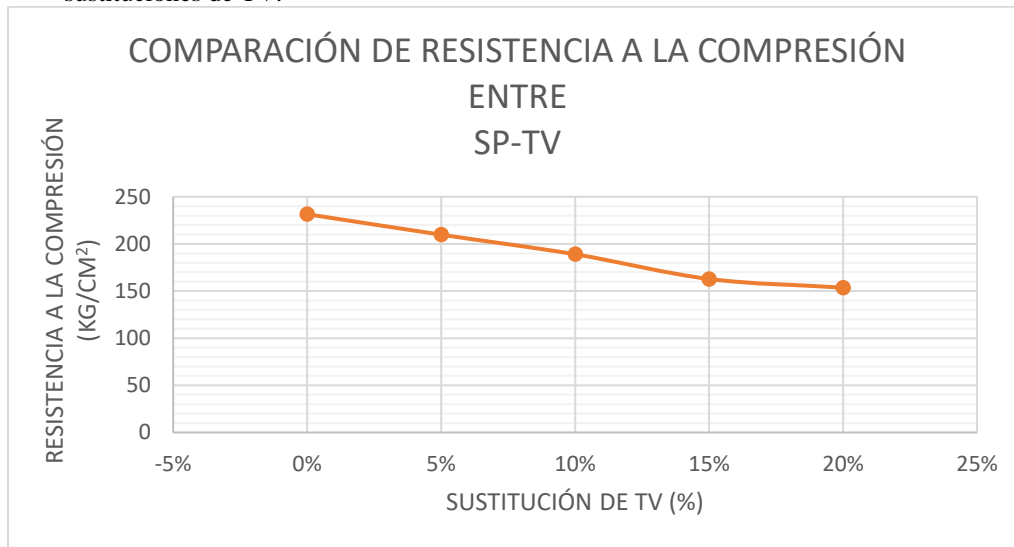
En general se puede observar que mientras aumenta la sustitución de puzolana (TV) por cemento, la disminución de la resistencia se incrementa.

**Tabla 4.2:** Resultados de ensayos de resistencia a la compresión simple de concreto a los 28 días para concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de TV.

<b>COMPARACIÓN RESISTENCIA SP-TV.</b>	
<b>% DE SUSTITUCIÓN.</b>	<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS (KG/CM<sup>2</sup>).</b>
<b>0%</b>	<b>231.55</b>
<b>5%</b>	<b>209.81</b>
10%	189.03
15%	162.83
<b>20%</b>	<b>153.63</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica 4.2:** Comparación resultados de resistencia a la compresión entre concreto sin puzolana (SP) y con sustituciones de TV.



**Fuente:** Elaboración propia.

#### **4.1.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN ENTRE CILINDROS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE CBC Y CON SUSTITUCIÓN DE TV.**

Después de realizar los ensayos a compresión simple a los 28 días (que se muestran en la tabla 3.41 del capítulo 3), se comparan los resultados de los especímenes con sustitución de CBC y TV, tal como se muestran en la tabla 4.3 y gráfica 4.3, se observó que ambas puzolanas tienen la misma tendencia a reducir la resistencia a la compresión, conforme se incrementa la proporción de la sustituciones de puzolana por cemento; se determinó que es menor la pérdida de resistencia a la

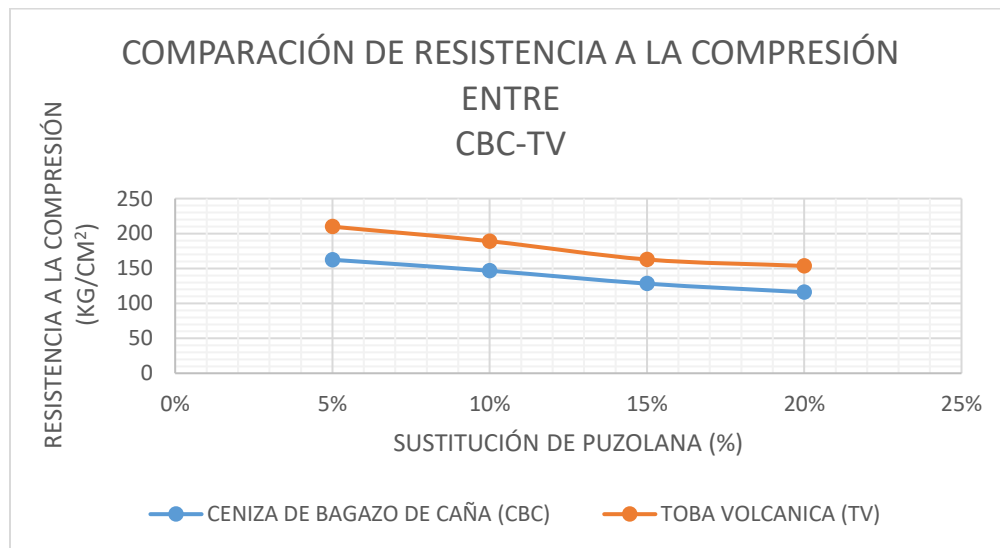
compresión con la adición de TV que con la CBC, en el porcentaje de sustitución del 5% la diferencia entre ambas es de 29.14% y para la sustitución del 20% es del 32.38%, de igual manera en los porcentajes de 10% y 15% se tiene el mismo comportamiento.

**Tabla 4.3:** Resultados de ensayos de resistencia a la compresión simple de concreto a los 28 días para concreto con sustituciones de CBC y concreto con sustituciones de TV.

<b>COMPARACIÓN RESISTENCIA CBC-TV.</b>		
<b>PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN.</b>	<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS(KG/CM<sup>2</sup>).</b>	
	<b>CBC</b>	<b>TV</b>
<b>5%</b>	<b>162.46</b>	<b>209.81</b>
10%	146.73	189.03
15%	128.29	162.83
<b>20%</b>	<b>116.05</b>	<b>153.63</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica 4.3:** Comparación resultados de resistencia a la compresión entre concreto con sustituciones de CBC y con sustituciones de TV.



**Fuente:** Elaboración propia.

Los resultados a la compresión de las probetas a las edades de 7, 14 y 28 días, se encuentran en las tablas A1-1 hasta la A1-9 del anexo 1 de este trabajo de investigación.

## 4.2 ANÁLISIS DE POTENCIAL DE CORROSIÓN EN VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO.

### 4.2.1 ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DEL POTENCIAL DE CORROSIÓN CON RESPECTO A LOS CICLOS DE INMERSIÓN PARA VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN SUSTITUCIÓN DE PUZOLANA (SP).

Después de realizar los ensayos de potencial de corrosión en las probetas sin adición de puzolanas y evaluar su comportamiento en el tiempo (de acuerdo con la tabla 3.42 del capítulo 3), se observó que desde el primer ciclo de inmersión y secado los ataques de cloruros fueron evidentes, alcanzando un valor de -448.92 mV, debido al incremento negativo del potencial de corrosión, hasta llegar a un valor máximo en las tomas de lecturas del ciclo final del ensayo de -549.96 mV, tal como se puede apreciar en la tabla 4.4 y gráfica 4.4.

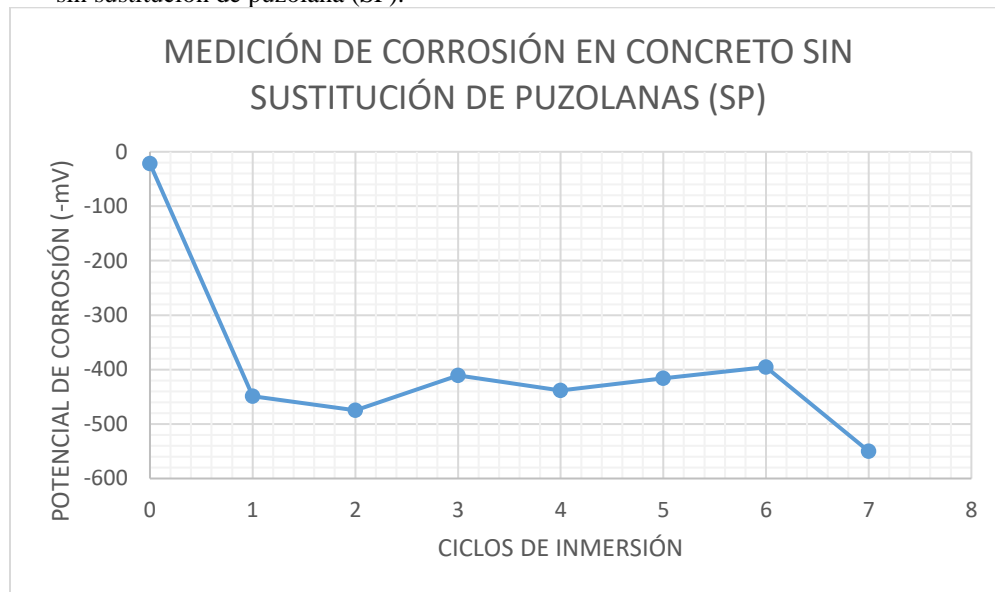
**Tabla 4.4:** Resultados de ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto sin sustitución de puzolanas (SP).

SIN SUSTITUCIÓN DE PUZOLANAS (SP).	
CICLO (14 DÍAS POR CICLO).	POTENCIAL DE CORROSIÓN (mV)
0	-21.75
<u>1</u>	<u>-448.92</u>
2	-474.75
3	-410.46
4	-438.54
5	-415.88
6	-395.33
<u>7</u>	<u>-549.96</u>

Fuente: Elaboración propia.

El ensayo de inmersión y secado de las probetas en agua de mar, evidenció un mayor riesgo de corrosión, con respecto a la muestra que no se sometió a dicho proceso. En cambio, la tendencia en general de las primeras fue que a mayor ciclo de inmersión y secado, mayor es el riesgo de corrosión, es decir que a mayor tiempo de exposición al agua de mar, mayor será el riesgo de corrosión en las probetas.

**Gráfica 4.4:** Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto sin sustitución de puzolana (SP).



**Fuente:** Elaboración propia.

#### **4.2.2 ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DEL POTENCIAL DE CORROSIÓN CON RESPECTO A LOS CICLOS DE INMERSIÓN PARA CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE PUZOLANAS (CBC Y TV).**

##### **4.2.2.1 VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON 5% DE CBC.**

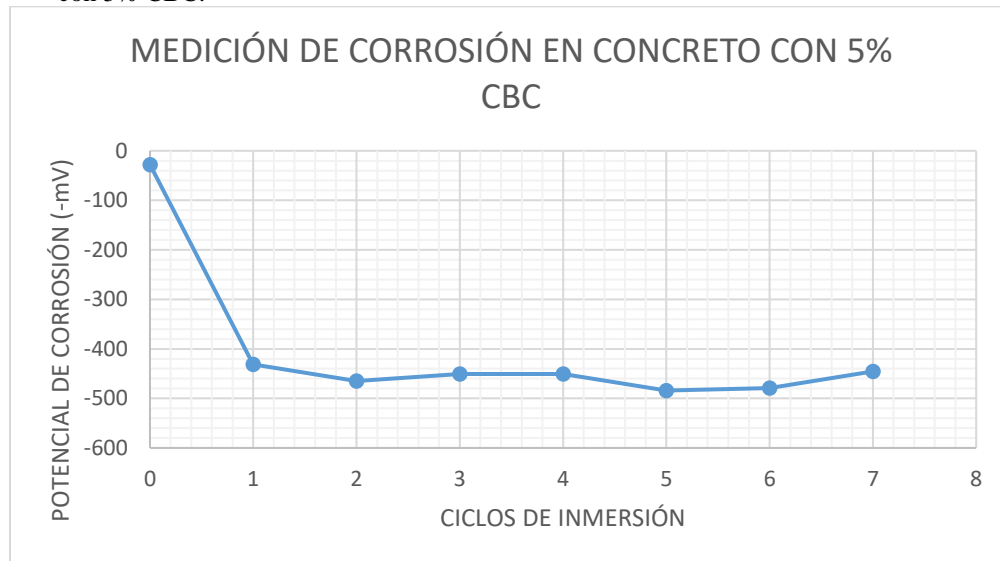
Después de realizar los ensayos de potencial de corrosión (mostrados en la tabla 3.42 del capítulo 3), en las probetas con el 5% de sustitución de CBC y evaluar su comportamiento en el tiempo, se observó que desde el primer ciclo de inmersión y secado, los ataques de cloruros fueron evidentes con un valor de -431.04 mV, debido al incremento negativo del potencial de corrosión, hasta llegar a un valor máximo en las tomas de lecturas en el ciclo 5 del ensayo de un valor de -484.04 mV, generándose una diferencia entre ambas lecturas de potencial de corrosión de 53 mV, en el tiempo de evaluación de las viguetas el cual fue de 58 días, tal como se puede apreciar en la tabla 4.5 y gráfica 4.5.

**Tabla 4.5:** Resultados de ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 5% CBC.

5% CBC.	
CICLO (14 DÍAS POR CICLO).	POTENCIAL DE CORROSIÓN (mV).
0	-27.79
<b>1</b>	<b>-431.04</b>
2	-464.88
3	-450.79
4	-450.67
<b>5</b>	<b>-484.04</b>
6	-479.29
7	-445.38

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 4.5:** Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 5% CBC.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2.2 VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON 10% DE CBC.

Después de realizar los ensayos de potencial de corrosión en las probetas con el 10% de CBC y evaluar su comportamiento en el tiempo (mostrados en la tabla 3.42 del capítulo 3), se observó que desde el primer ciclo de inmersión y secado los ataques de cloruros fueron evidentes con un valor de -425.92 mV, debido al incremento negativo del potencial de corrosión, hasta llegar a un valor máximo en las tomas de lecturas en el ciclo 3 del ensayo con un valor de -488.21 mV, tal como se puede apreciar en la tabla 4.6 y gráfica 4.6.

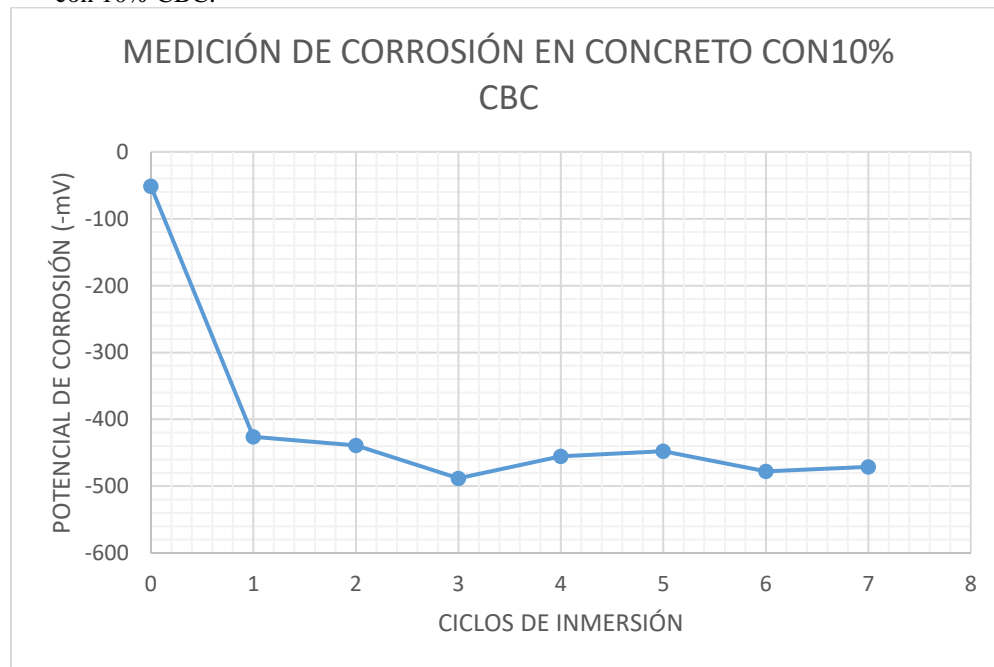


**Tabla 4.6:** Resultados ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 10% CBC.

10% CBC.	
CICLO (14 DÍAS POR CICLO).	POTENCIAL DE CORROSIÓN (mV).
0	-51.54
<u>1</u>	<u>-425.92</u>
2	-439.00
3	-488.21
<u>4</u>	<u>-455.29</u>
5	-447.46
6	-478.00
7	-471.04

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 4.6:** Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 10% CBC.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2.3 VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON 15% DE CBC.

Después de realizar los ensayos de potencial de corrosión en las probetas con el 15% de CBC y evaluar su comportamiento en el tiempo (mostrados en la tabla 3.42 del capítulo 3), se observó que desde el primer ciclo de inmersión y secado los ataques de cloruros fueron evidentes con un valor de -386.13 mV, debido al incremento negativo del potencial de corrosión, hasta llegar a un

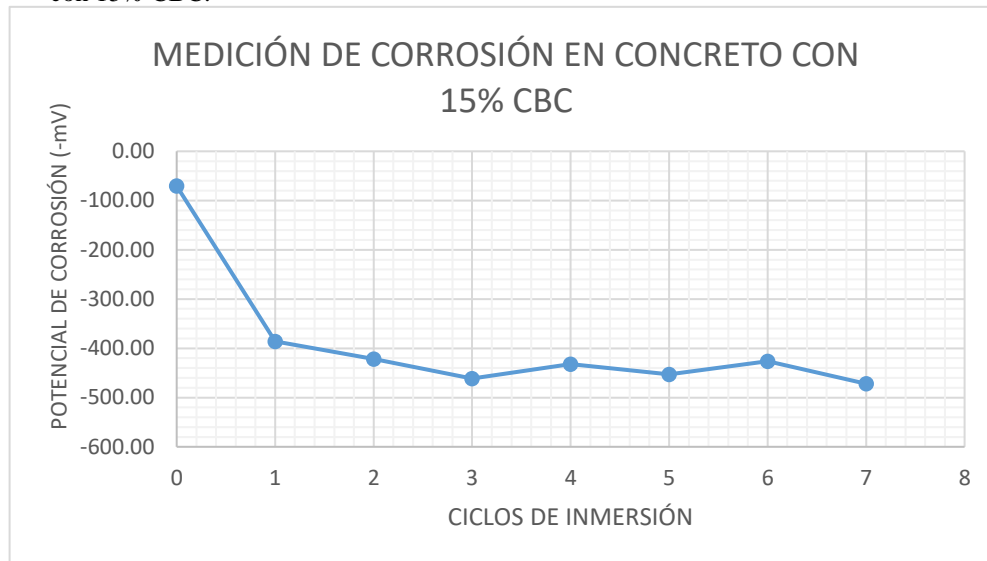
valor máximo en las tomas de lecturas del ciclo final del ensayo con un valor de -471.96 mV, tal como se puede apreciar en la tabla 4.7 y gráfica 4.7.

**Tabla 4.7:** Resultados ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 15% CBC.

15% CBC.	
CICLO (14 DÍAS POR CICLO).	POTENCIAL DE CORROSIÓN (mV).
0	-70.50
<u>1</u>	<u>-386.13</u>
2	-421.67
3	-461.33
4	-432.21
5	-452.83
6	-426.46
<u>7</u>	<u>-471.96</u>

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 4.7:** Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 15% CBC.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2.4 VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON 20% DE CBC.

Después de realizar los ensayos de potencial de corrosión en las probetas con el 20% de CBC y evaluar su comportamiento en el tiempo (mostrados en la tabla 3.42 del capítulo 3), se observó que en el primer ciclo de inmersión y secado se manifestó una probabilidad de riesgo de corrosión de -340.63 mV, debido al incremento negativo del potencial de corrosión, hasta llegar a un valor

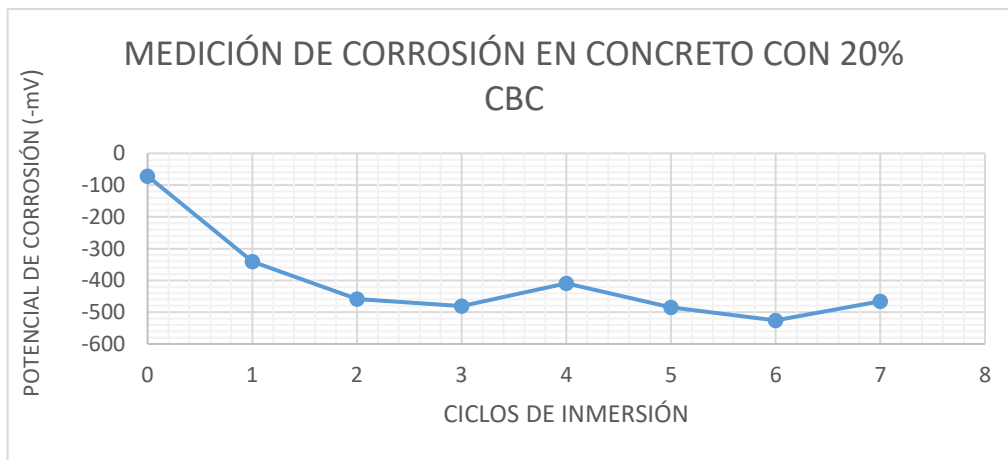
máximo en las tomas de lecturas del ciclo 6 del ensayo con un valor de -525.83 mV, tal como se puede apreciar en la tabla 4.8 y grafica 4.8.

**Tabla 4.8:** Resultados ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 20% CBC.

20% CBC.	
CICLO (14 DÍAS POR CICLO).	POTENCIAL DE CORROSIÓN (mV).
0	-71.21
<u>1</u>	<u>-340.63</u>
2	-458.25
3	-480.88
4	-409.17
5	-484.58
<u>6</u>	<u>-525.83</u>
7	-465.83

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 4.8:** Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 20% CBC.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2.5 VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON 5% DE TV.

Después de realizar los ensayos de potencial de corrosión en las probetas con el 5% de TV y evaluar su comportamiento en el tiempo (mostrados en la tabla 3.42 del capítulo 3), se observó que desde el primer ciclo de inmersión y secado los ataques de cloruros fueron evidentes con un valor de -446.19 mV, debido al incremento negativo del potencial de corrosión, hasta llegar a un

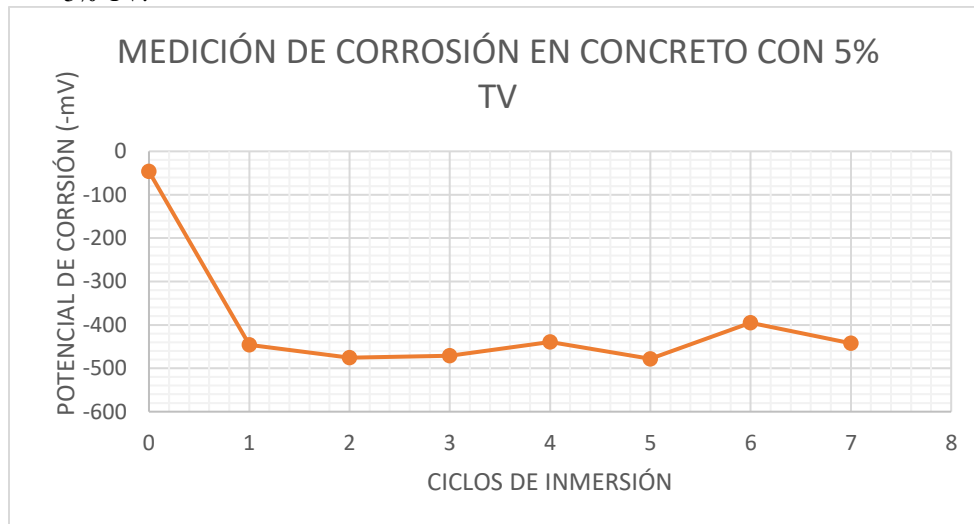
valor máximo en las tomas de lecturas del ciclo 5 del ensayo con un valor de -478.17 mV, tal como se puede apreciar en la tabla 4.9 y gráfica 4.9.

**Tabla 4.9:** Resultados ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 5% TV.

5% TV.	
CICLO (14 DÍAS POR CICLO).	POTENCIAL DE CORROSIÓN (mV).
0	-46.58
<b>1</b>	<b>-446.29</b>
2	-475.79
3	-471.50
4	-439.21
<b>5</b>	<b>-478.17</b>
6	-395.17
7	-442.46

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 4.9:** Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 5% TV.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2.6 VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON 10% DE TV.

Después de realizar los ensayos de potencial de corrosión en las probetas con el 10% de TV y evaluar su comportamiento en el tiempo (mostrados en la tabla 3.42 del capítulo 3), se observó que desde el primer ciclo de inmersión y secado los ataques de cloruros fueron evidentes con un valor de -412.38 mV, debido al incremento negativo del potencial de corrosión, hasta llegar a un

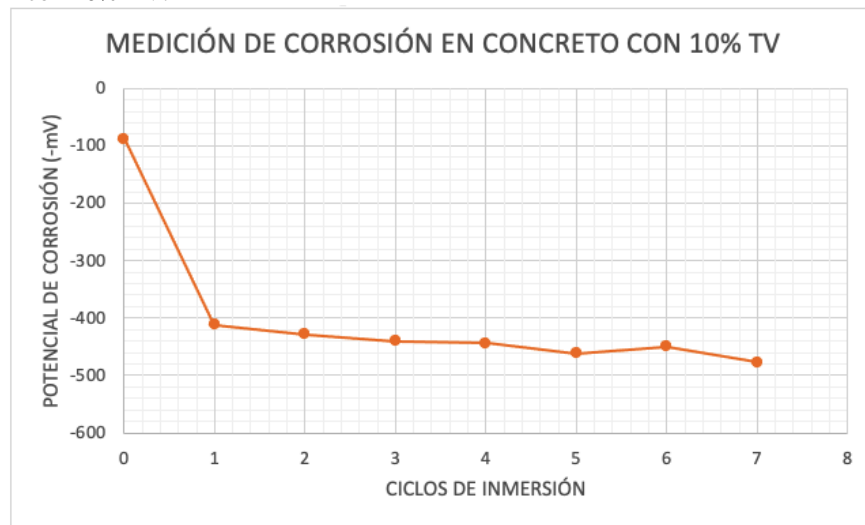
valor máximo en las tomas de lecturas del ciclo 7 del ensayo con un valor de -477.50 mV, tal como se puede apreciar en la tabla 4.10 y gráfica 4.10.

**Tabla 4.10:** Resultados ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 10% TV.

10% TV.	
CICLO (14 DÍAS POR CICLO).	POTENCIAL DE CORROSIÓN (mV).
0	-87.75
<u>1</u>	<u>-412.38</u>
2	-428.63
3	-440.25
4	-443.67
5	-462.25
6	-449.71
<u>7</u>	<u>-477.50</u>

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 4.10:** Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 10% TV.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2.7 VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON 15% DE TV.

Después de realizar los ensayos de potencial de corrosión en las probetas con el 15% de TV y evaluar su comportamiento en el tiempo (mostrados en la tabla 3.42 del capítulo 3), se observó que desde el primer ciclo de inmersión y secado los ataques de cloruros fueron evidentes con un valor de -373.75 mV, debido al incremento negativo del potencial de corrosión, hasta llegar a un

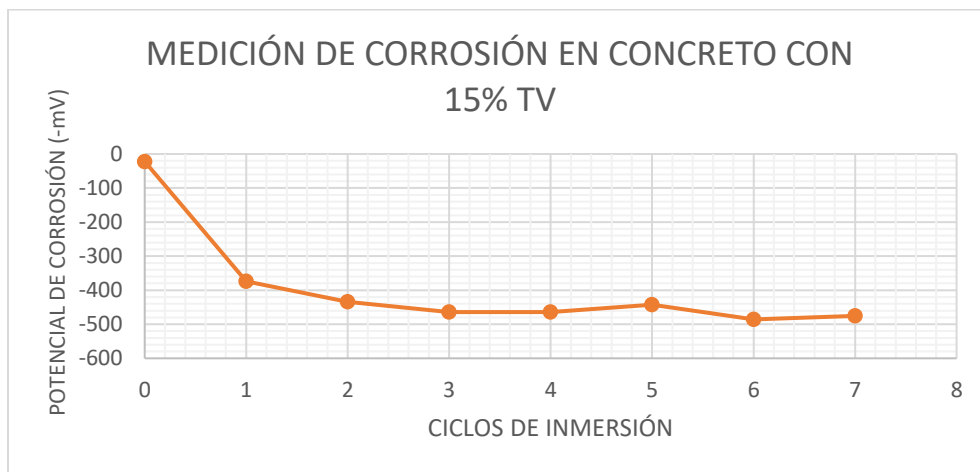
valor máximo en las tomas de lecturas del ciclo 6 del ensayo con un valor de -485.71 mV, tal como se puede apreciar en la tabla 4.11 y gráfica 4.11.

**Tabla 4.11:** Resultados ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 15% TV.

15% TV.	
CICLO (14 DÍAS POR CICLO).	POTENCIAL DE CORROSIÓN (mV).
0	-22.04
<b>1</b>	<b>-373.75</b>
2	-434.08
3	-463.83
4	-463.79
5	-442.88
<b>6</b>	<b>-485.71</b>
7	-475.13

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 4.11:** Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 15% TV.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2.8 VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON 20% DE TV.

Después de realizar los ensayos de potencial de corrosión en las probetas con el 20% de TV y evaluar su comportamiento en el tiempo (mostrados en la tabla 3.42 del capítulo 3), se observó que desde el primer ciclo de inmersión y secado los ataques de cloruros fueron evidentes con un valor de -400.38 mV, debido al incremento negativo del potencial de corrosión, hasta llegar a un

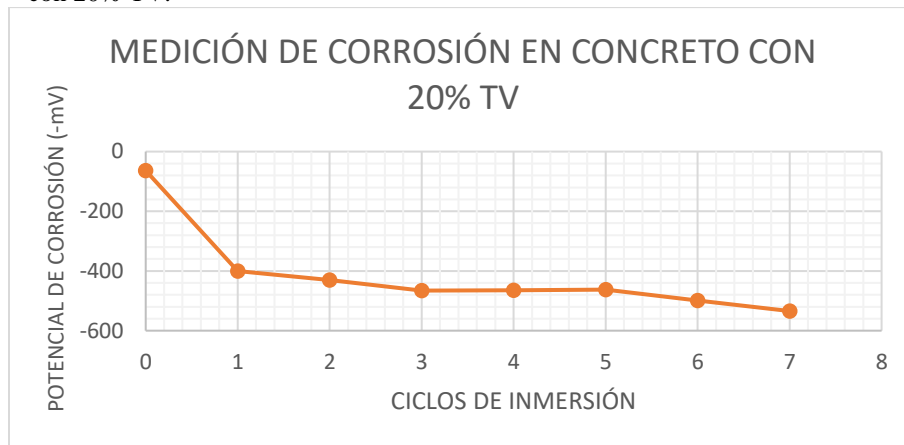
valor máximo en las tomas de lecturas del ciclo 7 del ensayo con un valor de  $-534.21$  mV, tal como se puede apreciar en la tabla 4.12 y gráfica 4.12.

**Tabla 4.12:** Resultados ensayos de potencial de corrosión en cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 20% TV.

20% TV.	
CICLO (14 DÍAS POR CICLO).	POTENCIAL DE CORROSIÓN (mV).
0	-63.79
<u>1</u>	<u>-400.38</u>
2	-430.63
3	-466.08
4	-464.54
5	-462.38
6	-498.92
<u>7</u>	<u>-534.21</u>

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 4.12:** Comportamiento del potencial de corrosión respecto a cada ciclo de inmersión-secado para concreto con 20% TV.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE POTENCIAL DE CORROSIÓN ENTRE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN PUZOLANAS (SP) Y CON SUSTITUCIONES DE CBC.

Después de realizar los ensayos de potencial de corrosión en las probetas con sustitución de CBC y compararlo con el valor del potencial de corrosión en la probeta SP, en el último ciclo de inmersión secado (ciclo 7) (mostrados en la tabla 3.42 del capítulo 3) se determinó que los valores

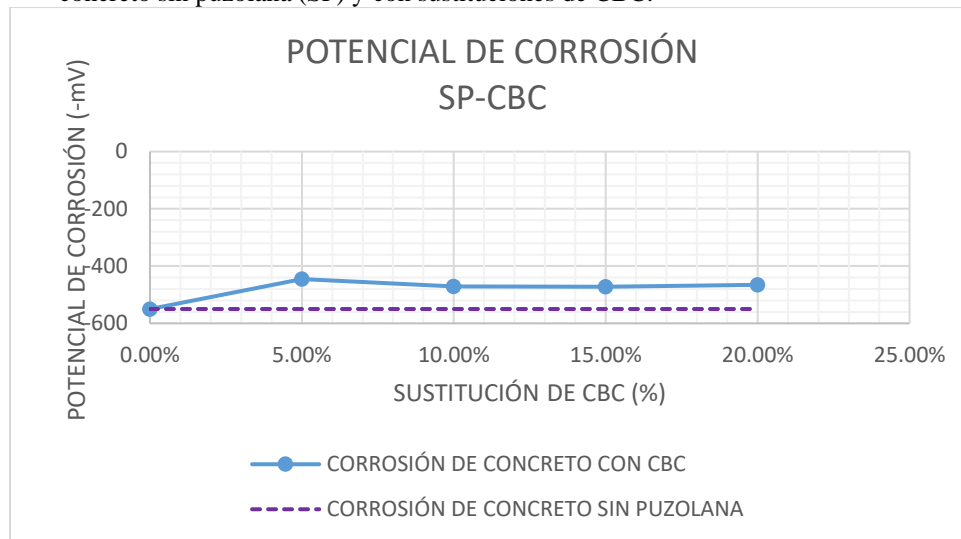
obtenidos para las sustituciones de CBC presentaron lecturas más positivas de potencial de corrosión, siendo la de sustitución del 5% (-445.38 mV) la más positiva, las demás sustituciones siempre presentaron la misma tendencia, como se muestra en la tabla 4.13 y gráfica 4.13.

**Tabla 4.13:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para el último ciclo de inmersión-secado en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de CBC.

COMPARACIÓN POTENCIAL DE CORROSIÓN SP-CBC	
PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN DE CBC.	POTENCIAL DE CORROSIÓN (mV).
0.00%	-549.96
<b>5.00%</b>	<b>-445.38</b>
10.00%	-471.04
15.00%	-471.96
20.00%	-465.83

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 4.13:** Comparación resultados de potencial de corrosión para el último ciclo de inmersión-secado entre concreto sin puzolana (SP) y con sustituciones de CBC.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE POTENCIAL DE CORROSIÓN ENTRE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN PUZOLANA (SP) Y CON SUSTITUCIONES DE TV.

Después de realizar los ensayos de potencial de corrosión en las probetas con sustitución de TV y compararlo con el valor del potencial de corrosión en la probeta SP, en el último ciclo de inmersión



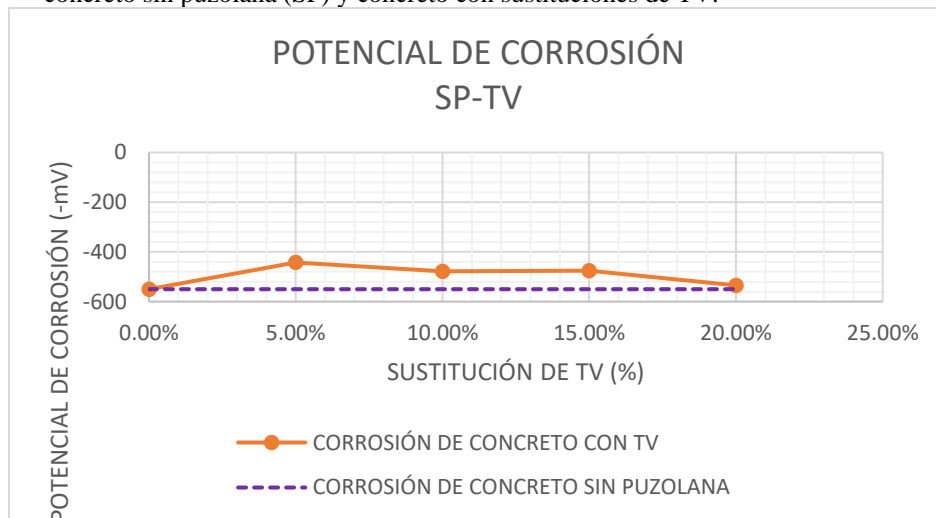
secado (ciclo 7) (mostrados en la tabla 3.42 del capítulo 3), se determinó que los valores obtenidos para las sustituciones de CBC presentaron lecturas más positivas de potencial de corrosión, siendo la de la sustitución del 5% (-442.69 mV), las demás sustituciones siempre presentaron la misma tendencia como se muestra en la tabla 4.14 y gráfica 4.14.

**Tabla 4.14:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para el último ciclo de inmersión-secado en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de TV.

COMPARACIÓN POTENCIAL DE CORROSIÓN SP-TV	
PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN DE TV.	POTENCIAL DE CORROSIÓN.
0.00%	-549.96
<u>5.00%</u>	<u>-442.69</u>
10.00%	-477.50
15.00%	-475.13
20.00%	-534.21

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 4.14:** Comparación resultados de potencial de corrosión para el último ciclo de inmersión-secado entre concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de TV.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE POTENCIAL DE CORROSIÓN ENTRE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON SUSTITUCIÓN DE CBC Y CON SUSTITUCIÓN DE TV.

Después de realizar los ensayos de potencial de corrosión en las probetas con sustitución de CBC y sustitución de TV, en el último ciclo de inmersión secado (ciclo 7) (mostrados en la tabla 3.42

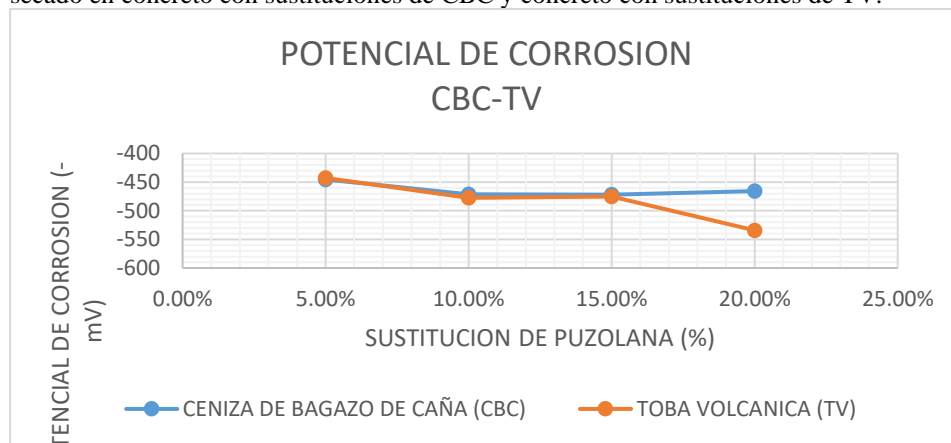
del capítulo 3), se determinó que las lecturas son muy similares entre sí y se observó que los valores más positivos de potencial de corrosión se obtienen con el menor valor de sustitución de CBC (-445.38 mV) y TV (-442.69 mV), como se aprecia en la tabla 4.15 y gráfica 4.15.

**Tabla 4.15:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para el último ciclo de inmersión-secado en concreto con sustituciones de CBC y concreto con sustituciones de TV.

<b>COMPARACIÓN POTENCIAL DE CORROSIÓN CBC-TV.</b>		
<b>PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN.</b>	<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN CBC.</b>	<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN TV.</b>
<b>5.00%</b>	<b>-445.38</b>	<b>-442.69</b>
10.00%	-471.04	-477.5
15.00%	-471.96	-475.13
20.00%	-465.83	-534.21

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 4.15:** Comparación resultados de ensayos de potencial de corrosión para el último ciclo de inmersión-secado en concreto con sustituciones de CBC y concreto con sustituciones de TV.



Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA ADHERENCIA EN CUBOS DE CONCRETO.

#### 4.3.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA ADHERENCIA ENTRE PRISMAS DE CONCRETO SIN PUZOLANA (SP) Y CONCRETOS CON SUSTITUCIÓN DE PUZOLANAS SIN CORROSIÓN.

##### 4.3.1.1 ANÁLISIS DE PRISMAS DE CONCRETO SIN PUZOLANA (SP) Y CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE CBC .

De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de adherencia en las probetas de concreto sin puzolana (SP) y comparados con los resultados obtenidos de las probetas con sustitución de

CBC (mostrados en la tabla 3.43 del capítulo 3), en un ambiente sin corrosión, mostró una disminución de la resistencia a la adherencia entre el cubo de concreto y la barra de acero, su comportamiento fue inversamente proporcional entre la probeta sin puzolana (SP) y las sustituciones de CBC, siendo las mayores reducciones en la resistencia a la adherencia para el 10% de CBC una reducción de la resistencia a la adherencia del 60% y para el 20% de CBC una reducción de la adherencia del 57.56% . La sustitución de CBC del 5% se reduce un 38.25 % y la del 15 % se redujo un 50.59%, como se muestra en la tabla 4.16 y gráfica 4.16.

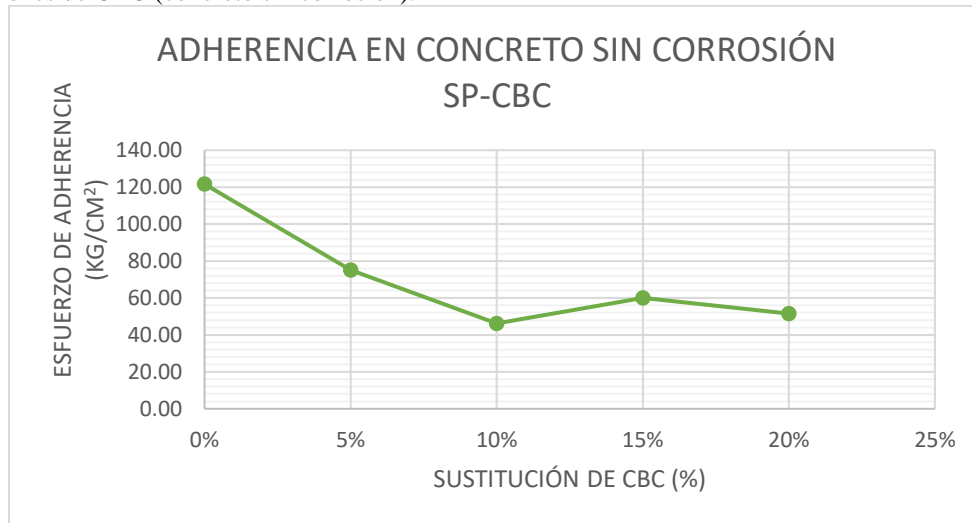
Se observó en general que todas las sustituciones de CBC por cemento influyen considerablemente en la resistencia a la adherencia de las probetas ensayadas.

**Tabla 4.16:** Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de CBC (concreto sin corrosión).

ADHERENCIA EN CONCRETO SIN CORROSIÓN.	
PORCENTAJE DE CBC.	ADHERENCIA (KG/CM <sup>2</sup> ).
0%	121.66
5%	75.12
10%	46.24
15%	60.11
20%	51.63

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica 4.16:** Comparación de resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de CBC (concreto sin corrosión).



**Fuente:** Elaboración propia.

### 4.3.1.2 ANÁLISIS DE PRISMAS DE CONCRETO SIN PUZOLANA (SP) Y CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE TV .

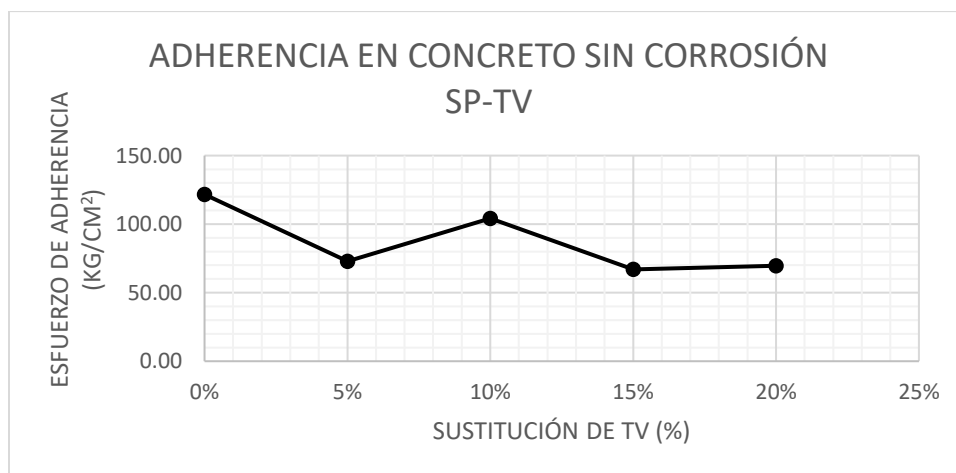
De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de adherencia en las probetas de concreto SP y con las probetas con sustitución de TV (mostrados en la tabla 3.43 del capítulo 3), en un ambiente sin corrosión, se apreció una disminución del esfuerzo de adherencia y su comportamiento fue inversamente proporcional entre el esfuerzo de adherencia y la sustitución de TV por cemento, a excepción de la sustitución del 10% de TV por cemento, lo cual sale fuera de la tendencia de los resultados de las otras sustituciones, como se muestra en la tabla 4.17 y gráfica 4.17.

**Tabla 4.17:** Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de TV (concreto sin corrosión).

ADHERENCIA EN CONCRETO SIN CORROSIÓN.	
PORCENTAJE DE TV.	ADHERENCIA (KG/CM <sup>2</sup> ).
0%	121.66
5%	72.91
10%	104.20
15%	66.98
20%	69.79

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica 4.17:** Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de TV (concreto sin corrosión).



**Fuente:** Elaboración propia.

## 4.3.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA ADHERENCIA ENTRE CONCRETO SIN PUZOLANA (SP) Y CONCRETOS CON SUSTITUCIÓN DE PUZOLANAS CON CORROSIÓN.

### 4.3.2.1 ANÁLISIS DE PRISMAS DE CONCRETO SIN PUZOLANA (SP) Y CONCRETOS CON SUSTITUCIÓN DE CBC.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de adherencia en las probetas de concreto SP y con las probetas con sustitución de CBC (mostrados en la tabla 3.43 del capítulo 3), sometidas a un proceso acelerado de corrosión, se registró una disminución mayor en el valor del esfuerzo de adherencia y su comportamiento es inversamente proporcional entre el esfuerzo de adherencia y la sustitución de CBC por cemento, como se muestra en la tabla 4.18 y gráfica 4.18.

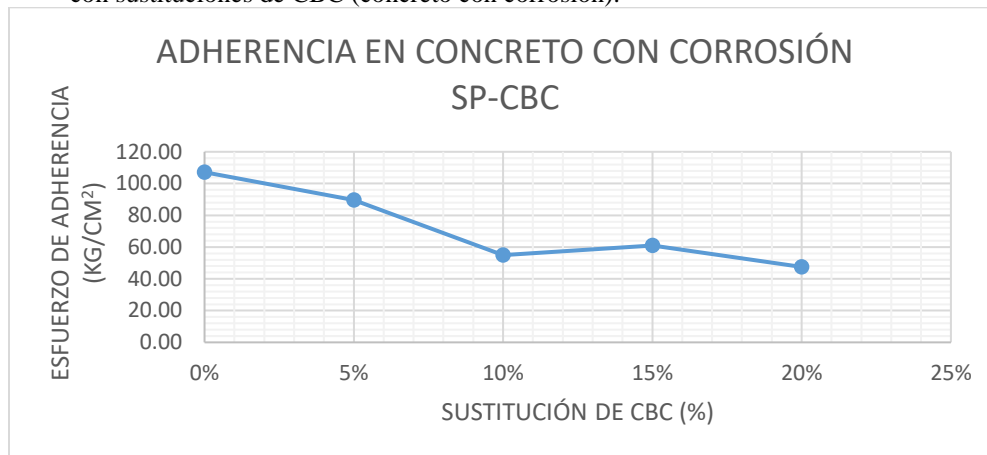
Comparando los resultados mostrados en la tabla 4.16 y la tabla 4.18, para la probeta SP, se observó una disminución en el esfuerzo de adherencia al ser sometida la probeta a un proceso acelerado de corrosión.

**Tabla 4.18:** Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de CBC (concreto con corrosión).

<b>ADHERENCIA EN CONCRETO CON CORROSIÓN.</b>	
<b>PORCENTAJE DE CBC.</b>	<b>ADHERENCIA (KG/CM<sup>2</sup>).</b>
0%	107.15
5%	89.63
10%	54.88
15%	61.05
20%	47.51

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica 4.18:** Comparación de resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de CBC (concreto con corrosión).



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.3.2.2 ANÁLISIS DE PRISMAS DE CONCRETO SIN PUZOLANA (SP) Y CONCRETOS CON SUSTITUCIÓN DE TV.

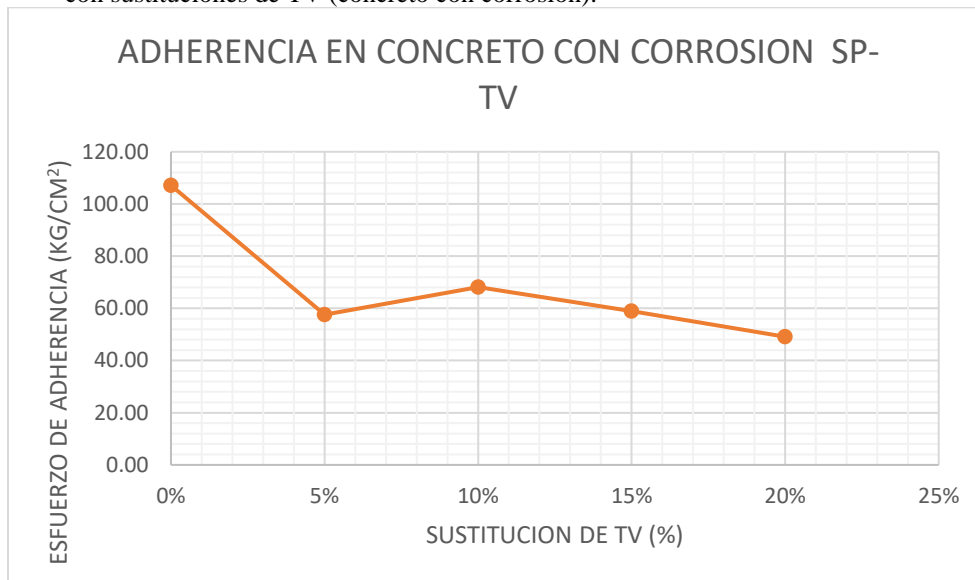
De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de adherencia en las probetas de concreto SP y con las probetas con sustitución de TV (mostrados en la tabla 3.43 del capítulo 3), sometidas a un proceso acelerado de corrosión, se registró una disminución en la resistencia en el esfuerzo de adherencia en la barra de acero y su comportamiento fue inversamente proporcional entre el esfuerzo de adherencia y la sustitución de TV por cemento, como se muestra en la tabla 4.19 y gráfica 4.19.

**Tabla 4.19:** Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de TV (concreto con corrosión).

ADHERENCIA EN CONCRETO CON CORROSIÓN.	
PORCENTAJE DE TV.	ADHERENCIA (KG/CM <sup>2</sup> ).
0%	107.15
5%	57.56
10%	68.12
15%	58.94
20%	49.12

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica 4.19:** Comparación de resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto sin puzolana (SP) y concreto con sustituciones de TV (concreto con corrosión).



**Fuente:** Elaboración propia.

### 4.3.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA ADHERENCIA ENTRE CONCRETOS CON SUSTITUCIÓN DE PUZOLANAS, SOMETIDOS A CORROSIÓN Y NO SOMETIDOS A CORROSIÓN.

#### 4.3.3.1 ANÁLISIS DE PRISMAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE CBC.

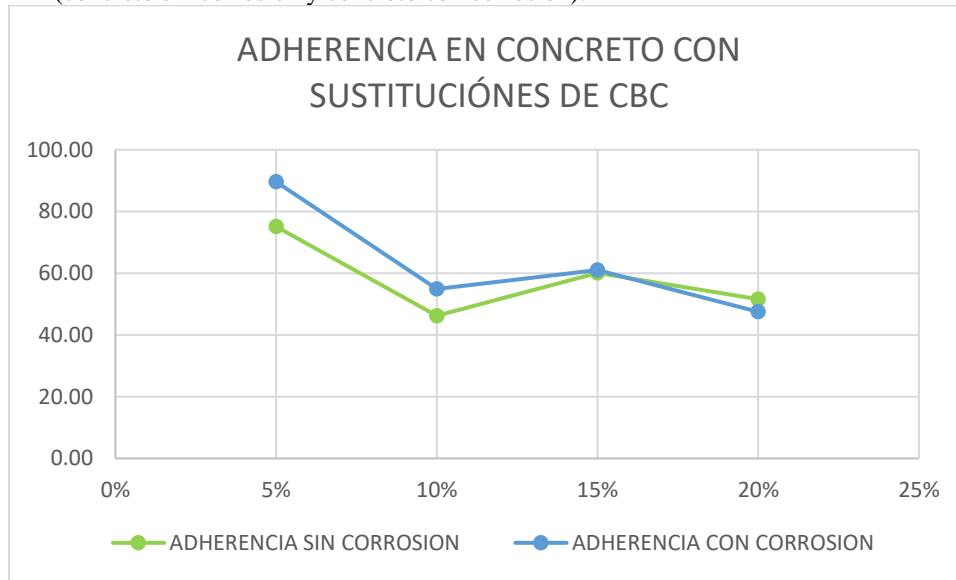
De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de adherencia en las probetas de concreto con sustitución de CBC por cemento (mostrados en la tabla 3.43 del capítulo 3), se registró un incremento en el esfuerzo de adherencia en las probetas que fueron sometidas a un proceso acelerado de corrosión, como lo muestra la tabla 4.20 y gráfica 4.20.

**Tabla 4.20:** Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto con sustituciones de CBC (concreto sin corrosión y concreto con corrosión).

COMPARACIÓN DE ADHERENCIA ENTRE CONCRETO SIN CORROSIÓN Y CONCRETO SOMETIDO A CORROSIÓN PARA SUSTITUCIONES DE CBC		
PORCENTAJE DE CBC.	ADHERENCIA SIN CORROSIÓN (KG/CM <sup>2</sup> ).	ADHERENCIA CON CORROSIÓN (KG/CM <sup>2</sup> ).
5%	75.12	89.63
10%	46.24	54.88
15%	60.11	61.05
20%	51.63	47.51

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica 4.20:** Comparación de resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto con sustituciones de CBC (concreto sin corrosión y concreto con corrosión).



Fuente: *Elaboración propia.*

#### 4.3.3.2 ANÁLISIS DE PRISMAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE TV.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de adherencia en las probetas de concreto con sustitución de CBC por cemento (mostrados en la tabla 3.43 del capítulo 3), se registró una reducción en el esfuerzo de adherencia en las probetas que fueron sometidas a un proceso acelerado de corrosión, como lo muestra la tabla 4.21 y gráfica 4.21.

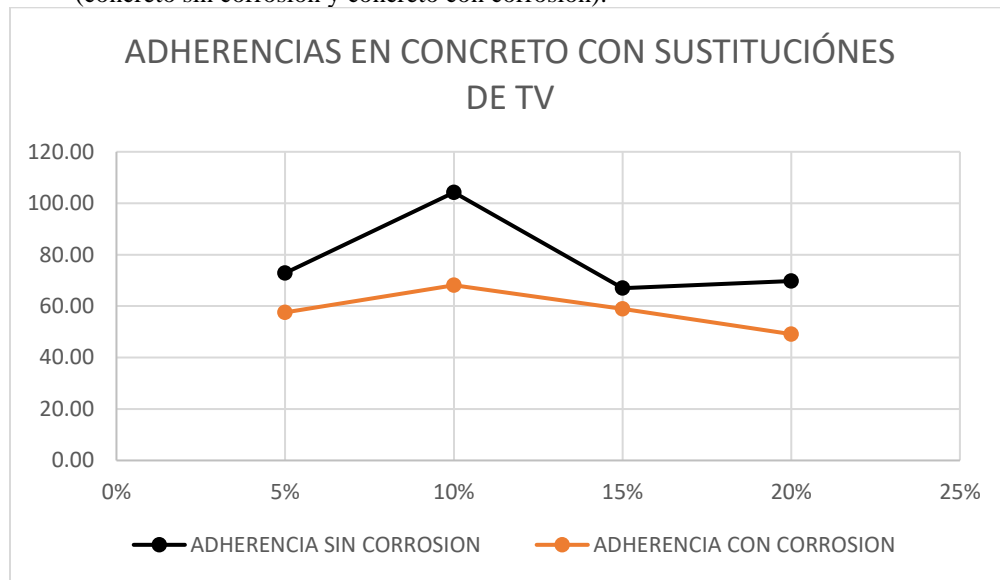
**Tabla 4.21:** Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto con sustituciones de TV (concreto sin corrosión y concreto con corrosión).

COMPARACIÓN DE ADHERENCIA ENTRE CONCRETO SIN CORROSIÓN Y CONCRETO SOMETIDO A CORROSIÓN PARA SUSTITUCIONES DE TV.		
PORCENTAJE DE TV.	ADHERENCIA SIN CORROSIÓN (KG/CM <sup>2</sup> ).	ADHERENCIA CON CORROSIÓN (KG/CM <sup>2</sup> ).
5%	72.91	57.56
10%	104.20	68.12
15%	66.98	58.94
20%	69.79	49.12

Fuente: *Elaboración propia.*



**Gráfica 4.21:** Comparación de resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto con sustituciones de TV (concreto sin corrosión y concreto con corrosión).



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.3.3.3 ANÁLISIS DE PRISMAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE TV Y CBC SIN CORROSIÓN.

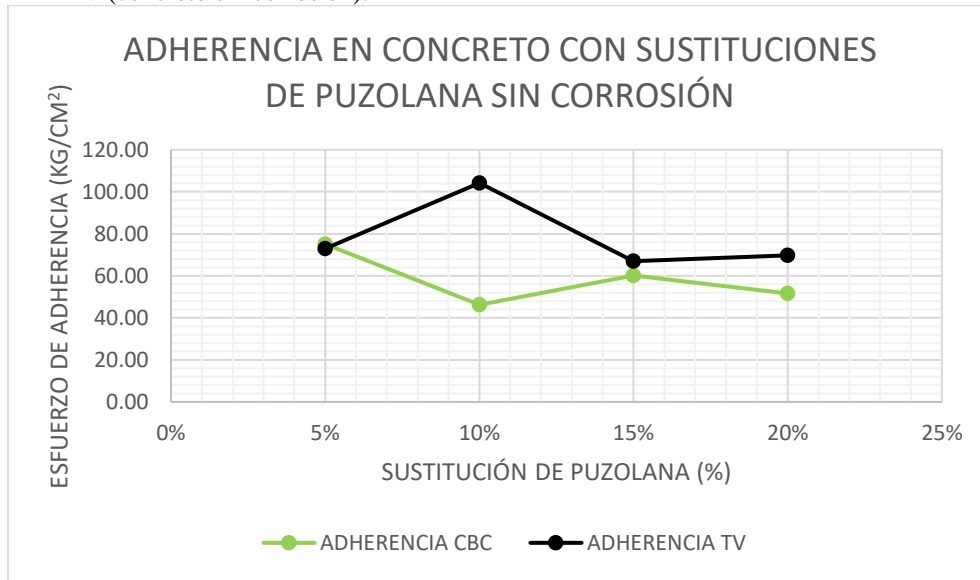
De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de adherencia en las probetas de concreto con sustitución de CBC y TV por cemento sin ser sometidas a un proceso acelerado de corrosión (mostrados en la tabla 3.43 del capítulo 3), se determinó que la reducción del esfuerzo de adherencia es mayor en la sustitución de CBC, como lo muestra la tabla 4.22 y gráfica 4.22.

**Tabla 4.22:** Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto sin corrosión).

COMPARACIÓN DE ADHERENCIA EN CONCRETO SIN CORROSIÓN CON SUSTITUCIONES DE CBC Y TV.		
PORCENTAJE DE PUZOLANA.	ADHERENCIA CBC (KG/CM <sup>2</sup> ).	ADHERENCIA TV (KG/CM <sup>2</sup> ).
5%	75.12	72.91
10%	46.24	104.20
15%	60.11	66.98
20%	51.63	69.79

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica 4.22:** Comparación de resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto sin corrosión).



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.3.3.4 ANÁLISIS DE PRISMAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE TV Y CBC CON CORROSIÓN.

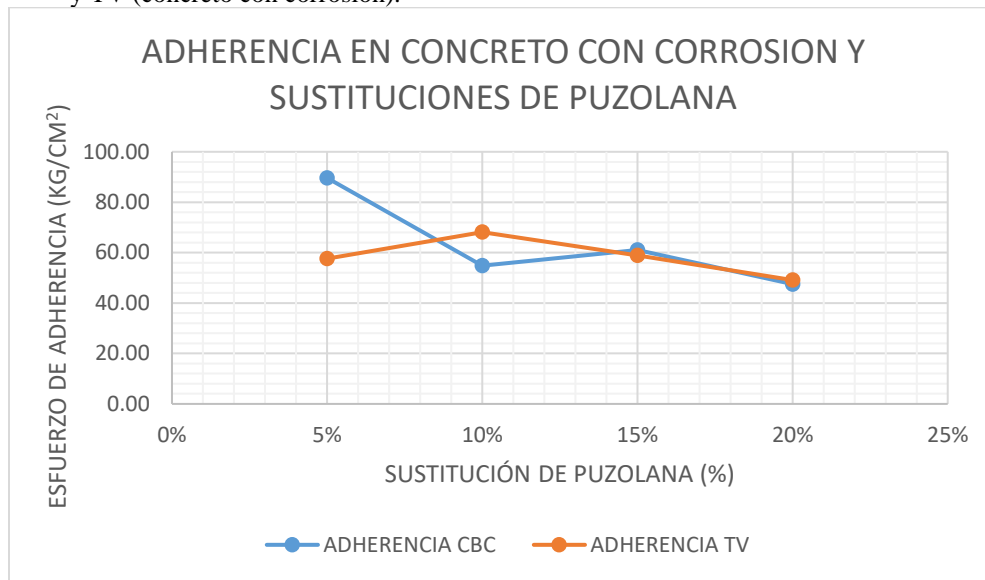
De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de adherencia en las probetas de concreto con sustitución de CBC y TV por cemento, al ser sometidas a un proceso acelerado de corrosión (mostrados en la tabla 3.43 del capítulo 3), se determinó que la reducción de adherencia es mayor en la sustitución de TV en las proporciones del 5% y 15% y en la sustitución de CBC para las proporciones del 10% y 20%, lo que muestra que no existe una tendencia marcada con el incremento de los porcentajes de sustitución, tal como lo muestra la tabla 4.23 y gráfica 4.23

**Tabla 4.23:** Resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto con corrosión).

COMPARACIÓN DE ADHERENCIA CONCRETO CON CORROSIÓN EN SUSTITUCIONES DE CBC Y TV.		
PORCENTAJE DE PUZOLANA.	ADHERENCIA CBC.	ADHERENCIA TV.
5%	89.63	57.56
10%	54.88	68.12
15%	61.05	58.94
20%	47.51	49.12

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica 4.23:** Comparación de resultados ensayos de esfuerzo de adherencia en concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto con corrosión).



Fuente: Elaboración propia.

#### **4.4 ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO, Y SU COMPORTAMIENTO SIN Y CON CORROSIÓN.**

##### **4.4.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE CARGA DE ROTURA TEORICA Y CARGA DE ROTURA REAL, ENTRE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN PUZOLANA (SP) Y CONCRETOS CON SUSTITUCIÓN DE PUZOLANAS.**

En este apartado se hicieron dos cálculos teóricos que permitió comparar el comportamiento de las vigas de concreto reforzado, el primero es la carga teórica promedio que es la carga máxima de diseño de acuerdo con el ACI y el segundo es la carga máxima de rotura teórica obtenida con el programa seismostruct (mostrados en la tabla 3.45 del capítulo 3).

##### **4.4.1.1 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN PUZOLANA (SP) Y CONCRETOS CON SUSTITUCIÓN DE CBC SIN CORROSIÓN.**

De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de flexión de las viguetas de concreto, sin someterse al proceso acelerado de corrosión sin puzolana y comparada con sustitución de CBC por cemento y al obtener la carga de rotura real, se registró una pérdida de resistencia a la flexión directamente proporcional al incremento de sustitución de CBC por cemento, adicionalmente se

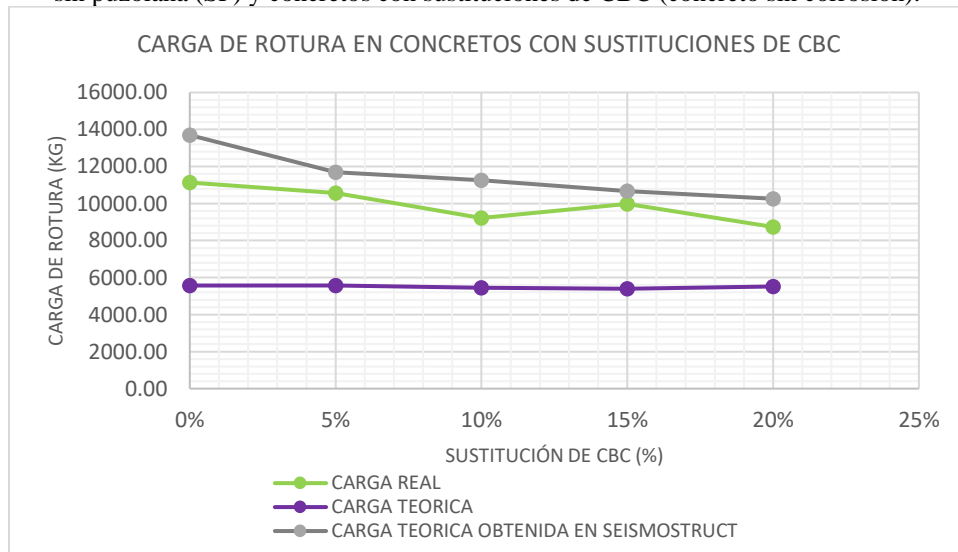
presentan dos cálculos teóricos para obtener un parámetro de comparación del comportamiento estructural de la probeta; la primera es la carga teoría promedio con la cual se calcula el momento de diseño de acuerdo al ACI y por último la carga teórica máxima antes de la falla, como lo muestra la tabla 4.24 y gráfica 4.24. De acuerdo con esta tabla también se observó que la carga teórica obtenida con el programa seismostruct es menor que la carga teórica obtenida con el programa seismostruct, Se observa además en la tabla 4.24 que la carga teórica promedio de diseño, es aproximadamente un 50% de las carga real y obtenida con el programa seismostruct.

**Tabla 4.24:** Resultados de comparación de ensayos a flexión y cargas teóricas en viguetas de concreto reforzado sin puzolana (SP) y concretos con sustituciones de CBC (concreto sin corrosión).

<b>CARGA DE ROTURA TEÓRICA Y REAL PARA CONCRETOS SIN CORROSIÓN CON SUSTITUCIÓN DE CBC.</b>			
<b>PORCENTAJE DE CBC.</b>	<b>CARGA DE ROTURA REAL APLICADA (KG).</b>	<b>CARGA TEÓRICA PROMEDIO DE DISEÑO (KG).</b>	<b>CARGA TEÓRICA OBTENIDA EN SEISMOSTRUCT.</b>
0%	11,133.34	5,567.25	13,695.88
5%	10,569.00	5,573.23	11,694.76
10%	9,214.50	5,441.85	11,258.71
15%	9,985.50	5,396.30	10,667.37
20%	8,736.50	5,518.20	10,258.90

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica 4.24:** Comparación de resultados de ensayos a flexión y cargas teóricas en viguetas de concreto reforzado sin puzolana (SP) y concretos con sustituciones de CBC (concreto sin corrosión).



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.4.1.2 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN PUZOLANA (SP) Y CONCRETOS CON SUSTITUCIÓN DE TV SIN CORROSIÓN.

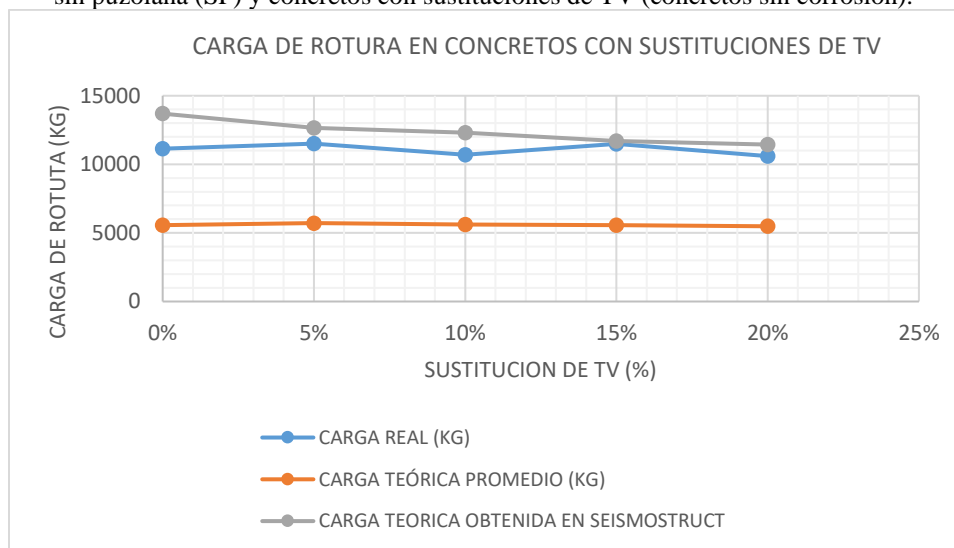
De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de flexión de las viguetas de concreto sin corrosión, sin puzolana y comparada con sustitución de TV por cemento, para obtener la carga de rotura real, se apreció una pérdida de resistencia directamente proporcional al incremento de sustitución de TV por cemento, como lo muestra la tabla 4.25 y gráfica 4.25.

**Tabla 4.25:** Resultados de ensayos a flexión y cargas teóricas en viguetas de concreto reforzado sin puzolana (SP) y concretos con sustituciones de TV (concreto sin corrosión).

CARGA DE ROTURA TEÓRICA Y REAL PARA CONCRETOS SIN CORROSIÓN CON SUSTITUCIÓN DE TV.			
PORCENTAJE DE TV.	CARGA DE ROTURA REAL APLICADA (KG).	CARGA TEÓRICA PROMEDIO DE DISEÑO (KG).	CARGA TEÓRICA OBTENIDA EN SEISMOSTRUCT.
0%	11,133.34	5,567.20	13,695.88
5%	11,508.50	5,716.90	12,668.70
10%	10,690.00	5,617.70	12,297.71
15%	11,500.00	5,575.4	11,692.64
20%	10,598.50	5,484.2	11,439.40

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 4.25:** Comparación de resultados de ensayos a flexión y cargas teóricas en viguetas de concreto reforzado sin puzolana (SP) y concretos con sustituciones de TV (concretos sin corrosión).



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE CARGA DE ROTURA REAL ENTRE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN PUZOLANA (SP) Y CON SUSTITUCIÓN DE PUZOLANAS CON CORROSIÓN.

En este apartado se hicieron dos cálculos teóricos que nos permitieron comparar el comportamiento de las vigas de concreto reforzado; el primero es la carga teórica promedio que es la carga máxima de diseño de acuerdo con el ACI, y el segundo es la carga máxima de rotura teórica obtenida con el programa seismostruct (mostrados en la tabla 3.45 del capítulo 3).

##### 4.4.2.1 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN PUZOLANAS (SP) Y CON SUSTITUCIÓN DE CBC CON CORROSIÓN.

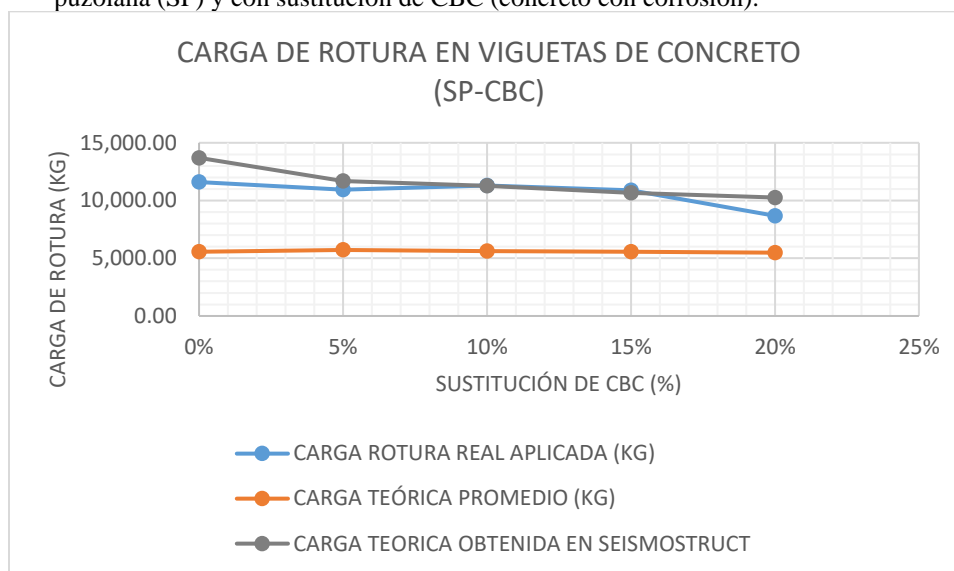
De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de flexión de las viguetas de concreto, sin someterse al proceso acelerado de corrosión sin puzolana y comparada con sustitución de TV por cemento y al obtener la carga de rotura real, se registró una pérdida de resistencia a la flexión directamente proporcional al incremento de sustitución de TV por cemento, adicionalmente se presentan dos cálculos teóricos para obtener un parámetro de comparación del comportamiento estructural de la probeta; la primera es la carga teoría promedio con la cual se calcula el momento de diseño de acuerdo al ACI y por último la carga teórica máxima antes de la falla, como lo muestra la tabla 4.26 y gráfica 4.26.

**Tabla 4.26:** Resultados de ensayos a flexión y cargas teóricas en viguetas de concreto reforzado sin puzolana (SP) y con sustituciones de CBC (concreto con corrosión).

<b>CARGA APLICADA PARA CONCRETO CON CORROSIÓN CON SUSTITUCIÓN DE CBC.</b>			
<b>PORCENTAJE DE CBC.</b>	<b>CARGA DE ROTURA REAL APLICADA (KG).</b>	<b>CARGA TEÓRICA PROMEDIO DE DISEÑO (KG).</b>	<b>CARGA TEÓRICA OBTENIDA EN SEISMOSTRUCT.</b>
0%	11,598.00	5,567.20	13,695.88
5%	10,941.50	5,716.90	11,694.76
10%	11,297.50	5,617.70	11,258.71
15%	10,878.00	5,575.4	10,667.37
20%	8,678.00	5,484.2	10,258.90

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica 4.26:** Comparación de resultados de ensayos a flexión y cargas teóricas en viguetas de concreto reforzado sin puzolana (SP) y con sustitución de CBC (concreto con corrosión).



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.2.2 ANÁLISIS VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN PUZOLANAS (SP) Y CON SUSTITUCIÓN DE TV CON CORROSIÓN.

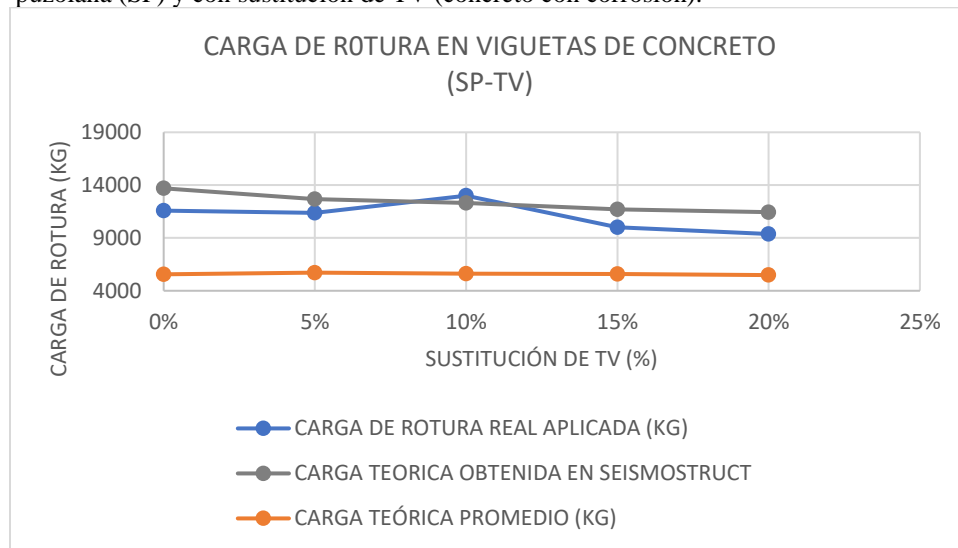
De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de flexión de las viguetas de concreto con corrosión sin puzolana y comparada con sustitución de TV por cemento y obtenida la carga de rotura real, se registró una pérdida de resistencia directamente proporcional al incremento de sustitución de TV por cemento, como lo muestra la tabla 4.27 y gráfica 4.27; la carga teórica promedio de diseño es aproximadamente el 50% de la carga de rotura real aplicada y la obtenida con seismostruct.

**Tabla 4.27:** Resultados de ensayos a flexión y cargas teóricas en viguetas de concreto reforzado sin puzolana (SP) y con sustituciones de TV (concreto con corrosión).

<b>CARGA APLICADA PARA CONCRETO CON CORROSIÓN CON SUSTITUCIÓN DE TV.</b>			
<b>PORCENTAJE DE TV.</b>	<b>CARGA DE ROTURA REAL APLICADA (KG).</b>	<b>CARGA TEÓRICA PROMEDIO DE DISEÑO (KG).</b>	<b>CARGA TEÓRICA OBTENIDA EN SEISMOSTRUCT.</b>
0%	11,598.00	5,567.20	13,695.88
5%	11,374.00	5,716.90	12,668.70
10%	12,996.50	5,617.70	12,297.71
15%	10,000.00	5,575.4	11,692.64
20%	9,373.50	5,484.2	11,439.40

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 4.27:** Comparación de resultados de ensayos a flexión y cargas teóricas en viguetas de concreto reforzado sin puzolana (SP) y con sustitución de TV (concreto con corrosión).



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.4.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE CARGA DE ROTURA ENTRE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON SUSTITUCIÓN DE PUZOLANAS SIN Y CON CORROSIÓN.

##### 4.4.3.1 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON SUSTITUCIÓN DE CBC.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de flexión de las viguetas de concreto sin y con corrosión, con sustitución de CBC por cemento y obtenida la carga de rotura real, se registró que la pérdida de resistencia en las viguetas fue menor, en las que fueron sumergidas en agua de mar para acelerar su proceso de corrosión como lo muestra la tabla 4.28 y gráfica 4.28.

En la tabla 4.28 en la última columna que muestra el cálculo de la carga teórica obtenida con seismostruct, se observó que ninguno de los valores de carga con y sin corrosión, superaron este valor.

Al ser sometidas las probetas a un proceso acelerado de corrosión (inmersión-secado en agua de mar), no mostraron una variación significativa en el cálculo de la resistencia de rotura del elemento



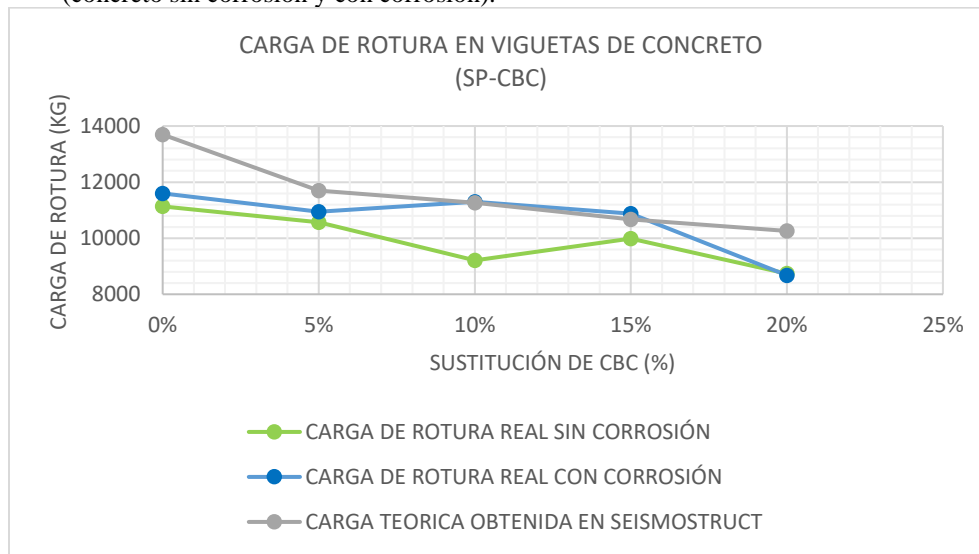
estructural ensayado (vigüeta) en los diferentes porcentajes de sustitución de CBC por cemento, como se aprecia en la tabla 4.28.

**Tabla 4.28:** Resultados de ensayos a flexión en vigüetas de concreto reforzado con sustituciones de CBC (concreto sin corrosión y con corrosión).

<b>COMPARACIÓN CARGA DE ROTURA PARA CONCRETO EN VIGÜETAS CON SUSTITUCIÓN DE CBC.</b>			
<b>PORCENTAJE DE CBC.</b>	<b>CARGA DE ROTURA REAL SIN CORROSIÓN (KG).</b>	<b>CARGA DE ROTURA REAL CON CORROSIÓN (KG).</b>	<b>CARGA TEÓRICA OBTENIDA EN SEISMOSTRUCT.</b>
0%	11,133.34	11,598.00	13,695.88
5%	10,569.00	10,941.50	11,694.76
10%	9,214.50	11,297.50	11,258.71
15%	9,985.50	10,878.00	10,667.37
20%	8,736.50	8,678.00	10,258.90

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica 4.28:** Comparación de resultados de ensayos de resistencia a la flexión en concreto con sustitución de CBC (concreto sin corrosión y con corrosión).



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.4.3.2 ANÁLISIS DE VIGÜETAS DE CONCRETO REFORZADO CON SUSTITUCIÓN DE TV.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de flexión de las vigüetas de concreto sin y con corrosión, con sustitución de TV por cemento y obtener la carga de rotura, se registró que la pérdida de resistencia en las vigüetas fue menor en las que no fueron sometidas a un proceso

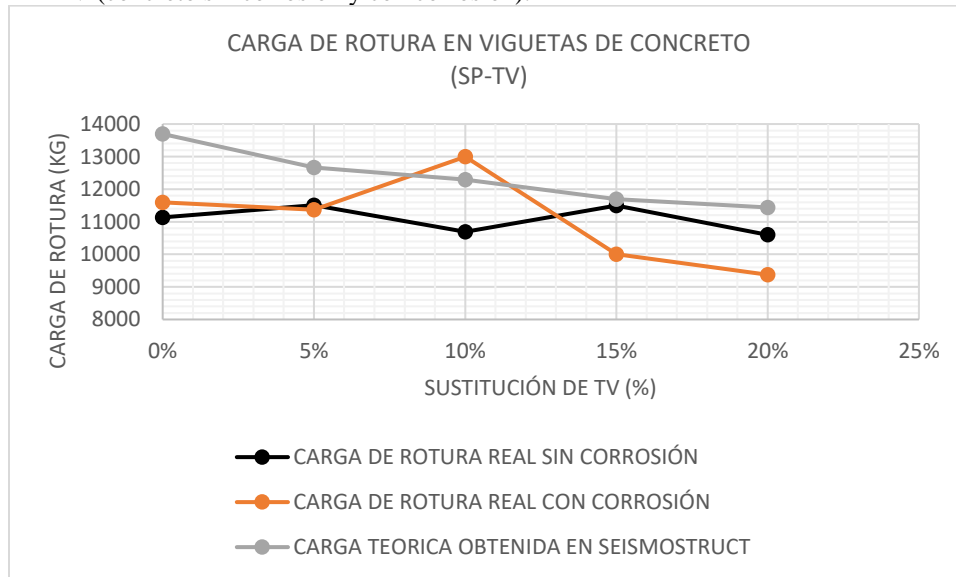
acelerado de corrosión en agua de mar (inmersión- secado), para acelerar su proceso de corrosión como lo muestra la tabla 4.29 y gráfica 4.29.

**Tabla 4.29:** Resultados de ensayos a flexión en viguetas de concreto reforzado con sustituciones de TV (concreto sin corrosión y con corrosión).

<b>COMPARACION CARGA DE ROTURA PARA CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE TV.</b>			
<b>PORCENTAJE DE TV.</b>	<b>CARGA DE ROTURA REAL SIN CORROSIÓN (KG).</b>	<b>CARGA DE ROTURA REAL CON CORROSIÓN (KG).</b>	<b>CARGA TEÓRICA OBTENIDA EN SEISMOSTRUCT.</b>
0%	11,133.34	11,598.00	13,695.88
5%	11,508.50	11,374.00	12,668.70
10%	10,690.00	12,996.50	12,297.71
15%	11,500.00	10,000.00	11,692.64
20%	10,598.50	9,373.50	11,439.40

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica 4.29:** Comparación de resultados de ensayos a flexión en viguetas de concreto reforzado con sustitución de TV (concreto sin corrosión y con corrosión).



**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.4.3.3 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN CORROSIÓN CON SUSTITUCIONES DE PUZOLANAS (CBC Y TV).

De los resultados obtenidos de las pruebas de carga mostró que la sustitución de puzolana que da mejor resistencia a la flexión es la es la sustitución TV por cemento, ya que al evaluar el efecto de

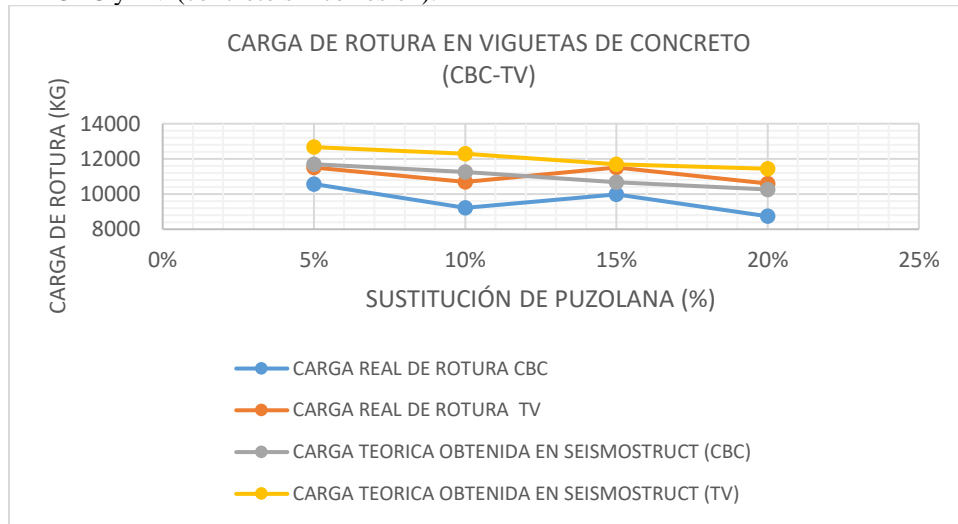
la corrosión en la CBC mejora la resistencia a la flexión en el 5% y 10% y para el caso de la TV solo para el 10%, como lo muestra la tabla 4.30 y gráfica 4.30.

**Tabla 4.30:** Resultados de ensayos a flexión en viguetas de concreto reforzado con sustituciones de CBC y TV (concreto sin corrosión).

<b>COMPARACION CARGA DE ROTURA PARA VIGUETAS DE CONCRETO SIN CORROSIÓN CON SUSTITUCIONES DE PUZOLANAS (CBC Y TV).</b>				
<b>PORCENTAJE DE PUZOLANA.</b>	<b>CARGA REAL DE ROTURA CBC (KG).</b>	<b>CARGA REAL DE ROTURA TV (KG).</b>	<b>CARGA TEÓRICA OBTENIDA EN SEISMOSTRUCT (CBC).</b>	<b>CARGA TEÓRICA OBTENIDA EN SEISMOSTRUCT (TV).</b>
5%	10,569.00	11,508.50	11,694.76	12,668.70
10%	9,214.50	10,690.00	11,258.71	12,297.71
15%	9,985.50	11,500.00	10,667.37	11,692.64
20%	8,736.50	10,598.50	10,258.90	11,439.40

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 4.30:** Comparación de resultados de ensayos a flexión en viguetas de concreto reforzado con sustituciones de CBC y TV (concreto sin corrosión).



Fuente: Elaboración propia.

#### **4.4.3.4 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON CORROSIÓN Y SUSTITUCIONES DE PUZOLANAS (TV Y CBC).**

De los resultados obtenidos de las pruebas de carga se apreció que la puzolana que da mejor resistencia a la flexión es la sustitución de TV por cemento, a excepción del 15% de sustitución.

Como lo muestra la tabla 4.31 y gráfica 4.31.

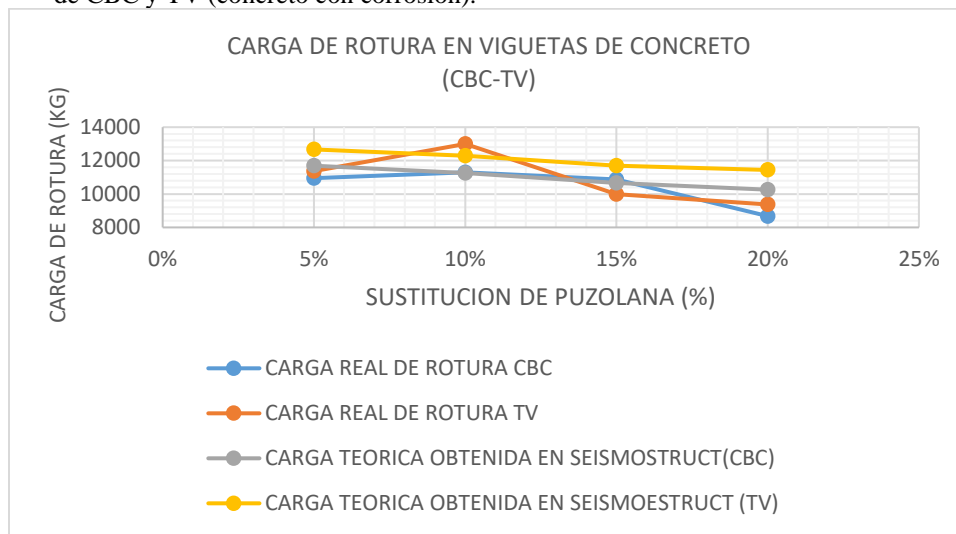
Se aprecia en la tabla 4.31 que los valores obtenidos son muy cercanos entre ellos.

**Tabla 4.31:** Resultados de ensayos a flexión en viguetas de concreto reforzado con sustituciones de CBC y TV (concreto con corrosión).

<b>COMPARACIÓN CARGA DE ROTURA PARA VIGUETAS CON CORROSIÓN Y SUSTITUCIONES DE PUZOLANAS.</b>				
<b>PORCENTAJE DE PUZOLANA.</b>	<b>CARGA REAL DE ROTURA CBC (KG).</b>	<b>CARGA REAL DE ROTURA TV (KG).</b>	<b>CARGA TEÓRICA OBTENIDA EN SEISMOSTRUCT (CBC).</b>	<b>CARGA TEÓRICA OBTENIDA EN SEISMOSTRUCT (TV).</b>
5%	10,941.50	11,374.00	11,694.76	12,668.70
10%	11,297.50	12,996.50	11,258.71	12,297.71
15%	10,878.00	10,000.00	10,667.37	11,692.64
20%	8,678.00	9,373.50	10,258.90	11,439.40

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 4.31:** Comparación de resultados de ensayos a flexión en viguetas de concreto reforzado con sustituciones de CBC y TV (concreto con corrosión).



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5 ANÁLISIS DE PESO VOLUMÉTRICO Y ABSORCIÓN DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON Y SIN CORROSIÓN.

Se presentan a continuación los resultados de los ensayos de peso volumétrico y absorción para cada una de las viguetas fabricadas, tomando en cuenta las sustituciones de CBC y TV por cemento y además las condiciones de corrosión a las que fueron sometidas.

#### 4.5.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE PESO VOLUMETRICO ENTRE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON SUSTITUCIONES DE PUZOLANAS (CBC Y TV).

##### 4.5.1.1 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON SUSTITUCIÓN DE CBC SIN Y CON CORROSIÓN.

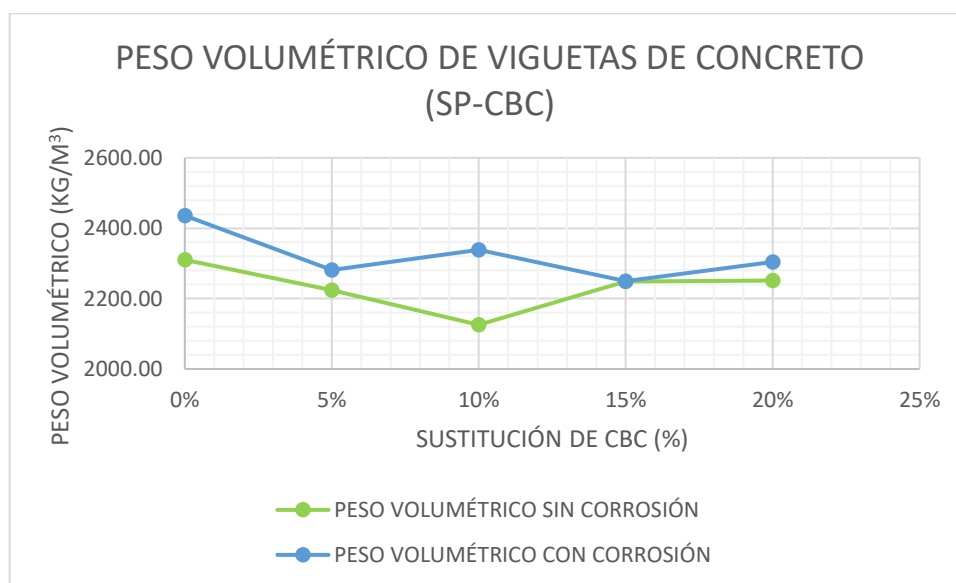
De los resultados obtenidos se observó que los pesos volumétricos de las probetas fueron mayores, en las que estuvieron sometidas a un proceso acelerado de corrosión con agua de mar como lo muestra la tabla 4.32 y gráfica 4.32.

**Tabla 4.32:** Resultado de peso volumétrico en concreto con sustituciones de CBC (concreto sin corrosión y con corrosión).

COMPARACIÓN PESO VOLUMÉTRICO PROMEDIO PARA CONCRETO EN VIGUETAS CON SUSTITUCIÓN DE CBC.		
PORCENTAJE DE CBC.	PESO VOLUMÉTRICO SIN CORROSIÓN (KG/M <sup>3</sup> ).	PESO VOLUMÉTRICO CON CORROSIÓN (KG/M <sup>3</sup> ).
0%	2,310.21	2,435.91
5%	2,224.38	2,280.87
10%	2,125.49	2,338.87
15%	2,248.37	2,249.72
20%	2,251.30	2,303.94

Fuente: *Elaboración propia.*

**Gráfica 4.32:** Comparación de resultados de peso volumétrico en viguetas de concreto con sustitución de CBC (concreto sin corrosión y con corrosión).



Fuente: *Elaboración propia.*

#### 4.5.1.2 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON SUSTITUCIÓN DE TV CON Y SIN CORROSIÓN.

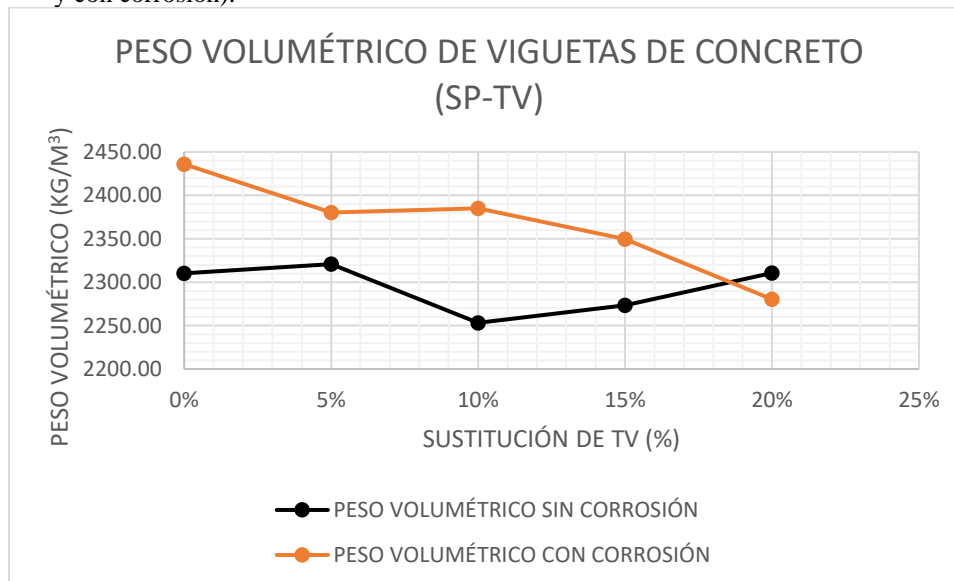
De los resultados obtenidos se observó que los pesos volumétricos de las probetas fueron mayores, en las que fueron sometidas a un proceso acelerado de corrosión en agua de mar, excepto para la sustitución del 20% como lo muestra la tabla 4.33 y la gráfica 4.33.

**Tabla 4.33:** Resultado de peso volumétrico en viguetas de concreto con sustituciones de TV (concreto sin corrosión y con corrosión).

COMPARACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO PROMEDIO PARA VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE TV.		
PORCENTAJE DE TV.	PESO VOLUMÉTRICO SIN CORROSIÓN (KG/M <sup>3</sup> ).	PESO VOLUMÉTRICO CON CORROSIÓN (KG/M <sup>3</sup> ).
0%	2,310.21	2,435.91
5%	2,320.81	2,380.37
10%	2,253.26	2,385.09
15%	2,273.43	2,349.67
20%	2,310.73	2,280.40

Fuente: *Elaboración propia.*

**Gráfica 4.33:** Comparación de peso volumétrico en viguetas de concreto con sustitución de TV (concreto sin corrosión y con corrosión).



Fuente: *Elaboración propia.*

### 4.5.1.3 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO SIN CORROSIÓN CON SUSTITUCIONES DE CBC Y TV.

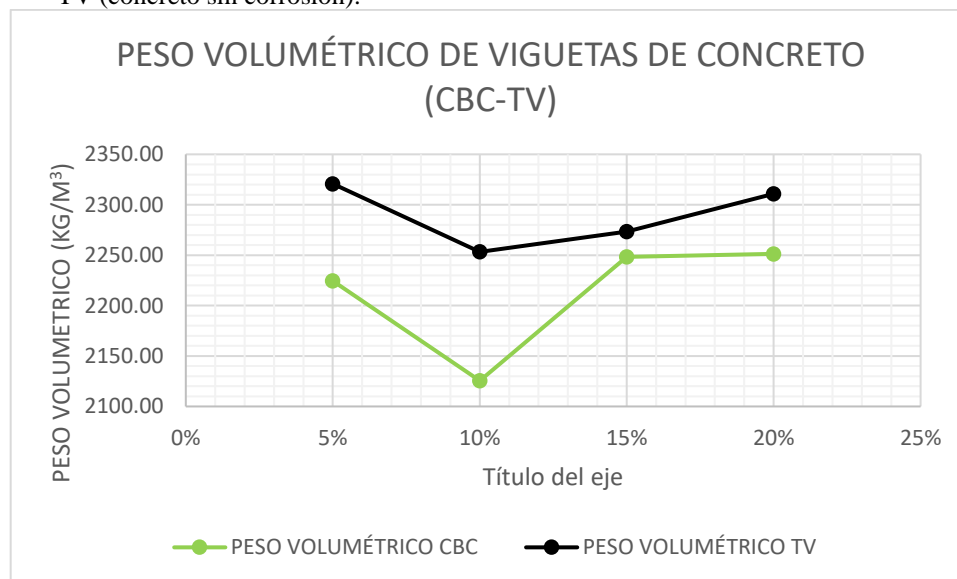
De acuerdo con los resultados obtenidos el peso volumétrico para todas las sustituciones de TV por cemento, es mayor en comparación con las sustituciones de CBC por cemento, como la muestra la tabla 4.34 y gráfica 4.34; los pesos volumétricos obtenidos en los ensayos con congruentes con los resultados esperados, para los concretos fabricados a la compresión de diseño utilizados en esta investigación.

**Tabla 4.34:** Resultados de peso volumétrico en viguetas de concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto sin corrosión).

COMPARACIÓN PESO VOLUMÉTRICO PROMEDIO PARA VIGUETAS DE CONCRETO SIN CORROSIÓN PARA CBC Y TV.		
PORCENTAJE DE PUZOLANA.	PESO VOLUMÉTRICO PROMEDIO CBC (KG/M <sup>3</sup> ).	PESO VOLUMÉTRICO PROMEDIO TV (KG/M <sup>3</sup> ).
5%	2,224.38	2,320.81
10%	2,125.49	2,253.26
15%	2,248.37	2,273.43
20%	2,251.30	2,310.73

Fuente: Elaboración propia.

**Gráfica 4.34:** Comparación de resultados de peso volumétrico en viguetas de concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto sin corrosión).



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.1.4 ANÁLISIS DE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON CORROSIÓN Y SUSTITUCIONES DE CBC Y TV.

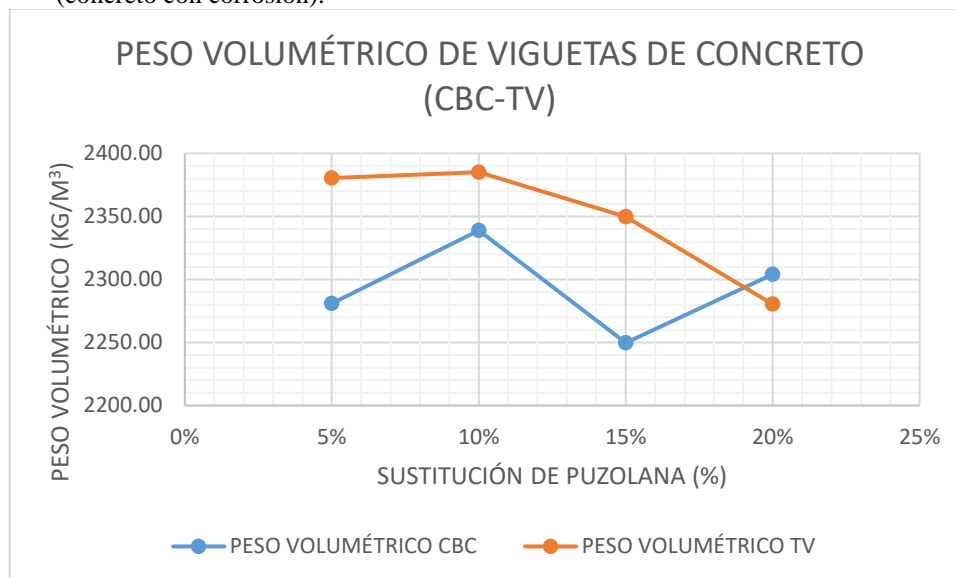
De acuerdo a los resultados obtenidos el peso volumétrico para todas las sustituciones de TV por cemento, en comparación con las sustituciones de CBC en los diferentes porcentajes es mayor, excepto para el 20%, como se muestra la tabla 4.35 y gráfica 4.35.

**Tabla 4.35:** Resultados de peso volumétrico en viguetas de concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto con corrosión).

COMPARACIÓN PESO VOLUMÉTRICO PARA VIGUETAS DE CONCRETO CON CORROSIÓN CON SUSTITUCIONES DE PUZOLANAS (CBC Y TV).		
PORCENTAJE DE PUZOLANA.	PESO VOLUMÉTRICO PROMEDIO CBC (KG/M <sup>3</sup> ).	PESO VOLUMÉTRICO PROMEDIO TV (KG/M <sup>3</sup> ).
5%	2,280.87	2,380.37
10%	2,338.87	2,385.09
15%	2,249.72	2,349.67
20%	2,303.94	2,280.40

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica 4.35:** Comparación de resultados peso volumétrico en viguetas de concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto con corrosión).



**Fuente:** Elaboración propia.

El peso volumétrico de las probetas con sustitución de TV con corrosión es mayor que las probetas con sustitución de TV si corrosión en los porcentajes del 5%,10% y 15% a excepción del 20%.



#### 4.5.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE ABSORCIÓN ENTRE VIGUETAS DE CONCRETO REFORZADO CON SUSTITUCIONES DE PUZOLANAS (CBC Y TV).

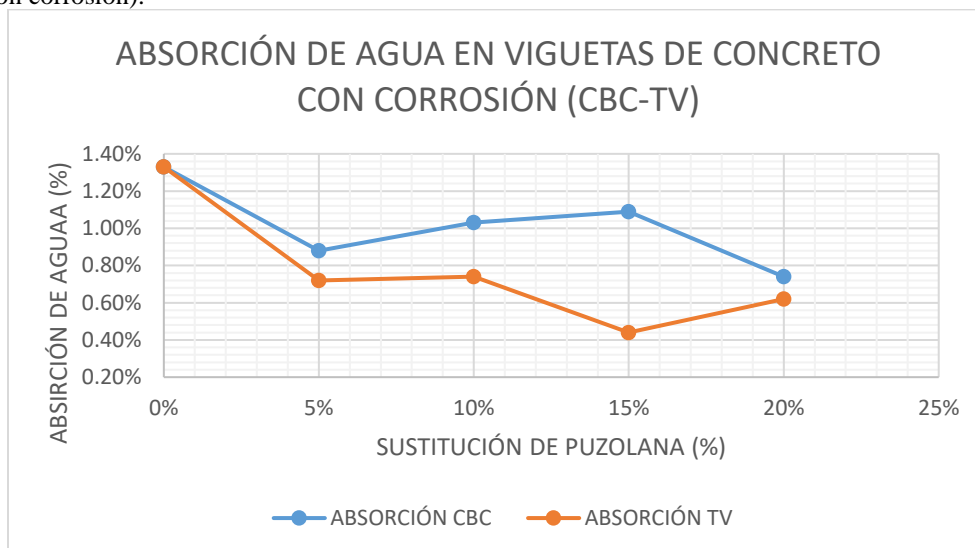
De los resultados obtenidos se determinó que el porcentaje de absorción es mayor en las viguetas con sustitución de CBC en comparación a la sustitución de TV, como se muestra la tabla 4.36 y gráfica 4.36.

**Tabla 4.36:** Resultados de absorción en viguetas de concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto con corrosión).

COMPARACION DE ABSORCIÓN EN VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIONES DE PUZOLANA (CBC Y TV).		
PORCENTAJE DE PUZOLANA.	PROMEDIO DE ABSORCIÓN CBC (%).	PROMEDIO DE ABSORCIÓN TV (%).
0%	1.33%	1.33%
5%	0.88%	0.72%
10%	1.03%	0.74%
15%	1.09%	0.44%
20%	0.74%	0.62%

**Fuente:** Elaboración propia.

**Gráfica 4.36:** Comparación de resultados de absorción en viguetas de concreto con sustituciones de CBC y TV (concreto con corrosión).



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.6 CUADRO RESUMEN.

En la tabla 4.37 se muestra un cuadro resumen de los ensayos realizados a cada una de las probetas, que fueron elaboradas en esta investigación, en la cual se puede apreciar todos los ensayos a los que fueron sometidas las probetas (cilindros, cubos y viguetas), con los porcentajes de sustitución de cada una de las puzolanas (TV y CBC).

**Tabla 4.37:** Tabla resumen de resultados de ensayo para probetas de concreto sin sustitución de puzolana y con sustitución de puzolana, con y sin corrosión.

DESCRIPCIÓN		SIN CORROSIÓN			CON CORROSIÓN			
MATERIAL	RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN CILINDROS (KG/CM <sup>2</sup> )	ADHERENCIA EN CUBOS (KG/CM <sup>2</sup> )	CARGA DE ROTURA EN VIGUETAS (KG)	POTENCIAL DE CORROSIÓN EN VIGUETAS (-mV)	ADHERENCIA EN CUBOS (KG/CM <sup>2</sup> )	CARGA DE ROTURA EN VIGUETAS (KG)	POTENCIAL DE CORROSIÓN EN VIGUETAS (-mV)	
SIN PUZOLANA		231.55	121.66	11,133.34	-21.75	107.15	11,598.00	-549.96
CBC	5%	162.46	75.12	10,569.00	-27.79	89.63	10,941.50	-445.38
	10%	146.73	46.24	9,214.50	-51.54	54.88	11,297.50	-471.04
	15%	128.29	60.11	9,985.50	-70.50	61.05	10,878.00	-471.96
	20%	116.05	51.63	8,736.50	-71.21	47.51	8,678.00	-465.83
TV	5%	209.81	72.91	11,508.50	-46.58	57.56	11,374.00	-442.69
	10%	189.03	104.20	10,690.00	-87.75	68.12	12,996.50	-477.50
	15%	162.83	66.98	11,500.00	-22.04	58.94	10,000.00	-475.13
	20%	153.63	69.79	10,598.50	-63.79	49.12	9,373.50	-534.21

Fuente: *Elaboración propia.*

**CAPÍTULO 5:  
CONCLUSIONES Y  
RECOMENDACIONES**

## 5.1 CONCLUSIONES.

- ✓ El ambiente que se ha simulado en el laboratorio, para esta investigación, es la zona costera de El Salvador, ya que se utilizó agua de mar proveniente de la playa El Espino, esto con el fin de que los análisis de los resultados sean aplicables a estas zonas, que es donde las estructuras de concreto armado se ven más afectadas por el fenómeno de la corrosión.
- ✓ Se determina que los incrementos en los porcentajes de sustitución de puzolanas por cemento son inversamente proporcionales a la trabajabilidad del concreto conforme se incrementa la sustituciones de las puzolanas, siendo mayor en la sustitución de CBC que en la TV por cemento, como lo muestra la tabla 3.37 del capítulo 3, sin embargo todos los resultados obtenidos se encuentra dentro de los rangos permitidos por el ACI 211.1 para su empleo en vigas y muros reforzados, en ambas puzolanas (ver tabla 3.15 del capítulo 3); la reducción en la trabajabilidad del concreto fresco, utilizando puzolanas se debe principalmente a que en los diseños de mezcla, para los concretos con sustitución de CBC y TV por cemento, se mantuvo constante la dosificación en peso, lo que aumentó es el volumen, ya que la densidad para el cemento C-1157 tiene un promedio de 2,800 a 3,000 Kg/m<sup>3</sup>, la densidad de la CBC es de 589 kg/m<sup>3</sup> y la de la toba volcánica es de 1,424 kg/m<sup>3</sup>, por lo que el incremento en el volumen en las mezclas con sustitución de puzolanas, aunado al mayor número de partículas en la pasta aglutinante, hacen que la humectación del concreto se reduzca considerablemente, generando de esa manera una menor trabajabilidad para las mezclas con sustitución de CBC y TV por cemento en el concreto fresco (ver tabla 3.15 del capítulo 3).
- ✓ La sustitución de CBC por cemento en las mezclas de concreto, ocasiona una pérdida importante de resistencia a la compresión conforme se incrementa dicha sustitución, manteniendo una relación inversamente proporcional entre resistencia y cantidad de CBC, obteniendo hasta un 50% en

pérdida de resistencia a la compresión al sustituir el 20% de CBC y un 34% en pérdida de resistencia a la compresión al sustituir el 20% de TV, en vista que con ninguna de las sustituciones de puzolanas se logra llegar a la resistencia del concreto sin puzolanas, ya que con la sustitución del 5% de TV el concreto alcanza un 90.6% y con el 5% de sustitución de CBC el concreto alcanza una resistencia del 70.2%; es importante hacer notar que ninguna de las sustituciones logró llegar a la resistencia del concreto sin puzolanas. El cemento tipo GU (C-1157) utilizado para estos ensayos, es el más empleado en la construcción en nuestro país; en la ficha técnica de este cemento se menciona que en la molienda final se le agrega puzolana en proporciones específicas, lo que puede ser un indicativo, de que la cantidad óptima de puzolana ya estaría agregada al cemento, por lo que se concluye que ninguno de los porcentajes de sustituciones de puzolanas, evaluados en este trabajo de investigación, se puede emplear para la fabricación de concreto estructural, dada su reducción en la resistencia a la compresión (ver en la tabla 3.41 del capítulo 3).

- ✓ Las resistencias a la compresión alcanzadas en el concreto con sustitución de TV son mayores que las obtenidas con CBC. En ambos resultados se considera que tiene influencia el contenido previo de puzolana en este cemento (ver en la tabla 4.3 del capítulo 4).
- ✓ Al medir el potencial de corrosión en las viguetas de concreto reforzado que fueron sometidas a un proceso acelerado de corrosión (inmersión-secado), se observó que en las probetas sin sustitución de CBC y TV, de acuerdo a la norma ASTM C-876 (tabla 2.11 del capítulo 2), la condición de corrosión que alcanzaron es severa, lo que representa una alta probabilidad que el acero dentro de la vigueta, ha iniciado su proceso de corrosión y para el caso de las viguetas con la sustitución de CBC y TV del 5%, 10%, 15% y 20%, la condición de corrosión que alcanzaron es alta, siendo esta una condición menor que la condición severa mencionada anteriormente, lo que indica que la adición de CBC y TV específicamente para el 5%, reduce el riesgo de corrosión

en el acero de refuerzo en las estructuras de concreto reforzado, después de esta proporción los incrementos ya no redujeron el riesgo de corrosión, sino que se van acercando a la condición severa de corrosión. (ver tabla 3.42 del capítulo 3).

- ✓ De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que conforme a se incrementa el porcentaje de sustitución de puzolana por cemento la corrosión se acerca a la condición severa, a nivel general se observa que la sustitución de CBC presenta mayor protección contra la corrosión que la sustitución de TV (ver tabla 3.42 del capítulo 3).
- ✓ Al comparar el riesgo de corrosión para las viguetas de concreto con sustitución de puzolanas (TV y CBC), se determinó que la sustitución de CBC disminuye en un mayor porcentaje la condición del riesgo de corrosión al compararlo con la sustitución de TV, sin embargo, su variación no sobrepasa el 1%; cabe señalar que estas mediciones para determinar el riesgo de corrosión son indirectas por lo que los resultados son un indicador del inicio del proceso de corrosión en las probetas de concreto (ver tabla 3.42 del capítulo 3).
- ✓ Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación de las pruebas de arrancamiento (pull-out) para calcular el esfuerzo de adherencia, elaborados bajo la norma RILEM-CEB RC6 (1983), realizados en los prismas de concreto tanto para las sustituciones de CBC y TV, comparados con la investigación experimental de adherencia entre concreto y acero para barras delgadas de refuerzo según Carvalho et al. 2017(107.58 kg/cm<sup>2</sup>), en el cual se utilizaron probetas de concreto sin sustitución de puzolanas y sin ser sometidas a un proceso acelerado de corrosión, el valor es congruente con los resultados obtenidos en los ensayos realizados en dicho estudio(ver tabla 3.43 del capítulo 3).
- ✓ En los prismas de concreto que no fueron sometidas a un proceso acelerado de corrosión, podemos determinar que, a mayor cantidad de puzolanas el esfuerzo de adherencia disminuye, para la

sustitución de CBC las reducciones varían desde un 38% para la sustitución del 5% de CBC, hasta un 58% de reducción en el esfuerzo de adherencia para la sustitución del 20% de CBC; para la sustitución de TV las reducciones varían desde un 40% para la sustitución del 5% de TV, hasta un 43% de reducción en el esfuerzo de adherencia para la sustitución del 20% de TV. La reducción en el esfuerzo de adherencia debido a la sustitución de puzolanas es congruente con los resultados obtenidos por el profesor Ferguson (1962), en sus estudios demostró que la resistencia por adherencia aumenta al aumentar la resistencia del concreto; posteriormente el profesor Baus (1965), en base a ensayos realizados en vigas, estableció la ley que define las variaciones de los esfuerzos de adherencia “U”, en función de la resistencia del concreto (ver tabla 3.43 del capítulo 3).

- ✓ Las probetas de concreto utilizadas para las pruebas de resistencia de adherencia, sin adición de puzolanas, sometidas a un proceso acelerado de corrosión (inmersión-secado), presentaron una reducción del 12% en la adherencia entre acero de refuerzo y el concreto, esto se debe a la pérdida de la capa pasivante generada por la producción de óxido en el acero de refuerzo, produciendo así una separación entre el acero y el concreto. En las probetas de concreto con adición de puzolanas que fueron sometidas a un proceso acelerado de corrosión podemos determinar que, a mayor cantidad de puzolanas, la resistencia a la adherencia disminuye, para la sustitución de CBC las reducciones varían desde un 16% para la sustitución del 5% de CBC, hasta un 56% de reducción resistencia a la adherencia para la sustitución del 20% de CBC; para la sustitución de TV las reducciones varían desde un 46% para la sustitución del 5% de TV, hasta un 54% de reducción resistencia a la adherencia para la sustitución del 20% de TV(ver tabla 3.43 del capítulo 3).
- ✓ En el ensayo de resistencia a la adherencia, se observa que en los porcentajes de sustitución de 5%, 10% y 15% de puzolana la resistencia a la adherencia del CBC es mayor que en la TV, y una menor

resistencia a la adherencia en el 20% de sustitución de CBC con respecto al mismo porcentaje de TV, en prismas sometidos a corrosión.

- ✓ Al ensayar las viguetas para el ensayo a flexión, que no fueron sometidas a corrosión, se observa que la carga de rotura disminuye en las viguetas conforme se incrementan las sustituciones de las puzolanas (CBC y TV) por cemento, con respecto a la carga de rotura de las viguetas que no se les añadió puzolanas, la tendencia observada en general es que al aumentar el porcentaje de sustitución de puzolanas, la magnitud de la carga de rotura a flexión disminuye, siendo un 21.5% la reducción máxima de la carga de rotura a flexión en el porcentaje de sustitución del 20% de CBC y de un 4.8% en la sustitución del 20% de TV por cemento, la menor diferencia en el porcentaje de reducción de la carga de rotura a flexión en la sustitución de TV por cemento, es debido a sus características geomecánicas y vulcanológicas que no tiene la puzolana orgánica CBC. (ver tabla 3.45 del capítulo 3).
- ✓ La incidencia de la corrosión en las viguetas sin puzolanas, en los ensayos de carga de rotura a flexión no fue apreciable, esto debido a que los procesos de corrosión, de acuerdo a estudios previos, conllevan largos períodos de tiempo y nuestro estudio duró 98 días; es importante hacer notar que en los resultados obtenidos ocurre un incremento de un 4% de la carga de rotura a flexión en las viguetas que fueron sometidas a corrosión, este fenómeno se debió a los ciclos de inmersión-secado de las viguetas en agua mar, lo que favoreció el proceso de curado del concreto, ganando una mayor resistencia; este fenómeno fue similar para las viguetas con sustitución de CBC; las viguetas con sustitución de TV sometidas a corrosión, mostraron un comportamiento inverso a la CBC, reduciendo su carga de rotura a flexión, esto debido a las propiedades de absorción y retención de humedad en el concreto endurecido con sustitución de CBC. (ver tabla 3.45 del capítulo 3 y tabla 4.36 del capítulo 4).



- ✓ La sustitución de puzolanas por cemento para la elaboración de concreto hidráulico, reduce el riesgo de corrosión en los elementos de concreto estructural sometidos a corrosión durante su vida útil, por lo que se ha cumplido la hipótesis de investigación; estas sustituciones afectan las propiedades de los concretos frescos como la trabajabilidad, la temperatura, así también reducen las propiedades del concreto endurecido como la resistencia a la compresión, al esfuerzo de adherencia y debido a ello también afectan las propiedades de resistencia de los elementos estructurales fabricados con concretos con sustituciones de puzolanas. Es importante tomar en cuenta que los cementos de uso común, que se emplean en nuestro país en las edificaciones de la zona costero-marina, ya poseen adición de puzolanas, por lo tanto, las cantidades a sustituir deben ser menores a las utilizadas en esta investigación. La dificultad de conseguir CBC y los resultados encontrados en esta investigación hacen que la TV sea la puzolana a utilizar, ya que reduce menos las características de resistencia de los concretos; es importante hacer notar que los datos obtenidos para la adherencia no marcan una tendencia concluyente (ver tabla 4.37 del capítulo 4).
- ✓ Comparando los resultados obtenidos en los ensayos de flexión en viguetas de concreto reforzado, muestran que la carga de rotura máxima teórica obtenida del programa seismostruct (CRMT) es mayor en todos los porcentajes de sustituciones de puzolanas (TV y CBC) que las cargas de rotura máxima real sin corrosión (CRMRSC), esto se debe a que en la CRMRSC se encuentra involucrada la incerteza inherente al proceso de elaboración de las viguetas sometidas a flexión, lo que incide en la reducción en la capacidad. (ver tabla 3.45 en el capítulo 3).
- ✓ Al analizar los resultados entre los valores de la CRMT y las cargas de rotura máxima real con corrosión (CRMRCC), podemos observar que el 10% de TV es la única sustitución que muestra un incremento considerable contra la CRMT; los porcentajes de sustitución de TV del 5%, 15% y el 20% son menores que la CRMT. (ver tabla 3.45 del capítulo 3).

- ✓ Comparando la CRMT con la CRMRCC en las sustituciones del 10% y 15% de CBC en sus incrementos, no son representativos para generalizarlo como un incremento aceptable y los otros porcentajes con menores que la CRMT.
- ✓ Realizando la evaluación de los costos unitarios del concreto con sustituciones de puzolanas, calculado con el 5% de TV y 5% de CBC para la zona oriental, muestran una reducción del 3% en el costo del concreto por metro cubico, como puede apreciarse en el anexo 6.

## **5.2 RECOMENDACIONES.**

- ✓ De acuerdo con los resultados obtenidos de la compresión simple del concreto, no es recomendable la sustitución de CBC y TV por cemento, ya que las mezclas de concreto aún en el mínimo porcentaje de sustitución de puzolanas dan como resultado pérdidas de resistencia de al menos 9 %.
- ✓ En cuanto a los resultados obtenidos en el potencial de corrosión en el concreto reforzado para la sustitución de CBC y TV, a mayor sustitución de puzolanas se obtuvieron valores menos positivos (con un mayor índice de corrosión). En base a lo anterior se sugiere para futuras investigaciones, utilizar sustituciones menores al 5% y/o además evaluar su empleo como adición en las mezclas de concreto.
- ✓ Se recomienda que, en futuros trabajos de investigación sobre este tema, prolongar el tiempo de duración de los ensayos de corrosión, para obtener resultados más concluyentes en cuanto a la reducción del riesgo de corrosión.
- ✓ Se recomienda hacer estudios sobre la utilización de estas puzolanas en otros elementos constructivos, como la fabricación de grout para las celdas de las paredes de block, o muros de mampostería de block y aceras.

## BIBLIOGRAFÍA

### Tesis

- ✓ Alvarado, J.N, Andrade, J.A, Hernández, H.N, (2016) “Estudio del empleo de cenizas producidas en ingenios azucareros como sustituto parcial del cemento portland en el diseño de mezclas de concreto”, El Salvador.
- ✓ Carranza, R.A (2017) “Nuevos materiales conglomerantes a partir de tierras de diatomeas de distinto origen: reactividad puzolánica” Universitat Politècnica de València, España, pp 25-43.
- ✓ García, G.R, Martínez, D.C, Miranda, C.A (2016), “Caracterización del potencial de corrosión en instalaciones superficiales de los pozos A-1 y A-2 de un campo geotérmico”. El Salvador, pp 20-24.
- ✓ Gómez, L, Villabona, Y.P, (2012) “Determinación de la corrosión en probetas de hormigón sumergidas en solución salina” Cartagena de Indias, D.T y C, pp 49-71.
- ✓ Andrade, V.G, Díaz, I.T (1994) “Evaluación de la efectividad de un sellador para concreto ante la penetración de iones cloruro” Maracaibo, Venezuela, pp 121 – 124.
- ✓ Martínez, L.A (2004) “Evaluación de la influencia del SO<sub>2</sub> como agente corrosivo en estructuras de concreto” Universidad Nacional Autónoma de México, pp 17-20, 30-42.
- ✓ Díaz S.A (2012) “Estimación del impacto del tiempo de corrosión en la evolución del riesgo de estructuras de concreto reforzado” Toluca, Estado de México, pp 29-36.
- ✓ Menjívar C.E (2015) “Corrosión del acero al carbono y del aluminio en diferentes tipos de atmósferas de El Salvador” El Salvador, pp 5-21.
- ✓ Fuentes A.A (2014) “Determinación de la velocidad de corrosión en armaduras de acero en presencia de inhibidores orgánicos, mediante técnicas de análisis electroquímico” Universidad Pontificia de Valencia, España, pp 4, 11, 19-28.

- ✓ Peralta (2015) et al: “Técnicas aceleradas para evaluar la susceptibilidad a corrosión de aceros embebidos en morteros con adiciones minerales expuestos a cloruros (páginas 140 y 141)”.
- ✓ Gómez (2012) et al.: “Determinación de la corrosión en probetas de hormigón sumergidas en solución salina” (pág. 28).
- ✓ De león (2007) et al.: “Tiempo estimado para mantenimiento de un puente de concreto reforzado expuesto a corrosión en el valle de Toluca aplicando criterios probabilistas (artículo)”.
- ✓ Gómez (2012) et al.: “Determinación de la corrosión en probetas de hormigón sumergidas en solución salina” (pág. 29).
- ✓ Menjívar (2020) “Corrosión del acero al carbono y del aluminio en diferentes tipos de atmósferas de El Salvador (artículo)”.
- ✓ Ventura (1987) et al: “La agresividad ambiental y la durabilidad de las estructuras de hormigón (artículo)” (pág. 18).
- ✓ Stulz (1993) et al: “Materiales de construcción apropiados” (pág. 147).
- ✓ Acosta M, Velásquez R, (2003) “Evaluación de la corrosión en vigas de concreto reforzado en presencia de agua potable y NaCl al 3.5%” pp 20-22.
- ✓ Muñoz et al. (2015): “Técnicas aceleradas para evaluar la susceptibilidad la corrosión de aceros embebidos en morteros con adiciones minerales expuestos a cloruros (artículo)”.
- ✓ Vera et al. (2004) “Estudio de la corrosión de hormigón armado con acero y acero galvanizado en ambiente salino (página 83)”.
- ✓ Larios, et al (2019) “Propuesta metodológica de caracterización y evaluación de puzolanas de origen volcánico y derivados del proceso de la calcinación de ladrillo de barro en la capacidad reactiva de formación de compuestos cementicios”.

## **Artículos**

- ✓ Aguirre, A. M, Mejia, R. (2013) “Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions” Cali, Colombia, p 14.
- ✓ Eliene, P.C, Ferreira E.G, da Cunha J.C, (2017) “Experimental Investigation of Steel-Concrete Bond for Thin Reinforcing Bars”, Belo Horizonte, Brazil.
- ✓ Paredes, J, Prieto, J (2013), “Corrosión del acero en elementos de hormigón armado: vigas y columnas”, Guayaquil, Ecuador.
- ✓ Carvajal, A.M, Silva. C, (2004) “Medidas de potencial de corrosión en sistema de penetración acelerada de iones Cl<sup>-</sup>, en hormigón armado” Universidad Católica de Chile pp 3-6.
- ✓ Aguirre A.M, Mejía R, “Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas” Universidad del Valle, Cali, Colombia pp 8-32.
- ✓ Ríos (2011) “Empleo de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto porcentual del agregado fino en la elaboración del concreto hidráulico”.
- ✓ Sánchez (2001): “Tecnología del concreto y del mortero”.

## **Memorias en Congresos:**

- ✓ B.R.S. Ingenieros, (2005), “Corrosión: El cáncer de las estructuras” Seminario internacional: Vulnerabilidad de las obras civiles, Caracas, Venezuela.
- ✓ Baltazar M.A, Hurtado G.S “Evaluación electroquímica de especímenes de concreto reforzado: influencia del tipo de curado y medio de exposición” XXVI Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica.
- ✓ García, “Revista internacional de contaminación ambiental”.

## **Normas:**

ASTM International. (2004). ASTM C 33/C33M—04 Specification for Concrete Aggregates.

ASTM International. (2004). ASTM C136/C136M – 04 Standard Test Method for Granulometric Analysis of Coarse and Fine Aggregates.

ASTM International. (2004). ASTM C29/C29M-04 Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate.

ASTM International. (2004). ASTM C128-04 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.

ASTM International. (2004). ASTM C127-04 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate.

ASTM International. (2004). ASTM C94/C94M-04 Standard Specification for Ready-Mixed Concrete.


ASTM International. (2004). ASTM C1064/C1064M-04 Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete.

ASTM International. (2004). ASTM C192/C192M-19 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.

**ANEXOS**

**ANEXO 1: RESULTADOS DE LABORATORIO PARA ENSAYOS DE COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO (CAPITULO 3).**

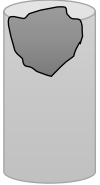
**Tabla A1-1:** Resultados de ensayos de compresión a cilindros de concreto sin sustitución de puzolana.

<b>CONTROL DE ENSAYOS A COMPRESIÓN DE CILINDROS SIN SUSTITUCIÓN DE PUZOLANA (S.P.).</b>						
<b>Resistencia esperada a los 28 días = 210 kg/cm<sup>2</sup></b>						
<b>Identificación</b>	<b>C1, S.P.</b>	<b>C2, S.P.</b>	<b>C3, S.P.</b>	<b>C4, S.P.</b>	<b>C5, S.P.</b>	<b>C6, S.P.</b>
<b>Fecha de elaboración</b>	23/07/2019	23/07/2019	23/07/2019	23/07/2019	23/07/2019	23/07/2019
<b>Fecha de ensayo</b>	30/07/2019	30/07/2019	06/08/2019	06/08/2019	20/08/2019	20/08/2019
<b>Edad (días)</b>	7	7	14	14	28	28
<b>Diámetro superior (cm)</b>	14.78	14.70	14.81	14.86	14.84	14.86
<b>Diámetro inferior (cm)</b>	14.78	14.70	14.96	15.01	14.95	14.93
<b>Diámetro promedio (cm)</b>	14.78	14.70	14.89	14.94	14.90	14.90
<b>Altura 1 (cm)</b>	30.40	30.30	30.30	30.10	30.30	30.50
<b>Altura 2 (cm)</b>	30.40	30.30	30.00	30.20	30.50	30.00
<b>Altura promedio (cm)</b>	30.40	30.30	30.15	30.15	30.40	30.25
<b>Masa del espécimen (kg)</b>	12.12	12.14	11.74	11.88	11.82	11.86
<b>Carga aplicada (kg)</b>	28,315.00	26,524.90	32,215.10	32,211.20	38,331.20	42,362.00
<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	171.57	169.72	174.02	175.19	174.25	174.25
<b>Resistencia (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	165.04	156.29	185.13	183.87	219.98	243.11
<b>Resistencia Promedio</b>	<b>160.66</b>		<b>184.50</b>		<b>231.55</b>	
<b>Porcentaje obtenido</b>	76.51%		87.86%		110.26%	
<b>Tipo de falla promedio</b>						

**Fuente:** *Elaboración propia.*

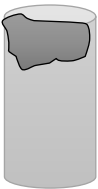


**Tabla A1-2:** Resultados de ensayos de compresión a cilindros con 5% de sustitución de CBC.

<b>CONTROL DE ENSAYOS A COMPRESIÓN DE CILINDROS CON EL 5% DE SUSTITUCIÓN DE CBC.</b>						
<b>Resistencia esperada a los 28 días = 210 kg/cm2..</b>						
<b>Identificación</b>	<b>C1, 5% CBC</b>	<b>C2, 5% CBC</b>	<b>C3, 5% CBC</b>	<b>C4, 5% CBC</b>	<b>C5, 5% CBC</b>	<b>C6, 5% CBC</b>
<b>Fecha de elaboración</b>	23/07/2019	23/07/2019	23/07/2019	23/07/2019	23/07/2019	23/07/2019
<b>Fecha de ensayo</b>	30/07/2019	30/07/2019	06/08/2019	06/08/2019	20/08/2019	20/08/2019
<b>Edad (días)</b>	7	7	14	14	28	28
<b>Diámetro superior (cm)</b>	14.80	14.83	14.77	14.95	14.82	14.85
<b>Diámetro inferior (cm)</b>	14.80	14.83	14.85	15.01	14.94	14.93
<b>Diámetro promedio (cm)</b>	14.80	14.83	14.81	14.98	14.88	14.89
<b>Altura 1 (cm)</b>	30.40	30.40	30.50	30.00	30.50	30.40
<b>Altura 2 (cm)</b>	30.40	30.40	30.30	30.10	30.20	30.10
<b>Altura promedio (cm)</b>	30.40	30.40	30.40	30.05	30.35	30.25
<b>Masa del espécimen (kg)</b>	11.88	11.92	11.48	11.58	10.42	11.62
<b>Carga aplicada (kg)</b>	16,988.80	9,149.20	24,001.80	21,746.30	26,683.70	29,859.60
<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	172.03	172.73	172.27	176.24	173.90	174.13
<b>Resistencia (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	98.75	52.97	139.33	123.39	153.44	171.48
<b>Resistencia Promedio</b>	<b>75.86</b>		<b>131.36</b>		<b>162.46</b>	
<b>Porcentaje obtenido</b>	36.12%		62.55%		77.36%	
<b>Tipo de falla promedio</b>						

**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Tabla A1-3:** Resultados de ensayos de compresión a cilindros con 10% de sustitución de CBC.

<b>CONTROL DE ENSAYOS A COMPRESIÓN DE CILINDROS CON EL 10% DE SUSTITUCIÓN DE CBC.</b>						
<b>Resistencia esperada a los 28 días = 210 kg/cm<sup>2</sup>.</b>						
<b>Identificación</b>	<b>C1, 10% CBC</b>	<b>C2, 10% CBC</b>	<b>C3, 10% CBC</b>	<b>C4, 10% CBC</b>	<b>C5, 10% CBC</b>	<b>C6, 10% CBC</b>
<b>Fecha de elaboración</b>	23/07/2019	23/07/2019	23/07/2019	23/07/2019	23/07/2019	23/07/2019
<b>Fecha de ensayo</b>	30/07/2019	30/07/2019	06/08/2019	06/08/2019	20/08/2019	20/08/2019
<b>Edad (días)</b>	7	7	14	14	28	28
<b>Diámetro superior (cm)</b>	14.80	15.12	14.87	14.98	14.82	14.94
<b>Diámetro inferior (cm)</b>	14.80	15.12	14.83	14.86	15.00	14.97
<b>Diámetro promedio (cm)</b>	14.80	15.12	14.85	14.92	14.91	14.96
<b>Altura 1 (cm)</b>	30.50	30.15	30.00	30.20	30.60	30.40
<b>Altura 2 (cm)</b>	30.50	30.40	30.10	30.10	30.30	30.50
<b>Altura promedio (cm)</b>	30.50	30.28	30.05	30.15	30.45	30.45
<b>Masa del espécimen (kg)</b>	11.76	12.78	11.28	11.26	11.50	11.86
<b>Carga aplicada (kg)</b>	12,146.20	16,445.00	16,670.30	16,663.80	23,729.00	27,676.30
<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	172.03	179.55	173.20	174.83	174.60	175.66
<b>Resistencia (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	70.60	91.59	96.25	95.31	135.90	157.56
<b>Resistencia Promedio</b>	<b>81.10</b>		<b>95.78</b>		<b>146.73</b>	
<b>Porcentaje obtenido</b>	38.62%		45.61%		69.87%	
<b>Tipo de falla promedio</b>						

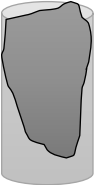
**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Tabla A1-4:** Resultados de ensayos de compresión a cilindros con 15% de sustitución de CBC.

<b>CONTROL DE ENSAYOS A COMPRESIÓN DE CILINDROS CON EL 15% DE SUSTITUCIÓN DE CBC.</b>						
<b>Resistencia esperada a los 28 días = 210 kg/cm<sup>2</sup>.</b>						
<b>Identificación</b>	<b>C1, 15% CBC</b>	<b>C2, 15% CBC</b>	<b>C3, 15% CBC</b>	<b>C4, 15% CBC</b>	<b>C5, 15% CBC</b>	<b>C6, 15% CBC</b>
<b>Fecha de elaboración</b>	24/07/2019	24/07/2019	24/07/2019	24/07/2019	24/07/2019	24/07/2019
<b>Fecha de ensayo</b>	31/07/2019	31/07/2019	07/08/2019	07/08/2019	21/08/2019	21/08/2019
<b>Edad (días)</b>	7	7	14	14	28	28
<b>Diámetro superior (cm)</b>	14.70	14.85	14.83	14.88	14.94	14.97
<b>Diámetro inferior (cm)</b>	14.70	14.83	14.89	14.93	14.96	14.98
<b>Diámetro promedio (cm)</b>	14.70	14.84	14.86	14.91	14.95	14.98
<b>Altura 1 (cm)</b>	30.10	30.40	30.50	30.30	30.50	30.10
<b>Altura 2 (cm)</b>	30.20	30.20	30.70	30.00	30.60	30.40
<b>Altura promedio (cm)</b>	30.15	30.30	30.60	30.15	30.55	30.25
<b>Masa del espécimen (kg)</b>	12.02	11.94	12.08	12.06	12.00	11.94
<b>Carga aplicada (kg)</b>	14,492.50	15,031.90	20,543.20	20,331.40	21,492.50	23,625.20
<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	169.72	172.96	173.43	174.48	175.54	176.13
<b>Resistencia (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	85.39	86.91	118.45	116.52	122.44	134.14
<b>Resistencia Promedio</b>	<b>86.15</b>		<b>117.49</b>		<b>128.29</b>	
<b>Porcentaje obtenido</b>	41.02%		55.95%		61.09%	
<b>Tipo de falla promedio</b>						

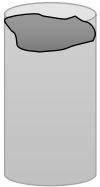
**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Tabla A1-5:** Resultados de ensayos de compresión a cilindros con 20% de sustitución de CBC.

<b>CONTROL DE ENSAYOS A COMPRESIÓN DE CILINDROS CON EL 20% DE SUSTITUCIÓN DE CBC.</b>						
<b>Resistencia esperada a los 28 días = 210 kg/cm<sup>2</sup>.</b>						
<b>Identificación</b>	<b>C1, 20% CBC</b>	<b>C2, 20% CBC</b>	<b>C3, 20% CBC</b>	<b>C4, 20% CBC</b>	<b>C5, 20% CBC</b>	<b>C5, 20% CBC</b>
<b>Fecha de elaboración</b>	24/07/2019	24/07/2019	24/07/2019	24/07/2019	24/07/2019	24/07/2019
<b>Fecha de ensayo</b>	31/07/2019	31/07/2019	07/08/2019	07/08/2019	21/08/2019	21/08/2019
<b>Edad (días)</b>	7	7	14	14	28	28
<b>Diámetro superior (cm)</b>	14.84	14.87	14.85	14.86	14.99	14.84
<b>Diámetro inferior (cm)</b>	14.91	14.92	14.96	14.85	14.98	14.95
<b>Diámetro promedio (cm)</b>	14.88	14.90	14.91	14.86	14.99	14.90
<b>Altura 1 (cm)</b>	30.30	30.00	30.10	30.30	30.10	30.10
<b>Altura 2 (cm)</b>	30.00	29.80	30.50	30.10	30.50	30.00
<b>Altura promedio (cm)</b>	30.15	29.90	30.30	30.20	30.30	30.05
<b>Masa del espécimen (kg)</b>	11.80	11.80	11.88	11.94	11.78	11.24
<b>Carga aplicada (kg)</b>	11,454.40	10,918.40	17,580.90	16,888.40	20,794.70	19,896.50
<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	173.78	174.25	174.48	173.31	176.36	174.25
<b>Resistencia (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	65.91	62.66	100.76	97.44	117.91	114.18
<b>Resistencia Promedio</b>	<b>64.29</b>		<b>99.10</b>		<b>116.05</b>	
<b>Porcentaje obtenido</b>	30.61%		47.19%		55.26%	
<b>Tipo de falla promedio</b>						

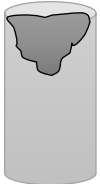
Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A1-6:** Resultados de ensayos de compresión a cilindros con 5% de sustitución de TV.

<b>CONTROL DE ENSAYOS A COMPRESIÓN DE CILINDROS CON EL 5% DE SUSTITUCIÓN DE TV.</b>						
<b>Resistencia esperada a los 28 días = 210 kg/cm<sup>2</sup>.</b>						
<b>Identificación</b>	<b>C1, 5% TV</b>	<b>C2, 5% TV</b>	<b>C3, 5% TV</b>	<b>C4, 5% TV</b>	<b>C5, 5% TV</b>	<b>C6, 5% TV</b>
<b>Fecha de elaboración</b>	24/07/2019	24/07/2019	24/07/2019	24/07/2019	24/07/2019	24/07/2019
<b>Fecha de ensayo</b>	31/07/2019	31/07/2019	07/08/2019	07/08/2019	21/08/2019	21/08/2019
<b>Edad (días)</b>	7	7	14	14	28	28
<b>Diámetro superior (cm)</b>	14.91	14.81	14.77	14.96	15.00	15.00
<b>Diámetro inferior (cm)</b>	14.87	14.93	14.81	15.00	15.00	15.00
<b>Diámetro promedio (cm)</b>	14.89	14.87	14.79	14.98	15.00	15.00
<b>Altura 1 (cm)</b>	30.20	30.00	30.20	30.30	30.50	30.50
<b>Altura 2 (cm)</b>	30.10	30.10	30.40	30.50	30.90	30.00
<b>Altura promedio (cm)</b>	30.15	30.05	30.30	30.40	30.70	30.25
<b>Masa del espécimen (kg)</b>	12.30	12.02	12.34	12.36	13.24	12.74
<b>Carga aplicada (kg)</b>	17,620.60	20,018.70	28,831.80	28,609.80	37,635.60	36,517.70
<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	174.13	173.66	171.80	176.24	176.71	176.71
<b>Resistencia (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	101.19	115.27	167.82	162.33	212.97	206.65
<b>Resistencia Promedio</b>	<b>108.23</b>		<b>165.08</b>		<b>209.81</b>	
<b>Porcentaje obtenido</b>	51.54%		78.61%		99.91%	
<b>Tipo de falla promedio</b>						


Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A1-7:** Resultados de ensayos de compresión a cilindros con 10% de sustitución de TV.

<b>CONTROL DE ENSAYOS A COMPRESIÓN DE CILINDROS CON EL 10% DE SUSTITUCIÓN DE TV.</b>						
<b>Resistencia esperada a los 28 días = 210 kg/cm<sup>2</sup>.</b>						
<b>Identificación</b>	C1, 10% TV	C2, 10% TV	C3, 10% TV	C4, 10% TV	C5, 10% TV	C6, 10% TV
<b>Fecha de elaboración</b>	25/07/2019	25/07/2019	25/07/2019	25/07/2019	25/07/2019	25/07/2019
<b>Fecha de ensayo</b>	01/08/2019	01/08/2019	08/08/2019	08/08/2019	22/08/2019	22/08/2019
<b>Edad (días)</b>	7	7	14	14	28	28
<b>Diámetro superior (cm)</b>	14.74	14.83	14.89	14.89	14.84	14.97
<b>Diámetro inferior (cm)</b>	14.83	15.01	14.96	14.92	14.87	14.95
<b>Diámetro promedio (cm)</b>	14.79	14.92	14.93	14.91	14.86	14.96
<b>Altura 1 (cm)</b>	30.50	30.00	30.00	30.10	30.00	30.60
<b>Altura 2 (cm)</b>	30.40	29.80	30.40	30.40	30.40	30.40
<b>Altura promedio (cm)</b>	30.45	29.90	30.20	30.25	30.20	30.50
<b>Masa del espécimen (kg)</b>	12.22	12.06	12.06	12.04	9.88	10.18
<b>Carga aplicada (kg)</b>	17,848.80	15,373.00	23,195.50	22,424.50	33,370.20	32,610.40
<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	171.69	174.83	174.95	174.48	173.31	175.77
<b>Resistencia (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	103.96	87.93	132.58	128.52	192.54	185.53
<b>Resistencia Promedio</b>	<b>95.95</b>		<b>130.55</b>		<b>189.03</b>	
<b>Porcentaje obtenido</b>	45.69%		62.17%		90.02%	
<b>Tipo de falla promedio</b>						

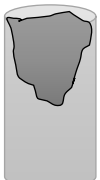
**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Tabla A1-8:** Resultados de ensayos de compresión a cilindros con 15% de sustitución de TV.

<b>CONTROL DE ENSAYOS A COMPRESIÓN DE CILINDROS CON EL 15% DE SUSTITUCIÓN DE TV.</b>						
<b>Resistencia esperada a los 28 días = 210 kg/cm<sup>2</sup>.</b>						
<b>Identificación</b>	<b>C1, 15% TV</b>	<b>C2, 15% TV</b>	<b>C3, 15% TV</b>	<b>C4, 15% TV</b>	<b>C5, 15% TV</b>	<b>C6, 15% TV</b>
<b>Fecha de elaboración</b>	25/07/2019	25/07/2019	25/07/2019	25/07/2019	25/07/2019	25/07/2019
<b>Fecha de ensayo</b>	01/08/2019	01/08/2019	08/08/2019	08/08/2019	22/08/2019	22/08/2019
<b>Edad (días)</b>	7	7	14	14	28	28
<b>Diámetro superior (cm)</b>	14.91	14.81	14.97	14.87	14.93	14.89
<b>Diámetro inferior (cm)</b>	14.86	15.00	14.93	14.89	14.96	14.86
<b>Diámetro promedio (cm)</b>	14.89	14.91	14.95	14.88	14.95	14.88
<b>Altura 1 (cm)</b>	30.40	30.10	30.30	30.30	30.30	30.10
<b>Altura 2 (cm)</b>	30.10	30.30	30.40	30.10	30.00	30.30
<b>Altura promedio (cm)</b>	30.25	30.20	30.35	30.20	30.15	30.20
<b>Masa del espécimen (kg)</b>	12.20	12.16	12.22	12.10	9.84	9.84
<b>Carga aplicada (kg)</b>	18,132.30	18,999.70	18,108.60	20,981.00	28,990.00	27,873.10
<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	174.02	174.48	175.54	173.90	175.42	173.78
<b>Resistencia (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	104.20	108.89	103.16	120.65	165.26	160.39
<b>Resistencia Promedio</b>	<b>106.55</b>		<b>111.91</b>		<b>162.83</b>	
<b>Porcentaje obtenido</b>	50.74%		53.29%		77.54%	
<b>Tipo de falla promedio</b>						

**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Tabla A1-9:** Resultados de ensayos de compresión a cilindros con 20% de sustitución de TV.

<b>CONTROL DE ENSAYOS A COMPRESIÓN DE CILINDROS CON EL 20% DE SUSTITUCIÓN DE TV.</b>						
<b>Resistencia esperada a los 28 días = 210 kg/cm<sup>2</sup>.</b>						
<b>Identificación</b>	<b>C1, 20% TV</b>	<b>C2, 20% TV</b>	<b>C3, 20% TV</b>	<b>C4, 20% TV</b>	<b>C5, 20% TV</b>	<b>C6, 20% TV</b>
<b>Fecha de elaboración</b>	25/07/2019	25/07/2019	25/07/2019	25/07/2019	25/07/2019	25/07/2019
<b>Fecha de ensayo</b>	01/08/2019	01/08/2019	08/08/2019	08/08/2019	22/08/2019	22/08/2019
<b>Edad (días)</b>	7	7	14	14	28	28
<b>Diámetro superior (cm)</b>	14.92	14.87	14.97	14.98	14.84	15.00
<b>Diámetro inferior (cm)</b>	14.91	14.92	14.98	15.00	14.96	15.00
<b>Diámetro promedio (cm)</b>	14.92	14.90	14.98	14.99	14.90	15.00
<b>Altura 1 (cm)</b>	30.50	30.30	30.40	30.00	30.50	30.80
<b>Altura 2 (cm)</b>	30.40	29.80	30.50	30.20	30.30	30.60
<b>Altura promedio (cm)</b>	30.45	30.05	30.45	30.10	30.40	30.70
<b>Masa del espécimen (kg)</b>	12.64	12.14	12.20	12.32	10.08	11.20
<b>Carga aplicada (kg)</b>	13,312.00	12,245.10	18,061.40	18,004.30	27,919.10	26,001.80
<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	174.72	174.25	176.13	176.48	174.37	176.71
<b>Resistencia (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	76.19	70.27	102.55	102.02	160.12	147.14
<b>Resistencia Promedio</b>	<b>73.23</b>		<b>102.28</b>		<b>153.63</b>	
<b>Porcentaje obtenido</b>	34.87%		48.71%		73.16%	
<b>Tipo de falla promedio</b>						

**Fuente:** *Elaboración propia.*



## ANEXO 2: RESULTADOS DE LABORATORIO PARA ENSAYOS DE POTENCIAL DE CORROSIÓN (CAPITULO 3).

**Tabla A2-1:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas sin puzolana y con puzolana que no fueron sometidas a corrosión.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO SIN SUSTITUCIÓN DE PUZOLANA.</b>							
<b>MEDICIÓN POTENCIAL.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V3	A	38	23	33	31.33	38.83	37.54
	B	33	39	42	38.00		
	C	49	37	51	45.67		
	D	31	41	49	40.33		
V4	A	23	55	32	36.67	36.25	
	B	29	47	27	34.33		
	C	31	37	45	37.67		
	D	43	28	38	36.33		
<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 5% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN POTENCIAL.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V3	A	39	34	47	40.00	42.75	39.54
	B	41	39	49	43.00		
	C	39	44	52	45.00		
	D	49	31	49	43.00		
V4	A	29	31	42	34.00	36.33	
	B	34	37	33	34.67		
	C	41	22	39	34.00		
	D	37	45	46	42.67		

Fuente: *Elaboración propia.*

**Cont. Tabla A2-1:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas sin puzolana y con puzolana que no fueron sometidas a corrosión.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 10% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN POTENCIAL.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V3	A	35	59	39	44.33	51.92	48.54
	B	53	57	57	55.67		
	C	49	49	61	53.00		
	D	55	65	44	54.67		
V4	A	33	42	37	37.33	45.17	
	B	45	59	48	50.67		
	C	51	47	41	46.33		
	D	49	51	39	46.33		
<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 15% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN POTENCIAL.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V3	A	41	59	38	46.00	47.25	43.92
	B	37	51	53	47.00		
	C	59	39	46	48.00		
	D	47	47	50	48.00		
V4	A	33	43	39	38.33	40.58	
	B	29	29	51	36.33		
	C	38	37	45	40.00		
	D	41	49	53	47.67		

Fuente: *Elaboración propia.*

**Cont. Tabla A2-1:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas sin puzolana y con puzolana que no fueron sometidas a corrosión.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 20% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN POTENCIAL.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V3	A	49	49	49	49.00	43.92	42.54
	B	37	38	53	42.67		
	C	51	47	41	46.33		
	D	39	39	35	37.67		
V4	A	49	29	38	38.67	41.17	
	B	38	46	46	43.33		
	C	45	33	51	43.00		
	D	39	41	39	39.67		
<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 5% TV.</b>							
<b>MEDICIÓN POTENCIAL.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V3	A	47	51	39	45.67	46.25	46.75
	B	35	47	42	41.33		
	C	44	59	35	46.00		
	D	49	53	54	52.00		
V4	A	35	39	49	41.00	47.25	
	B	42	56	51	49.67		
	C	37	49	60	48.67		
	D	51	43	55	49.67		

Fuente: *Elaboración propia.*

**Cont. Tabla A2-1:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas sin puzolana y con puzolana que no fueron sometidas a corrosión.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 10% TV.</b>							
<b>MEDICIÓN POTENCIAL.</b>							
<b>DESCRIPCIÓN DE VIGUETA</b>	<b>LADO</b>	<b>DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)</b>			<b>PROMEDIO POR LADO</b>	<b>PROMEDIO POR VIGUETA</b>	<b>PROMEDIO</b>
		<b>15</b>	<b>30</b>	<b>45</b>			
		<b>LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)</b>					
V3	A	29	36	33	32.67	30.0	31.71
	B	31	40	30	33.67		
	C	37	41	19	32.33		
	D	20	19	25	21.33		
V4	A	35	21	21	25.67	33.42	
	B	39	32	28	33.00		
	C	41	48	31	40.00		
	D	47	29	29	35.00		
<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 15% TV.</b>							
<b>MEDICIÓN POTENCIAL.</b>							
<b>DESCRIPCIÓN DE VIGUETA</b>	<b>LADO</b>	<b>DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)</b>			<b>PROMEDIO POR LADO</b>	<b>PROMEDIO POR VIGUETA</b>	<b>PROMEDIO</b>
		<b>15</b>	<b>30</b>	<b>45</b>			
		<b>LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)</b>					
V3	A	19	18	24	20.33	20.58	24.63
	B	21	15	19	18.33		
	C	27	9	25	20.33		
	D	30	21	19	23.33		
V4	A	19	33	27	26.33	28.67	
	B	12	29	29	23.33		
	C	21	36	35	30.67		
	D	24	39	40	34.33		

**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Cont. Tabla A2-1:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas sin puzolana y con puzolana que no fueron sometidas a corrosión.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 20% TV.</b>							
<b>MEDICIÓN POTENCIAL.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V3	A	31	33	33	32.33	31.75	31.33
	B	37	19	39	31.67		
	C	40	27	32	33.00		
	D	25	38	27	30.00		
V4	A	27	31	36	31.33	30.92	
	B	19	35	29	27.67		
	C	33	27	40	33.33		
	D	21	42	31	31.33		

**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Tabla A2-2:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas sometidas a corrosión sin sustitución de puzolana.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO SIN SUSTITUCIÓN DE PUZOLANA.</b>							
<b>MEDICIÓN INICIAL.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	26	20	21	22.33	33.17	21.75
	B	25	32	22	26.33		
	C	44	46	62	50.67		
	D	16	36	48	33.33		
V2	A	10	5	2	5.67	10.33	
	B	18	5	15	12.67		
	C	8	12	15	11.67		
	D	3	8	23	11.33		
<b>MEDICIÓN PRIMER CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	410	433	400	414.33	411.25	448.92
	B	404	492	412	436.00		
	C	387	409	406	400.67		
	D	409	399	374	394.00		
V2	A	535	493	493	507.00	486.58	
	B	508	450	472	476.67		
	C	508	512	451	490.33		
	D	515	442	460	472.33		

**Fuente:** Elaboración propia.

**Cont. Tabla A2-2:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas sometidas a corrosión sin sustitución de puzolana.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO SIN SUSTITUCIÓN DE PUZOLANA.</b>							
<b>MEDICIÓN SEGUNDO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	472	466	458	465.33	454.33	474.75
	B	458	500	462	473.33		
	C	432	448	456	445.33		
	D	443	429	428	433.33		
V2	A	474	490	493	485.67	495.17	
	B	477	466	516	486.33		
	C	462	502	500	488.00		
	D	447	654	461	520.67		
<b>MEDICIÓN TERCER CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	394	398	388	393.33	374.00	410.46
	B	394	427	384	401.67		
	C	372	376	355	367.67		
	D	346	334	320	333.33		
V2	A	430	437	439	435.33	446.92	
	B	448	429	465	447.33		
	C	444	511	478	477.67		
	D	428	427	427	427.33		

**Fuente:** Elaboración propia.

**Cont. Tabla A2-2:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas sometidas a corrosión sin sustitución de puzolana.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO SIN SUSTITUCIÓN DE PUZOLANA.</b>							
<b>MEDICIÓN CUARTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	365	364	352	360.33	426.00	438.54
	B	453	489	447	463.00		
	C	447	442	446	445.00		
	D	449	436	422	435.67		
V2	A	425	446	453	441.33	451.08	
	B	457	449	468	458.00		
	C	450	504	470	474.67		
	D	419	436	436	430.33		
<b>MEDICIÓN QUINTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	430	418	431	426.33	452.00	415.88
	B	452	505	487	481.33		
	C	441	461	476	459.33		
	D	446	437	440	441.00		
V2	A	375	358	381	371.33	379.75	
	B	395	356	390	380.33		
	C	388	414	378	393.33		
	D	371	378	373	374.00		

**Fuente:** *Elaboración propia.*



**Cont. Tabla A2-2:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas sometidas a corrosión sin sustitución de puzolana.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO SIN SUSTITUCIÓN DE PUZOLANA.</b>								
<b>MEDICIÓN SEXTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>								
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO	
		15	30	45				
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)						
V1	A	418	400	382	400.00	414.83	395.33	
	B	430	415	404	416.33			
	C	430	427	418	425.00			
	D	440	423	391	418.00			
V2	A	378	381	388	382.33	375.83		395.33
	B	399	388	390	392.33			
	C	378	399	360	379.00			
	D	349	350	350	349.67			
<b>MEDICIÓN SÉPTIMO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>								
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO	
		15	30	45				
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)						
V1	A	556	558	548	554.00	557.75	549.96	
	B	567	557	560	561.33			
	C	554	560	535	549.67			
	D	567	543	588	566.00			
V2	A	536	555	548	546.33	542.17		549.96
	B	567	556	554	559.00			
	C	563	531	535	543.00			
	D	508	525	528	520.33			

**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Tabla A2-3:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 5% CBC.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 5% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN INICIAL.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	33	23	51	35.67	36.92	27.79
	B	30	20	39	29.67		
	C	45	40	73	52.67		
	D	38	20	31	29.67		
V2	A	7	6	19	10.67	18.67	
	B	14	30	24	22.67		
	C	22	19	38	26.33		
	D	14	15	16	15.00		
<b>MEDICIÓN PRIMER CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	464	447	435	448.67	430.58	431.04
	B	450	419	418	429.00		
	C	431	420	420	423.67		
	D	440	412	411	421.00		
V2	A	415	425	420	420.00	431.50	
	B	427	417	418	420.67		
	C	489	445	408	447.33		
	D	457	446	411	438.00		

Fuente: *Elaboración propia.*

Cont. Tabla A2-3: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 5% CBC.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 5% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN SEGUNDO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	493	468	451	470.67	469.42	464.88
	B	499	468	476	481.00		
	C	480	446	471	465.67		
	D	479	448	454	460.33		
V2	A	442	461	453	452.00	460.33	
	B	487	477	457	473.67		
	C	458	464	478	466.67		
	D	447	450	450	449.00		
<b>MEDICIÓN TERCER CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	456	438	430	441.33	446.50	450.79
	B	464	439	449	450.67		
	C	450	445	463	452.67		
	D	450	430	444	441.33		
V2	A	437	456	439	444.00	455.08	
	B	490	475	450	471.67		
	C	456	458	477	463.67		
	D	433	440	450	441.00		

Fuente: *Elaboración propia.*

Cont. Tabla A2-3: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 5% CBC.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 5% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN CUARTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	460	444	446	450.00	446.58	450.67
	B	481	451	466	466.00		
	C	436	423	459	439.33		
	D	439	419	435	431.00		
V2	A	441	461	443	448.33	454.75	
	B	479	486	462	475.67		
	C	438	470	468	458.67		
	D	421	443	445	436.33		
<b>MEDICIÓN QUINTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	518	483	475	492.00	492.33	484.04
	B	520	474	482	492.00		
	C	510	477	504	497.00		
	D	513	471	481	488.33		
V2	A	476	473	459	469.33	475.75	
	B	498	491	470	486.33		
	C	470	475	494	479.67		
	D	473	465	465	467.67		

Fuente: Elaboración propia.

Cont. Tabla A2-3: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 5% CBC.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 5% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN SEXTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	535	502	495	510.67	500.58	479.29
	B	526	494	495	505.00		
	C	501	488	514	501.00		
	D	500	473	484	485.67		
V2	A	452	465	447	454.67	458.00	
	B	487	488	468	481.00		
	C	444	465	471	460.00		
	D	447	452	410	436.33		
<b>MEDICIÓN SÉPTIMO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	477	481	462	473.33	448.83	445.38
	B	456	478	472	468.67		
	C	423	440	415	426.00		
	D	410	424	448	427.33		
V2	A	469	461	459	463.00	441.92	
	B	461	466	452	459.67		
	C	418	431	400	416.33		
	D	414	434	438	428.67		

Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A2-4:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 10% CBC.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 10% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN INICIAL.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	55	65	92	70.67	82.83	51.54
	B	61	71	89	73.67		
	C	86	102	117	101.67		
	D	53	87	116	85.33		
V2	A	5	31	41	25.67	20.25	
	B	5	20	11	12.00		
	C	19	22	59	33.33		
	D	10	3	17	10.00		
<b>MEDICIÓN PRIMER CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	452	441	470	454.33	430.08	425.92
	B	436	410	443	429.67		
	C	420	396	426	414.00		
	D	428	403	436	422.33		
V2	A	445	457	468	456.67	421.75	
	B	398	413	402	404.33		
	C	396	412	389	399.00		
	D	413	436	432	427.00		

**Fuente:** *Elaboración propia.*

Cont. Tabla A2-4: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 10% CBC.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 10% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN SEGUNDO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	480	460	477	472.33	439.83	439.00
	B	447	402	448	432.33		
	C	433	411	427	423.67		
	D	436	423	434	431.00		
V2	A	488	478	462	476.00	438.17	
	B	430	431	404	421.67		
	C	418	435	402	418.33		
	D	431	446	433	436.67		
<b>MEDICIÓN TERCER CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	517	505	502	508.00	482.92	488.21
	B	517	458	483	486.00		
	C	473	428	470	457.00		
	D	491	472	479	480.67		
V2	A	509	536	491	512.00	493.50	
	B	492	481	459	477.33		
	C	486	496	472	484.67		
	D	488	510	502	500.00		

Fuente: Elaboración propia.

Cont. Tabla A2-4: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 10% CBC.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 10% CBC.</b>								
<b>MEDICIÓN CUARTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>								
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO	
		15	30	45				
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)						
V1	A	450	467	462	459.67	451.33	455.29	
	B	490	423	461	458.00			
	C	445	417	444	435.33			
	D	468	454	435	452.33			
V2	A	478	473	445	465.33	459.25		455.29
	B	457	455	429	447.00			
	C	458	474	438	456.67			
	D	460	481	463	468.00			
<b>MEDICIÓN QUINTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>								
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO	
		15	30	45				
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)						
V1	A	487	468	459	471.33	463.67	447.46	
	B	496	446	470	470.67			
	C	467	440	450	452.33			
	D	473	457	451	460.33			
V2	A	397	401	366	388.00	431.25		447.46
	B	380	382	361	374.33			
	C	481	497	459	479.00			
	D	478	497	476	483.67			

Fuente: Elaboración propia.



Cont. Tabla A2-4: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 10% CBC.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 10% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN SEXTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	503	470	477	483.33	473.58	478.00
	B	502	463	469	478.00		
	C	474	448	458	460.00		
	D	484	465	470	473.00		
V2	A	496	496	454	482.00	482.42	
	B	505	480	455	480.00		
	C	490	497	464	483.67		
	D	499	491	462	484.00		
<b>MEDICIÓN SÉPTIMO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	487	466	455	469.33	467.50	471.04
	B	495	466	464	475.00		
	C	476	458	451	461.67		
	D	477	459	456	464.00		
V2	A	496	469	439	468.00	474.58	
	B	489	469	436	464.67		
	C	488	499	460	482.33		
	D	501	491	458	483.33		

Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A2-5:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 15% CBC.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 15% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN INICIAL.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	35	64	20	39.67	50.17	70.50
	B	24	21	95	46.67		
	C	45	92	21	52.67		
	D	85	47	53	61.67		
V2	A	52	65	104	73.67	90.83	
	B	65	86	126	92.33		
	C	84	113	128	108.33		
	D	63	81	123	89.00		
<b>MEDICIÓN PRIMER CICLO DE INMERSIÓN -SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	470	400	422	430.67	408.58	386.13
	B	386	360	417	387.67		
	C	418	450	391	419.67		
	D	420	383	386	396.33		
V2	A	400	400	383	394.33	363.67	
	B	351	351	351	351.00		
	C	353	346	250	316.33		
	D	384	385	410	393.00		

**Fuente:** *Elaboración propia.*

Cont. Tabla A2-5: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 15% CBC.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 15% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN SEGUNDO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	454	468	465	462.33	436.25	421.67
	B	447	494	455	465.33		
	C	406	479	418	434.33		
	D	359	397	393	383.00		
V2	A	445	423	397	421.67	407.08	
	B	402	374	372	382.67		
	C	396	390	379	388.33		
	D	429	432	446	435.67		
<b>MEDICIÓN TERCER CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	544	488	505	512.33	490.50	461.33
	B	523	464	483	490.00		
	C	423	490	483	465.33		
	D	536	464	483	494.33		
V2	A	462	422	417	433.67	432.17	
	B	419	392	400	403.67		
	C	424	418	420	420.67		
	D	465	475	472	470.67		

Fuente: Elaboración propia.

Cont. Tabla A2-5: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 15% CBC.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 15% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN CUARTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	413	354	359	375.33	444.67	432.21
	B	512	450	471	477.67		
	C	496	409	425	443.33		
	D	535	449	463	482.33		
V2	A	450	418	402	423.33	419.75	
	B	405	388	393	395.33		
	C	401	399	401	400.33		
	D	462	468	450	460.00		
<b>MEDICIÓN QUINTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	528	491	490	503.00	472.58	452.83
	B	503	451	470	474.67		
	C	476	405	433	438.00		
	D	510	444	470	474.67		
V2	A	455	432	435	440.67	433.08	
	B	414	399	413	408.67		
	C	396	425	417	412.67		
	D	471	485	455	470.33		

Fuente: Elaboración propia.

Cont. Tabla A2-5: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 15% CBC.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 15% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN SEXTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	562	503	519	528.00	478.08	426.46
	B	549	500	506	518.33		
	C	549	492	497	512.67		
	D	59	497	504	353.33		
V2	A	400	378	379	385.67	374.83	
	B	392	351	361	368.00		
	C	368	331	353	350.67		
	D	388	401	396	395.00		
<b>MEDICIÓN SÉPTIMO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	597	558	564	573.00	518.50	471.96
	B	572	528	532	544.00		
	C	513	426	459	466.00		
	D	512	478	483	491.00		
V2	A	453	427	418	432.67	425.42	
	B	416	396	411	407.67		
	C	402	414	426	414.00		
	D	453	455	434	447.33		

Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A2-6:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 20% CBC.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 20% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN INICIAL.</b>							
<b>DESCRIPCIÓN DE VIGUETA</b>	<b>LADO</b>	<b>DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)</b>			<b>PROMEDIO POR LADO</b>	<b>PROMEDIO POR VIGUETA</b>	<b>PROMEDIO</b>
		<b>15</b>	<b>30</b>	<b>45</b>			
		<b>LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)</b>					
V1	A	44	53	61	52.67	62.75	71.21
	B	31	44	62	45.67		
	C	55	68	116	79.67		
	D	55	72	92	73.00		
V2	A	30	79	140	83.00	79.67	
	B	10	86	128	74.67		
	C	37	77	144	86.00		
	D	35	74	116	75.00		
<b>MEDICIÓN PRIMER CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
<b>DESCRIPCIÓN DE VIGUETA</b>	<b>LADO</b>	<b>DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)</b>			<b>PROMEDIO POR LADO</b>	<b>PROMEDIO POR VIGUETA</b>	<b>PROMEDIO</b>
		<b>15</b>	<b>30</b>	<b>45</b>			
		<b>LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)</b>					
V1	A	334	300	281	305.00	294.08	340.63
	B	313	270	263	282.00		
	C	300	265	290	285.00		
	D	323	300	290	304.33		
V2	A	420	428	438	428.67	387.17	
	B	394	360	375	376.33		
	C	380	360	370	370.00		
	D	383	378	360	373.67		

**Fuente:** *Elaboración propia.*

Cont. Tabla A2-6: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 20% CBC.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 20% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN SEGUNDO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO..</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	540	497	465	500.67	472.00	458.25
	B	501		423	446.33		
	C	492	430	465	462.33		
	D	503	469	464	478.67		
V2	A	480	467	438	461.67	444.50	
	B	462	444	449	451.67		
	C	446	420	438	434.67		
	D	450	437	403	430.00		
<b>MEDICIÓN TERCER CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	540	507	500	515.67	507.08	480.88
	B	525	469	479	491.00		
	C	516	476	513	501.67		
	D	537	508	515	520.00		
V2	A	485	502	464	483.67	454.67	
	B	482	475	389	448.67		
	C	449	430	446	441.67		
	D	463	453	418	444.67		

Fuente: *Elaboración propia.*

Cont. Tabla A2-6: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 20% CBC.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 20% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN CUARTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	517	478	457	484.00	479.58	409.17
	B	503	431	445	459.67		
	C	499	452	456	469.00		
	D	524	496	497	505.67		
V2	A	347	343	312	334.00	338.75	
	B	317	307	303	309.00		
	C	286	263	266	271.67		
	D	462	442	417	440.33		
<b>MEDICIÓN QUINTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	520	492	465	492.33	482.08	484.58
	B	506	466	468	480.00		
	C	494	439	450	461.00		
	D	506	485	494	495.00		
V2	A	491	508	584	527.67	487.08	
	B	489	505	533	509.00		
	C	454	449	465	456.00		
	D	472	456	439	455.67		

Fuente: *Elaboración propia.*



Cont. Tabla A2-6: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 20% CBC.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 20% CBC.</b>							
<b>MEDICIÓN SEXTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	523	515	503	513.67	512.17	525.83
	B	507	484	494	495.00		
	C	511	494	509	504.67		
	D	542	532	532	535.33		
V2	A	569	550	547	555.33	539.50	
	B	554	549	563	555.33		
	C	531	510	522	521.00		
	D	545	516	518	526.33		
<b>MEDICIÓN SÉPTIMO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	503	479	462	481.33	468.75	465.83
	B	503	465	438	468.67		
	C	478	451	411	446.67		
	D	492	473	470	478.33		
V2	A	499	483	458	480.00	462.92	
	B	476	472	479	475.67		
	C	459	444	442	448.33		
	D	474	448	421	447.67		

Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A2-7:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 5% TV.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 5% TV.</b>								
<b>MEDICIÓN INICIAL.</b>								
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO	
		15	30	45				
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)						
V1	A	10	25	22	19.00	13.92	46.58	
	B	7	5	7	6.33			
	C	15	15	25	18.33			
	D	15	13	8	12.00			
V2	A	50	55	100	68.33	79.25		
	B	48	62	93	67.67			
	C	81	86	129	98.67			
	D	63	73	111	82.33			
<b>MEDICIÓN PRIMER CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>								
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA		PROMEDIO
		15	30	45				
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)						
V1	A	475	481	456	470.67	447.17	446.29	
	B	443	431	433	435.67			
	C	442	430	457	443.00			
	D	444	433	441	439.33			
V2	A	472	461	468	467.00	445.42		
	B	444	457	452	451.00			
	C	425	433	439	432.33			
	D	417	429	448	431.33			

**Fuente:** *Elaboración propia.*

Cont. Tabla A2-7: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 5% TV.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 5% TV.</b>							
<b>MEDICIÓN SEGUNDO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	498	493	478	489.67	480.58	475.79
	B	487	469	461	472.33		
	C	490	459	487	478.67		
	D	493	477	475	481.67		
V2	A	482	490	499	490.33	471.00	
	B	477	477	475	476.33		
	C	443	464	452	453.00		
	D	455	469	469	464.33		
<b>MEDICIÓN TERCER CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	501	486	493	493.33	482.33	471.50
	B	494	481	477	484.00		
	C	469	474	465	469.33		
	D	479	482	487	482.67		
V2	A	463	469	425	452.33	460.67	
	B	473	447	433	451.00		
	C	476	454	468	466.00		
	D	479	475	466	473.33		

Fuente: Elaboración propia.

Cont. Tabla A2-7: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 5% TV.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 5% TV.</b>							
<b>MEDICIÓN CUARTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	436	434	402	424.00	430.92	439.21
	B	444	425	412	427.00		
	C	430	411	451	430.67		
	D	447	430	449	442.00		
V2	A	464	443	460	455.67	447.50	
	B	460	447	448	451.67		
	C	450	441	444	445.00		
	D	425	440	448	437.67		
<b>MEDICIÓN QUINTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	488	483	459	476.67	479.75	478.17
	B	496	473	465	478.00		
	C	496	465	498	486.33		
	D	489	470	475	478.00		
V2	A	504	477	478	486.33	476.58	
	B	499	473	472	481.33		
	C	476	463	464	467.67		
	D	476	463	474	471.00		

Fuente: Elaboración propia.

Cont. Tabla A2-7: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 5% TV.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 5% TV.</b>							
<b>MEDICIÓN SEXTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	400	387	359	382.00	351.17	395.17
	B	358	355	337	350.00		
	C	335	328	331	331.33		
	D	352	342	330	341.33		
V2	A	479	442	450	457.00	439.17	
	B	448	440	418	435.33		
	C	423	435	409	422.33		
	D	440	444	442	442.00		
<b>MEDICIÓN SÉPTIMO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	456	453	448	452.33	443.00	442.46
	B	451	426	457	444.67		
	C	448	451	412	437.00		
	D	403	444	467	438.00		
V2	A	469	461	459	463.00	441.92	
	B	461	466	452	459.67		
	C	418	431	400	416.33		
	D	414	434	438	428.67		

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla A2-8:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 10% T.V.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 10% TV</b>							
<b>MEDICIÓN INICIAL</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	36	40	97	57.67	82.67	87.75
	B	47	149	106	100.67		
	C	90	82	118	96.67		
	D	42	79	106	75.67		
V2	A	23	65	139	75.67	92.83	
	B	38	90	153	93.67		
	C	74	101	180	118.33		
	D	44	67	140	83.67		
<b>MEDICIÓN PRIMER CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	410	358	407	391.67	398.33	412.38
	B	420	464	450	444.67		
	C	370	360	406	378.67		
	D	400	350	385	378.33		
V2	A	454	432	430	438.67	426.42	
	B	440	425	420	428.33		
	C	425	410	400	411.67		
	D	433	433	415	427.00		

Fuente: *Elaboración propia.*

**Cont. Tabla A2-8:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 10% TV.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 10% TV.</b>							
<b>MEDICIÓN SEGUNDO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	461	411	451	441.00	431.83	428.63
	B	460	445	456	453.67		
	C	443	396	424	421.00		
	D	453	381	401	411.67		
V2	A	464	435	390	429.67	425.42	
	B	462	422	397	427.00		
	C	442	419	416	425.67		
	D	424	430	404	419.33		
<b>MEDICIÓN TERCER CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	435	405	448	429.33	441.83	440.25
	B	468	449	452	456.33		
	C	440	420	460	440.00		
	D	467	415	443	441.67		
V2	A	386	357	330	357.67	438.67	
	B	509	480	466	485.00		
	C	465	450	440	451.67		
	D	457	474	450	460.33		

**Fuente:** *Elaboración propia.*

Cont. Tabla A2-8: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 10% TV.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 10% TV.</b>							
<b>MEDICIÓN CUARTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	458	415	448	440.33	441.42	443.67
	B	475	465	481	473.67		
	C	435	403	464	434.00		
	D	445	386	422	417.67		
V2	A	493	493	436	474.00	445.92	
	B	485	436	426	449.00		
	C	438	422	421	427.00		
	D	429	452	420	433.67		
<b>MEDICIÓN QUINTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	456	420	464	446.67	458.42	462.25
	B	479	492	530	500.33		
	C	451	416	506	457.67		
	D	451	391	445	429.00		
V2	A	501	451	439	463.67	466.08	
	B	496	454	448	466.00		
	C	473	458	465	465.33		
	D	470	483	455	469.33		

Fuente: Elaboración propia.



Cont. Tabla A2-8: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 10% TV.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 10% TV.</b>							
<b>MEDICIÓN SEXTO CICLO DE INMERSIÓN -SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	470	432	463	455.00	433.92	449.71
	B	480	428	474	460.67		
	C	396	371	411	392.67		
	D	451	400	431	427.33		
V2	A	515	450	420	461.67	465.50	
	B	510	471	452	477.67		
	C	479	452	454	461.67		
	D	471	468	444	461.00		
<b>MEDICIÓN SÉPTIMO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	519	489	494	500.67	497.75	477.50
	B	530	457	517	501.33		
	C	497	484	517	499.33		
	D	514	475	480	489.67		
V2	A	501	458	422	460.33	457.25	
	B	503	464	430	465.67		
	C	462	450	440	450.67		
	D	464	467	426	452.33		

Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A2-9:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 15% TV.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 15% TV.</b>							
<b>MEDICIÓN INICIAL.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	1	1	3	1.67	12.92	22.04
	B	1	1	2	1.33		
	C	25	24	32	27.00		
	D	25	23	17	21.67		
V2	A	25	29	27	27.00	31.17	
	B	40	28	22	30.00		
	C	32	39	39	36.67		
	D	35	20	38	31.00		
<b>MEDICIÓN PRIMER CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	300	260	260	273.33	327.25	373.75
	B	304	306	368	326.00		
	C	346	348	360	351.33		
	D	352	333	390	358.33		
V2	A	456	440	417	437.67	420.25	
	B	448	424	401	424.33		
	C	413	401	410	408.00		
	D	411	410	412	411.00		

Fuente: *Elaboración propia.*

Cont. Tabla A2-9: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 15% TV.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 15% TV</b>							
<b>MEDICIÓN SEGUNDO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	478	434	450	454.00	440.50	434.08
	B	450	422	428	433.33		
	C	442	418	432	430.67		
	D	445	427	460	444.00		
V2	A	472	465	440	459.00	427.67	
	B	452	424	405	427.00		
	C	422	399	400	407.00		
	D	430	419	404	417.67		
<b>MEDICIÓN TERCER CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	497	442	458	465.67	454.83	463.83
	B	466	428	437	443.67		
	C	450	428	458	445.33		
	D	469	451	474	464.67		
V2	A	501	447	475	474.33	472.83	
	B	510	471	460	480.33		
	C	475	460	454	463.00		
	D	479	474	468	473.67		

Fuente: *Elaboración propia.*

Cont. Tabla A2-9: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 15% TV.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 15% TV.</b>							
<b>MEDICIÓN CUARTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	498	447	458	467.67	472.33	463.79
	B	498	457	462	472.33		
	C	482	458	479	473.00		
	D	490	466	473	476.33		
V2	A	520	505	488	504.33	455.25	
	B	525	48	462	345.00		
	C	490	485	483	486.00		
	D	493	480	484	485.67		
<b>MEDICIÓN QUINTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	446	395	402	414.33	405.92	442.88
	B	423	381	394	399.33		
	C	406	383	422	403.67		
	D	412	390	417	406.33		
V2	A	497	473	471	480.33	479.83	
	B	519	489	463	490.33		
	C	486	475	470	477.00		
	D	478	467	470	471.67		

Fuente: *Elaboración propia.*

Cont. Tabla A2-9: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 15% TV.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 15% TV.</b>							
<b>MEDICIÓN SEXTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	447	405	442	431.33	458.17	485.71
	B	488	451	460	466.33		
	C	471	449	477	465.67		
	D	475	469	464	469.33		
V2	A	539	506	502	515.67	513.25	
	B	544	523	488	518.33		
	C	515	505	518	512.67		
	D	511	500	508	506.33		
<b>MEDICIÓN SÉPTIMO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	505	465	458	476.00	475.00	475.13
	B	502	477	465	481.33		
	C	465	449	481	465.00		
	D	483	472	478	477.67		
V2	A	499	484	471	484.67	475.25	
	B	493	475	452	473.33		
	C	479	475	453	469.00		
	D	484	474	464	474.00		

Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A2-10:** Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 20% TV.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 20% TV.</b>							
<b>MEDICIÓN INICIA.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	10	29	58	32.33	58.00	63.79
	B	24	51	73	49.33		
	C	64	92	139	98.33		
	D	31	52	73	52.00		
V2	A	1	20	56	25.67	69.58	
	B	21	79	72	57.33		
	C	96	107	136	113.00		
	D	64	73	110	82.33		
<b>MEDICIÓN PRIMER CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	420	426	370	405.33	395.00	400.38
	B	400	399	397	398.67		
	C	380	371	400	383.67		
	D	396	392	389	392.33		
V2	A	414	406	400	406.67	405.75	
	B	414	445	437	432.00		
	C	380	373	400	384.33		
	D	400	400	400	400.00		

Fuente: *Elaboración propia.*

Cont. Tabla A2-10: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 20% TV.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 20% TV.</b>							
<b>MEDICIÓN SEGUNDO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	471	452	411	444.67	423.08	430.63
	B	441	419	426	428.67		
	C	387	382	424	397.67		
	D	416	433	415	421.33		
V2	A	472	438	432	447.33	438.17	
	B	478	471	471	473.33		
	C	415	394	444	417.67		
	D	430	393	420	414.33		
<b>MEDICIÓN TERCER CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	521	494	470	495.00	477.75	466.08
	B	494	468	472	478.00		
	C	450	446	487	461.00		
	D	473	485	473	477.00		
V2	A	499	467	465	477.00	454.42	
	B	496	469	474	479.67		
	C	432	416	470	439.33		
	D	470	432	363	421.67		

Fuente: *Elaboración propia.*

Cont. Tabla A2-10: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 20% TV.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 20% TV.</b>							
<b>MEDICIÓN CUARTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	509	487	445	480.33	468.50	464.54
	B	485	454	462	467.00		
	C	445	440	484	456.33		
	D	470	485	456	470.33		
V2	A	500	468	462	476.67	460.58	
	B	496	470	491	485.67		
	C	426	414	465	435.00		
	D	461	422	452	445.00		
<b>MEDICIÓN QUINTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	507	476	440	474.33	467.42	462.38
	B	480	462	463	468.33		
	C	443	431	489	454.33		
	D	468	484	466	472.67		
V2	A	481	464	456	467.00	457.33	
	B	485	458	489	477.33		
	C	423	416	473	437.33		
	D	460	427	456	447.67		

Fuente: *Elaboración propia.*



Cont. Tabla A2-10: Resultados ensayos de potencial de corrosión para viguetas con sustitución de 20% TV.

<b>VIGUETAS DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DE 20% TV.</b>							
<b>MEDICIÓN SEXTO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	533	508	500	513.67	504.58	498.92
	B	512	490	511	504.33		
	C	487	471	526	494.67		
	D	508	504	505	505.67		
V2	A	493	473	472	479.33	493.25	
	B	523	503	514	513.33		
	C	478	461	517	485.33		
	D	510	474	501	495.00		
<b>MEDICIÓN SÉPTIMO CICLO DE INMERSIÓN-SECADO.</b>							
DESCRIPCIÓN DE VIGUETA	LADO	DISTANCIA DE MEDICIÓN (cm)			PROMEDIO POR LADO	PROMEDIO POR VIGUETA	PROMEDIO
		15	30	45			
		LECTURAS DE POTENCIÓMETRO (-mV)					
V1	A	501	468	424	464.33	460.08	534.21
	B	491	460	448	466.33		
	C	439	432	467	446.00		
	D	471	475	445	463.67		
V2	A	643	626	602	623.67	608.33	
	B	640	615	611	622.00		
	C	579	568	624	590.33		
	D	604	587	601	597.33		

Fuente: *Elaboración propia.*

## ANEXO 3: RESULTADOS DE LABORATORIO PARA ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA ADHERENCIA (CAPITULO 3).

**Tabla A3-1:** Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas sin sustitución de puzolana (A1, A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión).

PRISMAS DE CONCRETO SIN SUSTITUCIÓN DE PUZOLANA..						
RESISTENCIA = 231.55 KG/CM2						
DESCRIPCIÓN DE PRISMA	FUERZA APLICADA (KG)	DESLIZAMIENTO (CM)	DIÁMETRO NOMINAL DE LA VARILLA (CM)	LONGITUD ADHERIDA (CM)	ESFUERZO DE ADHERENCIA (KG/CM2)	PROMEDIO
A1	1,600	0.5	0.95	5.00	107.22	107.15
A2	1,598.0	0.7	0.95	5.00	107.09	
A3	1,865.0	0.5	0.95	5.00	124.98	121.66
A4	1,766.0	0.6	0.95	5.00	118.34	

Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A3-2:** Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas con 5% de sustitución de CBC (A1, A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión).

PRISMAS DE CONCRETO CON 5% CBC.						
RESISTENCIA = 162.46 KG/CM2.						
DESCRIPCIÓN DE PRISMA	FUERZA APLICADA (KG)	DESLIZAMIENTO (CM)	DIÁMETRO NOMINAL DE LA VARILLA (CM)	LONGITUD ADHERIDA (CM)	ESFUERZO DE ADHERENCIA (KG/CM2)	PROMEDIO
A1	1,121.0	0.4	0.95	5.00	75.12	89.63
A2	1,554.0	2.3	0.95	5.00	104.14	
A3	1,091.0	1.7	0.95	5.00	73.11	75.12
A4	1,151.0	0.4	0.95	5.00	77.13	

Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A3-3:** Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas con 10% de sustitución de CBC (A1, A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión).

PRISMAS DE CONCRETO CON 10% CBC.						
RESISTENCIA = 146.73 KG/CM2.						
DESCRIPCIÓN DE PRISMA	FUERZA APLICADA (KG)	DESLIZAMIENTO (MM)	DIÁMETRO NOMINAL DE LA VARILLA (CM)	LONGITUD ADHERIDA (CM)	ESFUERZO DE ADHERENCIA (KG/CM2)	PROMEDIO
A1	1,026.0	0.5	0.95	5.00	68.75	54.88
A2	612.0	0.5	0.95	5.00	41.01	
A3	938.0	0.5	0.95	5.00	62.86	46.24
A4	442.0	0.6	0.95	5.00	29.62	

Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A3-4:** Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas con 15% de sustitución de CBC (A1, A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión).

PRISMAS DE CONCRETO CON 15% CBC.						
RESISTENCIA = 128.29 KG/CM2.						
DESCRIPCIÓN DE PRISMA	FUERZA APLICADA (KG)	DESLIZAMIENTO (CM)	DIÁMETRO NOMINAL DE LA VARILLA (CM)	LONGITUD ADHERIDA (CM)	ESFUERZO DE ADHERENCIA (KG/CM2)	PROMEDIO
A1	627	0.4	0.95	5.00	42.02	61.05
A2	1,195	0.5	0.95	5.00	80.08	
A3	776.00	0.5	0.95	5.00	52.00	60.11
A4	1,018.0	0.7	0.95	5.00	68.22	

Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A3-5:** Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas con 20% de sustitución de CBC (A1, A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión).

<b>PRISMAS DE CONCRETO CON 20% CBC.</b>						
<b>RESISTENCIA = 116.05 KG/CM2.</b>						
DESCRIPCIÓN DE PRISMA	FUERZA APLICADA (KG)	DESLIZAMIENTO (CM)	DIÁMETRO NOMINAL DE LA VARILLA (CM)	LONGITUD ADHERIDA (CM)	ESFUERZO DE ADHERENCIA (KG/CM2)	PROMEDIO
A1	844.0	0.8	0.95	5.00	56.56	47.51
A2	574.0	0.6	0.95	5.00	38.47	
A3	828.0	0.7	0.95	5.00	55.49	51.63
A4	713.0	0.4	0.95	5.00	47.78	

Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A3-6:** Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas con 5% TV. (A1, A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión).

<b>PRISMAS DE CONCRETO CON 5% TV.</b>						
<b>RESISTENCIA = 209.81 KG/CM2.</b>						
DESCRIPCIÓN DE PRISMA	FUERZA APLICADA (KG)	DESLIZAMIENTO (CM)	DIÁMETRO NOMINAL DE LA VARILLA (CM)	LONGITUD ADHERIDA (CM)	ESFUERZO DE ADHERENCIA (KG/CM2)	PROMEDIO
A1	879	0.4	0.95	5.00	58.90	57.56
A2	839	0.6	0.95	5.00	56.22	
A3	1,024.00	0.5	0.95	5.00	68.62	72.91
A4	1,152.0	1.6	0.95	5.00	77.20	

Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A3-7:** Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas con 10% de sustitución de TV (A1, A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión).

<b>PRISMAS DE CONCRETO CON 10% TV.</b>						
<b>RESISTENCIA = 189.03 KG/CM2.</b>						
DESCRIPCIÓN DE PRISMA	FUERZA APLICADA (KG)	DESLIZAMIENTO (CM)	DIÁMETRO NOMINAL DE LA VARILLA (CM)	LONGITUD ADHERIDA (CM)	ESFUERZO DE ADHERENCIA (KG/CM2)	PROMEDIO
A1	785.00	0.7	0.95	5.00	52.60	68.12
A2	1,248.00	0.4	0.95	5.00	83.63	
A3	1,622.00	0.4	0.95	5.00	108.69	104.20
A4	1,488.00	0.7	0.95	5.00	99.71	

Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A3-8:** Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas con 15% de sustitución de TV (A1, A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión).

<b>PRISMAS DE CONCRETO CON 15% TV.</b>						
<b>RESISTENCIA = 162.83 KG/CM2.</b>						
DESCRIPCIÓN DE PRISMA	FUERZA APLICADA (KG)	DESLIZAMIENTO (CM)	DIÁMETRO NOMINAL DE LA VARILLA (CM)	LONGITUD ADHERIDA (CM)	ESFUERZO DE ADHERENCIA (KG/CM2)	PROMEDIO
A1	902.0	0.5	0.95	5.00	60.45	58.94
A2	857.0	0.6	0.95	5.00	57.43	
A3	1,034.0	5.0	0.95	5.00	69.29	66.98
A4	965.0	5.0	0.95	5.00	64.67	

Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A3-9:** Resultados ensayos de resistencia a la adherencia en prismas con 20% de sustitución de TV (A1, A2 con corrosión y A3, A4 sin corrosión).

<b>PRISMAS DE CONCRETO CON 20% TV.</b>						
<b>RESISTENCIA 153.63= KG/CM2.</b>						
<b>DESCRIPCIÓN DE PRISMA</b>	<b>FUERZA APLICADA (KG)</b>	<b>DESLIZAMIENTO (CM)</b>	<b>DIÁMETRO NOMINAL DE LA VARILLA (CM)</b>	<b>LONGITUD ADHERIDA (CM)</b>	<b>ESFUERZO DE ADHERENCIA (KG/CM2)</b>	<b>PROMEDIO</b>
A1	557.0	0.4	0.95	5.00	37.33	49.12
A2	909.0	0.6	0.95	5.00	60.91	
A3	812.0	0.7	0.95	5.00	54.41	69.76
A4	1,270.0	0.4	0.95	5.00	85.11	

Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A3-10:** Resultados ensayos de potencial de corrosión en prismas de concreto sin sustitución de puzolana y con sustitución de puzolana para ensayo de resistencia a la adherencia no sometidos a corrosión.

<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS SIN PUZOLANA.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A3	27	25	28	30	27.50	32.38
A4	32	44	40	33	37.25	
<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS CON 5% CBC.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A3	33	34	30	28	31.25	32.13
A4	38	20	35	39	33.00	
<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS CON 10% CBC.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A3	40	44	46	50	45.00	45.38
A4	51	43	45	44	45.75	
<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS CON 15% CBC.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A3	55	54	57	43	52.25	48.50
A4	47	49	39	44	44.75	
<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS CON 20% CBC.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A3	33	35	44	40	38.00	40.38
A4	40	55	30	46	42.75	

Fuente: *Elaboración propia.*

Resultados ensayos de potencial de corrosión en prismas de concreto sin sustitución de puzolana y con sustitución puzolana para ensayo de resistencia a la adherencia no sometidos a corrosión.

<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS CON 5% TV.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A3	33	35	34	38	35.00	<b>37.25</b>
A4	41	39	38	40	39.50	
<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS CON 10% TV.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A3	44	40	39	48	42.75	<b>43.00</b>
A4	47	39	36	51	43.25	
<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS CON 15% TV.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A3	44	50	56	49	49.75	<b>47.13</b>
A4	39	51	47	41	44.50	
<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS CON 20% TV.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A3	40	38	46	43	41.75	<b>40.50</b>
A4	43	40	35	39	39.25	

**Fuente:** *Elaboración propia.*

**Tabla A3-11:** Resultados ensayos de potencial de corrosión en prismas de concreto sin sustitución de puzolana y con sustitución de puzolana para ensayo de resistencia a la adherencia sometidos a corrosión.

<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS SIN PUZOLANA.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A1	547	530	553	544	543.50	<b>561.50</b>
A2	579	573	582	584	579.50	
<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS CON 5% CBC.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A1	473	460	457	454	461.00	<b>518.38</b>
A2	578	583	578	564	575.75	
<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS CON 10% CBC.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A1	620	617	615	611	615.75	<b>610.13</b>
A2	607	600	605	606	604.50	
<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS CON 15% CBC.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A1	584	582	580	579	581.25	<b>590.88</b>
A2	606	597	600	599	600.50	
<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS CON 20% CBC.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A1	603	603	605	611	605.50	<b>612.25</b>
A2	625	616	618	617	619.00	

**Fuente:** *Elaboración propia.*

Resultados ensayos de potencial de corrosión en prismas de concreto sin sustitución de puzolana y con sustitución de puzolana para ensayo de resistencia a la adherencia sometidos a corrosión.

<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS CON 5% TV.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A1	586	591	587	597	590.25	<b>572.63</b>
A2	552	559	553	556	555.00	
<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS CON 10% TV.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A1	595	599	601	591	596.50	<b>585.50</b>
A2	580	564	578	576	574.50	
<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS CON 15% TV.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A1	589	595	589	589	590.50	<b>627.38</b>
A2	671	659	665	662	664.25	
<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN PRISMAS CON 20% TV.</b>						
PRISMA	POTENCIAL DE CORROSIÓN (-mV)				PROMEDIO POR PRISMA	PROMEDIO
	L1	L2	L3	L4		
A1	603	603	605	611	605.50	<b>580.00</b>
A2	554	558	553	553	554.50	

**Fuente:** *Elaboración propia.*

## ANEXO 4: CÁLCULO DE ROTURA TEORICA PARA VIGUETAS DE CONCRETO

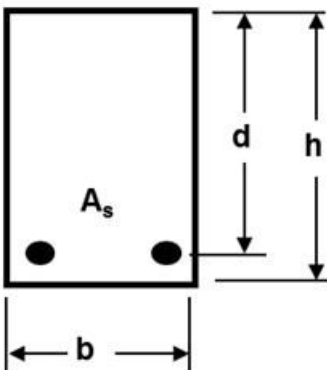
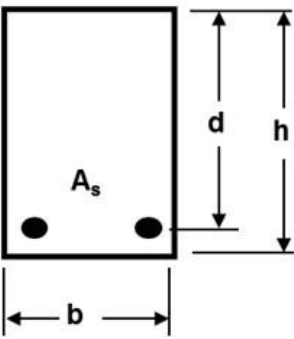
### (CAPÍTULO 3).

**Tabla A4-1:** Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto sin sustitución de puzolana.

V1 Concreto sin puzolana (SP).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
		<b>Unidades</b>
$f'_c =$	3,293.42	psi
$b =$	6.08	in.
$d =$	4.68	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.52	in.
$M_n =$	38.9	in.-k
	3.2	kip-ft
$\phi M_n =$	35.0	kip-ft
Pu	11,870.57	Kip
Pu	5,395.7	Kg

V2 Concreto sin puzolana (SP).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
		<b>Unidades</b>
$f'_c =$	3,293.34	psi
$b =$	5.98	in.
$d =$	4.89	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.53	in.
$M_n =$	40.7	in.-k
	3.4	kip-ft
$\phi M_n =$	36.6	kip-ft
Pu	12,422.74	Kip
Pu	5,646.7	Kg

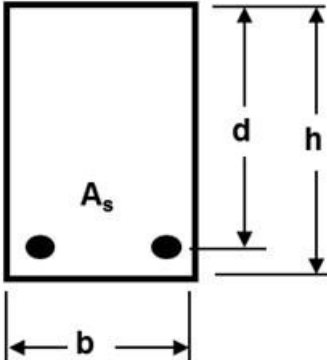



Fuente: *Elaboración propia.*

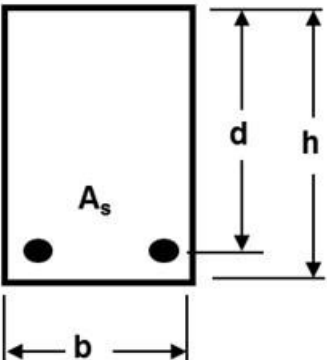


Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto sin sustitución de puzolana.

V3 Concreto sin puzolana (SP).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	3,293.34	psi
$b =$	6.04	in.
$d =$	4.87	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.52	in.
$M_n =$	40.6	in.-k
	3.4	kip-ft
$\phi M_n =$	36.5	kip-ft
$P_u$	12,376.06	Kip
$P_u$	5,625.5	Kg



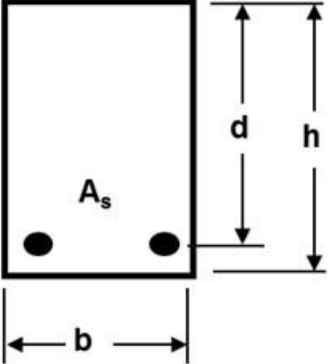
V4 Concreto sin puzolana (SP).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	3,293.34	psi
$b =$	6.04	in.
$d =$	4.85	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.52	in.
$M_n =$	40.4	in.-k
	3.4	kip-ft
$\phi M_n =$	36.4	kip-ft
$P_u$	12,322.36	Kip
$P_u$	5,601.1	Kg



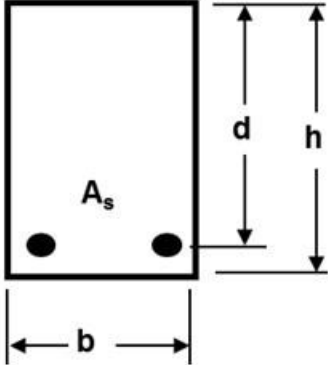
Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A4-2:** Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (5% CBC).

V1 Concreto con sustitución de puzolana (5% CBC).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
		<b>Unidades</b>
$f'_c =$	2,310.67	psi
$b =$	6.15	in.
$d =$	4.85	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.73	in.
$M_n =$	39.5	in.-k
	3.3	kip-ft
$\phi M_n =$	35.5	kip-ft
$P_u$	12,043.05	Kip
$P_u$	5,474.1	Kg



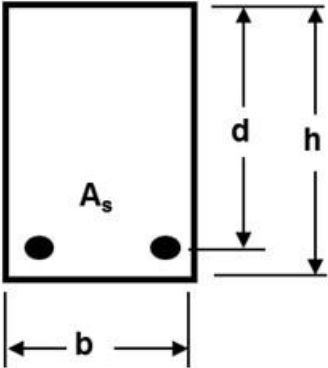
V2 Concreto con sustitución de puzolana (5% CBC).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
		<b>Unidades</b>
$f'_c =$	2,310.67	psi
$b =$	6.05	in.
$d =$	5.05	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.74	in.
$M_n =$	41.2	in.-k
	3.4	kip-ft
$\phi M_n =$	37.1	kip-ft
$P_u$	12,563.84	Kip
$P_u$	5,710.8	Kg



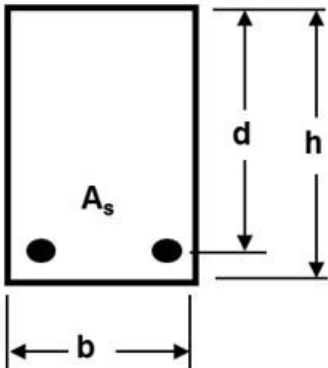
Fuente: *Elaboración propia.*

Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (5% CBC).

V3 Concreto con sustitución de puzolana (5% CBC).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	2,310.67	psi
$b =$	6.02	in.
$d =$	5.09	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.74	in.
$M_n =$	41.5	in.-k
	3.5	kip-ft
$\phi M_n =$	37.4	kip-ft
Pu	12,666.27	Kip
Pu	5,757.4	Kg



V4 Concreto con sustitución de puzolana (5% CBC).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	2,310.67	psi
$b =$	6.13	in.
$d =$	4.75	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.73	in.
$M_n =$	38.6	in.-k
	3.2	kip-ft
$\phi M_n =$	34.7	kip-ft
Pu	11,771.39	Kip
Pu	5,350.6	Kg



Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A4-3:** Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (10% CBC).

V1 Concreto con sustitución de puzolana (10% CBC).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	2,086.94	psi
$b =$	6.1	in.
$d =$	4.83	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.81	in.
$M_n =$	38.9	in.-k
	3.2	kip-ft
$\phi M_n =$	35.0	kip-ft
Pu	11,875.64	Kip
Pu	5,398.0	Kg

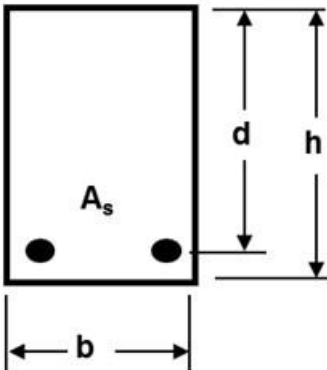
  

V2 Concreto con sustitución de puzolana (10% CBC).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	2,086.94	psi
$b =$	6.1	in.
$d =$	4.87	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.81	in.
$M_n =$	39.3	in.-k
	3.3	kip-ft
$\phi M_n =$	35.3	kip-ft
Pu	11,983.03	Kip
Pu	5,446.8	Kg

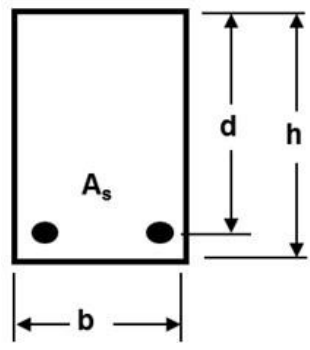
Fuente: *Elaboración propia.*

Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (10% CBC).

<b>V3 Concreto con sustitución de puzolana (10% CBC).</b>		
<b>Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.</b>		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	2,086.94	psi
$b =$	5.98	in.
$d =$	4.91	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.83	in.
$M_n =$	39.6	in.-k
	3.3	kip-ft
$\phi M_n =$	35.6	kip-ft
Pu	12,068.51	Kip
Pu	5,485.7	Kg



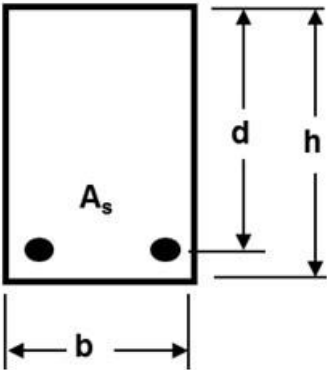
<b>V4 Concreto con sustitución de puzolana (10% CBC).</b>		
<b>Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.</b>		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	2,086.94	psi
$b =$	5.98	in.
$d =$	4.87	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.83	in.
$M_n =$	39.2	in.-k
	3.3	kip-ft
$\phi M_n =$	35.3	kip-ft
Pu	11,961.12	Kip
Pu	5,436.9	Kg



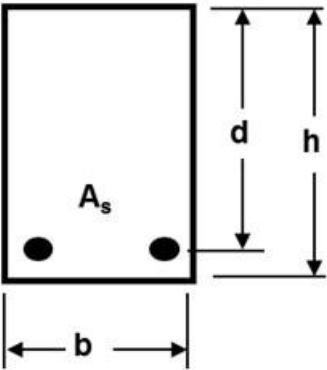
Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A4-4:** Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (15% CBC).

V1 Concreto con sustitución de puzolana (15% CBC).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	1,824.67	psi
$b =$	6.05	in.
$d =$	4.85	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.94	in.
$M_n =$	38.6	in.-k
	3.2	kip-ft
$\phi M_n =$	34.7	kip-ft
$P_u$	11,762.10	Kip
$P_u$	5,346.4	Kg



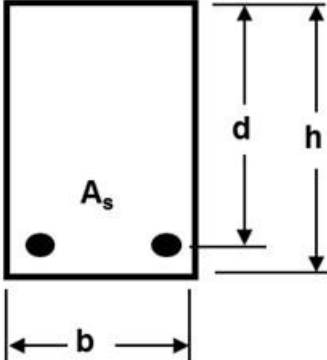
V2 Concreto con sustitución de puzolana (15% CBC).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	1,824.67	psi
$b =$	6	in.
$d =$	4.88	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.95	in.
$M_n =$	38.8	in.-k
	3.2	kip-ft
$\phi M_n =$	34.9	kip-ft
$P_u$	11,832.15	Kip
$P_u$	5,378.3	Kg



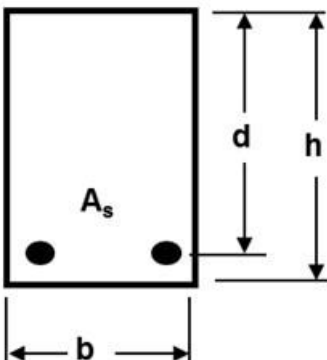
Fuente: *Elaboración propia.*

Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (15% CBC).

V3 Concreto con sustitución de puzolana (15% CBC).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	1,824.67	psi
$b =$	5.94	in.
$d =$	4.95	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.96	in.
$M_n =$	39.4	in.-k
	3.3	kip-ft
$\phi M_n =$	35.4	kip-ft
$P_u$	12,007.26	Kip
$P_u$	5,457.8	Kg



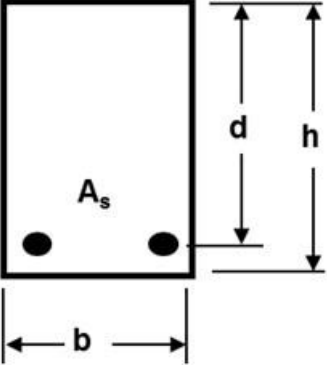
V4 Concreto con sustitución de puzolana (15% CBC).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	1,824.67	psi
$b =$	6	in.
$d =$	4.9	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.95	in.
$M_n =$	39.0	in.-k
	3.2	kip-ft
$\phi M_n =$	35.1	kip-ft
$P_u$	11,885.85	Kip
$P_u$	5,402.7	Kg



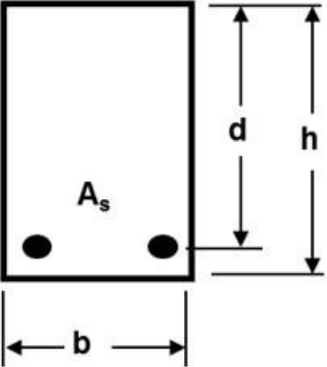
Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A4-5:** Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (20% CBC).

V1 Concreto con sustitución de puzolana (20% CBC).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	1,650.68	psi
$b =$	6.05	in.
$d =$	4.92	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	1.04	in.
$M_n =$	38.7	in.-k
	3.2	kip-ft
$\phi M_n =$	34.9	kip-ft
$P_u$	11,817.34	Kip
$P_u$	5,371.5	Kg



V2 Concreto con sustitución de puzolana (20% CBC).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	1,650.68	psi
$b =$	6.04	in.
$d =$	4.99	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	1.04	in.
$M_n =$	39.3	in.-k
	3.3	kip-ft
$\phi M_n =$	35.4	kip-ft
$P_u$	12,002.96	Kip
$P_u$	5,455.9	Kg

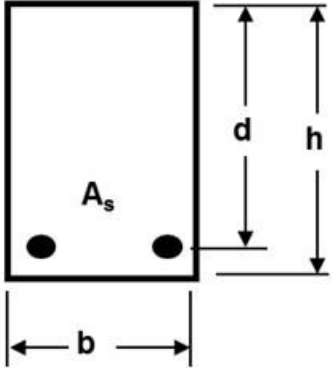


Fuente: *Elaboración propia.*

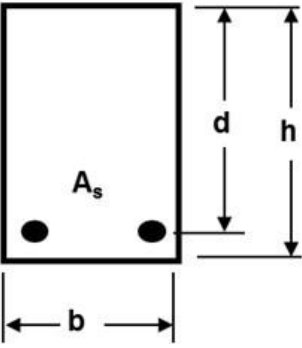


Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (20% CBC).

V3 Concreto con sustitución de puzolana (20% CBC).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	1,650.68	psi
$b =$	6.02	in.
$d =$	5.11	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	1.04	in.
$M_n =$	40.4	in.-k
	3.4	kip-ft
$\phi M_n =$	36.3	kip-ft
$P_u$	12,320.50	Kip
$P_u$	5,600.2	Kg



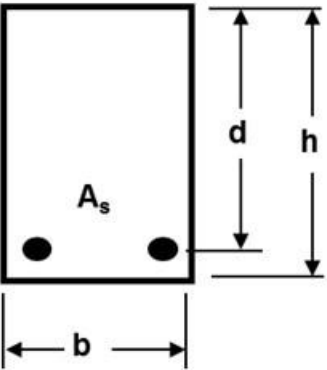
V4 Concreto con sustitución de puzolana (20% CBC).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	1,650.68	psi
$b =$	6.1	in.
$d =$	5.14	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	1.03	in.
$M_n =$	40.7	in.-k
	3.4	kip-ft
$\phi M_n =$	36.6	kip-ft
$P_u$	12,419.39	Kip
$P_u$	5,645.2	Kg



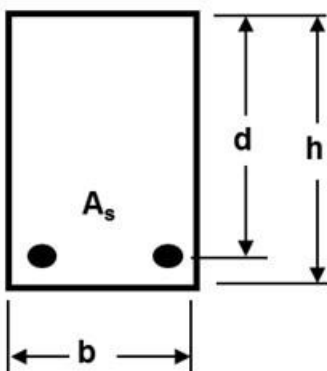
Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A4-6:** Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (5% TV).

V1 Concreto con sustitución de puzolana (5% TV).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	2,984.13	psi
$b =$	6.1	in.
$d =$	5.11	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.57	in.
$M_n =$	42.5	in.-k
	3.5	kip-ft
$\phi M_n =$	38.2	kip-ft
$P_u$	12,955.59	Kip
$P_u$	5,888.9	Kg



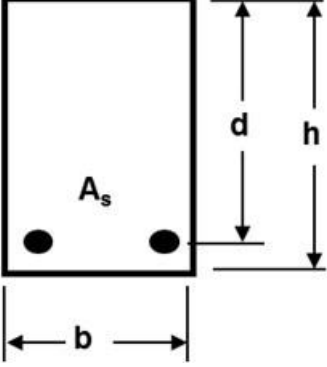
V2 Concreto con sustitución de puzolana (5% TV).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	2,984.13	psi
$b =$	6.02	in.
$d =$	4.72	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.58	in.
$M_n =$	39.0	in.-k
	3.3	kip-ft
$\phi M_n =$	35.1	kip-ft
$P_u$	11,898.39	Kip
$P_u$	5,408.4	Kg



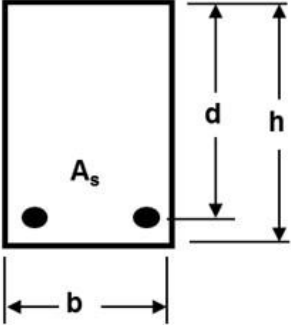
Fuente: *Elaboración propia.*

Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (5% TV).

<b>V3 Concreto con sustitución de puzolana (5% TV).</b>		
<b>Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.</b>		
		<b>Unidades</b>
$f'_c =$	2,984.13	psi
$b =$	6.14	in.
$d =$	4.91	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.57	in.
$M_n =$	40.7	in.-k
	3.4	kip-ft
$\phi M_n =$	36.6	kip-ft
$P_u$	12,423.61	Kip
$P_u$	5,647.1	Kg



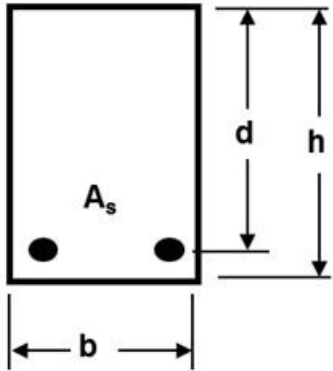
<b>V4 Concreto con sustitución de puzolana (5% TV).</b>		
<b>Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.</b>		
		<b>Unidades</b>
$f'_c =$	2,984.13	psi
$b =$	6.06	in.
$d =$	5.14	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.57	in.
$M_n =$	42.7	in.-k
	3.6	kip-ft
$\phi M_n =$	38.4	kip-ft
$P_u$	13,031.09	Kip
$P_u$	5,923.2	Kg



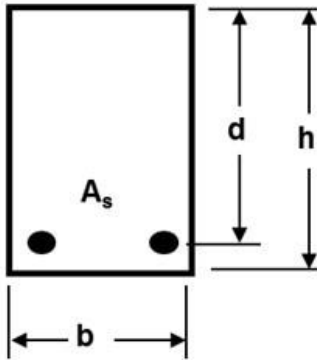
Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A4-7:** Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (10% TV).

V1 Concreto con sustitución de puzolana (10% TV).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
		<b>Unidades</b>
$f'_c =$	2,688.57	psi
$b =$	5.91	in.
$d =$	4.96	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.65	in.
$M_n =$	40.8	in.-k
	3.4	kip-ft
$\phi M_n =$	36.7	kip-ft
$P_u$	12,441.70	Kip
$P_u$	5,655.3	Kg



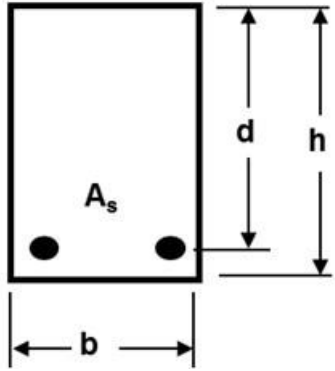
V2 Concreto con sustitución de puzolana (10% TV).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
		<b>Unidades</b>
$f'_c =$	2,688.57	psi
$b =$	5.93	in.
$d =$	4.9	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.65	in.
$M_n =$	40.3	in.-k
	3.4	kip-ft
$\phi M_n =$	36.2	kip-ft
$P_u$	12,283.57	Kip
$P_u$	5,583.4	Kg



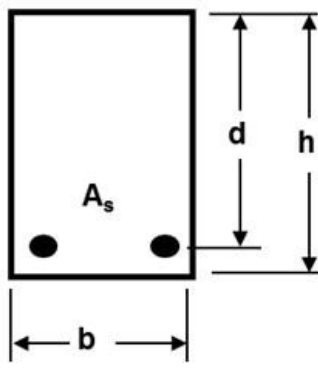
Fuente: *Elaboración propia.*

Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (10% TV).

<b>V3 Concreto con sustitución de puzolana (10% TV).</b>		
<b>Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.</b>		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	2,688.57	psi
$b =$	5.94	in.
$d =$	4.91	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.65	in.
$M_n =$	40.4	in.-k
	3.4	kip-ft
$\phi M_n =$	36.3	kip-ft
$P_u$	12,398.24	Kip
$P_u$	5,635.6	Kg



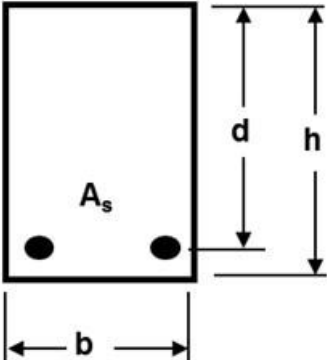
<b>V4 Concreto con sustitución de puzolana (10% TV).</b>		
<b>Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.</b>		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	2,688.57	psi
$b =$	5.98	in.
$d =$	4.94	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.64	in.
$M_n =$	40.6	in.-k
	3.4	kip-ft
$\phi M_n =$	36.6	kip-ft
$P_u$	13,550	Kip
$P_u$	6,144.4	Kg



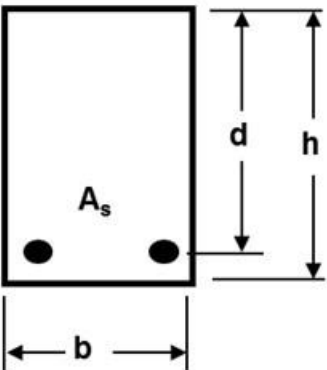
Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A4-8:** Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (15% TV).

V1 Concreto con sustitución de puzolana (15% TV).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	2,315.93	psi
$b =$	6.02	in.
$d =$	4.91	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.74	in.
$M_n =$	39.9	in.-k
	3.3	kip-ft
$\phi M_n =$	35.9	kip-ft
$P_u$	12,185.29	Kip
$P_u$	5,538.8	Kg



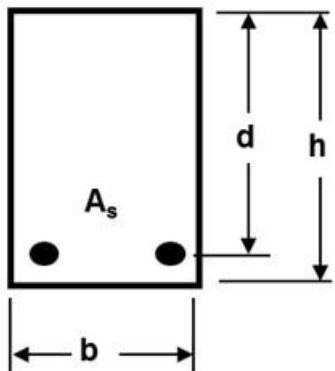
V2 Concreto con sustitución de puzolana (15% TV).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	2,315.93	psi
$b =$	6.02	in.
$d =$	4.95	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.74	in.
$M_n =$	40.3	in.-k
	3.4	kip-ft
$\phi M_n =$	36.3	kip-ft
$P_u$	12,292.68	Kip
$P_u$	5,587.6	Kg



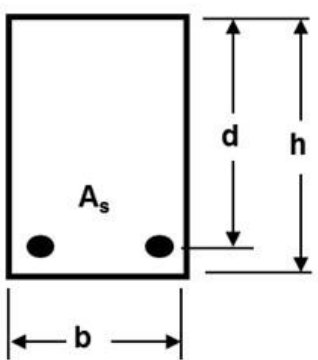
Fuente: *Elaboración propia.*

Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (15% TV).

V3 Concreto con sustitución de puzolana (15% TV).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	2,315.93	psi
$b =$	6.02	in.
$d =$	4.95	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.74	in.
$M_n =$	40.3	in.-k
	3.4	kip-ft
$\phi M_n =$	36.3	kip-ft
Pu	12,292.68	Kip
Pu	5,587.6	Kg



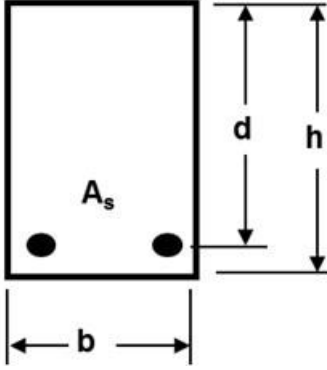
V4 Concreto con sustitución de puzolana (15% TV).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	2,315.93	psi
$b =$	6.02	in.
$d =$	4.95	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.74	in.
$M_n =$	40.3	in.-k
	3.4	kip-ft
$\phi M_n =$	36.3	kip-ft
Pu	12,292.68	Kip
Pu	5,587.6	Kg



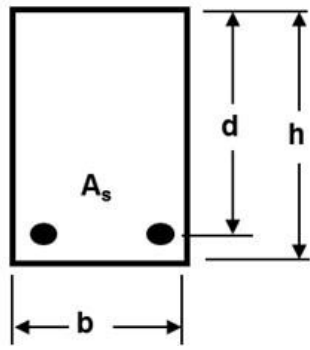
Fuente: *Elaboración propia.*

**Tabla A4-9:** Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (20% TV).

V1 Concreto con sustitución de puzolana (20% TV).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	2,185.08	psi
$b =$	6.06	in.
$d =$	4.87	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.78	in.
$M_n =$	39.4	in.-k
	3.3	kip-ft
$\phi M_n =$	35.5	kip-ft
$P_u$	12,025.18	Kip
$P_u$	5,466.0	Kg



V2 Concreto con sustitución de puzolana (20% TV).		
Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.		
<b>Unidades</b>		
$f'_c =$	2,185.08	psi
$b =$	5.98	in.
$d =$	4.83	in.
$A_s =$	0.22	in <sup>2</sup>
$f_y =$	40	ksi
$a =$	0.79	in.
$M_n =$	39.0	in.-k
	3.3	kip-ft
$\phi M_n =$	35.1	kip-ft
$P_u$	11,903.75	Kip
$P_u$	5,410.8	Kg

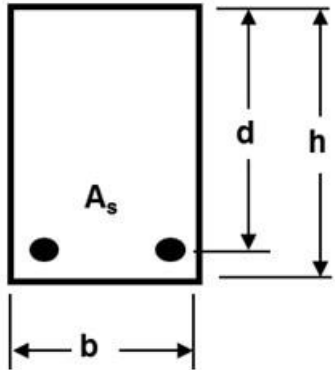


Fuente: *Elaboración propia.*

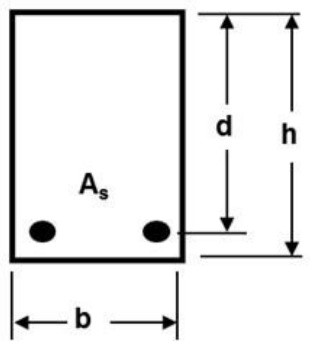


Cálculo del momento nominal y carga de rotura teórica para vigas de concreto con sustitución de puzolana (20% TV).

<b>V3 Concreto con sustitución de puzolana (20% TV).</b>		
<b>Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.</b>		
		<b>Unidades</b>
$f'_c =$	<b>2,185.08</b>	<b>psi</b>
$b =$	<b>5.91</b>	<b>in.</b>
$d =$	<b>4.95</b>	<b>in.</b>
$A_s =$	<b>0.22</b>	<b>in<sup>2</sup></b>
$f_y =$	<b>40</b>	<b>ksi</b>
$a =$	<b>0.80</b>	<b>in.</b>
$M_n =$	<b>40.0</b>	<b>in.-k</b>
	<b>3.3</b>	<b>kip-ft</b>
$\phi M_n =$	<b>36.0</b>	<b>kip-ft</b>
$P_u$	<b>12,213.32</b>	<b>Kip</b>
$P_u$	<b>5,551.5</b>	<b>Kg</b>



<b>V4 Concreto con sustitución de puzolana (20% TV).</b>		
<b>Momento nominal y carga de rotura para vigas rectangulares.</b>		
		<b>Unidades</b>
$f'_c =$	<b>2,185.08</b>	<b>psi</b>
$b =$	<b>5.98</b>	<b>in.</b>
$d =$	<b>4.91</b>	<b>in.</b>
$A_s =$	<b>0.22</b>	<b>in<sup>2</sup></b>
$f_y =$	<b>40</b>	<b>ksi</b>
$a =$	<b>0.79</b>	<b>in.</b>
$M_n =$	<b>39.7</b>	<b>in.-k</b>
	<b>3.3</b>	<b>kip-ft</b>
$\phi M_n =$	<b>35.7</b>	<b>kip-ft</b>
$P_u$	<b>12,118.53</b>	<b>Kip</b>
$P_u$	<b>5,508.4</b>	<b>Kg</b>



Fuente: *Elaboración propia.*

**ANEXO 5: CALIDAD DEL ACERO USADO EN LA INVESTIGACIÓN (CAPITULO 3).**



**LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD**

Entrada a Quezaltepeque, Depto. de La Libertad, El Salvador, C.A.  
 Aparado Postal 1142, Tel: 2314-3300 Fax: 2310-2133  
 www.corinca.com

**PRUEBA DE TRACCION DE BARRAS DE ACERO**

NORMA ASTM A615

CLIENTE: FREUND DE EL SALVADOR, S.A DE.C.V.

PROYECTO:

FECHA: 16/02/2021 FACTURA No.: REMISION No. 12615-20 ✓

Cada No.	Barr No.	Area		Peso de Muestra Gr	Long. de Muestra Cm	Peso/Long. Muestra		Variación MOF/MN de Peso (%)	Esfuerzo Fluencia Norma		Esfuerzo Fluencia Psi	Esfuerzo Último Norma		Esfuerzo Último Psi	Elongación Mínima 8" (%)	Elongación (%)						
		cm2	Pulg2			Kg / m	Lbs / Pie		Mpa	Psi		Mpa	Psi									
5221	B 3	0.7100	0.1100	0.11	393.20	70.80	0.5554	0.3727	0.56	0.376	99.2	-0.83	40.000	208.00	44.000	308.00	60.000	420.00	67.189	470.32	9.00	15.00

*[Handwritten signature]*  
 LABORIZADO



Laboratorio de ensayo acreditado por el OSA con registro N° IEA-07:17 para el alcance detallado en www.osa.gob.sv.  
 (La información contenida en este documento se ha extraído de los informes emitidos por el laboratorio). Documento propiedad intelectual de CORINCA, S.A. de C.V.

**ANEXO 6: ANALISIS DE COSTOS UNITARIOS (CONCLUSIONES).**

<b>COSTO POR M<sup>3</sup> DE CONCRETO SIN TV Y CBC</b>				
<b>CONCEPTO</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO</b>	<b>SUBTOTAL</b>
Cemento	9	bolsa	\$9.79	\$88.11
Agregado grueso	0.27	m <sup>3</sup>	\$47.50	\$12.83
Agregado fino	0.30	m <sup>3</sup>	\$33.50	\$10.05
Agua	200	litros	\$0.25	\$50.00
			<b>TOTAL</b>	<b>\$160.99</b>

<b>COSTO POR M<sup>3</sup> DE CONCRETO CON TV (5%)</b>				
<b>CONCEPTO</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO</b>	<b>SUBTOTAL</b>
Cemento	8.5	bolsa	\$9.79	\$83.22
TV	0.013	m <sup>3</sup>	\$11.00	\$0.14
Agregado grueso	0.27	m <sup>3</sup>	\$47.50	\$12.83
Agregado fino	0.30	m <sup>3</sup>	\$33.50	\$10.05
Agua	200	litros	\$0.25	\$50.00
			<b>TOTAL</b>	<b>\$156.23</b>

<b>COSTO POR M<sup>3</sup> DE CONCRETO CON CBC (5%)</b>				
<b>CONCEPTO</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>COSTO UNITARIO</b>	<b>SUBTOTAL</b>
Cemento	8.5	bolsa	\$9.79	\$83.22
CBC	0.03	m <sup>3</sup>	\$7.00	\$0.21
Agregado grueso	0.27	m <sup>3</sup>	\$47.50	\$12.83
Agregado fino	0.30	m <sup>3</sup>	\$33.50	\$10.05
Agua	200	litros	\$0.25	\$50.00
			<b>TOTAL</b>	<b>\$156.30</b>