

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA



TRABAJO DE GRADO:

“DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DE MEZCLAS DE CONCRETO
HIDRÁULICO CONSIDERANDO RELACIONES AGUA/CEMENTO DE 0.40, 0.50 Y 0.60”

PRESENTADO POR:

JOHANNA ROSALI JOYA

AMADEO ANTONIO ORTIZ PEREZ

JAVIER ARMANDO SORTO MALTEZ

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

DOCENTE DIRECTOR:

ING. GUILLERMO MOYA TURCIOS

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE 2015

SAN MIGUEL

EL SALVADOR

CENTRO AMÉRICA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

AUTORIDADES

LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN

RECTOR INTERINO

(PENDIENTE DE ELECCIÓN)

VICERRECTORÍA ACADÉMICA INTERINA

ING. CARLOS ARMANDO VILLALTA

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO INTERINO

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

SECRETARIA GENERAL

LICDA. NORA BEATRIZ MELÉNDEZ

FISCAL GENERAL INTERINA

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL

AUTORIDADES

ING. JOAQUÍN ORLANDO MACHUCA

DECANO

LIC. CARLOS ALEXANDER DÍAZ

VICE-DECANO

LIC. JORGE ALBERTO ORTEZ HERNÁNDEZ

SECRETARIO

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

**“DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DE MEZCLAS DE
CONCRETO HIDRÁULICO CONSIDERANDO RELACIONES
AGUA/CEMENTO DE 0.40, 0.50 Y 0.60”.**

PRESENTADO POR:

JOHANNA ROSALI JOYA

AMADEO ANTONIO ORTIZ PEREZ

JAVIER ARMANDO SORTO MALTEZ

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

DOCENTE DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN:

ING. GUILLERMO MOYA TURCIOS

COORDINADOR DE PROYECTOS DE GRADUACIÓN:

ING. MILAGRO DE MARIA ROMERO DE GARCIA

CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN MIGUEL, DICIEMBRE DE 2015

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios, por habernos permitido culminar nuestra carrera por darnos la sabiduría y fuerza necesaria para poder alcanzar esta meta.

A la Universidad de El Salvador, por habernos formado y hacernos crecer como profesionales de la carrera de Ingeniería Civil.

Al personal docente, que fue parte de nuestra formación académica por impartirnos sus conocimientos.

A nuestro asesor, Ing. Guillermo Moya, gracias por su orientación y por haber depositado su confianza en nuestro proyecto.

A los miembros de nuestro jurado calificador, Ing. Milagro Romero, Ing. David Chávez, gracias por su orientación por sus ideas y sugerencias para lograr desarrollar de la mejor manera nuestro trabajo.

A la Fundación del Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto (ISCYC), por habernos brindado su colaboración, por permitirnos el acceso a las instalaciones de su laboratorio y por el apoyo técnico brindado para el desarrollo de este trabajo de graduación.

A nuestro asesor externo, Ing. Marlon Vigil, por su orientación y dedicación por habernos aportado sus conocimientos para la realización de este trabajo, por haber creído y confiado hasta el final en nuestro grupo.

Al personal técnico del ISCYC: Tomas Brizuela, Julio Hernández y demás técnicos por la asesoría que nos brindaron en todo momento para la realización de las pruebas de laboratorio que fueron esenciales para la culminación de este trabajo de graduación.

DEDICATORIA

Agradezco:

Primeramente, a Dios por haberme sostenido en todo momento por ser el mayor apoyo y principalmente por permitirme terminar mi carrera porque a pesar de todos los obstáculos que hubo durante todos estos años me dio la fortaleza para seguir adelante.

A MI MADRE Y ABUELA: Ana Luisa Joya Romero y Ángela María Romero de Joya, a quienes dedico el triunfo alcanzado gracias a su amor y sacrificio me ayudaron a culminar mi carrera profesional, por ser mi ejemplo de perseverancia y por la ayuda incondicional en todas las etapas de mi vida.

A MI ESPOSO E HIJOS: José Luis, Hassel Daniela y Gerardo Josué por ser la mayor bendición y el mayor regalo que Dios me ha podido dar, la luz e inspiración para seguir adelante, Son mi tesoro más valioso.

A MIS HERMANOS: Carlos Manuel (Q.E.P.D) y Jorge David por apoyarme en todo momento en las diferentes etapas de mi vida, inspirándome a seguir adelante a pesar de todas las adversidades que se presentaban, sin ustedes no hubiera sido posible este logro.

A MIS TIOS: Iris Joya y Luis Díaz, gracias porque a pesar de la distancia siempre me han ayudado y han estado pendientes de mi estudio y apoyándome en todo momento que lo necesite.

A MI ABUELO: Manuel de Jesús Joya (Q.E.P.D) por todos los consejos por haberme animado a terminar mi carrera por todo su apoyo, hasta donde esté abuelo gracias, hoy puedo decir lo logre.

A MIS AMIGOS: Jennie Recinos (Q.E.P.D) y Edgar Velásquez por todas las palabras de ánimo, apoyo y cariño que me brindaron no alcanzarían las palabras para agradecerles todo.

A MIS COMPAÑEROS DE TESIS: Amadeo Ortiz por el apoyo y comprensión porque cuando dudaba me daba ánimos para seguir, Javier Sorto por ser parte de este grupo y compartir la visión y el esfuerzo de este proyecto.

A NUESTRO ASESOR EXTERNO: Ing. Marlon Vigil por todo su apoyo y disposición por brindarnos sus conocimientos y en especial por su tiempo dedicado, muchas gracias.

A MIS FAMILIARES, primos, tíos, sobrinos por aconsejarme para seguir luchando hasta el final.

AMIGOS DE LA FAMILIA, Teresa Guerrero y Alma Guerrero por haberme recibido en su hogar en el transcurso del desarrollo de mi tesis por todo su apoyo y cariño.

A TODOS MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS DE LA UNIVERSIDAD, a cada uno de ustedes que me acompañaron a lo largo de la carrera a los que estuvieron en las buenas y en las malas por haber compartido todos los buenos momentos por sus consejos a todos ustedes gracias.

La gloria del mundo es transitoria, y no es ella la que nos da la dimensión de nuestra vida, sino la elección que hacemos de seguir nuestra leyenda personal, tener fe en nuestras utopías y luchar por nuestros sueños.

JOHANNA R. JOYA

DEDICATORIA

A ti Alfa y Omega, principio y fin, de quien procede toda inteligencia, sabiduría y ciencia, sean Honor, Honra y Gloria, desde la eternidad hasta la eternidad. Gracias por darme el privilegio de formar parte en el mundo del profesionalismo terrenal.

A mi madre María Ortiz Cortez y a mi padre Amadeo Pérez Ramírez, por apoyarme en todos mis desvelos y darme las fuerzas para seguir adelante, por ser padres que siempre y hasta ahora no han faltado sus consejos, pues como dice mi Dios en su palabra, honrad a vuestros padres para que seáis de larga vida sobre la tierra y os vaya bien, hoy puedo decir que Dios cumple su palabra y siempre permanece fiel.

A mis hermanas: María Vilma, Yolanda Nohemí, Carmen Isabel, que desde un principio me apoyaron y siempre estuvieron en todo, nunca dijeron no, y han sido piezas claves en el trayecto de mi carrera, creo que no bastarían las palabras para agradecerles, a Maribel Yoselin por ser comprensiva y de igual forma brindarme su apoyo, y a mi hermano Eduardo Luis, por darme animo siempre de seguir adelante.

A mis tíos por estar siempre atento, y brindarme sus consejos, y especialmente a María Desideria gracias por estar pendiente de mí.

A mis sobrinos, José David, Yoselin Daniela, Ana Verónica, y Adrián Eduardo, que con mi ejemplo quiero mostrarles, que la mejor herencia que los padres pueden ofrecer a sus hijos es el estudio y que nunca lo pueden perder, más bien, pueden adquirir más y más con esfuerzo y dedicación.

A mi futura esposa e hijos, que pronto vendrán, y a su debido tiempo estaremos juntos, pues todo viene por añadidura, el cual será una bendición, así como este logro que mi Señor Jesús me ha permitido tener.

A mis amigos que siempre han estado a mi lado y aún más cuando los necesite.

A mis compañeros de tesis, Johanna Joya, quien me apoyo en muchos aspectos en el desarrollo de este proyecto, solo quiero decirte gracias. A Javier Sorto por emprender este trayecto hasta el final, aunque con mucho esfuerzo se puede decir ahora sí se pudo.

A mis hermanos en la común fe, gracias por su atención y sus oraciones que, hasta el día de hoy, nunca han faltado hacia a mi persona: Ing. y Meteorólogo Rubén Gonzales y su esposa Berta de Gonzales, Matilde, Lic. Francisco Medrano, Lic. Ramiro Claros, Natán Rivera, Tec. Alvin Padilla, Rene A. Claros, Omar Claros, y congregación en general.

A todos aquellos que, un día dijeron que no se podía y siempre estuvieron en contra, pero todo esto resulto para bien, y he aquí la recompensa, hoy puedo decirles gracias, porque es ahí donde pude tomar más fuerzas, y demostrar que con la ayuda de Dios todo es posible, porque las decisiones que uno tome en la vida, marcaran la historia para bien o para mal.

Nunca podremos cruzar el océano, a menos que tengamos el coraje de perder de vista la orilla.

‘‘La grandeza de un hombre está en saber reconocer su propia pequeñez’’

Amadeo Antonio Ortiz

DEDICATORIA

AGRADEZCO:

A **Dios**, por estar a mi lado toda mi vida, por darme fuerza de voluntad y levantarme cuando he dudado y por ser tan grande que llena mi vida con muchas bendiciones cada día. Para Él todos mis logros y mis metas futuras.

A mis padres Delmy Esperanza Maltez de Sorto y Fidel Armando Sorto Amaya por apoyarme, cuidarme y estar conmigo en todo momento de mi vida, por estar siempre aconsejándome, guiando siempre mis pasos y dándome todo su amor a cada instante. A mis hermanos a los cuales les doy gracias por apoyarme siempre en mis decisiones y en general a toda mi familia.

A mi esposa Nieves de Sorto, mi mejor amiga y mi compañera en todo momento, por estar siempre a mi lado, por compartir un camino de estudio de inicio a fin de mi carrera lleno de muchas vivencias de las cuales hemos aprendido y por haberme dado el apoyo en el desarrollo de este trabajo de graduación, y brindarme su amor, confianza y comprensión cada día.

A mis compañeros de tesis en este proceso por comprenderme y apoyarme incondicionalmente en todo momento.

A todos los Ingenieros de la Universidad de El Salvador, Facultad Multidisciplinaria Oriental por formarnos como profesionales y compartir sus conocimientos, por mostrarnos que la Ingeniería no simplemente es una profesión si no una forma de vida con la cual se interactúa día a día, la cual hay q vivir y disfrutar ahora como nuevos profesionales.

JAVIER ARMANDO SORTO MALTEZ

INDICE

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN	26
1.2 ANTECEDENTES.....	28
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	30
1.3.1 ENUNCIADO DEL PROBLEMA	31
1.4 OBJETIVOS	32
1.4.1 OBJETIVO GENERAL:	32
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	32
1.5 ALCANCES	33
1.6 LIMITACIONES	34
1.7 JUSTIFICACIÓN	35
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	37
2.1 EL CONCRETO	38
2.1.1 COMPONENTES BÁSICOS DEL CONCRETO HIDRÁULICO.....	38
2.1.2 EL CONCRETO Y SUS PROPIEDADES.....	39
2.1.3 INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE AGUA EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO	40
2.2 CONCRETO CON AIRE INCLUIDO.....	41
2.2.1 PROPIEDADES DEL CONCRETO CON AIRE INCLUIDO.....	43
2.3 DURABILIDAD DEL CONCRETO	45
2.3.1 CONCEPTO MODERNO DE LA DURABILIDAD.....	45
2.3.2 OBTENCIÓN DE LA DURABILIDAD	46
2.3.3 DURABILIDAD EN LA FASE DEL PROYECTO	47
2.3.4 DURABILIDAD EN LA FASE DE EJECUCIÓN.....	47
2.4 FACTORES DE DETERIORO DEL CONCRETO	48
2.4.1 PRESIÓN	48
2.4.2 TEMPERATURA.....	48
2.4.3 HUMEDAD:	49
2.4.4 EL AGUA COMO AGENTE DE DETERIORO.....	49

2.4.5 PROCEDENCIA Y EFECTO DE LA PENETRACIÓN DE AGUA EN EL CONCRETO	50
2.4.5.1 PROCEDENCIA DEL AGUA	50
2.5 MECANISMOS DE TRANSPORTE EN EL INTERIOR DEL CONCRETO	53
2.5.1 LA PERMEABILIDAD	53
2.5.2 LA ABSORCIÓN CAPILAR	53
2.5.3 LA DIFUSIÓN	55
2.6 PERMEABILIDAD DEL CONCRETO	56
2.6.1 DEFINICIÓN DE PERMEABILIDAD	56
2.6.2 COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD	57
2.6.3 PERMEABILIDAD AL AGUA DEL CONCRETO	58
2.6.3.1 CONSIDERACIONES GENERALES	58
2.7 CAUSAS DE LA PERMEABILIDAD EN EL CONCRETO	61
2.7.1 INFLUENCIA DE LA RELACIÓN A/C	61
2.7.3 PERMEABILIDAD DE LA PASTA DE CEMENTO HIDRATADA.	63
2.7.4 PERMEABILIDAD DEL CONCRETO INTEGRAL	65
2.8 CONSECUENCIAS DE LA PERMEABILIDAD EN EL CONCRETO.	69
2.8.1 EFLORESCENCIAS	69
2.8.2 OXIDACIÓN Y CORROSIÓN	71
2.8.3 LA CARBONATACIÓN	74
2.8.3 ATAQUE DE SUSTANCIAS QUÍMICAS AGRESIVAS	76
2.8.4 SULFATOS	76
2.9 VALORES DE REFERENCIA Y NIVELES DE PERMEABILIDAD SEGÚN NORMAS TÉCNICAS	78
2.9.1 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC) 4483 METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO AL AGUA	78
2.9.2 NORMA ESPAÑOLA UNE EN 12390-8 PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN.	80
2.10 ESPECIFICACIONES PARA EL CONTROL DE PERMEABILIDAD EN EL DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO	81
2.11 RECOMENDACIONES PARA OBTENER UN CONCRETO MENOS PERMEABLE EN OBRA	83

CAPITULO III: REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO	87
3.1 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE LABORATORIO.....	88
3.2 UNIDAD DE ANALISIS.....	88
3.3 DEFINICIÓN DE VARIABLES.	88
3.3.1 RESISTENCIA	88
3.3.3 RELACION AGUA/CEMENTO:	89
3.4 ENSAYOS REALIZADOS	89
3.5 PRUEBAS PARA CONTROLAR LA CALIDAD DE LOS AGREGADOS:	90
3.5.1 Práctica Estándar para reducción de las Muestras de Agregado al Tamaño de prueba. ASTM Designación 702-01	90
3.5.2 Método de Ensayo Estándar para Análisis por Malla de Agregados Grueso y Fino Designación ASTM C – 136 – 01.....	93
3.5.3 Método de ensayo Estándar para Densidad Bruta (Peso Unitario) y vacíos en los agregados. ASTM Designación C29/ C 29M -97.....	98
3.5.4 Método de Ensayo Estándar para la Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Especifica) y Absorción del Agregado Grueso. ASTM Designación C 127-01.....	100
3.5.5 Método de Ensayo Estándar para Gravedad Especifica y Absorción del Agregado Fino ASTM Designación C 128 – 00.	105
3.5.6 Método de Ensayo Estándar para Contenido de Humedad Total del Agregado por Secado. ASTM Designación C 566 – 97	109
3.5.7 Método de Ensayo Estándar para Determinar Esfuerzos de Compresión en Especímenes Cilíndricos de Concreto. ASTM Designación: C39/C39M-01	111
3.6 REALIZACIÓN DE LOS DISEÑOS DE MEZCLAS DE CONCRETO PARA LA ELABORACIÓN DE LOS ENSAYOS	112
3.6.1 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO PARA LA REALIZACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO	112
3. 7 ELABORACIÓN DE MUESTRAS.....	122
3.7.1 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE ESPECÍMENES DE PRUEBA PARA ENSAYOS	122
3.8 RESULTADO DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	134
3.9 REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE PERMEABILIDAD. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN	140

3.9.1 INTRODUCCIÓN.....	140
3.9.2 DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL EQUIPO PARA REALIZACIÓN DE ENSAYO DE PERMEABILIDAD	142
3.9.3 PROCEDIMIENTO PARA REALIZACIÓN DE ENSAYO DE PERMEABILIDAD	144
CAPITULO IV: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE PERMEABILIDAD	150
4.1 RESULTADOS DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	151
4.2 RESULTADOS DE PORCENTAJE DE HUMEDAD.....	170
4.3 CORRELACIÓN	179
4.3.1 CORRELACIÓN PRESIÓN VS PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN CONCRETO	179
4.3.2 CORRELACIÓN RELACIÓN A/C VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN	183
4.3.4 CORRELACIÓN RESISTENCIA A COMPRESIÓN VS PRESIÓN APLICADA	185
4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	187
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	170
5.1 CONCLUSIONES	191
5.2 RECOMENDACIONES	193
5.3 BIBLIOGRAFÍA	194
ANEXOS	197

INDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

FIGURA 1.1 Problemas debido al paso del agua a través de una estructura de concreto30

CAPITULO II

FIGURA 2.1 Variación entre las proporciones usadas en concretos convencionales, en volumen absoluto.39

FIGURA 2.2: Sección pulida de un concreto con aire incluido, vista a través de microscopio.42

FIGURA 2.3: Resistencia vs. Relación a/c, con agregado grueso de tamaño máximo nominal de 19 mm a 25 mm.....45

FIGURA 2.4: Durabilidad del concreto46

FIGURA 2.5: Esquemmatización del concepto moderno de permeabilidad.....61

FIGURA 2.6: Relación entre permeabilidad y relación A/C para pastas de cemento maduras62

FIGURA 2.7: Relación entre régimen de curado, relación agua/cemento y permeabilidad.....64

FIGURA 2.8: Influencia del tamaño máximo del agregado en la permeabilidad del concreto 67

FIGURA 2.9: Efecto del tiempo de curado húmedo sobre el desarrollo de la resistencia del concreto.....69

FIGURA 2.10: Severas eflorescencias en muro de concreto71

FIGURA 2.11: Corrosión del acero.....71

FIGURA 2.12: Consecuencias de la corrosión del acero de refuerzo en estructuras expuestas a ambientes marinos.....72

FIGURA 2.13: Proceso de la Carbonatación.....75

FIGURA 2.14: Esquemmatización de la carbonatación en el concreto y el acero de refuerzo ...76

FIGURA 2.15: Ataque por cloruros y sulfatos78

CAPITULO III

FIGURA 3.1 Muestra de arena triturada	90
FIGURA 3.2 Muestra de agregado grueso tamaño nominal $\frac{3}{4}$ "	92
FIGURA 3.3 Cuarteo mecánico de agregado grueso.....	92
FIGURA 3.4 Cuarteo agregado fina por apilamiento en miniatura	93
FIGURA 3.5 Tamices certificados de abertura cuadrada para agregado fino.....	95
FIGURA 3.6 Tamizado de agregado fino	96
FIGURA 3.7 Tamices certificados de abertura cuadrada para agregado grueso.....	97
FIGURA 3.8 Tamizado de agregado grueso	97
FIGURA 3.9 Homogenizado de material para llenado de recipiente y enrazado para nivelar el material antes varillado	100
FIGURA 3.10 Muestras en estado superficialmente secas y saturadas.....	103
FIGURA 3.11 Secado superficial del agregado grueso	104
FIGURA 3.12 Llenado de picnómetro	107
FIGURA 3.13 Determinación de la condición saturada superficialmente seca en muestra de arena.....	109
FIGURA 3.14 Molde cilíndricos de 15 x 30 cms de diámetro	123
FIGURA.3.15 Molde de hierro forjado y PVC de 20 x 12 cms de diámetro para especímenes de permeabilidad	123
FIGURA 3.16 Vertido de agregados en concreteira	124
FIGURA 3.17 Incorporación de agua y aditivo inclusor de aire en la mezcla	125
FIGURA.3.18 Varillado para revenimiento	126
FIGURA 3.19 Lectura de revenimiento	127
FIGURA 3.20 Varillado para ensayo de contenido de aire	128
FIGURA 3.21 Vertido de agua en equipo para determinar contenido de aire	129
FIGURA 3.22 Lectura de contenido de aire	129

FIGURA 3.23 Determinación de la temperatura	130
FIGURA.3.24 Llenado de cilindros para ensayo de permeabilidad de 12 x 20 cms.....	131
FIGURA 3.25 Llenado de especímenes de 15 x 30 cms para ensayo a compresión.....	131
FIGURA 3.26 Varillado de cilindros para ensayo de permeabilidad.....	132
FIGURA 3.27 Especímenes elaborados con una relación agua/cemento 0.60 con aire incluido	132
FIGURA 3.28 Curado de cilindros.....	133
FIGURA 3.29: Compresor de aire de 125 psi	140
FIGURA 3.30: Probeta graduada de 500 ml	141
FIGURA 3.31 Maquina de compresión de cilindros estándar	141
FIGURA 3.32 Equipo para medir la permeabilidad diseñado por el Ing. Hemant Kumar Bhagoria.....	142
FIGURA 3.33 Equipo para medir la permeabilidad	144
FIGURA 3.34 Colocación y extracción de la muestra del horno.....	145
FIGURA 3.35 Colocación de lámina de neopreno	145
FIGURA 3.36 Colocación de pernos en equipo	146
FIGURA 3.37 Colocación de lámina de neopreno y parte superior del equipo	146
FIGURA 3.38 Vertido de 200 ml de agua en el equipo.....	147
FIGURA 3.39 Inyección de presión en equipo.....	147
FIGURA 3.40 Vaciado de agua de agua restante	148
FIGURA 3.41 Ajuste de muestra en máquina de compresión	148
FIGURA 3.42 Ensayo brasileño para romper por mitad la muestra	149
FIGURA 3.43 Medida de profundidad de penetración y lectura de humedad	149

CAPITULO IV

FIGURA 4.1 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 9 días, concreto con relación agua/cemento de 0.40 sin aire incluido	151
FIGURA 4.2 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 15 días, concreto con relación agua/cemento de 0.40 sin aire incluido	152
FIGURA 4.3 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 27 días, concreto con relación agua/cemento de 0.40 sin aire incluido	153
FIGURA 4.4 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 8 días, concreto con relación agua/cemento de 0.50 sin aire incluido	154
FIGURA 4.5 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 15 días, concreto con relación agua/cemento de 0.50 sin aire incluido	155
FIGURA 4.6 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 27 días, concreto con relación agua/cemento de 0.50 sin aire incluido	156
FIGURA 4.7 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 8 días, concreto con relación agua/cemento de 0.60 sin aire incluido	157
FIGURA 4.8 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 15 días, concreto con relación agua/cemento de 0.60 sin aire incluido	158
FIGURA 4.9 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 27 días, concreto con relación agua/cemento de 0.60 sin aire incluido	159
FIGURA 4.10 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 9 días, concreto con relación agua/cemento de 0.40 con aire incluido	160
FIGURA 4.11 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 15 días, concreto con relación agua/cemento de 0.40 con aire incluido	161
FIGURA 4.12 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 28 días, concreto con relación agua/cemento de 0.40 con aire incluido	162
FIGURA 4.13 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 8 días, concreto con relación agua/cemento de 0.50 con aire incluido	163

FIGURA 4.14 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 15 días, concreto con relación agua/cemento de 0.50 con aire incluido	164
FIGURA 4.15 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 28 días, concreto con relación agua/cemento de 0.50 con aire incluido	165
FIGURA 4.16 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 8 días, concreto con relación agua/cemento de 0.60 con aire incluido	166
FIGURA 4.17 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 15 días, concreto con relación agua/cemento de 0.60 con aire incluido	167
FIGURA 4.18 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 28 días, concreto con relación agua/cemento de 0.60 con aire incluido	168
FIGURA 4.19 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.40 sin aire incluido.....	170
FIGURA 4.20 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.40 sin aire incluido.....	170
FIGURA 4.21 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.40 sin aire incluido.....	171
FIGURA 4.22 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.40 con aire incluido.....	171
FIGURA 4.23 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.40 con aire incluido.....	172
FIGURA 4.24 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.40 con aire incluido.....	172
FIGURA 4.25 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.50 sin aire incluido.....	173
FIGURA 4.26 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.50 sin aire incluido.....	173
FIGURA 4.27 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.50 sin aire incluido.....	174

FIGURA 4.28 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.50 con aire incluido.....	174
FIGURA 4.29 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.50 con aire incluido.....	175
FIGURA 4.30 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.50 con aire incluido.....	175
FIGURA 4.31 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.60 sin aire incluido.....	176
FIGURA 4.32 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.60 sin aire incluido.....	176
FIGURA 4.33 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.60 sin aire incluido.....	177
FIGURA 4.34 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.60 con aire incluido.....	177
FIGURA 4.35 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.60 sin aire incluido.....	178
FIGURA 4.36 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación a/c 0.60 con aire incluido.....	178
FIGURA 4.37 Gráfica correlación Presión vs Profundidad de penetración concreto relación agua/cemento 0.40 sin aire y con aire incluido.....	179
FIGURA 4.38 Gráfica correlación Presión vs Profundidad de penetración concreto con relación agua/cemento 0.50 con aire y sin aire incluido	180
FIGURA 4.39 Gráfica correlación Presión vs Profundidad de penetración concreto con relación agua/cemento de 0.60 sin aire y con aire incluido	181
FIGURA 4.40 Gráfica correlación Presión vs Profundidad de penetración concreto con relación agua/cemento 0.40, 0.50 y de 0.60 sin aire incluido	182
FIGURA 4.41 Gráfica correlación Presión vs Profundidad de penetración concreto con relación agua/cemento 0.40, 0.50 y de 0.60 con aire incluido	182

FIGURA 4.42 Gráfica Relación a/c vs Resistencia a compresión concreto sin aire incluido	183
FIGURA 4.43 Gráfica Relación a/c vs Resistencia a compresión concreto con aire incluido	184
FIGURA 4.44 Gráfica correlación de Resistencia a compresión concreto sin aire incluido vs Presión aplicada	185
FIGURA 4.45 Gráfica correlación de Resistencia a compresión concreto con aire incluido vs Presión aplicada.....	186

INDICE DE TABLAS

CAPITULO II

TABLA 2.1 Propiedades más importantes del concreto endurecido	41
TABLA 2.2 Efecto del Aire Incluido sobre las Propiedades del Concreto.....	43
TABLA 2.3 Mecanismos de daño en el concreto, Durabilidad y Patología del concreto	49
TABLA 2.4 Relación agua/material cementante máxima y resistencia de diseño mínima para varias condiciones de exposición	57
Tabla 2.5 Tiempo de curado requerido para producir un sistema discontinuo de poros capilares en el concreto, asumiendo curado húmedo continuo	65
TABLA 2.6 Relación de la permeabilidad del concreto con el coeficiente de permeabilidad y la profundidad de penetración.....	79
TABLA 2.7 Clases de exposición y especificación máxima y media de profundidad de penetración hormigón	81
TABLA 2.8 Categorías y clases de exposición	82
TABLA 2.9: Condiciones de deterioro y recubrimiento mínimo	82

CAPITULO III

TABLA 3.1 Límites de graduación de agregado fino.....	95
TABLA 3.2 Tamaño de la muestra de ensayo agregado grueso	96
TABLA 3.3 Masa mínima para la muestra de ensayo	102
TABLA 3.4 Tamaño de la Muestra para Agregado Grueso	110
TABLA 3.5 Edad de los especímenes y tolerancias permitidas para su ruptura.....	111
TABLA 3.6 Revenimientos Recomendados para Varios Tipos de Construcción.....	113
TABLA 3.7 Cálculo de resistencia requerida cuando no hay datos disponibles de S	114
TABLA: 3.8 Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado	115
TABLA 3.9 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.....	116
TABLA 3.10 Resultados ensayo de resistencia a compresión a 28 días.....	139
TABLA 3.11 Resultados de ensayos en mezcla fresca.....	139

CAPITULO IV

TABLA 4.1 Resultados de prueba de permeabilidad concreto sin aire incluido (SAI) y concreto con aire incluido (CAI)	169
TABLA 4.2 Resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad, edad de los ensayos y presión aplicada concreto con relación agua/cemento 0.40 con aire incluido (SAI).....	179
TABLA 4.3 Resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad, edad de los ensayos y presión aplicada concreto con relación agua/cemento 0.40 con aire incluido (CAI)	179
TABLA 4.4 Resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad, edad de los ensayos y presión aplicada concreto con relación agua/cemento 0.50 sin aire incluido (SAI).....	180
TABLA 4. 5 Resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad, edad de los ensayos y presión aplicada concreto con relación agua/cemento 0.50 con aire incluido (CAI)	180
TABLA 4.6 Resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad, edad de los ensayos y presión aplicada concreto con relación agua/cemento 0.60 sin aire incluido (SAI).....	181

TABLA 4.7 Resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad, edad de los ensayos y presión aplicada concreto con relación agua/cemento 0.60 con aire incluido (CAI)	181
TABLA 4.8 Resultados obtenidas en los ensayos de resistencia a compresión a los 28 días para concreto sin aire incluido (SAI)	183
TABLA 4.9 Resultados obtenidas en los ensayos de resistencia a compresión a los 28 días para concreto con aire incluido (CAI).....	184
TABLA 4.10 Profundidad de penetración y Resistencia a compresión obtenidas a diferente edad de curado concreto sin aire incluido	185
TABLA 4.11 Profundidad de penetración y Resistencia a compresión obtenidas a diferente edad de curado concreto con aire incluido.....	186

ABREVIATURAS EMPLEADAS

ACI: American Concrete Institute. (Instituto Americano del Concreto)

ASTM: American Society of Testing and Materials (Asociación Americana de Pruebas y Materiales)

F´c: Resistencia Mínima a la Compresión

NTC: Norma Técnica Colombiana

UNE- EN: Una Norma Española – European Norm.

ISCYC: Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto

PSI: Pounds per square inch (libra-fuerza por pulgada cuadrada)

EHE: Instrucción Española del Hormigón Estructural.

A/C: Relación Agua/Cemento.

SAI: Sin Aire Incluido

CAI: Con Aire Incluido

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

En toda obra civil uno de los requisitos importantes es que la infraestructura sea durable ya que estas se verán expuestas a diversos factores del medio los cuales causan deterioro en la estructura. Esta investigación se centra en el estudio de la permeabilidad del concreto, utilizando el Método basado en la profundidad de penetración de agua bajo presión de agua empleando para la elaboración de los ensayos cemento tipo GU el cual está regido por la norma ASTM C-1157, dichos ensayos se elaboraron bajo condiciones de diferentes relaciones agua/cemento esto con el fin de ver la variación de la permeabilidad con respecto a esta variable, el objetivo principal consistió en obtener valores de penetración de agua en la matriz del concreto hidráulico, bajo determinadas presiones de 25 psi, 60 psi, 110 psi a las cuales el concreto puede estar expuesto dependiendo del ambiente al cual la estructura estará sometida. Los ensayos de permeabilidad al agua se realizaron bajo una columna de agua a presión cuyo procedimiento se encuentra establecido por la norma española UNE EN 12390-8. La permeabilidad, es un fenómeno por el cual se produce el movimiento de un fluido a través del concreto, como consecuencia de una presión exterior, que se genera, la mayoría de las veces por la altura del nivel del agua sobre un punto considerado.

El método de profundidad de penetración permite evaluar la impermeabilidad del concreto al agua directamente vinculado con la relación agua/cemento, en otros países, se considera una prueba determinante de la durabilidad del concreto, este es aplicado como un ensayo de control de calidad cuando el concreto va estar sometido a ambientes severos, en nuestro medio ha sido poco estudiado ya que no se cuenta con suficiente información, esta investigación permitirá conocer valores de permeabilidad del concreto hidráulico en condiciones locales, para lo cual se contara con el apoyo de la Fundación ISCYC (Instituto Salvadoreño del Cemento y del concreto).

La realización del presente trabajo de graduación se llevó a cabo en cinco capítulos. El primer capítulo se define como generalidades, en el cual se hace la presentación del problema se exponen los antecedentes, planteamiento del problema, la definición de los objetivos del estudio, alcances, limitaciones y justificación. El segundo capítulo constituye la recopilación bibliográfica. En el capítulo III se describe la metodología que se utiliza para la realización de los ensayos de laboratorio desde el control de calidad de los agregados, diseños de mezcla, procedimiento y realización de los ensayos de permeabilidad. En el capítulo IV se hace la presentación y análisis de los ensayos de permeabilidad, finalizando con el capítulo V en cual se presentan las conclusiones y recomendaciones.

1.2 ANTECEDENTES

En los últimos años, la durabilidad del concreto ha sido uno de los temas más estudiados, por su incidencia en la seguridad pública, la economía, y en el aspecto social; entre otras causas por esta razón, la mayoría de los códigos estructurales en el mundo, desde hace algún tiempo contemplan la durabilidad como factor crítico de diseño.¹

La permeabilidad del concreto tiene una relación directa con su durabilidad, mas no así la medición de esta continúa siendo en cierta forma, una medida muy especializada;² en los laboratorios de concreto de nuestro país no se realiza la prueba de permeabilidad debido a que no cuentan con equipo para realizarla y a las pocas especificaciones que existen referentes a la permeabilidad del concreto al agua.

El Instituto Americano del Concreto (ACI, por sus siglas en inglés) al igual que en las normas de la Sociedad Americana de Ensayos de Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) no mencionan un método normalizado para medir la permeabilidad al agua del concreto; se pueden mencionar algunas normas técnicas desarrolladas por diferentes países como lo son la Norma Técnica Colombiana 4483 “Método de ensayo para medir la permeabilidad del concreto al agua”, este comprende la determinación de la permeabilidad del concreto endurecido por dos procedimientos el de flujo constante y profundidad de penetración; la comunidad europea por su parte cuenta con la norma UNE-EN 12390-8 “Profundidad de penetración de agua bajo presión”, este método se emplea para determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión en concreto endurecidos que han sido curados en agua.

Con permeabilidad se hace referencia a la cantidad de migración de agua a través del concreto o mortero cuando el agua se encuentra a presión; de igual forma, se puede

¹ Norma Técnica Colombiana NTC 5551; 2007; Concretos. Durabilidad de estructuras de concreto.

² German Hermida Ph. D; Concreto Impermeable, Sika Colombia S.A; oct-vo-198-10/2014

definir como la capacidad del concreto de resistir la penetración de agua u otras sustancias (liquido, gas, iones, etc.).³

Conocer la permeabilidad en el concreto es muy útil para tener un mejor control de calidad en estructuras que estarán expuestas a los diferentes ambientes. Es por eso que a nivel mundial se han realizado investigaciones sobre la permeabilidad del concreto, en las revistas de concreto y cemento se encuentran artículos relacionados al tema de la permeabilidad a sustancias liquidas y en estado gaseoso. En la actualidad existen muchos métodos para medir la permeabilidad, estos se pueden dividir en: Los métodos basados en la aplicación de presión, métodos basados en las propiedades eléctricas del concreto; y métodos basados en la medida del ingreso de sustancias al interior de la matriz cementante.

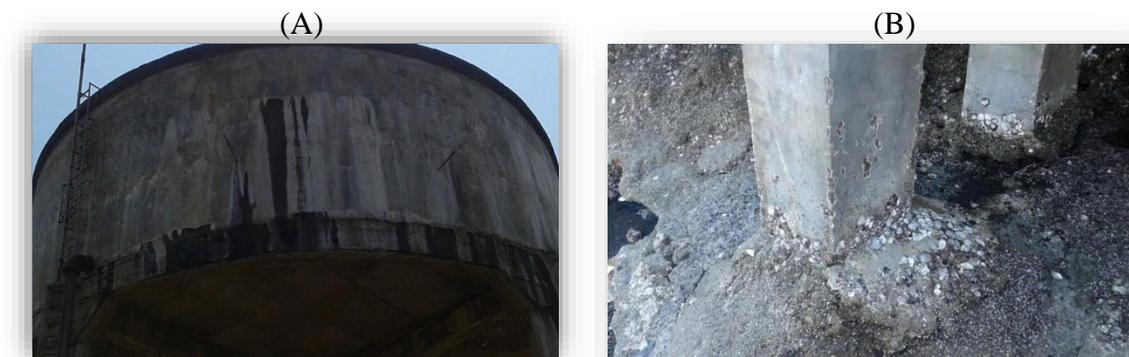
A pesar de la importancia, no se ha desarrollado a profundidad el tema para determinar valores de permeabilidad admisibles del concreto ; sin embargo en el año 2013 se llevó a cabo un trabajo de grado de la Universidad de El Salvador que lleva por título “Adaptación de un Método para determinar la Permeabilidad ”el cual con el apoyo de la Fundación ISCYC se logró adaptar, reproducir y utilizar un equipo para medir la permeabilidad del concreto al agua, dicho equipo fue diseñado por el Ingeniero Hemant Kumar Bhagoria y ha sido utilizado en obras de ferrocarriles de la India con este equipo se logra determinar la permeabilidad del concreto de una forma sencilla y práctica.

³ Sánchez de Guzmán, Diego. Tecnología del Concreto. 1999.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a que la construcción de las estructuras de concreto está siendo cada día más exigente se hace indispensable profundizar en el diseño y en las especificaciones de las mezclas de concreto aplicando conceptos de calidad en las construcciones bajo parámetros de durabilidad. En nuestro país generalmente como un indicador de la durabilidad del concreto ha sido utilizada la resistencia a compresión; sin embargo, cada día se hace más evidente que por sí misma no determina la durabilidad del concreto.

Con frecuencia se puede observar problemas de deterioro en todo tipo de estructuras esto se debe a que estas se encuentran están expuestas a las acciones de agentes agresivos de origen externos e internos abonándole también los malos procesos constructivos, la permeabilidad es una de las principales causas del deterioro, debido a que el paso del agua a través de una estructura de concreto genera dos problemas, el primero es la pérdida o salida del líquido, el cual puede tener un efecto contaminante o no, dependiendo de la naturaleza del mismo; el segundo es el ingreso de agentes agresivos disueltos en el agua que conducen con el tiempo al deterioro de la estructura.⁴ (Ver foto 1.1)



Fuente: Propia de la Investigación

Figura 1.1 Problemas debido al paso del agua a través de una estructura de concreto (A) Pérdida de líquido en tanque elevado de agua potable, (B) Deterioro de estructura causada por el ingreso de cloruros.

⁴ Norma Técnica Colombiana 4483; 1998; Concretos. Método de ensayo para determinar la permeabilidad

A causa de la importancia que tiene la permeabilidad del concreto al agua como parámetro para el diseño de las estructuras de concreto principalmente en el diseño de obras hidráulicas y otros tipos de construcciones que deben estar en contacto con el agua, nos motiva a ensayar el Método de profundidad de penetración para determinar la permeabilidad del concreto al agua, a fin de aportar nuevas experiencias que nos permita tener un mayor conocimiento del comportamiento del concreto sometido a presiones de agua. En esta investigación se pretende determinar valores de permeabilidad que se obtendrán a través de un ensayo de laboratorio bajo condiciones de diferentes relaciones agua/cemento y así poder tener valores en términos de profundidad de penetración admisible como un parámetro que describe la calidad del concreto y así darle una herramienta adicional al sector construcción y al desarrollo de esta temática.

1.3.1 ENUNCIADO DEL PROBLEMA

No existe una investigación local con valores de permeabilidad al agua en mezclas de concreto hidráulico, siendo esta propiedad un parámetro que permite la evaluación de la durabilidad de las estructuras sometidas al deterioro en los diferentes tipos de ambiente que se encuentran expuestas.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL: Determinar valores de permeabilidad del concreto hidráulico al agua mediante el ensayo de Profundidad de Penetración de agua de agua bajo presión.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- ✓ Determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión en concreto hidráulico endurecido.

- ✓ Elaborar especímenes para obtener valores de permeabilidad del concreto, en la dosificación de las mezclas se considerarán tres relaciones agua/cemento, 0.40, 0.50, 0.60

- ✓ Comparar los resultados de las pruebas de laboratorio obtenidos, con las normas UNE EN 12390-8 “Profundidad de penetración de agua bajo presión” y NTC 4483 “Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua”.

- ✓ Presentar recomendaciones de control de permeabilidad

1.5 ALCANCES

- ✓ El estudio comprende la determinación de la permeabilidad del concreto al agua haciendo uso del equipo con el que cuenta la Fundación ISCYC, elaborando una cantidad de especímenes para cada relación agua/cemento y así obtener parámetros de permeabilidad; para la elaboración de los especímenes se utilizó cemento el cual está regido por la norma ASTM C- 1157 tipo GU, por ser el de mayor utilización en la industria de la construcción.

- ✓ En los diseños de mezclas se mantuvieron fijas diversas variables, como por ejemplos mismos agregados, mismo tipo de cemento, mismas condiciones de curado, esto con el fin de que no afecten los resultados que se pretenden obtener.

- ✓ Para la realización de la investigación, se elaboró seis diseños de mezclas para concretos con aditivo inclusor de aire y sin aditivo con una variación en la relación a/c de, 0.10, empezando desde una relación de 0.40 hasta una relación de 0.60. Para la realización de ensayo de permeabilidad se elaboraron una cantidad de 3 probetas de 12 x 20 cms por cada diseño de mezcla.

- ✓ Se ensayó 12 cilindros de 15x 30 cms, para cada diseño de mezcla, los cuales se elaboraron y curaron según norma ASTM C-31 para evaluar la resistencia del concreto.

1.6 LIMITACIONES

- ✓ Para la presente investigación solamente se hicieron ensayos de permeabilidad al agua a especímenes de prueba y no se harán pruebas in-situ, ni extracción de núcleos, tampoco se determinó el coeficiente de permeabilidad.

- ✓ No se cuenta con información técnica por parte de los laboratorios locales, en cuanto a la realización de la prueba de permeabilidad del concreto al agua ya que ninguno realiza esta prueba.

- ✓ La Sociedad Americana para la Prueba de Materiales (ASTM) por sus siglas en inglés, como ente normalizador no posee hasta la fecha una norma para determinar la permeabilidad del concreto al agua, por lo tanto, no se cuenta con un método normalizado de aceptación general para la realización de esta prueba,

1.7 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la demanda de diseñar concretos con alta resistencia y durabilidad, que soporte las condiciones por la cual fue diseñado, sin sufrir deterioros durante su vida útil prevista, es el objetivo principal en toda obra civil. La durabilidad del concreto es un tema de mucha importancia debido a que su significado trasciende el nivel de servicio del concreto o de las estructuras de concreto, además del gran impacto económico en el sector de la construcción.

Diversos factores afectan la vida útil del concreto y esto se debe al medio que ha sido expuesto, entre los requisitos que deben de cumplir las estructuras se debe garantizar que estas posean la durabilidad necesaria para permanecer en servicio a lo largo de todo el periodo de vida útil para el que han sido proyectadas, la durabilidad de las estructuras de concreto hidráulico está muy influenciada por su permeabilidad, cuando se tienen concretos de alta permeabilidad esto beneficia a los agentes agresivos a que penetren en la matriz, acelerando así el deterioro de las estructuras, para la mayor parte de las aplicaciones en construcción de concreto reforzado la penetración del agua se califica como un problema que puede comprometer el funcionamiento de la estructura, el acceso de humedad y el aire tiene como resultado la corrosión del acero de refuerzo, lo cual origina grietas en los elementos estructurales, reduciendo así la vida útil de las estructuras, la aparición de estos problemas genera costos mucho más altos para su reparación los cuales pueden ser minimizados teniendo concretos más durable. La permeabilidad en gran medida determina la vulnerabilidad del concreto ante agentes agresivos disueltos, que pueden ocasionar daño o desintegración al concreto, como al acero de refuerzo; por ello un concreto durable, deberá ser relativamente impermeable, por lo tanto medir la permeabilidad del concreto se hace necesario ya que los parámetros obtenidos permitirán determinar cuan rápidamente las sustancias destructivas pueden penetrar en el concreto, y cuan fácilmente el material puede ser lavado rápidamente del concreto ⁵ y así desarrollar esta temática para alcanzar mayor conocimiento del

⁵ Enrique Rivva L; Durabilidad y Patología del concreto; 2006.

fenómeno realizando los respectivos ensayos para obtener valores de permeabilidad acorde a nuestros tipos de cemento y agregados que permita tener una referencia, ya que este método de prueba proporciona medir la capacidad del agua que penetra en el concreto de esta forma reducir gastos en reparaciones de obras civiles dañadas por la penetración de fluidos.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 EL CONCRETO.⁶

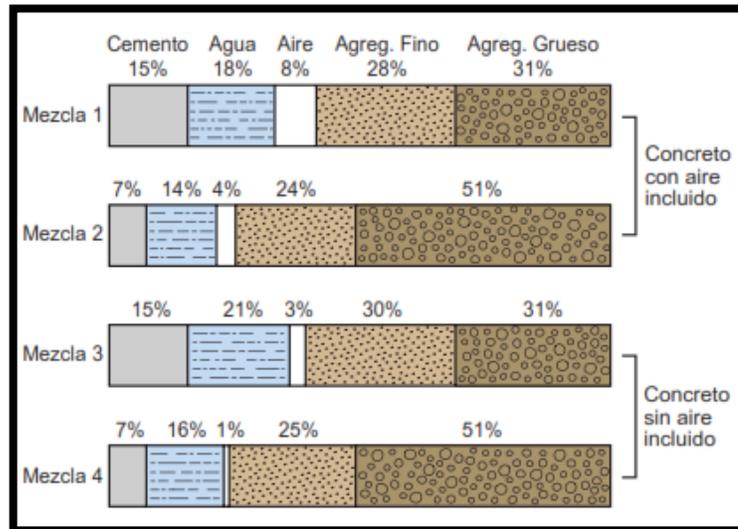
El concreto es básicamente una mezcla de componentes: agregados (arena y grava o piedra triturada), y algún aglutinante, también conocido como pasta. El aglutinante, compuesto de cemento Portland, agua y aire, une a los agregados para formar (luego de fraguado), una masa semejante a una roca, esto ocurre, debido a que el aglutinante endurece por una reacción química entre el cemento y el agua.

2.1.1 COMPONENTES BÁSICOS DEL CONCRETO HIDRÁULICO.

Los agregados generalmente se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar a ser desde 15 mm hasta los 10 mm aproximadamente; los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla No.16 y pueden llegar hasta 150 mm. El tamaño máximo del agregado que se emplea comúnmente es el de 19mm o el de 25mm.

El aglutinante está compuesto de cemento Portland, agua y aire atrapado o incluido intencionalmente. Por lo general, la pasta constituye: entre el 25% al 40 % del volumen total de concreto. Las siguientes gráficas muestran cuatro tipos de mezclas distintas (con aire y sin aire incluido), en donde se muestran los porcentajes ideales en donde el volumen absoluto del cemento está comprendido usualmente entre el 7% y el 15% y el agua entre el 14% y el 21%. En concretos con aire incluido, este puede representar hasta el 8% del volumen de la mezcla, dependiendo del tamaño máximo del agregado grueso. Como los agregados constituyen aproximadamente entre 60% a 75% del volumen total del concreto, su selección es importante (la selección debe ser importante no por el porcentaje del volumen, sino porque son los elementos fundamentales).

⁶ Boletín de Ingeniería EB201, Diseño y Control de mezclas de concreto, PCA



FUENTE: Boletín de Ingeniería EB201, Diseño y Control de mezclas de concreto, PCA

FIGURA 2.1 Variación entre las proporciones usadas en concretos convencionales, en volumen absoluto.

2.1.2 EL CONCRETO Y SUS PROPIEDADES.

La mezcla de concreto, inicialmente de consistencia pastosa, se rigidiza paulatinamente hasta alcanzar un grado de dureza similar al de una piedra natural, debido a la reacción química que se produce entre el cemento y el agua de amasado. La composición de la mezcla se determina racionalmente teniendo en cuenta las propiedades que se esperan alcanzar. Dentro de este conjunto se encuentran:

- **Trabajabilidad:** debe ser posible mezclar el concreto, transportarlo, colocarlo y compactarlo correctamente en encofrados y moldes, con los equipos disponibles en obra, sin que segregue ni exude excesivamente.
- **Resistencia:** debe soportar las acciones a las que estará sometido.
- **Durabilidad:** debe mantener sus propiedades inalterables en el tiempo.
- **Economía:** debe optimizarse el uso de los materiales para lograr las propiedades anteriores al menor costo.

Estas propiedades del hormigón dependen de:

- Propiedades de la pasta (porosidad, relación a/c, productos de hidratación).
- Propiedades de los agregados (tipos de roca, minerales constituyentes).
- Interacción entre pasta y agregados.
- Elaboración, transporte, colocación, curado, etc.

2.1.3 INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE AGUA EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO

El agua es un componente esencial en las mezclas de concreto y morteros, pues permite que el cemento desarrolle su capacidad ligante.

Para cada cuantía de cemento existe una cantidad de agua del total de la agregada que se requiere para la hidratación del cemento; el resto del agua solo sirve para aumentar la fluidez de la pasta para que cumpla la función de lubricante de los agregados y se pueda obtener la manejabilidad adecuada de las mezclas frescas.

La influencia del contenido de agua se puede analizar desde los dos estados principales del concreto:

-En estado fresco

El agregado de agua aumentará la fluidez del hormigón.

-En estado endurecido

Es donde tiene sus efectos más negativos: la cantidad de agua para hidratar el cemento es de aproximadamente el 25 % del peso del cemento. Con relaciones a/c tan bajas no se puede lograr un hormigón trabajable, con lo cual se debe agregar mayor cantidad de agua de la necesaria para la hidratación. El agua sobrante tenderá a ser eliminada de la masa del hormigón por evaporación, una parte de los espacios donde se encontraba serán ocupados por los compuestos de hidratación del cemento, mientras que el resto de dichos espacios permanecerán vacíos. Esto genera el aumento de la porosidad del concreto y consecuentemente, la disminución de la resistencia.

Por lo tanto, la calidad del concreto endurecido es fuertemente influenciada por la cantidad de agua usada con relación a la cantidad de cemento.

PROPIEDADES MAS IMPORTANTES POR DURABILIDAD		
Tipo de afectación	Proceso deletéreo	Propiedad del Concreto
Ataque físico	Contracción Desgaste Erosión Abrasión Acciones de temperaturas extremas Congelamiento y deshielo Fuego	Contracción por secado Módulo de elasticidad Resistencia al desgaste Permeabilidad Succión Capilar Absorción
Ataque físico - químico	Lixiviación Ataque ácido Ataque de sulfatos	Permeabilidad Succión Capilar Absorción
Acciones deletéreas internas	Reacción álcali-agregado Reacción álcali-carbonato	Permeabilidad Succión Capilar Absorción
Ataque electro - químico	Corrosión de armaduras Carbonatación Cloruros	Permeabilidad Succión Capilar Absorción

TABLA 2.1 Propiedades más importantes del concreto endurecido

2.2 CONCRETO CON AIRE INCLUIDO

Uno de los grandes avances en la tecnología del concreto fue el desarrollo del concreto con aire incluido (incorporado) en la mitad de la década de 30. Hoy en día, la incorporación del aire se recomienda para casi todos los concretos, principalmente para mejorar la resistencia a congelación-deshielo de concretos expuestos al agua y a los descongelantes. Sin embargo, la inclusión de aire presenta otros beneficios para el concreto fresco y el concreto endurecido.

El concreto con aire incluido se produce con el uso de un cemento con inclusor (incorporador) de aire o con la adición de aditivo inclusor de aire durante el mezclado. El aditivo inclusor de aire estabiliza las burbujas formadas durante el proceso del mezclado, realiza la incorporación de burbujas de varios tamaños con la disminución de la tensión superficial del agua de mezcla, impide la coalescencia de las burbujas y ancla

las burbujas en el cemento y en las partículas de agregados. Los aditivos inclusores de aire aniónicos son hidrófobos (repelen el agua) y están cargados eléctricamente (los aditivos no iónicos también están disponibles).

Cemento cargado positivamente, lo que ayuda la estabilización de las burbujas. El aditivo inclusor de aire forma una película resistente, repelente al agua, similar a una Película de jabón, con resistencia y elasticidad suficientes para contener y estabilizar las burbujas de aire y prevenir que se junten. La película hidrófoba también mantiene el agua fuera de las burbujas. La agitación y el amasamiento promovidos por el mezclado mecánico dispersan las burbujas de aire. Las partículas de agregado fino también actúan como rejilla tridimensional para ayudar a sostener las burbujas en la mezcla.

El concreto sin aire incluido con un tamaño máximo de agregado de 25 mm (1 pulg.) tiene un contenido de aire de aproximadamente 11/2 %. La misma mezcla con aire incluido necesita un contenido de aire de 6% (incluyendo vacíos “atrapados” mayores y vacíos “incorporados” menores) para resistir a las condiciones de exposición a congelación severa.



Fuente: Boletín de Ingeniería EB201, Diseño y Control de mezclas de concreto, PCA

Figura. 2.2 Sección pulida de un concreto con aire incluido, vista a través de microscopio.

2.2.1 PROPIEDADES DEL CONCRETO CON AIRE INCLUIDO

Las principales propiedades influenciadas por la incorporación de aire se enseñan en las secciones siguientes. Un breve resumen de otras propiedades se presenta en la Tabla 2.2

PROPIEDADES	EFECTO
Abrasión	Poco efecto: el aumento de la resistencia aumenta la resistencia a la abrasión
Absorción	Poco efecto
Acabado	Reducción debido al aumento de cohesión
Adherencia al acero	Disminución
Calor de hidratación	Poco efecto
Calor específico	Sin efecto
Cohesión	Aumento de cohesión afectando el acabado
Conductividad térmica	Disminuye del 1% al 3% para el aumento de cada punto porcentual de aire.
Demanda de agua del concreto para un mismo revenimiento (asentamiento)	Disminuye con el aumento del contenido de aire del 3 al 6 kg/m ³ por cada punto porcentual de aire.
Descascaramiento	Reducción significativa
Descascaramiento por descongelantes	Reducción significativa
Difusividad térmica	Disminuye del 1.6% con el aumento de cada punto porcentual de aire.
Estanquidad	Aumenta un poco por la disminución de la relación agua/ cemento
Fatiga	Poco efecto
Fluencia	Poco efecto
Masa específica	Reduce con el aumento del aire
Módulo de elasticidad	Con el aumento de aire reduce de 7,300 a 14,100 kg/cm ² para cada porcentual de aire

Permeabilidad	Poco efecto. La disminución de la relación agua/cemento reduce la permeabilidad
----------------------	---

Fuente: Boletín de Ingeniería EB201, Diseño y Control de mezclas de concreto, PCA

TABLA 2.2 Efecto del Aire Incluido sobre las Propiedades del Concreto

La resistencia del concreto endurecido a la congelación y al deshielo en la condición húmeda se mejora muchísimo con el uso intencional de aire incluido, aun cuando varios descongelantes están involucrados. Una prueba convincente de la mejoría de la durabilidad por la incorporación del aire. Como el agua de los concretos en medios húmedos se congela, se producen presiones osmótica e hidráulica en las capilaridades y poros de la pasta de cemento y en el agregado. Si la presión supera la resistencia a tracción (tensión) de la pasta o del agregado, la cavidad va a dilatarse y romperse. El efecto acumulativo de los ciclos sucesivos de congelación-deshielo y la ruptura de la pasta y del agregado puede causar una expansión significativa y el deterioro del concreto. Este deterioro es visible en la forma de fisuras (agrietamiento), Descascaramiento y desmoronamiento (Powers (1965) y Pigeon y Pleau (1995) revisaron extensivamente el mecanismo de acción de la congelación. Las presiones hidráulicas se causan por la expansión de 9% del agua congelada. En este proceso, los cristales de hielo en crecimiento sustituyen al agua que no se ha congelado.

Aunque los aditivos inclusores de aire no son clasificados como plastificantes, el aire incluido mejora la trabajabilidad del concreto cuando se encuentra en estado plástico, este efecto es particularmente efectivo en mezclas pobres de cemento, las cuales por lo general son bastante ásperas y difíciles de moldear.

La gráfica siguiente ilustra la resistencia versus la relación agua cemento para concretos con aire incluido y sin aire.

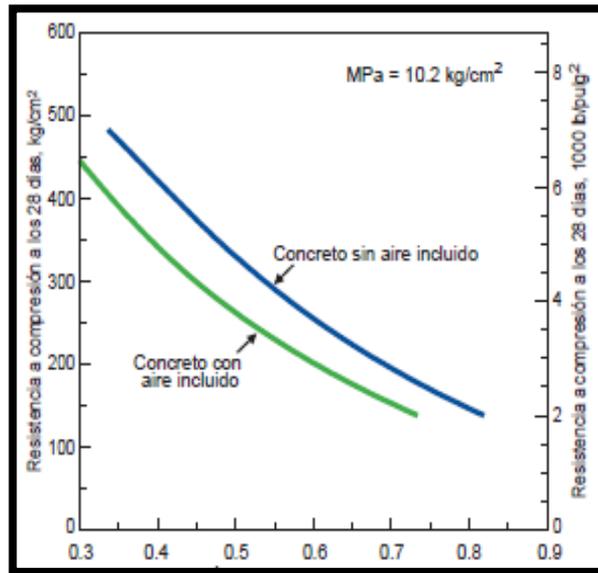


FIGURA 2.3: Resistencia vs. Relación a/c, con agregado grueso de tamaño máximo nominal de 19 mm a 25 mm (¾" a 1") cilindros curados a 28 días adaptado de la tabla 9.3 del ACI. 211.1 y hower 1995

2.3 DURABILIDAD DEL CONCRETO

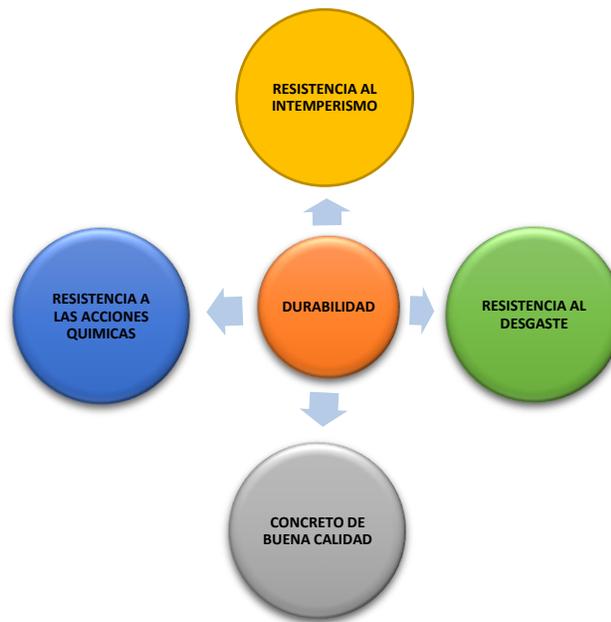
El código ACI 201.2 del Instituto Americano del Concreto, define la durabilidad del concreto como la capacidad para resistir la acción del clima, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro.

La conclusión que se desprende de la definición anterior, es que la durabilidad no es un concepto absoluto que dependa solo del diseño de mezcla, sino que está en función del ambiente de exposición y las condiciones de trabajo a las cuales lo sometamos, en este sentido, no existe un concreto “durable” por sí mismo, ya que las características físicas, químicas y mecánicas que pudieran ser adecuadas para ciertas circunstancias no necesariamente lo habilitan para seguir siendo “durable” bajo condiciones diferentes.

La durabilidad no es un concepto absoluto que depende sólo del diseño de mezcla, sino que está en función del ambiente y las condiciones de trabajo a las cuales lo sometamos.

2.3.1 CONCEPTO MODERNO DE LA DURABILIDAD.

Gracias al mejor conocimiento del proceso de daño de líquidos y gases agresivos en el concreto, se ha pasado de la cualificación a la cuantificación de la vida útil esperada de una edificación. El problema de la durabilidad de las estructuras de concreto debe considerar los siguientes planteamientos básicos, por una parte, necesitamos conocer el grado de agresividad del ambiente y por otra la calidad del concreto.



Fuente: Propia de la investigación

FIGURA 2.4: Durabilidad del concreto.

2.3.2 OBTENCIÓN DE LA DURABILIDAD

Una estructura durable puede conseguirse si se considera todos los posibles factores de degradación y se actúa consecuentemente en cada una de las fases de proyecto, ejecución y uso de la estructura. El incremento de la durabilidad debe tener en consideración que en una estructura puede haber diferentes elementos portantes sometidos a distintos tipos de ambientes, o diversas formas de ataques.

2.3.3 DURABILIDAD EN LA FASE DEL PROYECTO

El proyecto de una estructura de concreto debe incluir las medidas necesarias para que la estructura alcance su vida útil estimada, de acuerdo con las condiciones de agresividad ambiental y con el tipo de estructura. Para ello se debe incluir una estrategia de durabilidad, incluyendo la agresividad a la que estará sometida la estructura, la cual se identificará por el tipo de ambiente.

En la protección frente a los ataques químicos agresivos, las medidas preventivas suelen ser las más eficaces y menos costosas. Por ello, la durabilidad es una cualidad que debe tenerse en cuenta durante la realización del proyecto, estudiando la naturaleza e intensidad potencial previsible del medio agresivo y seleccionando las formas estructurales, los materiales, las dosificaciones y los procedimientos de puesta en obra más adecuados en cada caso.

2.3.4 DURABILIDAD EN LA FASE DE EJECUCIÓN

La buena calidad de la ejecución de la obra y, especialmente, del proceso de curado, tienen una influencia decisiva para conseguir una estructura durable.

Para obtener una buena estrategia de durabilidad se debe incluir al menos los siguientes aspectos:

Selección de formas estructurales adecuadas

- ✓ Consecución de una calidad adecuada del concreto y, en especial de su capa exterior.
- ✓ Adopción de un espesor de recubrimiento adecuado para la protección de las armaduras.
- ✓ Control del valor máximo de abertura de fisuras.
- ✓ Disposición de protecciones superficiales en el caso de ambientes muy agresivos.
- ✓ Adopción de medidas contra la corrosión de las armaduras
- ✓ Disminución al máximo de la permeabilidad.

Un principio básico para el logro de una estructura durable consiste en obtener, en la medida de lo posible, el máximo de aislamiento respecto al agua. La mayoría de los ataques que sufre el concreto están relacionados con ésta. Así, en algunos casos, provienen de sustancias disueltas que penetran a través del concreto, caso de los ataques químicos. En otras ocasiones, es la propia agua la que provoca el deterioro. Finalmente, hay veces que, si bien el agua no es la causa única o suficiente, si es un elemento necesario para que se desarrollen los procesos de degradación (corrosión).

2.4 FACTORES DE DETERIORO DEL CONCRETO:

El deterioro del concreto se puede ver adicionalmente afectado por las consecuencias de tres factores:

2.4.1 PRESIÓN

La presión atmosférica y el régimen de vientos tienen incidencia sobre la durabilidad al contribuir al deterioro debido a la erosión de partículas arrastradas por el viento; que pueden promover los ciclos de humedecimiento y secado; o afectar los ciclos de enfriamiento y calentamiento de la superficie de la tierra. La acción de la presión del medio (líquido, sólido, o gaseoso) en estructuras sumergidas en el suelo o agua puede ser muy importante por cuanto se promueve la penetración de elementos que pueden percolar el concreto.

2.4.2 TEMPERATURA

Cuando se hace referencia a la agresividad de los procesos físicos, mecánicos, químicos o biológicos del concreto, se suele olvidar el hacer mención de la temperatura. Sin embargo, el efecto de la temperatura, es muy importante por cuanto ella incide notablemente en la velocidad con la cual pueden ocurrir los fenómenos de deterioro en el concreto.

Las reacciones químicas usualmente son aceleradas por el aumento de la temperatura. Una regla general es que: Un aumento de la temperatura de 10°C, dobla la velocidad de

la reacción. Por ello, los climas tropicales (cálidos y húmedos), se consideran más agresivos que los demás. Así como lo es el caso de nuestro país, el cual se tiene un clima tropical.

2.4.3 HUMEDAD:

La presencia de agua es indispensable para que se genere deterioro y por lo tanto el estado de humedad en el concreto, más que en la atmósfera circundante es el factor más importante para considerar. En la Tabla 2.3 se presentan ejemplos de relaciones entre la humedad relativa y la susceptibilidad de mecanismos de deterioro al interior del concreto.

HUMEDAD RELATIVA EFECTIVA		EJEMPLO DE MECANISMO DE DAÑO EN EL CONCRETO				
		Congelamiento	Carbonatación	Ataque químico	Corrosión de la armadura	
					Carbonatado	Con cloruros
Muy baja	< 45%	Insignificante	Ligero	Mínimo	Mínimo	Mínimo
Baja	45-65%	Insignificante	Alto	Mínimo	Ligero	Ligero
Media	65-85%	Ligero	Medio	Mínimo	Alto	Alto
Alta	85-98%	Medio	Ligero	Ligero	Ligero	Alto
Saturación	>98 %	Alto	Insignificante	Alto	Ligero	Ligero

Tabla 2.3 Mecanismos de daño en el concreto, Durabilidad y Patología del concreto, Sánchez de Guzmán, Asocreto.

2.4.4 EL AGUA COMO AGENTE DE DETERIORO.⁷

El concreto no es un material vulnerable solamente a los procesos de deterioro físico y químico asociados con el agua, por lo tanto, es conveniente revisar en general las características del agua que la hacen el principal agente de destrucción de los materiales.

⁷ Monteiro Paulo J.M, Metha Kumar P. Concreto: Estructura, Propiedades y Materiales

En forma de agua de mar, agua subterránea, ríos, lagos, lluvia, nieve y vapor, el agua es indudablemente el fluido más abundante en la naturaleza. Siendo pequeñas las moléculas del agua son capaces de penetrar poros o cavidades extremadamente finos. Como solvente, el agua es notoria por su capacidad para disolver más sustancias que ningún otro líquido conocido. Esta propiedad cuenta para la presencia de muchos iones y gases en algunas aguas, que, a su vez, se vuelven el instrumento para causar la descomposición química de los materiales sólidos. Puede notarse también que el agua tiene el calor más alto de vaporización entre los líquidos comunes, por lo tanto, a temperaturas ordinarias tiene la tendencia a permanecer en un material en estado líquido y no evaporarse y dejar seco el material.

En los sólidos porosos, los movimientos internos y los cambios de la estructura del agua se saben que causan cambios volumétricos de ruptura de muchos tipos.

2.4.5 PROCEDENCIA Y EFECTO DE LA PENETRACIÓN DE AGUA EN EL CONCRETO

2.4.5.1 PROCEDENCIA DEL AGUA

En las construcciones en general, y en las de concreto en particular, la presencia de agua o humedades tienen los siguientes orígenes:

- La humedad natural del suelo, aspirada por las fuerzas capilares.
- El agua empleada en la preparación del concreto.
- La humedad de la atmósfera, condensada en el interior o en la superficie del hormigón.
- La lluvia, que penetra, más o menos, en el interior del macizo.
- La presión y penetración del agua acumulada en depósitos, embalses, etc., creados para esta finalidad.
- La creada por la acumulación de agua, procedente de lluvia, filtraciones, etc., detrás y en contacto con muros de contención.
- Las humedades accidentales en las construcciones, como consecuencia de fugas en las canalizaciones, absorción de agua empleada en limpieza de suelos, etc.

- **Humedad natural del suelo**

La existencia de una capa freática y el efecto de las fuerzas capilares que hacen elevar el agua por encima de la misma crea una situación de humedad, más o menos intensa, pudiendo llegar a actuar a presión.

El concreto en contacto con el suelo da lugar, por capilaridad, a la absorción de agua, que puede tener mucha importancia.

Humedad de construcción

El agua excedente empleada en el amasado del concreto, según hemos indicado anteriormente, da lugar a los poros y canales capilares, como consecuencia del proceso de evaporación.

Esta evaporación, en condiciones habituales, es bastante lenta, y del orden de unos cuantos meses.

Dependiente de otras muchas causas (condiciones climáticas, estructura del material y diámetro de los poros, etc.), de una forma general, podemos tomar como duración máxima del secado.

Humedad de absorción y condensaciones

En función del grado higrométrico del aire, de la temperatura y del diámetro de los poros del hormigón, se produce una condensación y absorción del agua procedente del ambiente.

El problema de las condensaciones es, muchas veces, un problema térmico ya que, en ciertas condiciones normales, la cantidad de agua que hay en el aire es sensiblemente constante, pues no se puede desecar de atmósfera.

Ahora bien, si teóricamente, en una atmósfera libre, no se producen condensaciones mientras el grado higrométrico no llega a 100 %, en los poros del concreto hay condensación con grados higrométricos inferiores, y tanto más bajos cuanto más finos son los poros.

Acción de la lluvia.

Es, generalmente, pequeña la absorción en el concreto como consecuencia de la lluvia caída en superficies verticales, ya que la evaporación lo evita.

Puede tener importancia la dirección e intensidad del viento y, sobre todo, el estado de fisuración exterior del hormigón, las juntas.

Tiene más importancia la acción del agua caída en las superficies sensiblemente horizontales.

Presión del agua acumulada en depósitos, embalses, muros, etc.

Globalmente, en obras de ingeniería, puede considerarse que es el agua, en estas situaciones, por permeabilidad o higroscopicidad, la que puede entrar en los muros de concreto, a través de sus poros, grietas, fisuras y juntas, en mayor o menor profundidad, según sea la presión y las demás condiciones estructurales y ambientales.

Como ya hemos indicado, ello dependerá, fundamentalmente, de las condiciones del hormigón endurecido, en cuanto a sus procesos de amasado (granulometría de los áridos, cantidad y clase de cemento, relación a/c), transporte, colocación y curado.

Humedades accidentales.

Muy diversas causas pueden dar lugar a las mismas y, aunque no las consideramos fundamentales en obras de ingeniería, entre las cuales se pueden mencionar, fugas de agua en las canalizaciones o tuberías que van embebidas en el concreto, efectos de condensación en el exterior de conducciones de agua fría, pérdidas de agua en las conducciones o desagües por debajo de las obras de concreto, etc.

2.5 MECANISMOS DE TRANSPORTE EN EL INTERIOR DEL CONCRETO

La penetración de fluidos dentro del concreto determina en buena parte la durabilidad del material. En el caso particular de los líquidos estos pueden penetrar la red porosa del concreto usando principios físicos muy distintos como la permeabilidad, la difusión, la absorción capilar, y la convección.

En el mundo de la construcción el agua puede penetrar el concreto de acuerdo a cualquiera de los mecanismos arriba mencionados, sin embargo, los fenómenos más frecuentes y de mayor preocupación frente a la contención de líquidos o penetración al interior del material son:

- a. Permeabilidad
- b. Absorción Capilar
- c. Difusión

2.5.1 La permeabilidad se refiere al movimiento de un líquido en presencia de un gradiente de presión como es el que tiene lugar en las estructuras de contención de agua, este tema se tratara más a profundidad en el presente capitulo.

2.5.2 La absorción capilar ⁸

Corresponde al desplazamiento de un frente líquido a través de un capilar, como consecuencia de la interacción de las fuerzas de contacto líquido-sólido. Este fenómeno de movimiento de agua tiene lugar en concretos secos o parcialmente saturados.

La penetración de agua al interior del concreto basado en el fenómeno de absorción capilar se considera como el mecanismo básico o más frecuente de transporte de agua en las estructuras de concreto reforzado.

El agua al tocar la superficie de un concreto convencional sufrirá así un efecto de atracción similar al producido por una esponja. Un concreto seco de 28 días de edad con

⁸ Hall, C., "Water Sorptivity of Mortars and Concretes: a review". Magazine of concrete Research.

una relación agua/cemento de 0.60 luego de 3 horas de contacto con el agua (una lluvia) ya ha absorbido 2 L/m. Si este concreto tiene una porosidad del 15% eso significa que el agua ya ha penetrado en algunos puntos hasta 1.2 cm².

La velocidad de penetración por absorción capilar en un concreto seco puede ser del orden de un millón de veces más rápida que el del mismo volumen de agua que atraviesa el mismo concreto bajo un gradiente de presión, es decir por permeabilidad.

Las estructuras de concreto expuestas a ciclos de humedecimiento y secado (lluvia, variación de mareas, variación de altura de niveles freáticos, etc.) sin duda representan un número mayor que aquellas que están en contacto permanente con agua y que además están expuestas a una presión de agua constante.

Sobre la superficie de un cuerpo líquido como el agua, tiene lugar un ordenamiento molecular que se orienta en el plano horizontal debido a la gravedad y a las fuerzas atómicas entre las partículas. Sobre esta superficie de líquido se crea entonces una tensión paralela al plano conocida como tensión superficial.

El fenómeno se ha intentado predecir y modelar durante mucho tiempo, hoy en día una de las formas más aceptadas para describir el movimiento del agua en un medio poroso es la expresión de Hall:

$$I = S \sqrt{t}$$

Dónde:

I = profundidad de penetración (mm)

S = capacidad de absorción, (mm/s^{0.5})

t = tiempo, (s)

Esta expresión predice así la penetración del agua para las primeras horas de contacto entre el medio poroso y el líquido cuando el sólido se encuentra inicialmente seco. Así el parámetro S es una característica del material y se conoce como la Sortividad, que describe la “velocidad” de penetración del fluido.

La sortividad ⁹ del concreto depende al igual que el coeficiente de permeabilidad (K), de las características geométricas de la red porosa del material. Si bien el presente documento se concentra en las propiedades del concreto y la relación entre su composición y la penetración del agua, es necesario señalar que uno de los parámetros que mayor influencia tiene sobre la penetración por absorción capilar es el estado de saturación del material. El avance de agua dentro de la red porosa por absorción capilar solo es posible en concretos, morteros o pastas no saturadas.

El porcentaje de saturación del medio juega un papel fundamental en la velocidad y la cantidad de líquido penetrado.

2.5.3 La difusión corresponde por otro lado al desplazamiento de un compuesto, ión, líquido etc., a través de un medio, debido a una agitación aleatoria a nivel molecular, relacionado este, con la existencia de un gradiente de concentración. La difusión se determina en general sobre concretos saturados. A través de este medio continuo, tiene entonces lugar la difusión de una sustancia.

El parámetro que cuantifica la capacidad de transporte por este mecanismo se denomina coeficiente de difusión D, definido en la primera ley de Fick

$$J_x = D \frac{dC}{dx}$$

Donde J_x es el flujo constituyente en la dirección x y dC/dx es el gradiente de concentración en esa dirección.

Si se considera que el fenómeno de difusión tiene lugar en un poro capilar cilíndrico de radio r, la dimensión l del capilar no tiene ninguna influencia en la velocidad de difusión, siempre que esa dimensión sea suficientemente grande comparada con el recorrido medio de las moléculas. En la práctica, el radio del capilar debe ser mayor que algunas decenas de nanómetros.

Los transportes por difusión pueden ocurrir en fase líquida o gaseosa. El primero involucra el transporte de sustancias en solución en la fase acuosa intersticial, y son

⁹ Velocidad (pendiente) o ritmo de penetración de agua por absorción capilar

ejemplo de este caso el ataque por agua de mar o por ácido carbónico de un suelo rico en materia orgánica.

El transporte de gases en los hormigones, se produce en general por difusión en el aire contenido en los poros y fisuras del material. La difusión en fase gaseosa involucra el proceso de desecación del hormigón ya parcialmente seco transferencia de vapor de agua, así como la penetración de CO₂ y O₂.

2.6 PERMEABILIDAD DEL CONCRETO

2.6.1 DEFINICIÓN DE PERMEABILIDAD

La permeabilidad del concreto, como la de cualquier material, consiste en que este pueda ser atravesado por un fluido (agua, aire, vapor de agua) a causa de una diferencia de presión entre las dos superficies opuestas del material. Depende también de la porosidad de la pasta de cemento y de la porosidad de los agregados, así como de los vacíos causados por una compactación deficiente o por los capilares dejados por el agua de exudación.

Es importante también en relación a lo hermético de las estructuras que retienen líquidos. Además, la penetración de humedad en el concreto afecta sus propiedades de aislamiento térmico.

La permeabilidad no es solamente función de su porosidad, sino que depende también del tamaño, la distribución y la continuidad de los poros. En donde el concreto se ve afectado por las propiedades del cemento.

Para una misma relación agua/cemento, el cemento grueso tiende a producir una pasta de más porosidad que un cemento fino. La composición del cemento afecta la permeabilidad en cuanto a su influencia sobre la rapidez de hidratación, pero el grado final de porosidad y de permeabilidad no se afecta.

Un concreto con baja relación agua/cemento, buena gradación de los agregados, manejable y bien compactado es casi impermeable, por lo tanto, muy durable.

En la tabla 2.4 Se indican algunos valores máximos recomendados de la relación agua/cemento, para concretos que se requiere propiciar una baja permeabilidad de los mismos, con el fin de proteger a la estructura contra el deterioro previsible.

Condición de exposición	Relación agua-material cementante máxima por masa de concreto	Resistencia a compresión de diseño mínima f'_{cr} kg/cm ²
Concreto protegido de la exposición a congelación-deshielo, de la aplicación de sales de deshielo o de sustancias agresivas	Elija la relación agua-material cementante basándose en la resistencia, trabajabilidad y requisitos de acabado (terminación superficial)	Elija la resistencia basándose en los requisitos estructurales
Concreto que se pretenda que tenga baja permeabilidad cuando sea expuesto al agua	0.5	280
Concreto expuesto a congelación deshielo en la condición húmeda y a descongelantes	0.45	320
Para protección contra la corrosión del refuerzo (armadura) del concreto expuesto a cloruro de las sales descongelantes, agua salobre, agua del mar o rociado de estas fuentes	0.4	350

TABLA 2.4 Relación agua/material cementante máxima y resistencia de diseño mínima para varias condiciones de exposición. Adaptada del ACI. 318 (2002)

2.6.2 COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

El flujo en poros capilares del concreto saturado sigue la ley de Darcy en cuanto a flujo laminar a través de un medio poroso:

$$\frac{dq}{dt} \frac{1}{A} = \frac{k' \rho g}{\eta} \frac{\Delta h}{L}$$

En donde $\frac{dq}{dt}$ es la rapidez de flujo de agua en m³/s, “A” es el área de sección transversal de la muestra en m², “ Δh ” es la caída en altura hidráulica a través de la muestra, medida

en m, “L” es el espesor de la muestra en m, “ η ” es la viscosidad dinámica del fluido en Ns/r^2 , “ ρ ” es la densidad del fluido en kg/m^3 , y “g” es la aceleración debida a la gravedad “ m/s^2 ”.

El coeficiente “K” se expresa entonces en m^2 y representa la permeabilidad intrínseca del material, independientemente del fluido involucrado.

Puesto que el fluido involucrado es generalmente agua, se puede reescribir así:

$$K = \frac{k' \rho g}{\eta}$$

El coeficiente “K” se expresa entonces en metros por segundo y se conoce como el coeficiente de permeabilidad del concreto, entendiéndose que se refiere a agua a temperatura ambiente. La última calificación surge del hecho de que la viscosidad del agua cambia con la temperatura. Así, la ecuación de flujo se puede escribir como:

$$\frac{dq}{dt} \frac{1}{A} = K \frac{\Delta h}{L}$$

Y cuando se ha alcanzado un estado estacionario de flujo $\frac{dq}{dt}$, “K” se determina directamente.

2.6.3 PERMEABILIDAD AL AGUA DEL CONCRETO

2.6.3.1 CONSIDERACIONES GENERALES

La permeabilidad de un material se define por la facilidad con que puede ser penetrado por un fluido, ya sea líquido o gaseoso, bajo determinadas condiciones de aplicación. En el caso del concreto interesa principalmente su permeabilidad al agua y al aire, dado que son los fluidos con los que de ordinario tiene contacto. La permeabilidad al aire es importante porque favorece el fenómeno de carbonatación, con sus consiguientes efectos perjudiciales sobre la contracción del concreto, y sobre la corrosión del acero de refuerzo. La permeabilidad al agua es obviamente un asunto de gran interés en las

estructuras hidráulicas, pero también lo es en todo tipo de estructuras por su contribución al riesgo de corrosión del acero de refuerzo, y al deterioro prematuro del concreto en general.

En la práctica normal solo se acostumbra determinar la permeabilidad al agua, aunque se supone que ésta es buen índice de la permeabilidad al aire, para las condiciones operativas ambientales ordinarias en que el aire esté a la presión atmosférica. Para evaluar la permeabilidad del concreto al agua, es común hacerlo en especímenes cúbicos o cilíndricos que se someten a presión hidráulica en una de sus caras, de modo que al establecerse a través de ellos un flujo con régimen estable, resulta aplicable la conocida ley de Darcy:

$$V = kl \quad \text{o bien;} \quad Q = KIA$$

En donde v es la velocidad de flujo por unidad de área, que también puede expresarse como el gasto Q que pasa a través de toda el área A expuesta al agua; l es el gradiente de presión hidráulica; y k es el llamado coeficiente de permeabilidad, el cual depende básicamente de la homogeneidad y porosidad del concreto, y se utiliza para caracterizarlo en este aspecto.

Debido a que las pruebas de permeabilidad son relativamente laboriosas y de larga duración, y también porque sus resultados frecuentemente presentan un alto grado de dispersión, no se acostumbra su ejecución regular como medio de verificación de la calidad del concreto, sino más bien se les utiliza con carácter comparativo para la selección entre mezclas opcionales, o para en el medio local no se dispone de un procedimiento sancionado oficialmente o de uso alternativo aprobado (ASTM), por lo cual en las pruebas de permeabilidad que se realizan ocasionalmente, suelen adoptarse criterios de ensayo adaptados a los requerimientos específicos del caso.

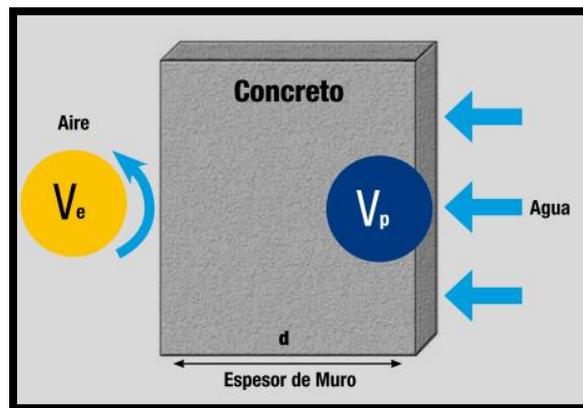
En vista de estas limitaciones, cuando se requiere propiciar una reducida permeabilidad en el concreto, lo usual es adoptar medidas teóricas atenerse a sus probables efectos útiles, sin verificar prácticamente su cumplimiento. Por tal motivo, y considerando la

importante injerencia que se atribuye a la permeabilidad del concreto en la durabilidad de las estructuras, resulta preciso identificar los principales factores que influyen en dicha permeabilidad, para tomarlos en cuenta en la selección de los componentes y el diseño de las mezclas de concreto, y en la construcción de las estructuras, no sólo con el fin de darles la impermeabilidad necesaria sino también hacerlas más duraderas.

Por tratarse de la propiedad de un material compuesto, la permeabilidad del concreto depende de la permeabilidad individual de sus componentes, el modelo más simple y aceptado para representar la composición del concreto convencional, consiste en considerarlo formado por partículas de roca embebidas en una matriz constituida por la pasta de cemento hidratada. De este modo, la permeabilidad de las rocas que constituyen los agregados y la permeabilidad de la pasta endurecida son dos elementos esenciales de la permeabilidad del concreto, pero existe un tercer elemento complementario e indispensable representado por la homogeneidad y la compacidad de la masa de concreto integrada, como resulta finalmente colocada en la estructura.

La pasta de cemento endurecido se compone de partículas conectadas por solo una fracción pequeña de la superficie total de ellas. Por esta razón, una parte del agua está dentro del campo de fuerza de la fase sólida, es decir, esta absorbida. Esta agua tiene una viscosidad alta, pero, a pesar de esto, es móvil y toma parte en el flujo. La permeabilidad del concreto no es una función sencilla de la porosidad del concreto, sino que también depende del tamaño, distribución y continuidad de los poros. Así, a pesar que un gel de cemento tiene una porosidad de 28 por ciento y su permeabilidad solo es de casi 7×10^{-6} m/s. Esto se debe a la textura extremadamente fina de la pasta de cemento endurecido: los poros y las partículas sólidas son muy pequeños y numerosos, mientras que, en las piedras, los poros, aunque menores en número, son muchos más grandes y conducen a una permeabilidad más alta. Por la misma razón, el agua puede fluir más fácilmente a través de los poros capilares que a través de los muchos y más pequeños poros de gel: la pasta de cemento como un todo es de 20 a 100 veces más permeable que el gel mismo.

En la Figura 2.5 Se muestra el concepto moderno de la permeabilidad en el cual se puede afirmar que “una estructura de concreto, es impermeable si el volumen de agua que la permea (V_p) es menor que el volumen mínimo de agua que se evapora en la cara opuesta (V_e)” esta definición tiene más relevancia en lo que corresponde al confort en la edificación y a la consecución de un ambiente donde no haya humedad, que a evitar la pérdida de agua tratada en una estructura de servicio.¹⁰



Fuente: Sika informaciones técnicas, Construcción de estructuras impermeables y estancas, (04-2009)

FIGURA 2. 5 Esquematación del concepto moderno de permeabilidad

2.7 CAUSAS DE LA PERMEABILIDAD EN EL CONCRETO

2.7.1 INFLUENCIA DE LA RELACIÓN A/C

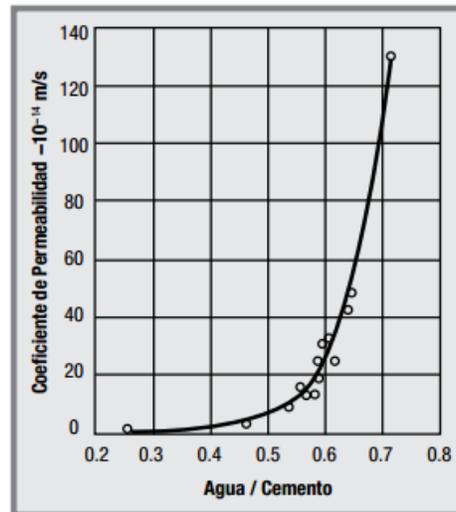
La relación a/c afecta no solamente la resistencia a la compresión del hormigón, sino también su permeabilidad.

Con menores relaciones a/c, la concentración creciente de granos de cemento en la pasta deja menos espacio entre ellos para ser ocupados por el agua, al estar más unidos unos con otros.

Inicialmente el espacio entre los granos de cemento forma una red continua llena de agua, formada por los poros capilares. A medida que los granos de cemento se van hidratando, generan cristales que bloquean los poros y esto hace al hormigón menos

¹⁰ Sika informaciones técnicas, Construcción de estructuras impermeables y estancas, (04-2009)

penetrante. Los poros pequeños son bloqueados más fácilmente que los grandes, y mientras más granos de cemento se tengan (menor relación a/c) el bloqueo será mayor, con lo que se consigue una menor permeabilidad y un hormigón más durable.



Fuente: A.M. Neville, Tecnología del concreto pág. 343

FIGURA 2.6 Relación entre permeabilidad y relación A/C para pastas de cemento maduras

2.7.2 PERMEABILIDAD DE LOS AGREGADOS.

La permeabilidad propia de los agregados y la pasta, y del concreto integral, depende en cada caso de su correspondiente porosidad, a pesar de que la relación entre ambas no siempre es clara por la injerencia de otros factores. En términos generales, la porosidad de un material corresponde a su proporción de vacíos; pero el grado de influencia que estos vacíos ejercen en la permeabilidad no sólo depende del espacio proporcional que representan, sino también de la forma, dimensiones y distribución de tamaños de los poros, y del hecho de si estos son independientes o se hallan interconectados. El efecto de estas características de los poros en la permeabilidad se pone de manifiesto al considerar que una cierta roca con sólo 1% de porosidad puede tener el mismo coeficiente de permeabilidad que una pasta de cemento hidratada cuya porosidad es de

50 por ciento, lo cual se debe a que los poros de dicha roca son considerablemente mayores que los de la pasta y además se encuentran interconectados.

Muchos de los agregados de peso normal están constituidos por rocas de textura de grano grueso, es decir, que contienen poros relativamente grandes, sin embargo, su permeabilidad no resulta alta debido a que dichos poros representan de ordinario una proporción reducida del volumen de la roca, y esto se hace evidente porque su peso específico es lo que se considera normal o alto. Por otra parte, hay rocas ostensiblemente porosas que consecuentemente tienen un peso específico subnormal, y sin embargo no manifiestan una excesiva permeabilidad debido a que sus poros son independientes, pues se formaron por la expansión de gases en el seno de la roca en estado de fusión. Por el contrario, las rocas que además de ser muy porosas contienen poros interconectados no sólo presentan un bajo peso específico sino también exhiben un elevado coeficiente de permeabilidad que las hace inadecuadas para su utilización como agregados en concretos que requieren una baja permeabilidad.

Comúnmente, los agregados de peso normal tienen una permeabilidad del mismo orden, e incluso algo mayor, que la pasta de cemento endurecida, pero como en el concreto las partículas de los agregados se encuentran envueltas en la pasta, resulta así que la permeabilidad de ésta es la que más suele influir en la permeabilidad del concreto; de este modo, mediante acciones que permiten modificar la porosidad de la pasta endurecida, es posible ejercer influencia en la permeabilidad potencial del concreto.

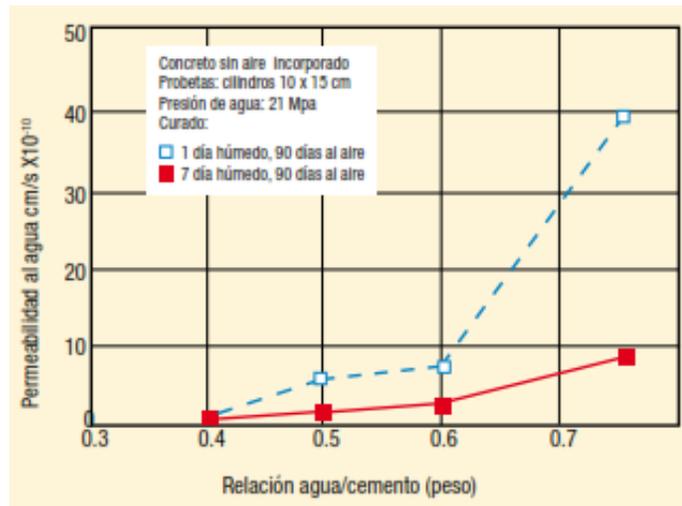
2.7.3 PERMEABILIDAD DE LA PASTA DE CEMENTO HIDRATADA.

La porosidad de la pasta de cemento en un momento dado depende de la relación agua/cemento con que se elabora y del estado de avance en su hidratación, el cual puede ser referido al tiempo que transcurre desde su elaboración, si las condiciones de humedad y temperatura son favorables. Así, en la fig. 2.7, se indica la variación de la permeabilidad de pastas con diferente relación agua/cemento, de acuerdo con el avance en el tiempo de hidratación. Como ahí se observa, para propiciar una reducida

permeabilidad en la pasta y en el concreto se requiere emplear una baja relación agua/cemento y concederle un tiempo de hidratación adecuado de por lo menos 28 días.

Con base en este vínculo entre relación agua/cemento y la permeabilidad de la pasta, cuando se requiere inducir una baja permeabilidad en el concreto, es usual prescribir un límite máximo para la relación agua/cemento que debe utilizarse en su elaboración. Tal requerimiento tiene normalmente el propósito de inhibir la penetración en el concreto de sustancias o agentes deteriorantes que se hallan presentes por sí solos o mezclados en el medio de contacto de la estructura, se éste agua, suelo o aire.

Un concreto de baja permeabilidad requiere tanto de una baja relación agua/cemento como de un adecuado periodo de curado. Lo anterior se fundamenta en que, a medida que avanza la hidratación del cemento, la red poros se va cerrando como consecuencia del bloqueo de los mismos. Con el curado húmedo continuo se va disminuyendo el valor del coeficiente de permeabilidad hasta llegar a una completa discontinuidad de los poros capilares, pero en función de la relación agua/cemento.



Fuente: Sika Informaciones Técnicas, Construcción de Estructuras Impermeables y Estancas
FIGURA 2.7 Relación entre régimen de curado, relación agua/cemento y permeabilidad

En la tabla 2.5 se muestra que en concretos cuya relación agua/cemento es mayor de 0.70 es imposible alcanzar la completa discontinuidad de los poros capilares, aun con un curado húmedo continuo, estos concretos tendrán permeabilidad relativamente más alta.

Para tener un orden de magnitud, el coeficiente de permeabilidad K de un concreto maduro de buena calidad es de aproximadamente 1×10^{-22} m/s.

Relación agua/cemento	Tiempo de curado (días)
0.40	3
0.45	7
0.50	28
0.60	180
0.70	365
> 0.70	No es posible

Fuente: Nuevas tendencias en la especificación y diseño de mezclas de concreto, Revista Noticreto N° 73.

Tabla 2.5 Tiempo de curado requerido para producir un sistema discontinuo de poros capilares en el concreto, asumiendo curado húmedo continuo.

2.7.4 PERMEABILIDAD DEL CONCRETO INTEGRAL

El coeficiente de permeabilidad de las pastas de cemento hidratadas, cuyas relaciones agua/cemento son el orden que se acostumbra utilizar en el concreto convencional entre 0.4 y 0.8, resulta en el intervalo de 10^{-14} a 10^{-12} m/s, aproximadamente. Sin embargo, al referirse al concreto ya integrado, ocurre que sus coeficientes de permeabilidad tienden a ser más altos pues con frecuencia oscilan entre 10^{-13} y 10^{-11} m/s aproximadamente.

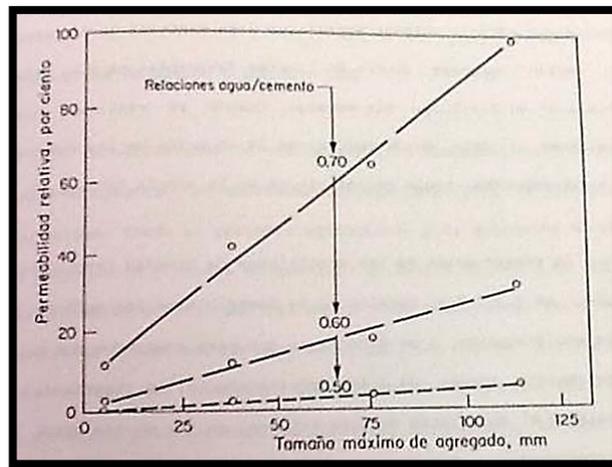
El concreto integral tiende a ser más permeable que la pasta de cemento que contiene, esto suele obedecer a diversas causas, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- Proporción de pasta en el concreto

A igualdad de todas las demás características y condiciones, las mezclas que contienen mayor proporción de pasta de cemento, es decir, cuya consistencia es más blanda, tienden a producir concretos más permeables. Lo cual puede atribuirse a los efectos incrementados del asentamiento y de los cambios volumétricos por secado, que de este modo dan lugar a posibles discontinuidades y microfisuras en la masa de concreto ya colocada en la estructura, haciéndola más permeable. Cabe suponer entonces que, con el uso de mezclas con exceso de pasta de cemento, la permeabilidad del concreto en la estructura resulta más alta de lo predecible en función de la relación agua/cemento utilizada.

- Tamaño máximo del agregado

Conforme aumenta el tamaño máximo del agregado, el concreto resulta más permeable, según se pone manifiesto en la figura 2.7, tal comportamiento se atribuye en parte a que el aumento en el tamaño de las partículas de grava crea condiciones más propicias para su asentamiento y para las acumulaciones de agua de sangrado debajo de ellas, y también porque con el aumento de tamaño máximo se acentúa la diferencia en la magnitud de los cambios volumétricos de origen térmico entre la pasta de cemento y los grandes fragmentos de roca, particularmente cuando sus respectivos coeficientes de expansión térmica difieren mucho y esto último puede traducirse en microfisuras alrededor de las grandes gravas que deben afectar la permeabilidad del concreto en la estructura. Lo anterior no necesariamente significa que deba reducirse el tamaño máximo del agregado con el solo fin de hacerlo menos permeable, sino que este es uno de los efectos que deben tratar de compatibilizarse al hacer la definición del tamaño máximo más conveniente, en cada caso particular.



Fuente: Comisión Federal Electoral, Manual de Tecnología del Concreto, 1994

FIGURA 2.8 Influencia del tamaño máximo del agregado en la permeabilidad del concreto

- Condiciones de curado

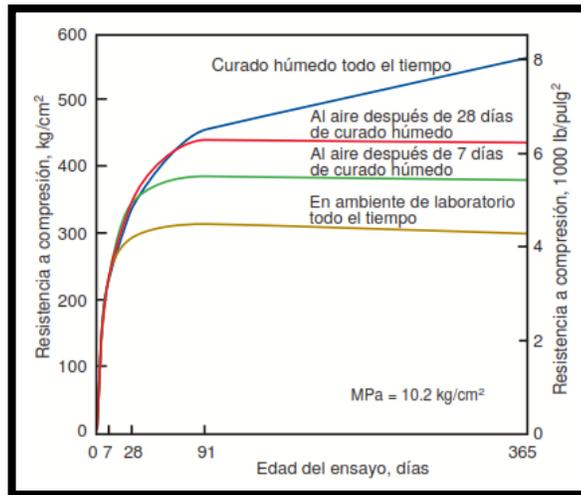
La permeabilidad de la pasta, y del concreto, depende básicamente de su porosidad, y que ésta es infinita principalmente por la relación agua/cemento y el grado de hidratación. El grado de hidratación puede ser relacionado directamente con la edad de la pasta, si las condiciones de humedad y temperatura son favorables. Precisamente, curar el concreto significa proporcionarle condiciones favorables de humedad y temperatura para que su hidratación evolucione satisfactoriamente.

Con mucha frecuencia, el curado que recibe el concreto colocado en la estructura resulta deficiente en comparación con el llamado curado estándar a que se acometen los especímenes de pasta en que se determina la permeabilidad de ésta; de manera que dicha deficiencia de curado constituye frecuentemente un motivo adicional para que la permeabilidad del concreto en la estructura resulte más elevada de la que podría suponerse de acuerdo con la relación agua/cemento empleada en su elaboración. La notable repercusión que la deficiencia de curado produce en la durabilidad del concreto en todos aspectos, constituye una justificación de primer orden para demandar la correcta ejecución del curado en las obras.

El curado es la manutención de la temperatura y del contenido de humedad satisfactorios, por un periodo de tiempo que empieza inmediatamente después de la colocación y del acabado, para que se puedan desarrollar las propiedades deseadas en el concreto.

Siempre se debe enfatizar la necesidad de curado pues tiene una fuerte influencia sobre las propiedades del concreto endurecido, o sea, el curado adecuado hace que el concreto tenga mayor durabilidad, resistencia, impermeabilidad, resistencia a abrasión, estabilidad dimensional, resistencia a congelación-deshielo y a descongelantes. Cuando el cemento portland se mezcla con el agua, empieza una reacción química, llamada de hidratación. El grado de hidratación tiene influencia sobre la resistencia y la durabilidad del concreto.

El concreto recién mezclado normalmente contiene más agua que la requerida para la hidratación del cemento, sin embargo, la pérdida excesiva de agua por evaporación puede disminuir o prevenir la hidratación adecuada. La superficie es particularmente susceptible a la hidratación insuficiente porque se seca primero. Si la temperatura es favorable, la hidratación es relativamente rápida en los primeros días después de la colocación del concreto. Por lo tanto, es importante que se retenga agua en el concreto durante este período, se debe evitar la evaporación o reducirla considerablemente. Con el curado adecuado, el concreto se vuelve más impermeable y más resistente a esfuerzos, a abrasión y a congelación-deshielo. El desarrollo de las propiedades es muy rápido en los primeros días, pero después continúa más lentamente por un periodo de tiempo indefinido. La Figura 2.9 muestra el efecto del tiempo de curado húmedo sobre el desarrollo de la resistencia del concreto.



Fuente: Boletín de Ingeniería EB201, Diseño y Control de mezclas de concreto, PCA, 2004, Pág. 261
Figura 2.9 Efecto del tiempo de curado húmedo sobre el desarrollo de la resistencia del concreto (Gonnerman y Shuman, 1928)

2.8 CONSECUENCIAS DE LA PERMEABILIDAD EN EL CONCRETO.

La permeabilidad se constituye en una de las principales causas de deterioro de las estructuras de concreto. Un alto porcentaje del agua que se utiliza para la elaboración del concreto por razones de fluidez no se requiere en el proceso de hidratación y termina dejando en la matriz una serie de poros, posiblemente interconectados, y que en un futuro serán el factor determinante para volverla más permeable.

Otras patologías del concreto que son consecuencia directa de la permeabilidad del material son:

2.8.1 EFLORESCENCIAS: se producen por el efecto de sales disueltas absorbidas por capilaridad y como parte de los materiales constitutivos, están son arrastradas al exterior al evaporarse el agua cristalizando en la superficie o en las capas externas inmediatas. Son en su mayoría: nitratos, carbonatos, sulfatos de calcio, sodio, potasio y magnesio, e incluso sales férricas.

Su formación se deriva de la presencia y circulación de agua en la masa del concreto. Para entender este proceso, es necesario reconocer que el concreto es un material poroso en mayor o menor grado, y que, por lo tanto, es susceptible de ser penetrado por el agua, logrando circular libremente en él, y dando origen a una reacción con la pasta de cemento formando hidróxido de calcio, que en la circulación es llevado a la superficie. Al salir, el agua se evapora y el hidróxido de calcio queda en la superficie, entrando en contacto con el bióxido de carbono que se encuentra en forma libre en la naturaleza, y reaccionando para formar diminutos cristales de carbonato de calcio. Esta es la reacción más común que se presenta en este tipo de procesos, aunque también pueden ocurrir con algunas otras sales como cloruro de sodio o similares, que pueden estar presentes en el agua de mezcla, agua proveniente del subsuelo, agregados, etc.

En términos generales su aparición no representa ningún riesgo para el funcionamiento de cualquier estructura de concreto, es decir, que su formación sólo representa un deterioro estético de la misma. Pero si tenemos en consideración que la disolución de la pasta de concreto incrementa la porosidad ya existente en la estructura, a largo plazo puede dejar de ser un problema superficial para convertirse en un problema de durabilidad.

En consideración del origen de las eflorescencias, se debe formular un concreto con un adecuado diseño de mezcla que disminuya el desarrollo de porosidad. En el proceso de colocación y acabado de las estructuras, se debe tener particular cuidado con la compactación del concreto y su posterior curado. Lo anterior es como finalidad de reducir al mínimo o eliminar la posibilidad de formación de fisuras en la superficie del concreto. De nada sirve diseñar y fabricar un concreto buscando disminución de la porosidad, si por prácticas deficientes de colocación o curado éste termina con fisuramiento superficial. El número y características de las juntas de construcción debe ser controlada para que no sean hechas en forma excesiva. También ayuda un adecuado aislamiento del concreto que impida su contacto con humedad.



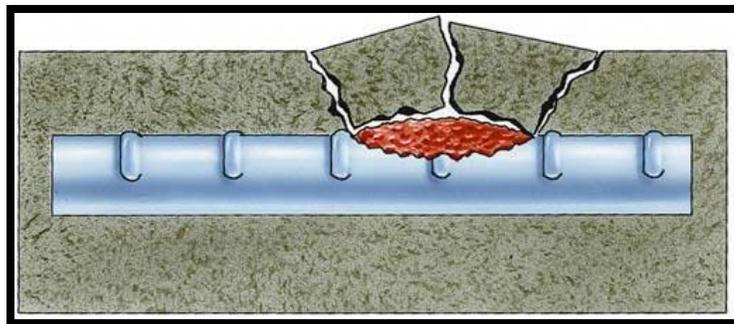
Fuente: Propia de la investigación

Figura 2.10: Severas eflorescencias en muro de concreto

2.8.2 OXIDACIÓN Y CORROSIÓN:

Tendencia natural de los metales de volver a su estado natural. La oxidación es menos grave y puede actuar como una capa pasivadora.

La corrosión es la pérdida de material por erosión disminuyendo la capacidad estructural. Medidas preventivas: impermeabilidad y recubrimientos adecuados.



Fuente: El óxido en las armaduras de hormigón. Obras & protagonistas.221. (febrero 2014)

FIGURA 2.11: Corrosión del acero

CORROSIÓN DEL ACERO.

Las primeras manifestaciones de la corrosión del acero es el agrietamiento del concreto en diferente forma dependiendo de la localización del acero corroído por lo que puede manifestarse a lo largo de la varilla al quedar el acero expuesto a la intemperie la corrosión es progresiva y se acelera mediante un mecanismo complejo en el que están involucrados entre otros los siguientes factores:

- El diseño de la mezcla.
- El tipo y superficie específica del cemento.
- La relación agua/cemento.
- El contenido de sales.
- Las condiciones de curado, edad e historia ambiental del concreto.
- La carbonatación.
- La temperatura y humedad relativa del concreto.
- La rugosidad y limpieza del refuerzo.
- El espesor del recubrimiento del concreto.
- Las condiciones ambientales durante la vida útil.

En la figura 2.11 se muestra las consecuencias de la corrosión del acero de refuerzo y de cómo afecta este a las estructuras de concreto expuesta a las aguas marinas.



Fuente: <http://es.slideshare.net/miguelvivas2/proyecto-de-patologa-del-acero-y-concreto>

Figura 2.12: Consecuencias de la corrosión del acero de refuerzo en estructuras expuestas a ambientes marinos.

La corrosión es un fenómeno de naturaleza electroquímica por el flujo de corriente eléctrica conocida como la formación de una media celda. El mecanismo surge por las diferencias de potencial eléctrico en diversos puntos, ocasionadas por las diferencias de contenido de humedad, concentración de electrolitos o por contacto con otro tipo de metales.

Cualquier concreto húmedo contiene suficiente electrolito como para conducir la corriente capaz de causar corrosión. Mientras más seco este un concreto, menor será la conductividad, para que se presente la corrosión es indispensable el oxígeno, la difusión del oxígeno a través del concreto saturado con agua es menor cuanto menor sea la relación a/c.

En resumen, para que se presente la corrosión es necesaria la presencia simultánea del electrolito, un medio húmedo y el oxígeno.

El volumen incrementado producto de la corrosión causa explosivos esfuerzos radiales alrededor de la barra de refuerzo. Con ello resultan fisuras radiales con las que se inicia la pulverización del concreto. Estas fisuras adicionalmente proveen fácil acceso del oxígeno, humedad y cloruros en el concreto creando las condiciones por donde continua y causa nuevas fisuras y finalmente significativa pulverización.

El refuerzo, acero del pretensado y la mayoría de los elementos metálicos si se encuentran expuestos a la humedad de la atmosfera, se oxidan debido a la reacción química de oxidación. Esta reacción continua aun si el acero esta embebido dentro del concreto.

Como el óxido ocupa mucho más volumen que el acero de donde se formó, el proceso crea una presión de expansión radial alrededor de la varilla y los revienta, formando inicialmente una fisura lineal. Esto puede además permitir la separación de láminas de concreto y eventualmente el daño.

El refuerzo se protege contra la corrosión cuando se encuentra embebido en un concreto de buena calidad y con un suficiente espesor del recubrimiento. La protección es debida

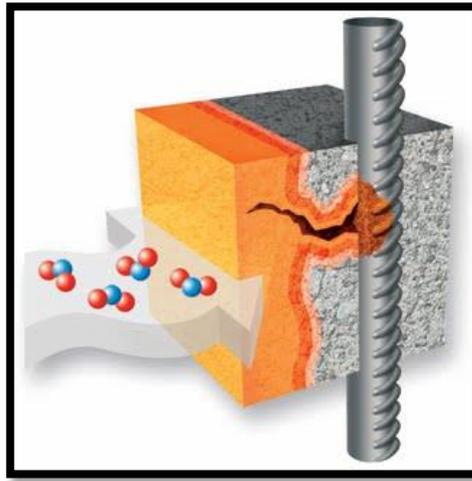
a la alta alcalinidad del concreto creando un interface o capa delgada sobre la superficie de la barra. Pero la protección contra la corrosión no es eterna. El ambiente siempre afecta al concreto y finalmente lleva a descomponer la capa pasiva por cloruros libres o por carbonatación del recubrimiento del concreto.

El tiempo hasta el daño de la capa pasiva normalmente se conoce como periodo de iniciación, La duración del periodo de iniciación depende de:

- El espesor del recubrimiento del concreto, el recubrimiento delgado acorta el periodo de iniciación, de allí la necesidad de garantizar espesores uniformes de recubrimiento mediante el uso de panelas elaborados en concreto de la misma calidad del utilizado en el resto del conjunto estructural.
- La calidad del concreto del recubrimiento depende principalmente de la relación agua/cemento; el periodo de la iniciación decrece cuando se reduce la calidad del concreto. La agresividad del medio ambiente, la temperatura, la humedad y el nivel de contaminación por sulfatos, los cloruros y la penetración de dióxido de carbono.
- La clase de mecanismos causantes del deterioro; la carbonatación y penetración de cloruros son con mucho, el mecanismo más agresivo de deterioro. Los iones cloro facilitan el proceso de deterioro. Durante el periodo de iniciación el proceso de corrosión se desarrolla sin signos visibles de deterioro en la superficie del concreto o del refuerzo de esta forma el riesgo de daño o causa de futura corrosión solamente puede ser evaluada por investigaciones especiales.

2.8.3 LA CARBONATACIÓN.

El concreto debido a su contenido de CA (OH) que se origina durante la hidratación del cemento, aumenta la alcalinidad o valores del pH mayor a 13, creando un medio excelente para proteger el acero de la corrosión, formando una película de óxido de hierro en la superficie del metal protectora que es la pasivadora.



Fuente: <http://civilgeeks.com/2011/10/02/la-carbonatacion-el-primer-cancer-del-hormigon-i/>

FIGURA 2.13: Proceso de la Carbonatación

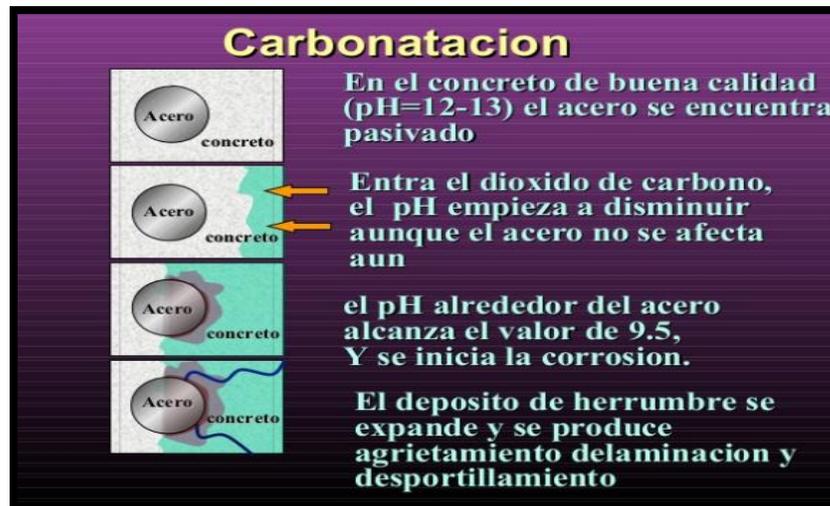
La carbonatación es causada por el dióxido de carbono (CO_2) del aire el CO_2 de la pasta del cemento haciendo descender a un valor crítico la alcalinidad.

El valor del pH decrece alrededor de 9, la cual es insuficiente para proteger el refuerzo contra la corrosión, entonces la capa pasiva circundante del refuerzo se quiebra.

La velocidad de carbonatación de la pasta del cemento depende de la permeabilidad, su contenido de humedad, el contenido de CO_2 en el aire la humedad relativa del medio ambiente y el contenido inicial de humedad en el concreto endurecido, a su vez, la permeabilidad del concreto está regida por la relación agua cemento que es función inversa de la resistencia a la compresión y de la efectividad del curado.

La carbonatación neutraliza la naturaleza alcalina de la pasta del cemento hidratado y más fácilmente puede ingresar la humedad y el oxígeno. La humedad relativa del medio ambiente tiene influencia en el proceso de carbonatación.

El agua bloquea los poros impidiendo la difusión del CO_2 , pero al mismo tiempo proporciona un medio para la relación entre el CO_2 el $\text{CO}(\text{OH})_2$ y el CaCO_3 por lo tanto existe un valor crítico de humedad relativa ambiente que origina máxima carbonatación.



Fuente: Patología del concreto causas y daños en el concreto

FIGURA 2.14: Esquematación de la carbonatación en el concreto y el acero de refuerzo

2.8.3 ATAQUE DE SUSTANCIAS QUÍMICAS AGRESIVAS:

Generan deterioro con el paso del tiempo; estas se encuentran en solución en la mayoría de los casos y tienen mayor influencia cuando están acompañadas de presiones ejercidas sobre una de las superficies, forzando la solución dentro del volumen de concreto.

2.8.4 SULFATOS:

La acción del sulfato de magnesio es la que produce un mayor daño, en cuanto actúa sobre las fases de la pasta de cemento, como son los silicatos cálcicos, mediante una serie de acciones complejas que modifican el PH de las pastas de cemento. Se estima que el 75% de las publicaciones que tratan de la durabilidad del concreto se ocupan de este tema. El ion sulfato aparece en mayor o menor proporción en todas las aguas libres subterráneas. El contenido de ion sulfato de las aguas subterráneas es considerable en los terrenos arcillosos, también puede haber iones sulfatos en los materiales que contienen desechos industriales, tales como las escorias obtenidas del procesamiento de hierro, cenizas y aguas subterráneas que contienen estos materiales. El agua de mar y los suelos costeros embebidos en agua de mar constituyen un tipo de exposición particular.

Las sales en estado sólido no atacan al concreto, pero cuando se encuentran en solución pueden reaccionar con la pasta de cemento endurecido. Algunas arcillas contienen, por ejemplo, álcalis y sulfatos de calcio y de magnesio, y las aguas freáticas con este tipo de arcilla son una solución de sulfatos. Por lo tanto, puede haber un ataque al cemento, al reaccionar el sulfato con la $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y con el C_3A

La rapidez de ataque del sulfato aumenta al elevarse la concentración de la solución, pero más allá de una concentración alrededor del 0,5% de MgSO_4 o del 1% de Na_2SO la rapidez con que aumenta el ataque es menor. Una solución saturada de MgSO causa graves deterioros en el concreto; aunque con una relación agua/cemento baja, esto tiene lugar solamente después de 2 o 3 años.

Además de la concentración de sulfatos, el grado de ataque al concreto, depende también de la velocidad con que el sulfato removido por la reacción con el cemento puede ser reemplazado. Por lo tanto, para estimar el peligro del ataque de sulfatos, debe conocerse el movimiento del agua freática. Cuando el concreto está expuesto a la presión de agua sulfatada, por un lado, la rapidez de ataque será máxima. Así mismo, la saturación seguida del secado, produce deterioro rápido. Por otra parte, cuando el concreto se encuentra totalmente bajo tierra, sin cauce alguno de agua freática las condiciones son menos severas.

El concreto atacado por sulfatos tiene un aspecto blanquecino y característico. El daño suele iniciarse en los bordes y los ángulos, va seguido por agrietamientos y descascaramientos progresivos que reducen el concreto a un estado frágil o incluso blando.

La vulnerabilidad del concreto a sulfatos puede reducirse con el empleo de cemento bajo en C_3A . Con los cementos tipos II y V de bajo contenido de CA los problemas de variación de volumen y formación de grietas serán menores que con los demás tipos, por lo tanto, la acción de los sulfatos tendrá una importancia menor. La resistencia al ataque de los sulfatos mejora también mediante la adición o sustitución parcial del cemento con puzolanas. La resistencia del concreto al ataque de sulfatos depende también de su impermeabilidad.



Fuente: Propia de la investigación

Figura 2.15: Ataque por cloruros y sulfatos

2.9 VALORES DE REFERENCIA Y NIVELES DE PERMEABILIDAD SEGÚN NORMAS TÉCNICAS

2.9.1 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC) 4483 METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO AL AGUA

La NTC 4483, es el método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto en agua. Este método donde se somete la muestra a una presión constante durante tres días, después de los cuales se entra a determinar si el fluido atravesó todo el espesor de la muestra, caso en el cual se determina la velocidad de flujo relacionándolo con el volumen que atraviesa en ciertos intervalos de tiempo; si el flujo no atraviesa la muestra, se hace un corte perpendicular y se mide la profundidad de penetración, la cual se considera como parámetro para definir el nivel de permeabilidad o impermeabilidad de la masa de concreto. Este método comprende la determinación, en el laboratorio, del coeficiente de permeabilidad (K) del concreto endurecido por dos métodos: flujo constante y profundidad de penetración. El primero se usa para la determinación de permeabilidad de concretos considerados de alta permeabilidad y el segundo en concretos que, por su diseño, composición y características, son de muy baja permeabilidad. ¹¹

¹¹ Norma Técnica Colombiana 4483; 1998; Concretos. Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua.

Cualquiera de los dos métodos es aplicable tanto a especímenes moldeados en el laboratorio o en la obra, como a núcleos extraídos de una estructura.

Según se especifica en la NTC 4483, se necesitan mínimo tres mediciones de cada muestra para obtener ciertos valores de confiabilidad

La tabla 2.6 se establece los parámetros de clasificación de los concretos aplicables a los dos métodos relacionados

Determinación	Unidades	Permeabilidad		
		Baja	Media	Alta
Coefficiente de permeabilidad al agua	m/s	$< 10^{-12}$	10^{-12} a 10^{-10}	$> 10^{-10}$
Profundidad de penetración	mm	< 30	30 a 60	> 60

Fuente: Norma técnica colombiana 4483

TABLA 2.6 Relación de la permeabilidad del concreto con el coeficiente de permeabilidad y la profundidad de penetración

2.9.2 NORMA ESPAÑOLA UNE EN 12390-8 PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN. ¹²

Esta norma especifica un método para determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión en hormigones. Este método se emplea para determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión en hormigones endurecidos que han sido curados en agua. El agua es aplicada bajo presión a la superficie del hormigón endurecido. A continuación, se divide la probeta en dos mitades y se mide la profundidad de penetración del frente de agua.

El ensayo debe comenzar cuando las probetas tengan al menos una edad de 28 días. No aplicar el agua a presión a la cara de acabado de la probeta. La probeta se coloca en el aparato de ensayo y se aplica al agua una presión de (500 ± 50) kPa durante (72 ± 2) h. El resultado del ensayo es la profundidad máxima de penetración, redondeada al mm más próximo. En el art 37.3.3 (Impermeabilidad del hormigón) de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 establece que para comparar experimentalmente la consecución de una estructura porosa del hormigón suficientemente impermeable para el ambiente en el que va estar ubicado, puede realizarse comprobando la impermeabilidad al agua del hormigón, mediante el método de determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión, según la UNE- EN 12390-8. Esta comprobación se deberá realizar cuando las clases generales de exposición sean III o IV, o cuando el ambiente presente cualquier clase específica de exposición. Un hormigón se considera suficientemente impermeable al agua si los resultados del ensayo de penetración de agua cumplen simultáneamente que:

-
- ¹² Norma española UNE EN 12390-8; “Ensayos de hormigón endurecido, Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión”; AENOR.

CLASE DE EXPOSICIÓN AMBIENTAL	ESPECIFICACIONES PARA LA PROFUNDIDAD MÁXIMA	ESPECIFICACIONES PARA LA PROFUNDIDAD MEDIA
IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H,F, Qb (en el caso de elementos en masa o armados)	50 mm	30 mm
IIIc, Qc, Qb (solo en el caso de elementos pretensados)	30 mm	20 mm

Fuente: Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08

TABLA 2.7 Clases de exposición y especificación máxima y media de profundidad de penetración hormigón.

2.10 ESPECIFICACIONES PARA EL CONTROL DE PERMEABILIDAD EN EL DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO

En ninguna normativa internacional se encuentran especificaciones que involucre directamente la permeabilidad como factor de diseño de mezclas.

Algunos aspectos que se mencionan para el diseño de mezclas son las siguientes:

- Economía
- Trabajabilidad aceptable del concreto fresco
- Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme del concreto endurecido
- Exposición Ambiental
- Cualidades del concreto bien proporcionado
- Costo
- Consideraciones de formas estructurales adecuadas y que no generen sitios de deterioro potencial.

En el código ACI 318 Capítulo 4 Requisitos de Durabilidad se señala los requisitos para el concreto sobre la base de la asignación de clases de exposición, en cuanto a

permeabilidad se asigna la categoría de exposición P para concreto en contacto con agua y que requiere baja permeabilidad, esta subdividida en dos clases:

Categoría	Severidad	Clase	Condición
P Requiere baja permeabilidad	No aplicable	P0	En contacto con el agua donde no se requiere baja permeabilidad
	Requerida	P1	En contacto con el agua donde se requiere baja permeabilidad

Fuente: ACI 318

TABLA 2.8 Categorías y clases de exposición

En el reglamento se contempla una clase de exposición P1 para concreto que requiere baja permeabilidad por estar en contacto directo con el agua, esta se asigna con base a la necesidad de baja permeabilidad del concreto al agua cuando la permeabilidad al agua puede reducir la durabilidad.

En el cuadro 2.9 Se muestran algunas especificaciones para concretos con alto riesgo de corrosión del acero de refuerzo, se toma en cuenta la relación agua/cemento y el recubrimiento mínimo que debe tomarse en cuenta:

Condiciones de riesgo de deterioro en que se requiere baja permeabilidad del concreto	Relación agua/cemento recomendada	Recubrimiento mínimo
Según ACI 201		
Alto riesgo de corrosión del acero de refuerzo	0.40	2 in (50 mm)
Ataque severo por sulfatos y/o mediano riesgo de corrosión del acero de refuerzo	0.45	Mínimo 1½ in (38 mm) y preferiblemente mayor o igual a 2 in (50 mm)

Ataque moderado por sulfatos y/o riesgo moderado de corrosión del acero de refuerzo	0.5	Mínimo 1½ in (38 mm) y preferiblemente mayor o igual a 2 in (50 mm)
--	-----	---

Fuente: Comité ACI 201.2R-01 Guía para la Durabilidad del Hormigón.

TABLA 2.9: Condiciones de deterioro y recubrimiento mínimo

Por su parte la Instrucción del Hormigón Estructural (EHE-08) presenta una estrategia que considera todos los posibles mecanismos de degradación, adoptando medidas específicas en función de la agresividad a la que se encuentra sometido cada elemento.

La estrategia de durabilidad deberá incluir al menos los siguientes aspectos:

- Selección de formas estructurales adecuadas
- Consecución de una calidad adecuada del hormigón y en especial de su capa exterior
- Adopción de un espesor de recubrimiento adecuado para la protección de las armaduras
- Control del valor máximo de abertura de fisura
- Disposición de protecciones superficiales en el caso de ambientes muy agresivos
- Adopción de medidas de protección de las armaduras frente a la corrosión.

2.11 RECOMENDACIONES PARA OBTENER UN CONCRETO MENOS PERMEABLE EN OBRA

	CONSECUENCIAS	RECOMENDACIONES
TEMPERATURA	A altas temperaturas el concreto plástico puede ocasionar, excesiva evaporación y dificultades en la colocación y el acabado, las reacciones químicas se aceleran con el aumento de	Es muy importante tener en cuenta siempre el registro de temperatura, cada vez que se hagan las pruebas de revenimiento, o contenido de aire, porque un incremento en la temperatura de 10°C

	temperatura	aumenta la velocidad de reacción.
HUMEDAD	El factor principal es la humedad y no la atmósfera circundante, aunque esta contribuye con los fenómenos de deterioro en la medida que se presentan ciclos de humedecimiento y secado en el concreto.	Es necesario tener en cuenta al tipo de ambiente al cual estará expuesta la estructura y la característica del suelo, ya que hay suelo que retienen agua (arcillas) y esto contribuye al deterioro del concreto
PRESION	La acción de la presión del medio (líquido, sólido, o gaseoso) en estructuras sumergidas en el suelo o agua puede ser muy importante por cuanto se promueve la penetración de elementos que pueden percolar el concreto.	Realizar un buen acabado, respetando los recubrimientos, para cada tipo de estructuras que estarán expuestas a condiciones moderadas y severas, ya que esto ayudaría a evitar, el desgaste, la erosión y la penetración de agentes agresivos en la matriz del concreto.
MEZCLADO	Un mal mezclado impide que todas las partículas del cemento y de los agregados, se homogenicen correctamente, dando así una mezcla muy pedregosa o fluida.	Se debe hacer mecánico en concretera y si se hace manual deberá ser sobre una superficie plana y pavimentada para que no escurra el agua o lechada, y para que no se contamine el concreto con el suelo o basura.
ADICION DE AGUA	Un aumento de agua, en la mezcla elevaría la relación para la cual fue especificado el diseño, y se tendría un concreto de baja resistencia.	No se deberá permitir el aumento de agua, para aumentar el revenimiento en mezclas endurecidas, con el fin de no alterar el diseño de mezcla para el cual fue establecido
		Mantener los agregados pétreos en constante

CORRECCIÓN POR HUMEDAD	Al no hacer las correcciones por humedad por cada batchada o colado, se corre el riesgo de cambiar por completo el diseño de mezcla	humedecimiento cuando se tiene a la intemperie, ya que la temperatura del sol hace que estén secos y en tiempos de lluvia se deben cubrir y realizar los cambios necesarios para reducir el agua, o aumentarlo y no alterar el diseño
TRANSPORTE	Cuando el traslado del concreto en una obra es demasiado largo, el concreto empieza a fraguar y esto implicaría adición de agua o aditivos. Los agregados gruesos se asientan.	No permitir el uso de camiones de volteo, para transportar mezclas demasiadas fluidas o muy secas, o cuando el tiempo de transporte sea excesivo y se pierda más de 2.5 cm de revenimiento, también cuando el concreto sea para bombear
RELACIÓN AGUA/ CEMENTO	El no respetar la relación agua/material cementante, se expone el concreto, a que fácilmente pueda ser atravesado por cualquier sustancia líquida, ocasionando así el desgaste de la pasta cementante, descascaramiento y la corrosión del acero, ya que la corrosión se lleva con más rapidez cuando el concreto está expuesto a agua de mar o dulce.	Respetar las relaciones agua/material cementante, para obtener estructura con buena resistencia y durables, con esto se evita gastos económicos adicionales, el comité ACI, recomienda relaciones de 0.50 para concretos con exposiciones moderadas, de 0.45 para concretos expuesto a agua de mar, estas relaciones dependen del tipo de cemento a utilizar, en caso contrario de usar otro tipo de cemento y evaluar sus componentes.
TAMAÑO DEL AGREGADO	Conforme aumenta el tamaño máximo del agregado, el concreto resulta más permeable, esto se debe a que la grava crea condiciones propicias para su asentamiento y para la acumulación de agua.	No necesariamente significa que deba reducirse el tamaño máximo del agregado con el solo fin de hacerlo menos permeable, sino que este es uno de los efectos que deben tratar de compatibilizarse al hacer la

		definición del tamaño máximo más conveniente, en cada caso particular.
PERMEABILIDAD DE LOS AGREGADOS	El no hacer un buen estudio del agregado grueso, nos lleva a tener un concreto menos impermeable. Muchos de los agregados de peso normal están constituidos por rocas de textura de grano grueso, es decir, que contienen poros relativamente grande	Tomar en cuenta el tamaño, forma y textura de los poros del agregado, para que su permeabilidad no resulte alta ya que dichos poros representan de ordinario una proporción reducida del volumen de la roca, y esto se hace evidente porque su peso específico es lo que se considera normal o alto.
RECUBRIMIENTO	El no hacer un recubrimiento adecuado, se exponen las estructuras y principalmente el acero de refuerzo	Con el fin de garantizar la debida protección del refuerzo, deben controlarse los espesores del recubrimiento en los términos que las condiciones ambientales lo exijan. El ACI recomienda dichos recubrimientos, pero dada la condición de cada país, se debe tomar consideraciones especiales cuando se habla de durabilidad de las estructuras.

CAPITULO III: REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

3.1 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE LABORATORIO

La parte experimental consta de ensayos previos como la caracterización de agregados y diseños de mezclas, hasta los ensayos principales como el ensayo de compresión de cilindros, y el ensayo de determinación de la permeabilidad mediante el método de penetración de profundidad del concreto, este último se desarrolló en muestras de concreto endurecido a los 8, 15, 27 días y para lo cual se prepararon probetas según se indican en las normas Española UNE EN 12390-8, en la cual se especifica que las probetas de ensayo serán cúbicas, cilíndricas o prismáticas de longitud de lado, o diámetro, no menor de 150 mm. Los ensayos de los agregados y compresión del concreto se realizaron basándonos en las normas americanas ASTM. En el desarrollo de este capítulo se describen a fondo cada una de las partes del trabajo que se realizó.

3.2 UNIDAD DE ANALISIS

Mezclas de concreto:

El concreto puede ser definido como la mezcla de un material aglutinante (normalmente cemento Portland Hidráulico), un material de relleno (agregados), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forman un sólido compacto y después de cierto tiempo es capaz de soportar esfuerzos de compresión.

3.3 DEFINICIÓN DE VARIABLES.

3.3.1 RESISTENCIA

La resistencia del concreto, se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto a carga axial a los 28 días, El concreto como material estructural se diseña para que tenga una determinada resistencia. La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica más importante de un concreto y se utiliza normalmente para juzgar su calidad. Según la norma ASTM C – 39

3.3.2 PERMEABILIDAD:

La permeabilidad es la cantidad de agua que migra a través del concreto, mientras que el agua está bajo presión, o a la capacidad del concreto de resistir la penetración de agua u otras sustancias (líquido, gas, iones, etc.)

La permeabilidad es afectada por la relación agua/cemento, el grado de hidratación del cemento, y el periodo de curado húmedo.

3.3.3 RELACION AGUA/CEMENTO:

Es la relación que se obtiene de dividir el peso del agua, entre el peso del cemento de la mezcla. A mayor relación menor resistencia mecánica, y menor durabilidad del concreto.

3.4 ENSAYOS REALIZADOS

Los ensayos realizados fueron los siguientes.

- Caracterización de los agregados de los agregados tanto grueso como fino
- Diseños de mezclas
- Preparación de muestras para ensayo a compresión y Permeabilidad
- Ensayo de Resistencia a la compresión.
- Ensayo de Permeabilidad

3.5 PRUEBAS PARA CONTROLAR LA CALIDAD DE LOS AGREGADOS:

3.5.1 Práctica Estándar para reducción de las Muestras de Agregado al Tamaño de prueba. ASTM Designación 702-01

Determinación de las muestras de agregados para concreto.

El muestreo de los materiales es un procedimiento fundamental ya que de este se derivarán las muestras de agregados a las cuales se le harán las pruebas posteriores. En general, hacer un buen muestreo nos da una idea global del tipo de material que está en el banco de materiales elegido.

Muestreo

Equipo y material:

- Pala.
- Sacos: deberán ser de una capacidad suficiente para depositar y transportar el Material.

Procedimiento

La muestra de agregados fue tomada de acuerdo a la metodología de la Norma ASTM D 75 el material fue colocado en sacos los cuales fueron identificados y transportados de la planta Holcim Santa Tecla al laboratorio de la Fundación ISCYC para la realización de los ensayos de control de calidad de los agregados.



Figura 3.1 Muestra de arena triturada

- **Cuarteo de la Muestra**

Se realizó en base a la Norma ASTM C 702, el agregado grueso por el Método A – Cuarteo mecánico y el agregado fino por el Método C- Apilado en Miniatura

Equipo y Herramientas

- ✓ Partidor de Muestras: El partidor de muestras debe tener un número igual de conductos, pero no menos que un total de ocho para agregado grueso, o doce para agregado fino, el cual descarga alternadamente a cada lado del partidor. Para agregado grueso mezclas de agregado, el ancho mínimo del conducto individual será aproximadamente 50 % mayor que el tamaño máximo de las partículas en la muestra a ser partida (Nota 2). Para agregado fino seco en el cual la muestra entera pasa la malla de 9.5 mm (3/8”), un partidor teniendo conductos de 12.5 a 20 mm (1/2 a 3/4”) de ancho deberán ser usados. El partidor estará equipado con dos receptáculos para recibir las dos mitades de la muestra después de partirla.

También estará equipada con una tolva o cucharón de fondo recto el cual tiene un ancho igual o ligeramente menor que el ancho del conjunto de conductos, mediante el cual la muestra puede ser alimentado a una velocidad controlada. El partidor y equipo accesorio será diseñado en tal forma que la muestra fluya suavemente sin restricción o pérdida de material.

Procedimiento:

Coloque la muestra original en la tolva o cucharón alimentador, distribuyéndola uniformemente en toda su longitud, para que cuando se introduzcan en los conductos, aproximadamente igual cantidad fluya a través de cada conducto. La rata a la cual la muestra es introducida debe ser tal que permita un flujo continuo por los conductos hacia los receptáculos inferiores. Se vuelve a introducir la porción de la muestra de uno de los receptáculos en el partidor cuantas veces sea necesario para reducir la muestra al tamaño requerido para el ensayo. Reserve la

porción de material recolectado en el otro receptáculo para reducción de tamaño en otras pruebas a desarrollar, cuando se requiera.



FIGURA 3.2 Muestra de agregado grueso tamaño nominal $\frac{3}{4}$ "



FIGURA 3.3 Cuarteo mecánico de agregado grueso

Método C – Apilado en Miniatura

Aparatos

El equipo consistirá de una regla, pala o cuchará para mezclar el agregado, un muestreador pequeño o cucharón pequeño o cuchará para muestreo.

Procedimiento:

Coloque la muestra original de agregado fino húmedo sobre una superficie dura limpia y nivelada, donde no se produzca pérdida de material ni adición accidental de material extraño. Mezcle el material completamente, traspaleando la muestra entera al menos tres veces. En el último traspaleo forme con la muestra una pila cónica, depositando cada palada en la parte superior de la pila. Si se desea, aplane la pila cónica, presionando con una pala la parte superior del cono hasta obtener un espesor y diámetro uniforme, de tal forma que cada cuarto de la pila contenga el material que originalmente se encontraba en él. Obtenga una muestra para cada ensayo seleccionando al menos cinco porciones de material localizados al azar del apilamiento miniatura, usando uno de los dispositivos de muestreo.



FIGURA 3.4 Cuarteo agregado fina por apilamiento en miniatura

3.5.2 Método de Ensayo Estándar para Análisis por Malla de Agregados Grueso y Fino Designación ASTM C – 136 – 01.**Análisis granulométrico (Granulometría).**

Se conoce como análisis granulométrico a la acción de pasar al agregado fino o grueso por medio de unas mallas (también conocidas como cribas) y pesar la cantidad de partículas de agregado que quedan retenidas en cada una de las mallas y sacando el porcentaje retenido en cada una de estas con respecto de la muestra original.

Los requisitos de la norma ASTM C 33, permiten un intervalo relativamente amplio en la granulometría del agregado fino, pero las especificaciones de otras organizaciones. La granulometría más conveniente para el agregado fino, depende del tipo de trabajo, de la riqueza de la mezcla, y del tamaño máximo del agregado grueso. En mezclas más pobres, o cuando se emplean agregados gruesos de tamaño pequeño, la granulometría que más se aproxime al porcentaje máximo que pasa por cada criba resulta lo mejor para lograr trabajarla idealmente. En general, si la relación agua/cemento se mantiene constante y la relación de agregado fino a grueso se elige correctamente, se puede hacer uso de un amplio rango en la granulometría sin tener un cambio apreciable en la resistencia. En ocasiones se obtendrá una economía máxima, ajustando la mezcla del concreto para que encaje con la granulometría de los agregados locales. Entre más uniforme sea la granulometría, mayor será la economía.

Resumen del método de ensayo:

Una muestra de agregado seco de masa conocida es separada a través de una serie de mallas de aberturas progresivamente menor para la determinación de los tamaños de las partículas.

Material y Equipo:

- ✓ Arena.
- ✓ Grava.
- ✓ Balanzas de 0.1 y 0.5 g de precisión.
- ✓ Juego de Mallas: 2 ½", 2", 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", No 4, No 8, No 16, No 30,
- ✓ No 50, No 100, No 200, fondo y tapa.
- ✓ Un horno a temperatura uniforme de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$).
- ✓ Juego de pesas: 500 grs., 1, 2, 5 y 10 kg.
- ✓ Recipientes de aluminio.
- ✓ Un cucharón de Aluminio.
- ✓ Una brocha

Agregado Fino

El tamaño de la muestra de ensayo después de secado será de 300 gr mínimo.

El agregado fino deberá ser graduado dentro de los límites siguientes según Norma ASTM C 33. Ver tabla 3.1

GRADUACION DEL AGREGADO FINO				
Abertura de Malla		Porcentaje que pasa de Arena		
(9.51 mm)	3/8 in		100	
(4.75 mm)	N° 4	95	a	100
(2.36 mm)	N°8	80	a	100
(1.18 mm)	N°16	50	a	85
(600 µm)	N°30	25	a	60
(300 µm)	N°50	10	a	30
(150 µm)	N°100	2	a	10

Fuente: ASTM C-33

TABLA 3.1 Límites de graduación de agregado fino



FIGURA 3.5 Tamices certificados de abertura cuadrada para agregado fino



FIGURA 3.6 Tamizado de agregado fino

Agregado grueso:

El tamaño de la muestra de ensayo se determinó según la siguiente tabla.

Tamaño Máximo Nominal, Aberturas cuadradas, mm (pulg)	Tamaño de la muestra de ensayo, Mínimo, Kg. (lb)
9.5 (3/8)	1 (2)
12.5 (1/2)	2 (4)
19.0 (3/4)	5 (11)
25.0 (1)	10 (22)
37.5 (1 ½)	15 (33)
50 (2)	20 (44)
63 (2½)	35 (77)
75 (3)	60 (130)
90 (3½)	100 (220)
100 (4)	150 (330)
125 (5)	300 (660)

Fuente: ASTM C33

TABLA 3.2 Tamaño de la muestra de ensayo agregado grueso.



FIGURA 3.7 Tamices certificados de abertura cuadrada para agregado grueso



FIGURA 3.8 Tamizado de agregado grueso

Cálculo:

Se calculó los porcentajes que pasan, porcentajes totales retenidos, o los porcentajes en diverso tamaño de fracciones al más cercano de 0.1% en base de la masa total de la muestra seca inicial.

Módulo de finura.

El módulo de finura (MF) es un indicador que nos describe de una forma rápida y breve la porción de partículas finas contenidas en los agregados.

El módulo de finura (MF) del agregado grueso o del agregado fino se obtiene, conforme a la norma ASTM C 125, sumando los porcentajes acumulados en peso de los agregados retenidos en una serie especificada de mallas y dividiendo la suma entre 100. Las mallas que se emplean para determinar el módulo de finura son la de 0.15 mm (No.100), 0.30 mm (No.50), 0.60 mm (No.30), 1.18 mm (No.16), 2.36 mm (No.8), 4.75 mm (No.4), 9.52 mm (3/8”), 19.05 mm (3/4”), 38.10 mm (1½”), 76.20 mm (3”), y 152.40 mm (6”). El módulo de finura es un indicador del grado de partículas finas del agregado, entre mayor sea el módulo de finura, más grueso será el agregado.

3.5.3 Método de ensayo Estándar para Densidad Bruta (Peso Unitario) y vacíos en los agregados. ASTM Designación C29/ C 29M -97.

Alcance:

Este método de ensayo cubre la determinación de la densidad bulk (“peso unitario”) del agregado en una condición compactada o suelta, y calcula los vacíos entre las partículas en el agregado fino, grueso o una mezcla de ellos, basado en la misma determinación. Este método de ensayo es aplicable a agregados que no excedan las 5 pulg. (125 mm) de tamaño nominal máximo.

Material y Equipo:

- ✓ Balanza o báscula con una precisión de 0.1 % de la carga de ensayo y para cualquier punto dentro del rango de uso, con una graduación de al menos 0.1 lb (0.05 Kg).
- ✓ Varilla Compactadora: Una varilla compactadora redonda acero, de 5/8 pulg. (16 mm) de diámetro y de aproximadamente de 24 pulg. (600 mm) de longitud teniendo un extremo o ambos redondeados a una punta hemisférica, con diámetro igual a 5/8 pulg. (16 mm).
- ✓ Recipiente Volumétrico: Recipiente de forma cilíndrica, metálico, preferiblemente provisto con asas. Deberá ser impermeable, con la parte superior y la inferior planas y niveladas, suficientemente rígido para mantener su forma

bajo uso pesado. El recipiente deberá tener una altura igual al diámetro, pero en ningún caso la altura será menor del 80 % ni mayor del 150% del diámetro.

Selección del Procedimiento:

El procedimiento para densidad bruta suelta deberá ser usado solamente cuando sea estipulado específicamente. De otra manera, la densidad bruta compactada deberá ser determinada por el procedimiento de varillado para agregados que tienen un tamaño máximo nominal de 1 ½ pulg. (37.5 mm) o menos, o por el procedimiento de sacudimiento para agregados que tienen un tamaño máximo nominal mayor de 1 ½ pulg. (37.5 mm) y no excedan de 5 pulg. (125 mm).

Procedimiento de Varillado

- Seque la muestra de arena al sol y pésela en la balanza, anote el peso.
- Pese el recipiente vacío y empleando el cucharón tome la muestra.
- Llene el depósito hasta un tercio de su altura y nivele la superficie con los dedos.
- Varille la capa de agregados con 25 golpes de la varilla, igualmente distribuidos sobre la superficie.
- Llene el recipiente a dos tercios y vuelva a nivelar y varillar como se hizo antes.
- Finalmente, llene el recipiente hasta rebalsarlo y varille de nuevo en la forma previamente mencionada.
- Nivele la superficie del agregado con los dedos o regla enrasadora en tal forma que ninguna pieza del agregado grueso sobresalga, balancee los huecos en la superficie por debajo del borde del recipiente.

Al varillar la primera capa, no permita que la varilla toque el fondo del recipiente. Al varillar la segunda y tercera capa, aplique bastante fuerza, pero no más de la necesaria para causar que la varilla penetre en la capa previa de agregados.



FIGURA 3.9 Homogenizado de material para llenado de recipiente y enrazado para nivelar el material antes varillado

3.5.4 Método de Ensayo Estándar para la Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Agregado Grueso. ASTM

Designación C 127-01

Densidad relativa.

La densidad relativa (gravedad específica) de la grava se define de la misma forma que el agregado fino, como la relación del peso del agregado grueso respecto al peso de un volumen absoluto igual de agua (agua desplazada por inmersión), pero su método de determinación es distinto.

Resumen del Método de Ensayo

Una muestra de agregado es inmersa en agua por 24 ± 4 h para esencialmente llenar los poros. Entonces es removida del agua, y el agua secada de la superficie de las partículas y la masa determinada. Subsecuentemente, el volumen de la muestra es determinado por el método de desplazamiento de agua. Finalmente, la muestra es secada al horno y determinada la masa. Usando entonces los valores de masa obtenidos y las formulas en este método de ensayo, es posible calcular la densidad, densidad relativa (gravedad específica), y absorción.

Definiciones:

Absorción: Incremento en masa del agregado debido a penetración de agua en los poros de las partículas durante un período de tiempo prescrito, pero no incluye el agua adherida a la superficie externa de las partículas, expresado como un porcentaje de la masa seca.

Saturado superficialmente seco (SSS): Relativo a las partículas de agregado. La condición en la cual los poros permeables de las partículas de agregado son llenados con agua a través de la sumergencia en un periodo de tiempo prescrito, pero sin agua libre en la superficie de las partículas.

Densidad, la masa por unidad de volumen de un material, Kg/m³ o lb/ pie

Densidad (SSS), la masa del agregado saturado superficialmente seco por unidad de volumen de partículas de agregado, incluyendo el volumen de poros impermeables y agua llenando los vacíos en las partículas, pero no incluye los huecos entre las partículas.

Densidad aparente, la masa por unidad de volumen de la porción impermeable de las partículas del agregado.

Material y Equipo:

- ✓ Balanza - Un dispositivo para determinar la masa que sea sensitivo, legible, y preciso a 0.05 % de la masa de la muestra en algún punto del rango usado para este ensayo, ó 0.5 g, el que sea mayor.
- ✓ Contenedor de Muestra (charolas para una capacidad de por lo menos 5000 gr)
- ✓ Tanque de agua (libre de impureza y potable)
- ✓ Mallas: Una malla de 4.75 mm (No. 4) u otro tamaño como se necesite.

Procedimiento:

- Coloque la muestra en la charola y satúrela de agua por 24hrs.

- Colocar la muestra en una canasta y sumergirla en agua para obtener su peso saturado.
- Enseguida retire el agua y seque la muestra superficialmente con una franela ligeramente húmeda, para que estén en condición de saturadas y superficialmente secas.
- Posteriormente pesar con la balanza una cantidad de material cercana a los 5000 grs. obteniéndose de esta forma el peso, superficialmente seco de gravas.
- Coloque la muestra al horno para obtener su peso seco.
- Pese la muestra seca
- Proceda hacer los cálculos para obtener la densidad relativa del material.

La masa mínima de la muestra está dada a continuación en la tabla 3.3

Tamaño Máximo Nominal mm (pulg)	Masa Mínima de la muestra de Prueba, Kg (lb)
12.5 (1/2) o menos	2 (4.4)
19.0 (3/4)	3(6.6)
25.0 (1)	4 (8.8)
37.5 (1 1/2)	5 (11)
50 (2)	8 (18)
63 (2 1/2)	12 (26)
75 (3)	18 (40)
90 (3 1/2)	25 (55)
100 (4)	40 (88)
125 (5)	75 (165)

Fuente: ASTM C 127-01

TABLA 3.3 Masa mínima para la muestra de ensayo



FIGURA 3.10 Muestras en estado superficialmente secas y saturadas

- **Porcentaje de absorción.**

La absorción en la grava se define como la capacidad que tiene esta de absorber el agua hasta quedar todas las partículas sobresaturadas.

Material y equipo:

- Charola. - La charola deberá ser metálica y con una capacidad de por lo menos 5000gr.
- Horno o estufa.
- Cristal de reloj. Este deberá estar limpio y podrá ser de cualquier tamaño y con un espesor de 3mm.
- Grava. - Muestra de grava de 5 kg deberá haber sido tomada como se mencionó anteriormente.
- Balanza. - Balanza calibrada con aproximación al 0.1 gr. Y capacidad de por lo menos 5kg.
- Franela.
- Agua. - El agua deberá estar libre de impurezas y ser potable.

Procedimiento:

- 1) Coloque la muestra en la charola y satúrela de agua por 24hrs.

- 2) Enseguida retire el agua y se seque las gravas superficialmente con una franela ligeramente húmeda, para que estén en condición de saturadas y superficialmente secas.
- 3) Posteriormente pese con la balanza una cantidad de material cercana a los 500 grs, obteniéndose de esta forma el peso saturado y superficialmente seco de gravas (W_{sss}).
- 4) Sin que haya pérdida de material, vacíe las gravas de nuevo a la charola para secarlas totalmente ya sea en la estufa o en el horno, obteniéndose el peso de
- 5) gravas secas (W_s).

Cálculos matemáticos:

Sustituya los valores obtenidos en la fórmula siguiente y se obtiene el por ciento de absorción de la grava: % adsorción = $((w_{sss} - w_s) / w_s) (100)$

Dónde:

W_{sss} = Peso saturado superficialmente seco de la grava. W_s = Peso seco de la grava.



FIGURA 3.11 Secado superficial del agregado grueso

3.5.5 Método de Ensayo Estándar para Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino ASTM Designación C 128 – 00.

Densidad relativa.

Se define como densidad relativa (también llamada gravedad específica) de un agregado, la relación de su peso respecto al peso de un volumen absoluto igual de agua (agua desplazada por inmersión). Se usa en ciertos cálculos para proporcionamiento de mezclas y control, por ejemplo, en la determinación del volumen absoluto ocupado por el agregado. Generalmente no se le emplea como índice de calidad del agregado, aunque ciertos agregados porosos que exhiben deterioro acelerado a la congelación-deshielo tengan pesos específicos bajos. La mayoría de los agregados naturales tienen densidades relativas entre 2.4 y 2.9.

Resumen del Método de Ensayo

Una muestra de agregado es sumergida en agua por 24 ± 4 h a esencialmente poros llenos. Es entonces removido del agua, el agua es secada de la superficie de las partículas y la masa determinada. Subsecuentemente, la muestra (o una porción de esta) se coloca en un recipiente graduado y el volumen de la muestra se determina por el método gravimétrico o volumétrico. Finalmente, la muestra se seca al horno y la masa determinada de nuevo. Usando entonces los valores de masa obtenida y fórmulas de este método de ensayo, es posible calcular la densidad, densidad relativa (gravedad específica), y absorción.

Material y equipo

- ✓ Balanza
- ✓ Picnómetro
- ✓ Frasco (para usar con el procedimiento volumétrico)
- ✓ Molde y Pisón para ensayo de humedad superficial.
- ✓ Gotero. - El gotero podrá ser de cualquier capacidad y/o material.

- ✓ Horno o estufa.
- ✓ Charola. - La charola deberá ser metálica y con una capacidad de por lo menos 1000gr.
- ✓ Cristal de reloj. Este deberá estar limpio y podrá ser de cualquier tamaño y con un espesor de 3mm.
- ✓ Agua. - El agua deberá estar libre de impurezas y ser potable.

Procedimiento:

Procedimiento Gravimétrico (Picnómetro):

- Llene parcialmente el picnómetro con agua. Introduzca en el picnómetro 500 ± 10 g de agregado fino saturado superficialmente seco preparado como se describe en la sección y llene con agua adicional hasta aproximadamente el 90 % de la capacidad. Agite el picnómetro (manual ó mecánicamente).
- Manualmente ruede, invierta y agite el picnómetro para eliminar todas las burbujas de aire
- Mecánicamente agite el picnómetro por vibración externa, de tal manera que no degrade la muestra. Un nivel de agitación ajustado en un conjunto de partículas individuales en movimiento es suficiente para promover el desairado sin degradación. Después de eliminar todas las burbujas de aire, ajuste la temperatura del picnómetro y su contenido a 23.0 ± 2.0 °C si es necesario por inmersión parcial en agua circulando, y lleve el nivel del agua en el picnómetro a su capacidad de calibración. Determine la masa total del picnómetro, el espécimen y el agua.
- Remueva el agregado fino del picnómetro, seque a masa constante a una temperatura de 110 ± 5 °C, enfríe al aire a la temperatura del cuarto para $1 \pm \frac{1}{2}$ h y determine la masa.
- Determine la masa del picnómetro lleno con agua a su capacidad de calibración a una temperatura de 23.0 ± 2.0 °C.



FIGURA 3.12 Llenado de picnómetro

Porcentaje de absorción.

Los agregados generalmente se encuentran en la intemperie y se encuentran expuestos a cambios atmosféricos, por lo que al presentarse una lluvia tienen la capacidad de absorber el agua hasta quedar todas las partículas que los componen totalmente sobresaturadas.

Equipo y material:

- Balanza: balanza calibrada con aproximación al 0.1 gr. y capacidad de por lo menos 1kg
- Molde troncocónico: Molde troncocónico metálico, suficientemente rígido y con una base igualmente metálica para depositar el material sobre una superficie lisa y limpia.
- Pisón: pisón metálico con la parte superior redonda que tiene un diámetro inferior a la parte superior del molde troncocónico y que sirve para compactar el material.
- Horno o estufa.
- Charola: La charola deberá ser metálica y con una capacidad de por lo menos 1000gr.
- Cristal de reloj: Este deberá estar limpio y podrá ser de cualquier tamaño y con un espesor de 3mm.
- Agua: El agua deberá estar libre de impurezas y ser potable.

Procedimiento:

- Tome una porción de la muestra de arena tal que, al secarla en el horno o la estufa, tenga un peso constante de 500gr. Verifique que el material este seco pasando el cristal de reloj por la superficie hasta que este no se empañe. Este peso es el que se considerará como el peso seco de la arena (W_s).
- Coloque la muestra de arena en la charola y satúrela de agua.
- Deje reposar la arena en estado saturado por lo menos 24hrs. y retire el agua para proceder a obtener el estado de saturado interiormente de agua y superficialmente seco.
- Tienda la arena en una superficie limpia y seca exponiéndola a la intemperie, moviéndola de un lado a otro, para que por efecto del sol y el viento, se logre el estado superficialmente seco; para verificar que el agregado fino se encuentre en este estado, se toma una porción de él y se deposita en el molde troncocónico, el cual se llena con la arena en 2 capas, la primera hasta la mitad del molde, dándole 15 golpes para compactarla y 10 golpes a la segunda capa; se enrasa y se retira el cono, hacia arriba, sin hacer movimientos laterales. Si al retirarse el molde el material mantiene la forma de este, nos dice que la arena tiene exceso de humedad, por lo cual se continúa secando y se vuelve a repetir la operación antes descrita, hasta que, cuando se retire el cono, arena se desmorone libre y lentamente; cuando suceda esta condición habremos obtenido el estado deseado.
- Pese con la balanza la muestra de arena en este estado (W_{sss}).



FIGURA 3.13 Determinación de la condición saturada superficialmente seca en muestra de arena

3.5.6 Método de Ensayo Estándar para Contenido de Humedad Total del Agregado por Secado. ASTM Designación C 566 – 97

Resumen del método de ensayo

Una muestra de agregado en condición húmeda cuya masa es conocida, se somete a un proceso de secado en un horno hasta alcanzar una masa constante por pérdida del contenido total de humedad evaporable en la superficie y en los poros de sus partículas.

Material y equipo:

- ✓ Balanza
- ✓ Fuente de Calor (Horno, Cocina o estufa)
- ✓ Recipiente para la muestra
- ✓ Agitador (Cuchara metálica o espátula)

Procedimiento

1. Pese la muestra con una aproximación de 0.1 %
2. Seque la muestra completamente en el recipiente, por medio de la fuente de calor seleccionada, teniendo el cuidado de evitar la pérdida de alguna partícula. El calentamiento muy rápido puede causar que algunas partículas exploten, causando la pérdida de material. Use un horno de temperatura controlada cuando el calor excesivo

pueda alterar las características del agregado, o cuando se requiere mayor precisión en la medida. Si se usa una fuente de calor diferente al horno de temperatura controlada, agite la muestra durante el secado para acelerar la operación y evite sobrecalentamiento localizado. Cuando se use un horno de microondas, la agitación de la muestra es opcional.

Las muestras a ensayar deben de cumplir con lo establecido en las Normas ASTM D 75, ASTM C 702 con los siguientes requerimientos mínimos ver tabla 3.4

Tamaño máximo nominal del agregado mm (pulg)	Masa de peso normal muestra de agregado min. Kg.
4.75 (N° 4)	0.5
9.5 (3/8)	1.5
12.5 (1/2)	2
19.0 (3/4)	3
25.0 (1)	4
37.5 (1½)	6
50 (2)	8
63 (2½)	10
75 (3)	13
90 (3½)	16
100 (4)	25
150 (6)	50

Fuente: ASTM C56-97

TABLA 3.4 Tamaño de la Muestra para Agregado Grueso

Cálculos:

Dónde:

w = contenido de humedad de la muestra, (%)

m = masa de la muestra original, (g)

d = masa de la muestra seca, (g)

El contenido de humedad superficial es igual a la diferencia entre el contenido de humedad total y la absorción, con todos los valores basados en pesos secos.

3.5.7 Método de Ensayo Estándar para Determinar Esfuerzos de Compresión en Especímenes Cilíndricos de Concreto. ASTM Designación: C39/C39M-01

Procedimiento

1. Los ensayos de compresión en especímenes curados húmedos, serán hechos tan pronto como sea practicable, después de removerlos del almacenamiento húmedo.
2. Los especímenes deberán ser mantenidos húmedos por algún método conveniente durante el período entre la remoción del lugar de curado y el ensayo. Serán ensayados en condición húmeda.
3. Todos los especímenes para una edad de ensayo dada, serán rotos con la tolerancia de tiempo permisible prescritos a continuación:

Edad de Ensayo	Tolerancia Permitida
24 horas	± 0.5 horas ó 2.1%
3 días	2 horas ó 2.8%
7 días	6 horas ó 3.6%
28 días	20 horas ó 3.0%
90 días	2 días ó 2.2%

Fuente: ASTM C 39/39M-01

TABLA 3.5 Edad de los especímenes y tolerancias permitidas para su ruptura

4. *Colocación del espécimen:* Coloque la placa inferior, con su cara endurecida hacia arriba, sobre la mesa o bloque de la máquina de ensayo, directamente debajo del bloque de carga con asiento esférico. Limpiar las superficies de carga de los bloques superior e inferior y del espécimen de ensayo y coloque éste en el bloque de carga inferior. Cuidadosamente alinear el eje del espécimen con el centro de carga del bloque con asiento esférico.

3.6 REALIZACIÓN DE LOS DISEÑOS DE MEZCLAS DE CONCRETO PARA LA ELABORACIÓN DE LOS ENSAYOS

Con los datos obtenidos de los ensayos de caracterización de los agregados se elaboraron 6 diseños de mezclas con una variación en la relación A/C de 0.10, empezando desde una relación de 0.40 hasta una relación de 0.60 estas mezclas se realizaran mediante el método de peso y volumen absoluto, elaborado por el Comité ACI 211.1 Este método se fundamenta en el principio básico de la relación agua/cemento desarrollado por Abrams; consiste en seguir en forma ordenada una secuencia de pasos, para determinar la cantidad de cada material en peso y volumen para 1 m³ de concreto.

Se mantuvieron fijas muchas variantes en las mezclas, esto con el fin de que no afectaran los resultados que se pretenden obtener, que es la variación de la permeabilidad en función de la relación agua/cemento.

A las mezclas frescas se les tomaron los siguientes datos.

- Revenimiento
- Temperatura
- Contenido de Aire

3.6.1 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO PARA LA REALIZACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO

1. **Elección del revenimiento.** El concreto debe ser fabricado para tener siempre una trabajabilidad, consistencia y plasticidad adecuadas para las condiciones de

trabajo. La trabajabilidad es una medida de lo fácil o difícil que resulta colocar, consolidar y darle acabado al concreto.

Se requieren distintos revenimientos para los diferentes tipos de construcción con concreto; cuando no se especifica el revenimiento, se puede elegir un valor aproximado de la tabla 3.6

Tipos de construcción	Revenimiento cm	
	Máximo*	mínimo
Muros de cimentación y zapatas	7.5	2.5
Zapatas, cajones de cimentación y muros de sub estructuras sencillos.	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados	10	2.5
Columnas para edificios	10	2.5
Pavimentos y lozas	7.5	2.5
Concreto masivo	7.5	2.5
*El revenimiento puede incrementar cuando se le agrega aditivos químicos, se debe considerar que el concreto tratado con aditivo, tiene una relación de agua/material cementante igual o menor sin que potencialmente se tenga segregación o sangrado excesivo		
*Se puede incrementar en 2.5cm cuando los métodos de compactación no sean mediante vibrado		

Fuente: Boletín de Ingeniería EB201, Diseño y Control de mezclas de concreto, PCA

TABLA 3.6 Revenimientos Recomendados para Varios Tipos de Construcción

2. Resistencia Promedio Requerida.

Cuando no se llevan registros de prueba de resistencia en el campo, para el cálculo de la desviación estándar la resistencia promedio requerida fcr debe determinarse según la tabla 3.7

Resistencia a la compresión especificada f'_c	Resistencia promedio requerida f'_{cr}
$< 210 \text{ kg/cm}^2$	$F'_c + 70$
210a 350	$F'_c + 85$
$> 350 \text{ kg/cm}^2$	$F'_c + 50$

TABLA 3.7 Cálculo de resistencia requerida cuando no hay datos disponibles de S

- ✓ Para nuestro caso nuestros diseños de mezcla tendrán una resistencia a compresión especificada de $f'_c = 210$ a 350 kg/cm^2

$$F_{cr} = 210 \text{ kg/cm}^2 + 85$$

$$F_{cr} = 295 \text{ kg/cm}^2$$

3. **Elección del Tamaño Máximo Nominal.** El tamaño máximo nominal está limitado por las dimensiones de la estructura teniéndose presente que, en ningún caso, debe exceder de un quinto de la menor dimensión entre los lados de la fortaleza, de un tercio del espesor de las losas, ni de las tres cuartas partes del espaciamiento libre entre varillas individuales de refuerzo. Estas restricciones se pueden evitar, si a juicio del ingeniero, la trabajabilidad y los métodos de compactación son tales, que el concreto se puede colocar sin que se produzcan vacíos, para nuestro caso el tamaño máximo nominal que se utilizará en nuestros diseños de mezclas será $\frac{3}{4}$ " (19 mm)

4. **Cantidad de Agua de Mezclado.** La cantidad de agua por volumen unitario de concreto que se requiere para producir un revenimiento dado, depende del tamaño máximo del agregado, la forma y textura de las partículas, así como de la gradación de los agregados, de la cantidad de aire incluido y de los aditivos reductores de agua (cuando son utilizados).

Tabla.3.8 Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado								
Revenimiento. cm	Agua, kg/m ³ para el concreto de agregado de Tamaño Máximo nominal							
	9.5*	12.5*	19*	25*	38*	50*	75*+...	150*+...
2.5 a 5	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	-----
Cantidad aproximada de aire, en concreto sin aire incluido, %	3	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
*Estas cantidades de agua de mezclado para emplearse en el cálculo del contenido de cemento para mezclas de prueba, a una temperatura de 20°C a 25°C								
*Son cantidades máximas para agregados grueso, angulosos razonablemente bien formados y con granulometría dentro de los límites aceptados por la norma ASTM C-33								

Fuente: Boletín de Ingeniería EB201, Diseño y Control de mezclas de concreto, PCA

TABLA: 3.8 Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado

Para nuestro diseño como el tamaño máximo nominal es de ¾” (19 mm) y con un revenimiento de 7cm a 10 cm, entonces la cantidad aproximada de aire en concreto sin aire incluido es de 2%. Entonces la cantidad de agua por metro cubico es de.

Cantidad de agua= 205 kg/m³

5. Cálculo de contenido de cemento

El cálculo del contenido de cemento lo obtenemos dividiendo el contenido de agua 205 kg/m³ entre, la relación que queremos la cual para nuestro primer diseño es de 0.40.

$$R = A/C \quad C = A/R$$

Sustituyendo valores se tiene:

$$\text{Contenido de cemento} = (205\text{kg/m}^3) / 0.40$$

Contenido de cemento = 512.5 kg

6. Estimación del contenido de Agregado Grueso. Ver tabla 3.9

Tamaño Máximo nominal del agregado	Volumen de agregado grueso* varillado en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de arena			
	MF= 2.4	2.6	2.8	3
9.5 (3/8")	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5(1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53
19(3/4")	0.66	0.64	0.62	0.60
25(1")	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5(1 1/2")	0.75	0.71	0.71	0.69
50(2")	0.78	0.76	0.74	0.72
75(3")	0.82	0.80	0.78	0.76
150(6")	0.87	0.85	0.83	0.81

***Volúmenes seleccionados a partir de relaciones empíricas para producir concretos con un grado de trabajabilidad adecuado a la construcción reforzada común.**

Fuente: Boletín de Ingeniería EB201, Diseño y Control de mezclas de concreto, PCA

TABLA 3.9 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

Para nuestro análisis, el dato obtenido en el laboratorio del módulo de finura es de 2.68, la tabla antes mencionada no cuenta con el dato de MF= 2.68, entonces se procede a la interpolación.

Cuando se tiene el valor buscado, se procede con los cálculos para obtener el contenido del agregado grueso.

$$\text{Cantidad de agregado grueso} = \text{P.U. compactado (kg/m}^3\text{)} \times 0.63$$

$$\text{Cantidad A.G} = (1492.09 \text{ kg/m}^3) (0.63)$$

$$\text{Cantidad A.G.} = 943 \text{ kg}$$

7. Contenido de agregado fino. Para obtener el peso requerido de la arena por metro cubico, se procede la diferencia de un metro cubico menos la sumatoria los pesos por metro cubico de los materiales encontrados.

Valores conocidos:

$$\text{Agua} = 205 \text{ kg}/1000 \text{ kg/m}^3 = 0.205 \text{ m}^3$$

$$\text{Cemento} = 512.50 / 2960 \text{ kg/m}^3 = 0.17 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire } 2\% = 0.02$$

$$\text{Grava} = 943 \text{ kg} / 2500 \text{ kg/m}^3 = 0.37 \text{ m}^3$$

8. Corrección por humedad y absorción de agregados para la humedad especificada

$$\text{Arena} = 554 \times (1 + (12.5/100))$$

$$\text{Arena} = \mathbf{554.12}$$

$$\text{Grava} = 943 \times (1 + (1.7/100))$$

$$\text{Grava} = \mathbf{959.03}$$

9. Calculando agua superficial aportada por el agregado

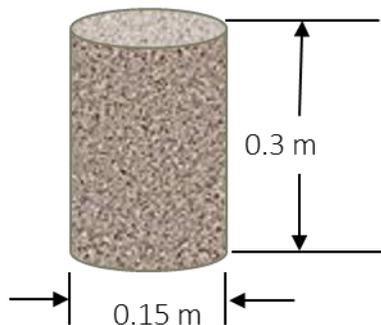
$$\text{Arena} = 4.17\% \text{ (absorción)} - 12.5\% \text{ (humedad)} = - 8.33 \text{ L}$$

$$\text{Grava} = 2.46\% \text{ (absorción)} - 1.7\% \text{ (humedad)} = 0.76 \text{ L}$$

El requerimiento estimado de adición de agua es $205 - 8.33 + 0.76 = \mathbf{197.43 \text{ L}}$

Material	Peso (kg) / 1m ³	
	Seco	Húmedo
Agua	205.00	197.43
Cemento	512.50	512.50
Grava	943.00	959.03
Arena	554.00	554.12
P.U Teórico	2214.5	2223.08

10. Calculando volumen para mezcla de prueba



$$\text{Radio} = 0.075 \text{ m}$$

$$\text{Altura} = 0.3 \text{ m}$$

$$A = (\pi) (0.075\text{m})$$

$$A = 0.01767\text{m}^2$$

$$V = (0.3\text{m}) (0.01767 \text{ m}^2)$$

$$V = 0.00530145\text{m}^3$$

11. Volumen para mezcla de prueba

$$\text{Numero de cilindros} = 9$$

$$\text{Volumen total} = 9 \times (0.00530145\text{m}^3) = 0.04771305 \text{ m}^3$$

12. Cantidad de materiales para mezcla de prueba

Agua	9.42	lt
Cemento	24.45	kg
Grava	45.76	kg
Arena	26.44	kg



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO MEDIANTE ACI 211.1

Relacion A/C 0.40

**PROYECTO: TESIS DETERMINACION DE LA PERMEABILIDAD EN MEZCLAS DE CONCRETO
 HIDRAULICO CONSIDERANDO RELACIONES AGUA/CEMENTO DE 0.40, 0.50 Y 0.60**

Descripcion : Mezcla Teorica N° 1	
Revenimiento	7.5 cm
Resistencia a los 28 dias, Fc	210 kg/m ²
Tipo de cemento	ASTM C 1157 GU
Tamaño maximo	3/4"

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Material	P. Especifico	Humedad (%)	Absorcion (%)	P. U. Comp (kg/m ³)	TMN (plg)	MF
Agua	1					
Cemento	2.96					
Grava	2.5	1.70	2.46	1492.01	3/4"	-
Arena	2.4	12.50	4.17		-	2.68

CANTIDADES REQUERIDAS PARA UN (1) M ³ DE CONCRETO (En peso) SIN CORRECCION DE HUMEDAD	
Agua de Mezcla (Lts)	205
Cemento (Kgs)	512.5
Arena (Kgs)	554
Grava (Kgs)	943

* Para mezcla con aire incluido se agregó 1.5 ml de aditivo inductor de aire por kg de cemento.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO MEDIANTE ACI 211.1

Relacion A/C **0.50**

**PROYECTO: TESIS DETERMINACION DE LA PERMEABILIDAD EN MEZCLAS DE CONCRETO
 HIDRAULICO CONSIDERANDO RELACIONES AGUA/CEMENTO DE 0.40, 0.50 Y 0.60**

Descripcion : Mezcla Teorica N° 1	
Revenimiento	7.5 cm
Resistencia a los 28 dias, Fc	210 kg/m²
Tipo de cemento	ASTM C 1157 GU
Tamaño maximo	3/4"

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Materiales	P. Especifico	Humedad (%)	Absorcion (%)	P. U. Comp (kg/m³)	TMN (plg)	MF
Agua	1					
Cemento	2.96					
Grava	2.5	1.70	2.46	1492.01	3/4"	-
Arena	2.4	12.50	4.17		-	2.68

CANTIDADES REQUERIDAS PARA UN (1) M ³ DE CONCRETO (En peso) SIN CORRECCION DE HUMEDAD	
Agua de Mezcla (Lts)	168
Cemento (Kgs)	336
Arena (Kgs)	685
Grava (Kgs)	1020

* Para mezcla con aire incluido se
 agregó 1.5 ml de aditivo inductor de
 aire por kg de cemento.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO MEDIANTE ACI 211.1

Relacion A/C **0.60**

PROYECTO: TESIS DETERMINACION DE LA PERMEABILIDAD EN MEZCLAS DE CONCRETO
HIDRAULICO CONSIDERANDO RELACIONES AGUA/CEMENTO DE 0.40, 0.50 Y 0.60

Descripcion : Mezcla Teorica N° 1	
Revenimiento	7.5 cm
Resistencia a los 28 dias, Fc	210 kg/m ²
Tipo de cemento	ASTM C 1157 GU
Tamaño maximo	3/4"

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Materiales	P. Especifico	Humedad (%)	Absorcion (%)	P. U. Comp (kg/m ³)	TMN (plg)	MF
Agua	1					
Cemento	2.96					
Grava	2.5	1.70	2.46	1492.01	3/4"	-
Arena	2.4	12.50	4.17		-	2.68

CANTIDADES REQUERIDAS PARA UN (1) M³ DE
CONCRETO (En peso)
SIN CORRECCION DE HUMEDAD

Agua de Mezcla (Lts)	168
Cemento (Kgs)	280
Arena (Kgs)	735
Grava (Kgs)	1020

* Para mezcla con aire incluido se
agrego 1.5 ml de aditivo inductor de
aire por kg de cemento.

3.7 ELABORACIÓN DE MUESTRAS.

Se realizaron un total de 12 cilindros por cada mezcla, nueve de 15 x 30 cms para ensayo a compresión, las muestras que se realizaron para ensayo de permeabilidad fueron tres de 12 cm x 20cm, los cilindros se realizaron según norma ASTM C 192 que indica dicho procedimiento.

3.7.1 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE ESPECÍMENES DE PRUEBA PARA ENSAYOS

DOCUMENTOS DE REFERENCIA:

ASTM C-192 Practica Normalizada para la Preparación y Curado de Especímenes de concreto para ensayo en laboratorio.

ASTM C172 Practica Normalizada para Muestreo de concreto Recién Mezclado.

ASTM C231/C231M – 14 Método de Ensayo Normalizado de Contenido de Aire del Concreto Recién Mezclado Mediante el Método por Presión

MATERIAL Y EQUIPO

- ✓ Cemento Portland Norma ASTM C 1157 tipo GU
- ✓ Arena
- ✓ Grava 19 mm
- ✓ Agua Potable
- ✓ Probeta de 1000 ml
- ✓ *Moldes para hacer especímenes verticales* Los moldes para hacer los especímenes de prueba de concreto (ver figura), deben satisfacer los requerimientos de la especificación C 470.

Los moldes para especímenes o abrazadera que estarán en contacto con el concreto, deberán estar hechos de acero, hierro fundido o cualquier otro material no absorbente, que no reaccione con concretos de cemento Pórtland u otros cementantes hidráulicos.



FIGURA.3.14 Molde cilíndricos de 15 x 30 cms de diámetro



FIGURA.3.15 Molde de hierro forjado y PVC de 20 x 12 cms de diámetro para especímenes de permeabilidad

- ✓ *Varilla de apisonamiento.* - La varilla debe ser redonda, recta, de acero de 5/8 de pulgada (16mm) de diámetro y de aproximadamente 24 pulg. (610 mm) de longitud, con el extremo apisonador redondeado en semi-esfera, cuyo diámetro sea el mismo.

- ✓ *Martillo*: Con cabeza de goma o de cuero crudo que pese 1.25 ± 0.50 lb. (0.57 ± 0.23 kg.).
- ✓ *Herramientas Auxiliares*. Las herramientas y accesorios que pueden necesitarse son palas, cubetas, llanas, charola de madera, charola de lámina, enrasador, calibrador de precisión, cucharones y reglas.

Elaboración del concreto

- Pese las cantidades de cada uno de los materiales a utilizar y déjelos en las charolas o baldes hasta el momento de utilizarlos, mida el agua necesaria de absorción en la probeta y el aditivo si en la mezcla se deberá incluir.
- Prepare en un lugar adecuado los moldes.
- Asegúrese que el mecanismo o funcionamiento de la mezcladora sea el correcto, al mismo tiempo humedezca el tambor de mezclado y escurra totalmente el agua.
- Previo a iniciar la rotación del tambor, añadir el agregado grueso y algo de agua. Encender la mezcladora y añadir el agregado fino, el cemento y el resto del agua con la mezcladora en funcionamiento.



FIGURA 3.16 Vertido de agregados en concretera



FIGURA 3.17 Incorporación de agua y aditivo inclusor de aire en la mezcla

- Verter el concreto ya mezclado en un recipiente previamente humedecido. Con el concreto de la bandeja realice la prueba de revenimiento, dentro de los 5 minutos siguientes de la obtención de la muestra de concreto.

Muestreo del concreto.

Las muestras utilizadas para fabricar los especímenes se deberán obtener de acuerdo a la Norma ASTM C 172 esta norma trata sobre los procedimientos para la obtención de muestras representativas de concreto fresco obtenidas in situ.

Determinación del Asentamiento del concreto hidráulico.

Documentos de Referencia

ASTM C143/C143 M-00. Método de ensaye estándar para la determinación del revenimiento en el concreto a base de cemento hidráulico.

Se le conoce como revenimiento a la fluidez que presenta la mezcla de concreto. Esta prueba tiene como objetivo determinar la fluidez del concreto fresco por el

- **Método del asentamiento del cono de Abrams.**

Procedimiento:

- Limpie el cono, Humedezca con agua y colóquelo sobre la placa de revenimiento. La placa para la prueba de revenimiento debe estar limpia, firme, nivelada, y no debe ser absorbente, Obtenga una muestra de concreto, párese firmemente sobre los estribos y llene 1/3 del volumen del cono con la muestra. Compacte el concreto varillando 25 veces, llene a 2/3 y nuevamente varille 25 veces, justo hasta la parte superior de la primera capa, llene hasta que empiece a derramarse, varillando nuevamente, esta vez justo hasta la parte superior de la segunda capa, colme el cono hasta que se derrame.



FIGURA.3.18 Varillado para revenimiento

- Nivele la superficie con la varilla de acero como una acción de rodillo. Limpie el concreto que quede alrededor de la base y de la parte superior del cono, empuje hacia abajo sobre las asas y deje de pisar los estribos, levante cuidadosamente el cono en dirección recta hacia arriba, asegurándose de que no se mueva la muestra. Coloque el cono al revés y ponga la varilla a través del cono volteado, Una vez levantado el molde se mide inmediatamente la disminución de altura del concreto moldeado respecto al molde. La medición se hace en el eje central del molde en su posición original.



FIGURA 3.19 Lectura de revenimiento

Determinación del contenido de aire en el concreto

Documentos de referencia.

ASTM C231/C231M – 14 Método de Ensayo Normalizado de Contenido de Aire del Concreto Recién Mezclado Mediante el Método por Presión

Equipo y material:

- Equipo de medición de aire. Deberá ser un recipiente con tapa de acero cuya capacidad mínima es de 6 litros. Cuenta con una tapa hermética, un par de llaves de agua, cámara de presión con dial, bomba manual, válvulas y accesorios.
- Varilla punta de bala.
- Una barra recta plana de acero u otro metal conveniente, de por lo menos 3 mm (1/8 de pulg). Se utilizará para enrasar.
- Mazo (con cabeza de hule o cuero crudo), con una masa aproximadamente de 0.57 ± 0.23 kg (1.25 ± 0.50 lb)
- Mezcla de concreto.

Procedimiento:

- Llene el recipiente con la muestra de concreto según el asentamiento del cono.
- Coloque el concreto en tres capas de igual volumen, Apisone cada capa con 25 golpes de pisón distribuidos en toda el área. La capa inferior se apisona en toda

su altura sin golpear el fondo y las capas superiores se apisonarán de modo que el pisón penetre aproximadamente 3 cm en la capa subyacente.



FIGURA 3.20 Varillado para ensayo de contenido de aire

- Después de apisonar, golpee los costados del recipiente 10 a 15 veces con un mazo. Con el propósito de evitar colmenas y llenar los vacíos, los golpes tienen que ser moderados. Una vez compactada la muestra, enrase y alise la superficie. Para que la tapadera del equipo quede perfectamente horizontal y no haya fuga cuando se le aplique presión.
- Limpie los bordes y en especial la goma de sello y coloque y ajuste la tapa herméticamente con las llaves de apriete. Cierre las válvulas para aire y abra las llaves para agua, introduzca el agua por una de las llaves de agua hasta que fluya por la otra llave.
- Golpee lateralmente con el mazo para expulsar burbujas de aire atrapadas en el agua introducida, Bombee el aire a la cámara de presión hasta que la aguja del dial llegue a la marca de presión inicial. Deje reposar por algunos segundos para enfriar el aire comprimido, después se estabilizará la aguja mediante bombeo, en la marca de presión.



FIGURA 3.21 Vertido de agua en equipo para determinar contenido de aire

- Golpee suavemente los costados del recipiente, como también la tapa del dial para estabilizar la lectura.
- Tome la lectura a partir de la primera vez en que se detiene la aguja del manómetro, con aproximación a 0,1% el contenido de aire registrado en el manómetro. Antes de abrir la tapa, mantenga cerradas las válvulas de aire y después abra las llaves de agua para liberar la presión de aire existente en el recipiente.



FIGURA 3.22 Lectura de contenido de aire

- **Temperatura.**

Documento de Referencia.

ASTM C1064 Método de ensayo Normalizado de Temperatura de Concreto de Cemento Hidráulico recién mezclado.

Procedimiento.

Colocar el dispositivo medidor de temperatura, de modo que el sensor de temperatura esté sumergido al menos 75 mm (3 pulg) en el concreto recién mezclado. Presionar suavemente la superficie del concreto alrededor del dispositivo medidor de temperatura, para cerrar los vacíos provocados por la inmersión y para que la temperatura del aire circundante no afecte la medición. Dejar el dispositivo medidor de temperatura en la mezcla de concreto recién mezclado por un período mínimo de dos minutos, pero no más de cinco minutos; entonces leer y registrar la misma, con una aproximación de 0.5°C (1°F). No retirar del concreto el dispositivo, cuando haga la lectura. Registrar la temperatura medida del concreto recién mezclado, con una aproximación de 0.5° C.



FIGURA 3.23 Determinación de la temperatura

Llenado de cilindros de (15 x 30) cm y (20 x 12) cm

- ✓ Llenar el molde con tres capas iguales, este tiene que estar engrasado (lubricado, para que al momento del desmolde sea fácil el retiro del espécimen). Para cilindros de permeabilidad se elaboraron moldes de PVC con un espesor de 1cm, una altura de 12 cm, diámetro interno de 20 cm, sujetado con abrazaderas.



FIGURA.3.24 Llenado de cilindros para ensayo de permeabilidad cilindros de 20 x 12 cms



FIGURA 3.25 Llenado de especímenes de 15 x 30 cms para ensayo a compresión

- ✓ Con la varilla apisonadora compactar cada capa con 25 penetraciones, posteriormente con el mazo de hule, dar de 9 a 12 golpes alrededor del molde para liberar las burbujas de aire que puedan quedar atrapadas.



FIGURA 3.26 Varillado de cilindros para ensayo de permeabilidad

RETIRO DE MOLDE Y CURADO

- ✓ Pasados 24 ± 8 horas retirar del molde los especímenes de prueba e identificar con un código o fecha de colado.



FIGURA 3.27 Especímenes elaborados con una relación agua/cemento 0.60 con aire incluido

Curado:

Después del moldeo los especímenes de concreto deben permanecer almacenados en un ambiente húmedo evitando cualquier pérdida de humedad. Se debe evitar vibraciones, movimientos bruscos, golpes o inclinaciones. Los especímenes permanecerán dentro de

la tina de curado hasta que llegue el momento de ser transportados al lugar donde se van a ensayar para su caracterización en estado endurecido.

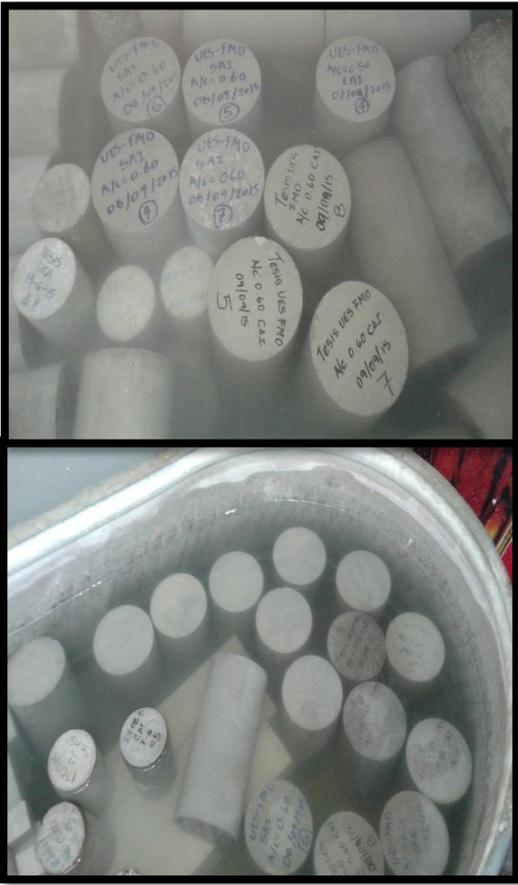


FIGURA 3.28 Curado de cilindros

3.8 Resultado de los ensayos de caracterización de los agregados

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ENSAYO GRANULOMETRICO DE AGREGADO GRUESO ASTM C – 136

Proyecto: TRABAJO DE GRADUACIÓN: Determinación de la Permeabilidad en mezclas de concreto hidráulico considerando relaciones agua/cemento de 0.40, 0.5 y 0.60.

Procedencia: **Cantera San Diego.**

Fecha: 23-Jun-15

Peso inicial: 5629 grs

MALLA	M. RETENIDO (g)	MASA RETENIDA PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	QUE PASA LA MALLA (%)
3/4"	600	10.66	10.66	89.34
1/2"	2725	48.41	59.07	40.93
3/8"	1216	21.60	80.67	19.33
N° 4	1009	17.93	98.60	1.40
N°8	43	0.76	99.36	0.64
FONDO	36	0.64	100.00	0
SUMAS	5629	100.00		

Observaciones: Tamaño Máximo Nominal 3/4"

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ENSAYO GRANULOMETRICO DE AGREGADO GRUESO ASTM C – 136

Proyecto: TRABAJO DE GRADUACIÓN: Determinación de la Permeabilidad en mezclas de concreto hidráulico considerando relaciones agua/cemento de 0.40, 0.5 y 0.60.

Procedencia: **Cantera San Diego.**

Fecha: 23-Jun-15

Peso inicial: 466.3 grs

MALLA	MASA RETENIDA (g)	MASA RETENIDA PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	QUE PASA LA MALLA (%)
3/8"	0	0	0	100
N° 4	15.1	3.24	3.24	96.76
N° 8	35.8	7.68	10.92	89.08
N° 16	65.7	14.09	25.01	74.99
N° 30	119.3	25.58	50.59	49.41
N° 50	144.5	30.99	81.58	18.42
N° 100	71.6	15.35	96.94	3.06
FONDO	13.3	2.85	99.79	0.21
SUMAS	465.3	99.79		

e = 0.2%

$$Mf = \frac{\text{sumatoria de porcentaje acumulado retenido desde la malla N° 4 a N° 100}}{100}$$

$$Mf = \frac{268.27}{100}$$

$$Mf = 2.68$$

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ENSAYO DE PESO VOLUMETRICO VARILLADO ASTM C- 29

Proyecto: TRABAJO DE GRADUACIÓN: Determinación de la Permeabilidad en mezclas de concreto hidráulico considerando relaciones agua/cemento de 0.40, 0.5 y 0.60.

Procedencia: **Cantera San Diego.**

Fecha: 23-Jun-15

VARILLADO

A MASA RECIPIENTE VACIO (kg):	5.425
B VOLUMEN RECIPIENTE (m ³):	0.00943
MASA RECIPIENTE + AGREGADO(kg) # 1	19.569
MASA RECIPIENTE + AGREGADO(kg) # 2	19.470
MASA RECIPIENTE + AGREGADO(kg) # 3	19.445
MASA RECIPIENTE + AGREGADO (kg) PROMEDIO:	19.4947
C MASA AGREGADO (kg) PROMEDIO:	14.0697
PESO UNITARIO (kg/m ³)	1492.09

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA EN AGREGADO GRUESO. ASTM C - 127

Proyecto: TRABAJO DE GRADUACIÓN: Determinación de la Permeabilidad en mezclas de concreto hidráulico considerando relaciones agua/cemento de 0.40, 0.5 y 0.60.

Procedencia: **Cantera San Diego.**

Fecha: 24-Jun-15

MASA TARA (g):	26
MASA TARA SUMERGIDA (g):	849
MASA SATURADA, W _{sss} + TARA (g):	3680
MASA SATURADA, W _{sss} :	3654
MASA SUMERGIDA, W _{sum} + TARA SUM (g) :	3079
MASA SUMERGIDA NETA, W _{sum} (g) :	2230
MASA SECA, W _{seca} + TARA (g):	3897
MASA TARA /seca (g):	330
MASA SECA, W _{seca} (g):	3567
AGUA (g):	87
ABSORCION % = 2.44	
GRAVEDAD ESPECIFICA SECA = 2.50	
GRAVEDAD ESPECIFICA SSS = 2.566	

MASA TARA (g):	26
MASA TARA SUMERGIDA (g):	849
MASA SATURADA, W _{sss} + TARA (g):	3400
MASA SATURADA, W _{sss} :	3374
MASA SUMERGIDA, W _{sum} + TARA SUM (g) :	2908
MASA SUMERGIDA NETA, W _{sum} (g) :	2059
MASA SECA, W _{seca} + TARA (g):	3521
MASA TARA /seca (g):	229
MASA SECA, W _{seca} (g):	3292
AGUA (g):	82
ABSORCION % = 2.49	
GRAVEDAD ESPECIFICA SECA = 2.50	
GRAVEDAD ESPECIFICA SSS = 2.565	

PROMEDIO

ABSORCION % = 2.46

GRAVEDAD ESPECIFICA SECA = 2.50

GRAVEDAD ESPECIFICA SSS = 2.56

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA EN AGREGADO FINO. ASTM C - 128

Proyecto: TRABAJO DE GRADUACIÓN: Determinación de la Permeabilidad en mezclas de concreto hidráulico considerando relaciones agua/cemento de 0.40, 0.5 y 0.60.

Procedencia: **Cantera San Diego.**

Fecha: 24-Jun-15

MUESTRA 1

S MASA DE LA MUESTRA SSS (g):	500
B MASA PICNOMETRO + AGUA (g):	1441.5
C MASA PICNOM. + AGUA + MUESTRA (g):	1741.8
MASA SECA DE LA MUESTRA + TARA (g):	784.5
MASA TARA (g):	304.4
A MASA SECA DE LA MUESTRA (g):	480.1
AGUA (g):	19.9
ABSORCION, (%):	4.14
GRAVEDAD ESPECIFICA SECA:	2.40
GRAVEDAD ESPECIFICA SSS:	2.50
GRAVEDAD ESPECIFICA SECA PROMEDIO:	2.4

MUESTRA 2

S MASA DE LA MUESTRA SSS (g):	500
B MASA PICNOMETRO + AGUA (g):	1441.5
C MASA PICNOM. + AGUA + MUESTRA (g):	1743.2
MASA SECA DE LA MUESTRA + TARA (g):	641.4
MASA TARA (g):	161.6
A MASA SECA DE LA MUESTRA (g):	479.8
AGUA (g):	20.2
ABSORCION, (%):	4.20
GRAVEDAD ESPECIFICA SECA:	2.41
GRAVEDAD ESPECIFICA SSS:	2.52
GRAVEDAD ESPECIFICA SSS PROMEDIO:	2.51

ABSORCION PROMEDIO (%)= **4.17**

Resultados de los ensayos de resistencia a compresión

RESISTENCIA A COMPRESION A 28 DIAS	
Relación Agua/Cemento	Resistencia Promedio (kg/cm ²)
0.4 Sin aire incluido	380.47
0.5 Sin aire incluido	284.17
0.6 Sin aire incluido	234.83
0.4 Con aire incluido	360.91
0.5 Con aire incluido	261.95
0.6 Con aire incluido	214.86

TABLA 3.10 Resultados ensayo de resistencia a compresión a 28 días

• **Resultados de la mezcla Fresca**

Mezcla	0.40 SAI	0.50 SAI	0.60 SAI	0.40 CAI	0.50 CAI	0.60 CAI
Revenimiento (Pulg)	2.5	3	4	3.75	4.25	4.75
Porcentaje de aire incluido(%)	2	2	2	5.5	5.5	5.5
Temperatura (°C)	26	26	25	25	26	25

TABLA 3.11 Resultados de ensayos en mezcla fresca

3.9 REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE PERMEABILIDAD. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN

3.9.1 INTRODUCCIÓN

Este método se emplea para determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión en concreto endurecido. El agua es aplicada bajo presión a la superficie del concreto endurecido, a continuación, se divide la probeta por rotura en dos mitades en nuestro caso se utilizó el ensayo brasileño luego se procede a medir la profundidad de penetración del frente de agua.

MATERIALES Y EQUIPO

1. Equipo para medir la permeabilidad

Este equipo en el cual la probeta de dimensiones dadas (20 cm x 12 cm) se puede situar de tal manera que la presión del agua pueda actuar sobre la zona de ensayo y se visualice la presión aplicada.

2. Compresor que tenga la capacidad de inyectar presión de aire de más de 100 psi como el que se puede ver en la siguiente figura.



FIGURA 3.29 Compresor de aire de 125 psi

3. Probeta graduada



FIGURA 3.30 Probeta graduada de 500 ml

4. Máquina de compresión de cilindros estándar.



FIGURA 3.31 Máquina de compresión de cilindros estándar

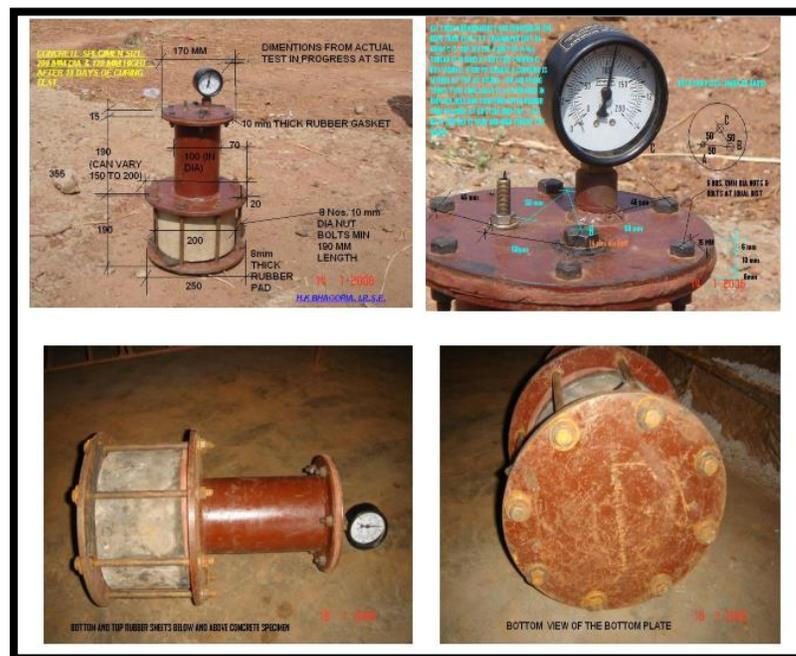
3.9.2 DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL EQUIPO PARA REALIZACIÓN DE ENSAYO DE PERMEABILIDAD

El equipo y procedimiento para la realización de la prueba de permeabilidad fueron diseñados en la India por el ingeniero Hemant Kumar Bhagoria, en el año 2013 se logró la adaptación de dicho equipo en nuestro país en una investigación realizada por la Universidad de El Salvador con la cooperación de la Fundación ISCYC.

PARTE INFERIOR DEL EQUIPO

La parte inferior del prototipo consta de una parte:

- Consiste en una placa de forma circular de diámetro 260 mm, con un espesor de 10 mm, con 8 agujeros de 12mm de diámetro cada uno. Estos agujeros estarán distanciados de la orilla de la placa al centro de su diámetro a 40 mm, e igualmente distanciados entre ellos.



Fuente: Un equipo simple y portable para desarrollar la prueba de permeabilidad al agua del concreto; Kumar Bhagoria, Hemant; I.R.S.E.; Vijayawada; 2006

FIGURA 3.32: Equipo para medir la permeabilidad diseñado por el Ing. Hemant Kumar Bhagoria

CÁMARA DE PRESIÓN DEL EQUIPO

La cámara de presión comprende de tres partes, que se describen a continuación:

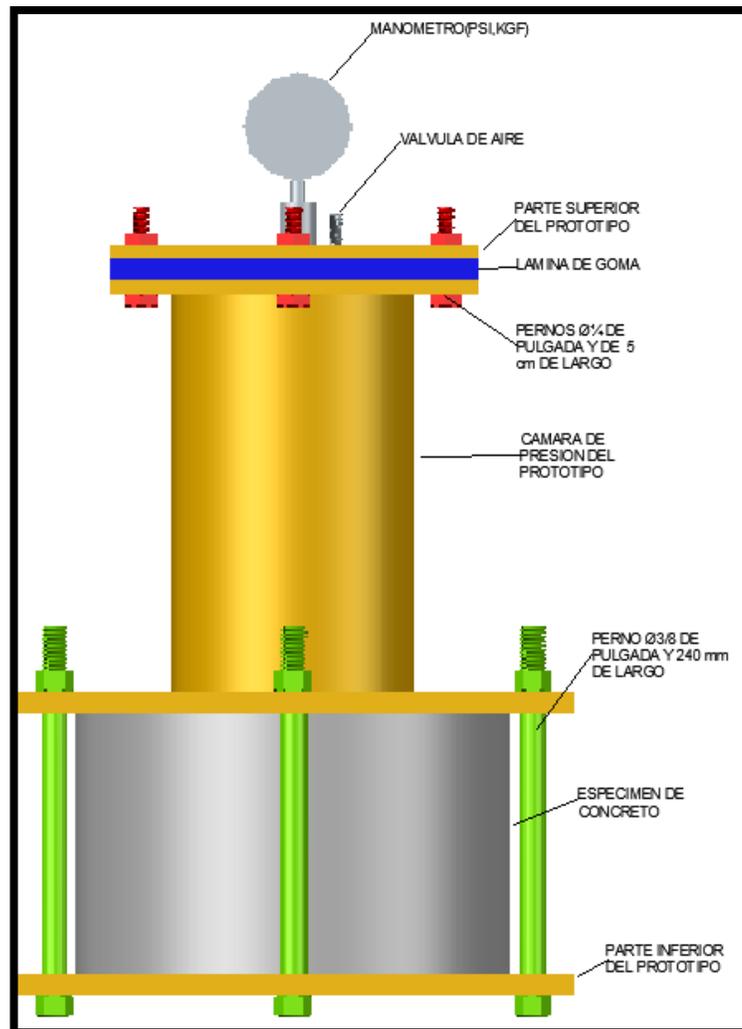
- Parte 1: consiste en una placa con las mismas especificaciones que la placa de la parte inferior del prototipo, teniendo además un agujero de 100 mm de diámetro en su centro.
- Parte 2: consiste en un tubo de 100 mm de diámetro, con un espesor de 6 mm y de un largo de 190 mm.
- Parte 3: consiste en una placa circular de 170 mm de diámetro con un espesor de 6mm, esta placa tendrá un agujero en su centro de 100 mm de diámetro y tendrá 6 agujeros de 8mm de diámetro, distanciados desde el centro de la placa hasta el centro del diámetro de cada agujero por 70 mm, e igualmente distanciados entre sí.

PARTE SUPERIOR DEL EQUIPO

La parte superior del prototipo sólo consta de una lámina que contiene tres arreglos:

- Esta parte consiste en una placa de forma circular de 170 mm de diámetro, con un espesor de 6 mm, con 6 agujeros de 8 mm de diámetro de cada uno, distanciados desde el centro de la placa hasta el centro del diámetro de cada agujero por 70mm e igualmente distanciados entre sí.
- Además, esta placa lleva 3 agujeros en su interior separados cada uno a una distancia de 50 mm desde cada centro de su diámetro. Uno de estos tres agujeros tiene un diámetro de 14 mm, el cual sirve para colocar un perno con cierre hermético. Los otros agujeros tienen un diámetro necesario para colocar la respectiva válvula de presión y el manómetro.

En la figura 3.33 se presenta la estructura del equipo para medir la permeabilidad del concreto al agua, identificando las partes que lo componen.



Fuente: Arévalo, N.H, Barrillas, L.I; Silva, R.F. (2013), “Adaptación de un método para medir la permeabilidad”. (Trabajo de graduación). Universidad de El Salvador, Santa Ana.

FIGURA 3.33: Equipo para medir la permeabilidad

3.9.3 PROCEDIMIENTO PARA REALIZACIÓN DE ENSAYO DE PERMEABILIDAD

Después de haber terminado el tiempo considerado de curado de las probetas para nuestro caso se consideró un tiempo de curado de 6,13 y 25 días, se procedió a colocar en el horno por un tiempo de 24 horas para su secado completo, luego se retiró y se dejó enfriar a temperatura ambiente.



FIGURA 3.34 Colocación y extracción de la muestra del horno

Cuando la probeta (espécimen) se encuentra completamente fría se procede a colocar la muestra en el equipo para medir la permeabilidad de la siguiente manera:

1. Coloque la lámina de empaque de neopreno en la parte inferior del equipo como se muestra en la figura.



FIGURA 3.35 Colocación de lámina de neopreno

2. Coloque los pernos de manera ordenada y se sitúe el espécimen en el centro del equipo.



FIGURA 3.36 Colocación de pernos en equipo

3. Seguido se procedió a colocar la lámina de empaque de neopreno en la parte superior del espécimen, se consideró cubrir el empaque en el área que se encontraba en contacto con la superficie de concreto con grasa mecánica para así evitar fugas debido a la porosidad del concreto, y asegurando bien los pernos, se ubicó la parte superior del equipo.



FIGURA 3.37 Colocación de lámina de neopreno y parte superior del equipo

4. Se retiró el tornillo hermético, y se procedió a verter 200 ml de agua en la cámara del prototipo, luego se aseguró correctamente para evitar cualquier fuga.



FIGURA 3.38 Vertido de 200 ml de agua en el equipo

5. Con el equipo debidamente armado y asegurándose que la válvula del equipo estuviera cerrada, se colocó la manguera del compresor a la válvula de entrada de aire del equipo y se procedió a inyectar la presión requerida, para nuestra investigación se tomaron 3 presiones diferentes para las distintas edades del concreto.



FIGURA 3.39 Inyección de presión en equipo

Edad del concreto	Presión
8 días	25 psi
13 días	60 psi
27 días	110 psi

6. Después de transcurridas 24 horas se abrió la válvula para liberar la presión que se mantenía en la cámara del equipo, luego se procedió a retirar el tornillo

hermético y se tiro el agua restante, se aflojaron cada uno de los pernos y se retiró la muestra del equipo.



FIGURA 3.40 Vaciado de agua de agua restante

7. Teniendo la muestra fuera del equipo se colocó en la máquina de compresión estándar para romperlo por la mitad, para esto se utilizó el ensayo brasileño (Resistencia a tracción indirecta, Norma ASTM C 496).

Se ajustó la maquina a la altura adecuada de la muestra se colocaron dos reglas de madera una arriba y otra abajo y se procedió a romper la muestra para visualizar su interior.



FIGURA 3.41 Ajuste de muestra en máquina de compresión



FIGURA 3.42 Ensayo brasileño para romper por mitad la muestra

8. Con el espécimen partido a la mitad se marcó el frente de penetración de agua y se midió con un pie de rey la profundidad de penetración máxima, y utilizando un protimeter se determinó el porcentaje de humedad en diferentes puntos del espécimen. Para corroborar hasta donde fue la penetración del agua en el interior del concreto



FIGURA 3.43 Medida de profundidad de penetración y lectura de humedad

CAPITULO IV: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE PERMEABILIDAD

4.1 RESULTADOS DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD

INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
Identificación de la muestra de ensayo: Concreto con relación agua/cemento 0.40 sin aire incluido, considerando tiempo de curado de 7 días	
Resistencia de Diseño: 210 kg/cm ²	
Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 380.47 kg/cm ²	
Fecha y Hora de Realización del ensayo: 25 de Septiembre de 2015, 04.20 pm	
Descripción de la muestra: La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm	
Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 53 mm	
Presión aplicada : 25 psi	
Tiempo de aplicación de presión: 22:25 horas	
Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma irregular, el aparato presento fugas al momento de realizar la prueba con una pérdida de agua y presión	Figura 4.1 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 9 días, concreto con relación agua/cemento de 0.40 sin aire incluido

INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
<p>Identificación de la muestra de ensayo: Concreto con relación agua/cemento 0.40 sin aire incluido, considerando tiempo de curado de 13 días</p>	
<p>Resistencia de Diseño: 210 kg/cm²</p>	
<p>Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 380.47 kg/cm²</p>	
<p>Fecha y Hora de Realización del ensayo: 01 de Octubre de 2015, 11.40 am</p>	
<p>Descripción de la muestra: La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm</p>	
<p>Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 100 mm</p>	
<p>Presión aplicada : 60 psi</p>	<p>Figura 4.2 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 15 días, concreto con relación agua/cemento de 0.40 sin aire incluido</p>
<p>Tiempo de aplicación de presión: 24 horas</p>	
<p>Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma irregular.</p>	

INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
<p>Identificación de la muestra de ensayo: Concreto con relación agua/cemento 0.40 sin aire incluido, considerando tiempo de curado de 25 días</p>	
<p>Resistencia de Diseño: 210 kg/cm²</p>	
<p>Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 380.47 kg/cm²</p>	
<p>Fecha y Hora de Realización del ensayo: 13 de Octubre de 2015, 10:00 am</p>	
<p>Descripción de la muestra: La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm</p>	
<p>Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 101 mm</p>	
<p>Presión aplicada : 110 psi</p>	
<p>Tiempo de aplicación de presión: 24 horas</p>	
<p>Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma irregular.</p>	<p>Figura 4.3 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 27 días, concreto con relación agua/cemento de 0.40 sin aire incluido</p>

INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
<p>Identificación de la muestra de ensayo: Concreto con relación agua/cemento 0.50 sin aire incluido, considerando tiempo de curado de 6 días</p>	
<p>Resistencia de Diseño: 210 kg/cm²</p>	
<p>Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 284.17 kg/cm²</p>	
<p>Fecha y Hora de Realización del ensayo: 30 de Septiembre de 2015, 11.30 am</p>	
<p>Descripción de la muestra: La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm</p>	
<p>Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 94 mm</p>	
<p>Presión aplicada : 25 psi</p>	<p>Figura 4.4 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 8 días, concreto con relación agua/cemento de 0.50 sin aire incluido</p>
<p>Tiempo de aplicación de presión: 24 horas</p>	
<p>Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma cónica.</p>	

INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
<p>Identificación de la muestra de ensayo: Concreto de Resistencia 210 kg/cm², relación agua/cemento 0.50 sin aire incluido, considerando tiempo de curado de 13 días</p>	
<p>Resistencia de Diseño: 210 kg/cm²</p>	
<p>Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 284.17 kg/cm²</p>	
<p>Fecha y Hora de Realización del ensayo: 07 de Octubre de 2015, 11:51 am</p>	
<p>Descripción de la muestra: La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm</p>	
<p>Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 95 mm</p>	
<p>Presión aplicada : 60 psi</p>	
<p>Tiempo de aplicación de presión: 24 horas</p>	<p>Figura 4.5 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 15 días, concreto con relación agua/cemento de 0.50 sin aire incluido</p>
<p>Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma irregular.</p>	

INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
<p>Identificación de la muestra de ensayo: Concreto con relación agua/cemento de 0.50 sin aire incluido, considerando tiempo de curado de 25 días</p>	
<p>Resistencia de Diseño: 210 kg/cm²</p>	
<p>Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 284.17 kg/cm²</p>	
<p>Fecha y Hora de Realización del ensayo: 21 de Octubre de 2015, 11:45 am</p>	
<p>Descripción de la muestra: La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm</p>	
<p>Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 109 mm</p>	
<p>Presión aplicada : 110 psi Tiempo de aplicación de presión: 24 horas</p>	
<p>Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma irregular.</p>	<p>Figura 4.6 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 27 días, concreto con relación agua/cemento de 0.50 sin aire incluido</p>

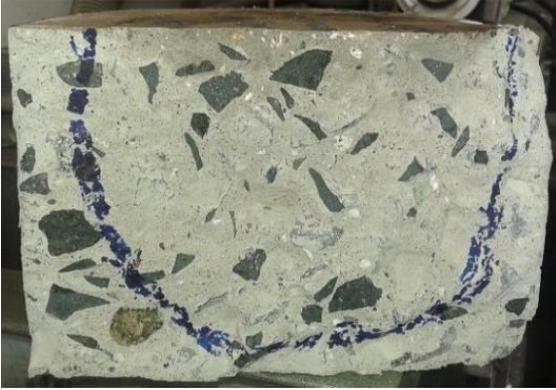
INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
<p>Identificación de la muestra de ensayo: Concreto con relación agua/cemento 0.60 sin aire incluido, considerando tiempo de curado de 6 días</p>	
<p>Resistencia de Diseño: 210 kg/cm²</p>	
<p>Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 234.83 kg/cm²</p>	
<p>Fecha y Hora de Realización del ensayo: 29 de Septiembre de 2015, 11.30 am</p>	
<p>Descripción de la muestra: La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm</p>	
<p>Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 98 mm</p>	
<p>Presión aplicada : 25 psi</p>	
<p>Tiempo de aplicación de presión: 24 horas</p>	
<p>Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma irregular.</p>	<p>Figura 4.7 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 8 días, concreto con relación agua/cemento de 0.60 sin aire incluido</p>

INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
<p>Identificación de la muestra de ensayo:</p> <p>Concreto con relación agua/cemento 0.60 sin aire incluido, considerando tiempo de curado 13 de días de curado</p>	
<p>Resistencia de Diseño: 210 kg/cm²</p> <p>Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 234.83 kg/cm²</p>	
<p>Fecha y Hora de Realización del ensayo:</p> <p>06 de Octubre de 2015, 11:45 am</p>	
<p>Descripción de la muestra:</p> <p>La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm</p>	
<p>Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 104 mm</p>	
<p>Presión aplicada : 60 psi</p>	
<p>Tiempo de aplicación de presión: 24 horas</p>	
<p>Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma irregular.</p>	
<p>Figura 4.8 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 15 días, concreto con relación agua/cemento de 0.60 sin aire incluido</p>	

INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
<p>Identificación de la muestra de ensayo: Concreto de Resistencia 210 kg/cm², relación agua/cemento de 0.60 sin aire incluido, considerando tiempo de curado de 25 días</p>	
<p>Resistencia de Diseño: 210 kg/cm² Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 234.83 kg/cm²</p>	
<p>Fecha y Hora de Realización del ensayo: 20 de Octubre de 2015, 11:30 am</p>	
<p>Descripción de la muestra: La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm</p>	
<p>Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 110 mm</p>	
<p>Presión aplicada : 110 psi</p>	
<p>Tiempo de aplicación de presión: 24 horas</p>	
<p>Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma irregular.</p>	

INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
<p>Identificación de la muestra de ensayo: Concreto con relación agua/cemento 0.40 con aire incluido, considerando tiempo de curado de 7 días</p>	
<p>Resistencia de Diseño: 210 kg/cm²</p>	
<p>Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 360.91 kg/cm²</p>	
<p>Fecha y Hora de Realización del ensayo: 26 de Septiembre de 2015, 4:40 pm</p>	
<p>Descripción de la muestra: La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm</p>	
<p>Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 85 mm</p>	
<p>Presión aplicada : 25 psi</p>	
<p>Tiempo de aplicación de presión: 24 horas</p>	<p>Figura 4.10 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 9 días, concreto con relación agua/cemento de 0.40 con aire incluido</p>
<p>Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma irregular.</p>	

INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
<p>Identificación de la muestra de ensayo:</p> <p>Concreto con relación agua/cemento 0.40 con aire incluido, considerando tiempo de curado de 13 días</p>	
<p>Resistencia de Diseño: 210 kg/cm²</p>	
<p>Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 360.91 kg/cm²</p>	
<p>Fecha y Hora de Realización del ensayo:</p> <p>02 de Octubre de 2015, 11:30 pm</p>	
<p>Descripción de la muestra:</p> <p>La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm</p>	
<p>Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 95 mm</p>	
<p>Presión aplicada : 60 psi</p>	
<p>Tiempo de aplicación de presión: 24 horas</p>	
<p>Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma irregular.</p>	<p>Figura 4.11 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 15 días, concreto con relación agua/cemento de 0.40 con aire incluido</p>

INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
<p>Identificación de la muestra de ensayo: Concreto con relación agua/cemento 0.40 con aire incluido, considerando tiempo de curado de 26 días</p>	
<p>Resistencia de Diseño: 210 kg/cm² Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 360.91 kg/cm²</p>	
<p>Fecha y Hora de Realización del ensayo: 14 de Octubre de 2015, 10: 55 am</p>	
<p>Descripción de la muestra: La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm</p>	
<p>Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 107 mm</p>	
<p>Presión aplicada : 110 psi</p>	
<p>Tiempo de aplicación de presión: 24 horas</p>	
<p>Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma irregular.</p>	

INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
<p>Identificación de la muestra de ensayo: Concreto con relación agua/cemento 0.50 con aire incluido, considerando tiempo de curado de 6 días</p>	
<p>Resistencia de Diseño: 210 kg/cm²</p>	
<p>Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 261.95 kg/cm²</p>	
<p>Fecha y Hora de Realización del ensayo: 08 de Octubre de 2015, 12:00 am</p>	
<p>Descripción de la muestra: La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm</p>	
<p>Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 95 mm</p>	
<p>Presión aplicada : 25 psi</p>	
<p>Tiempo de aplicación de presión: 24 horas</p>	<p>Figura 4.13 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 8 días, concreto con relación agua/cemento de 0.50 con aire incluido</p>
<p>Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma irregular.</p>	

INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
<p>Identificación de la muestra de ensayo: Concreto con relación agua/cemento de 0.50 con aire incluido, considerando tiempo de curado de 13 días</p>	
<p>Resistencia de Diseño: 210 kg/cm²</p>	
<p>Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 261.95 kg/cm²</p>	
<p>Fecha y Hora de Realización del ensayo: 15 de Octubre de 2015, 11 :10 am</p>	
<p>Descripción de la muestra: La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm</p>	
<p>Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 100 mm</p>	
<p>Presión aplicada : 60 psi</p>	
<p>Tiempo de aplicación de presión: 24 horas</p>	
<p>Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma irregular.</p>	<p>Figura 4.14 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 15 días, concreto con relación agua/cemento de 0.50 con aire incluido</p>

INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
<p>Identificación de la muestra de ensayo: Concreto con relación agua/cemento de 0.50 con aire incluido, considerando tiempo de curado de 26 días</p>	
<p>Resistencia de Diseño: 210 kg/cm²</p>	
<p>Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 261.95 kg/cm²</p>	
<p>Fecha y Hora de Realización del ensayo: 28 de Octubre de 2015, 9:30 am</p>	
<p>Descripción de la muestra: La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm</p>	
<p>Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 107 mm</p>	
<p>Presión aplicada : 110 psi</p>	<p>Figura 4.15 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 28 días, concreto con relación agua/cemento de 0.50 con aire incluido</p>
<p>Tiempo de aplicación de presión: 24 horas</p>	
<p>Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma irregular.</p>	

INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
<p>Identificación de la muestra de ensayo: Concreto con relación agua/cemento 0.60 con aire incluido, considerando tiempo de curado de 6 días</p>	
<p>Resistencia de Diseño: 210 kg/cm²</p>	
<p>Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 214.86 kg/cm²</p>	
<p>Fecha y Hora de Realización del ensayo: 09 de Octubre de 2015, 12:00 am</p>	
<p>Descripción de la muestra: La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm</p>	
<p>Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 100 mm</p>	
<p>Presión aplicada : 25 psi</p>	
<p>Tiempo de aplicación de presión: 24 horas</p>	
<p>Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma irregular.</p>	<p>Figura 4.16 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 8 días, concreto con relación agua/cemento de 0.60 con aire incluido</p>

INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
<p>Identificación de la muestra de ensayo: Concreto con relación agua/cemento de 0.60 con aire incluido, considerando tiempo de curado de 13 días</p>	
<p>Resistencia de Diseño: 210 kg/cm²</p>	
<p>Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 214.86 kg/cm²</p>	
<p>Fecha y Hora de Realización del ensayo: 16 de Octubre de 2015, 11: 20 am</p>	
<p>Descripción de la muestra: La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm</p>	
<p>Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 110 mm</p>	
<p>Presión aplicada : 60 psi</p> <p>Tiempo de aplicación de presión: 24 horas</p>	
<p>Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma irregular.</p>	<p>Figura 4.17 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 15 días, concreto con relación agua/cemento de 0.60 con aire incluido</p>

INFORME DE PRUEBA DE PERMEABILIDAD	IMAGEN DE LA MUESTRA
<p>Identificación de la muestra de ensayo: Concreto con relación agua/cemento de 0.60 con aire incluido, considerando tiempo de curado de 26 días</p>	
<p>Resistencia de Diseño: 210 kg/cm²</p>	
<p>Resistencia promedio obtenida de los ensayos: 214.86 kg/cm²</p>	
<p>Fecha y Hora de Realización del ensayo: 29 de Octubre de 2015, 10:41 am</p>	
<p>Descripción de la muestra: La muestra tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 20 cm y con una altura de 12 cm</p>	
<p>Profundidad de Penetración Máxima, en milímetros: 108 mm</p>	
<p>Presión aplicada : 110 psi</p>	
<p>Tiempo de aplicación de presión: 24 horas</p>	
<p>Observaciones durante la prueba: La muestra presenta una distribución uniforme de los agregados que la constituyen. En cuanto a la Penetración del flujo a través del espécimen es de forma irregular.</p>	<p>Figura 4.18 Fotografía de la muestra después de realizada la prueba de permeabilidad a los 28 días, concreto con relación agua/cemento de 0.60 con aire incluido</p>

N° de cilindro	Relación A/C	Tiempo de curado (días)	Profundidad de Penetración (mm)	Edad de ensayo de permeabilidad	Presión (psi)
1	0.40 SAI	7	53	9	20
2	0.40 SAI	13	100	15	60
3	0.40 SAI	25	101	27	110
4	0.40 CAI	7	85	9	25
5	0.40 CAI	13	95	15	60
6	0.40 CAI	25	107	27	110
7	0.50 SAI	6	94	8	25
8	0.50 SAI	13	95	15	60
9	0.50 SAI	27	109	27	110
10	0.50 CAI	6	95	8	25
11	0.50 CAI	13	100	15	60
12	0.50 CAI	26	107	28	110
13	0.60 SAI	6	98	8	25
14	0.60 SAI	13	104	15	60
15	0.60 SAI	27	110	27	110
16	0.60 CAI	6	100	8	25
17	0.60 CAI	13	110	15	60
18	0.60 CAI	26	108	28	110

TABLA 4.1 Resultados de prueba de permeabilidad concreto sin aire incluido (SAI) y concreto con aire incluido (CAI)

4.2 RESULTADOS DE PORCENTAJE DE HUMEDAD

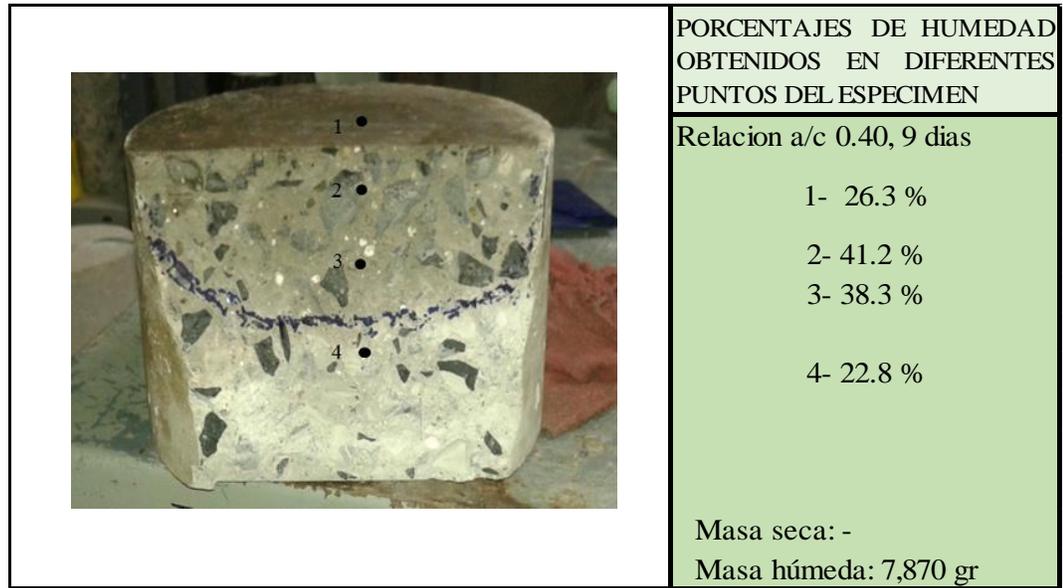


FIGURA 4.19 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.40 sin aire incluido

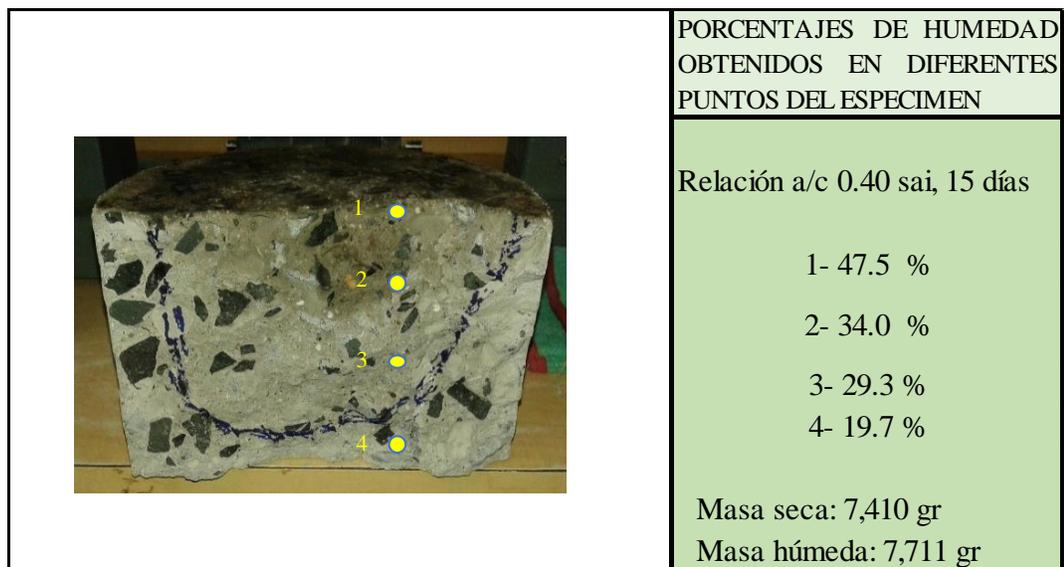


FIGURA 4.20 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.40 sin aire incluido

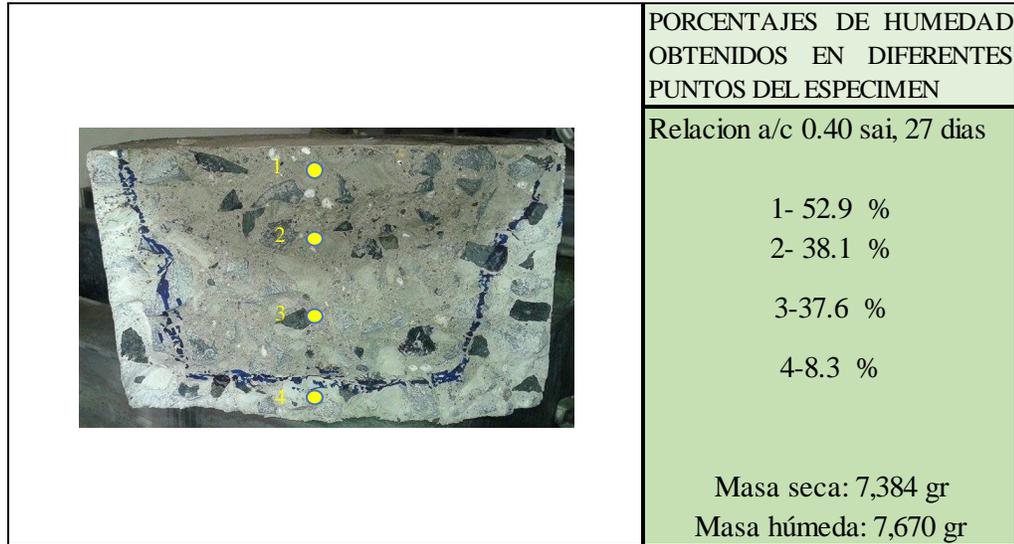


FIGURA 4.21 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.40 sin aire incluido

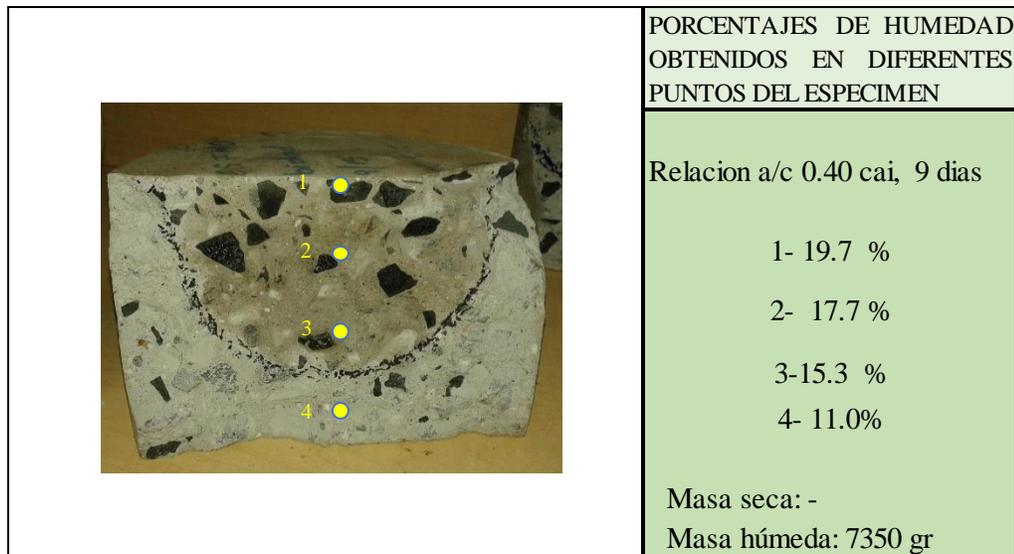


FIGURA 4.22 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.40 con aire incluido

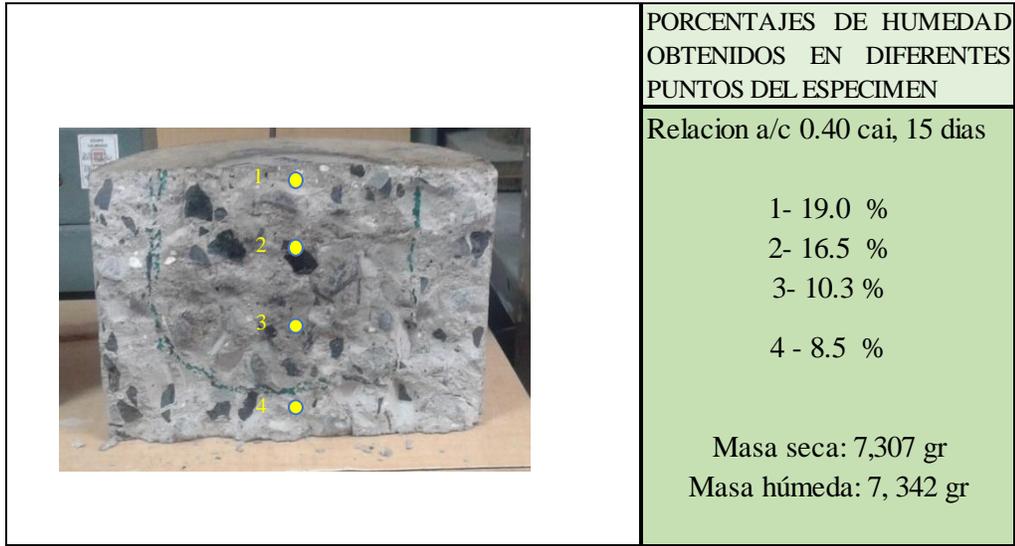


FIGURA 4.23 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.40 con aire incluido

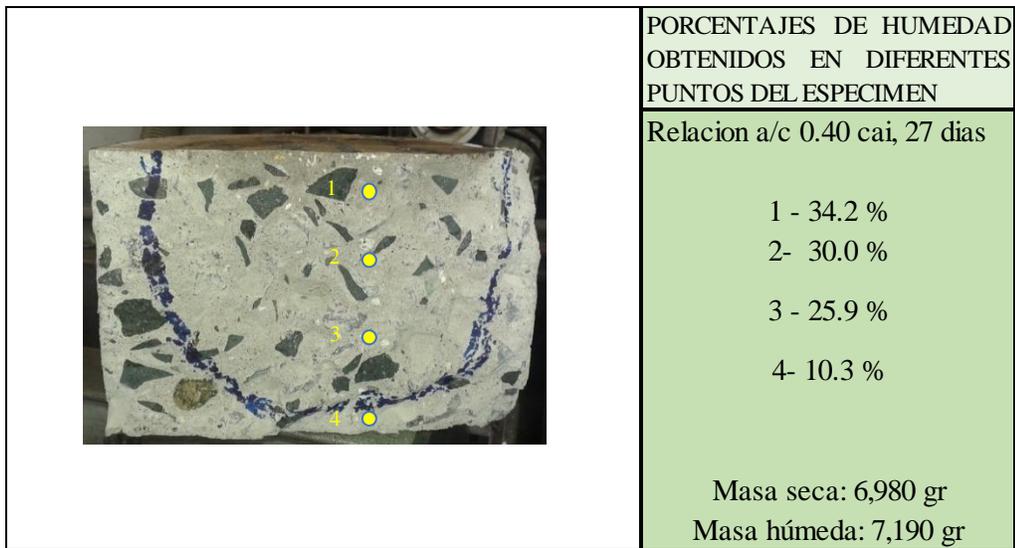


FIGURA 4.24 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.40 con aire incluido

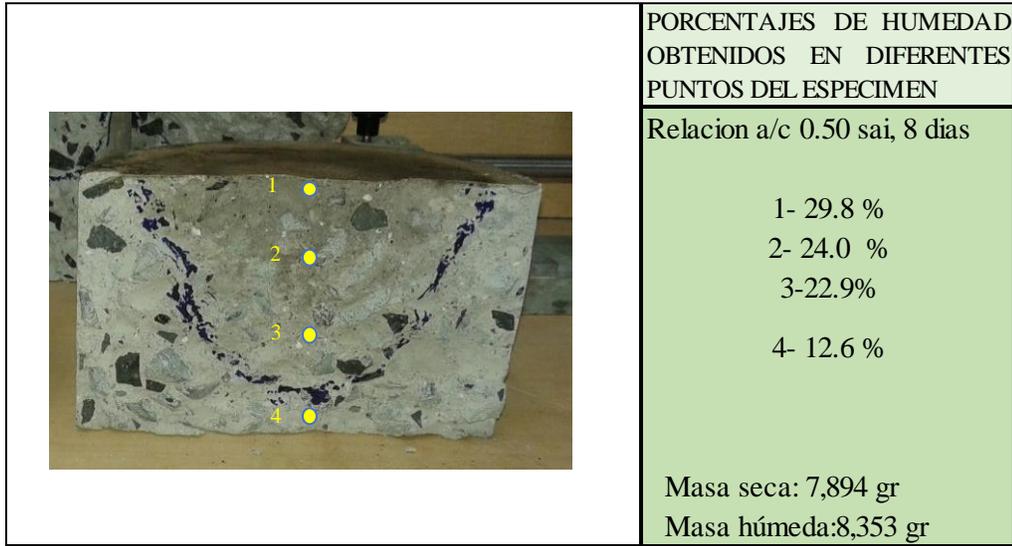


FIGURA 4.25 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.50 sin aire incluido

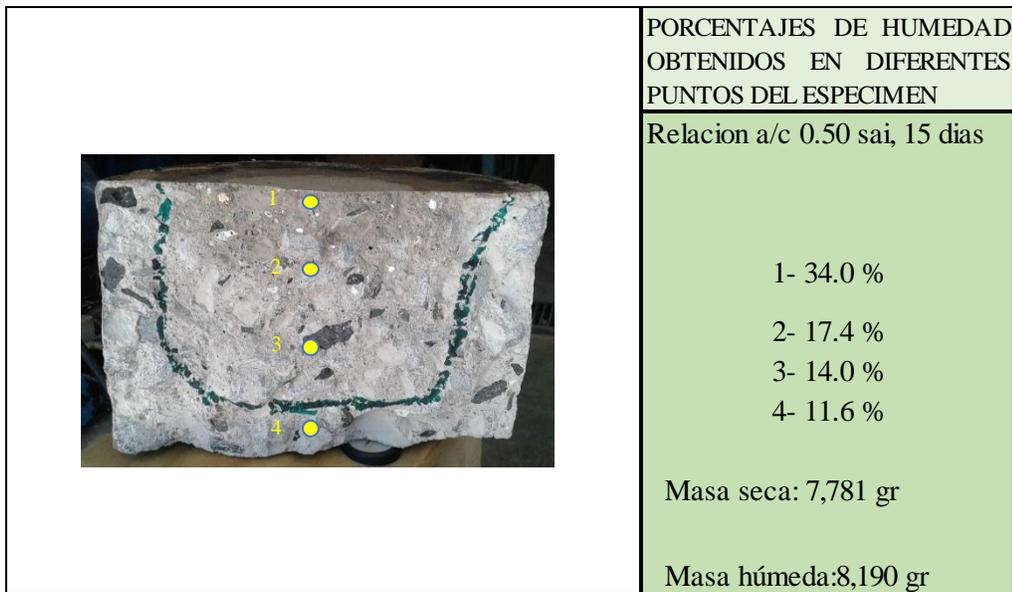


FIGURA 4.26 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.50 sin aire incluido

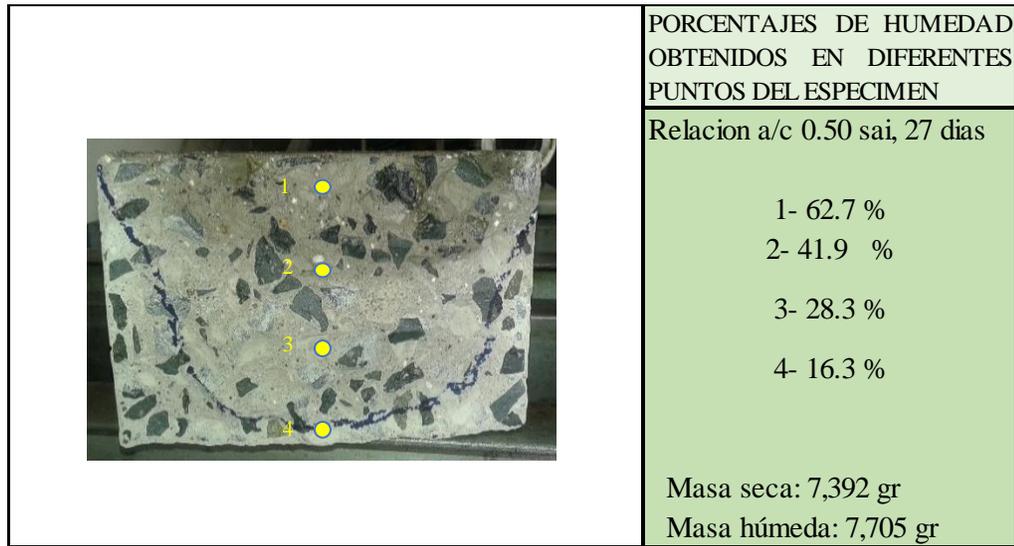


FIGURA 4.27 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.50 sin aire incluido

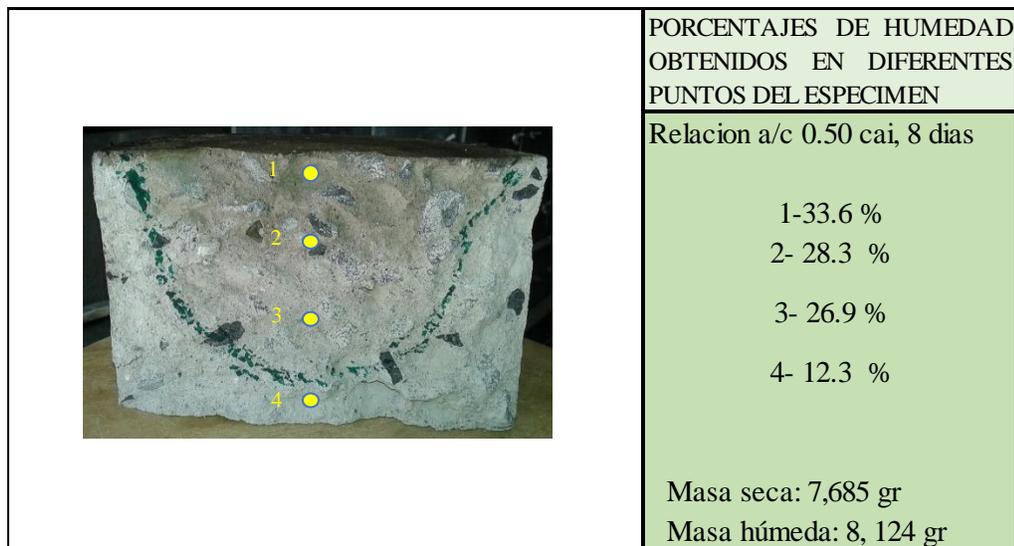


FIGURA 4.28 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.50 con aire incluido

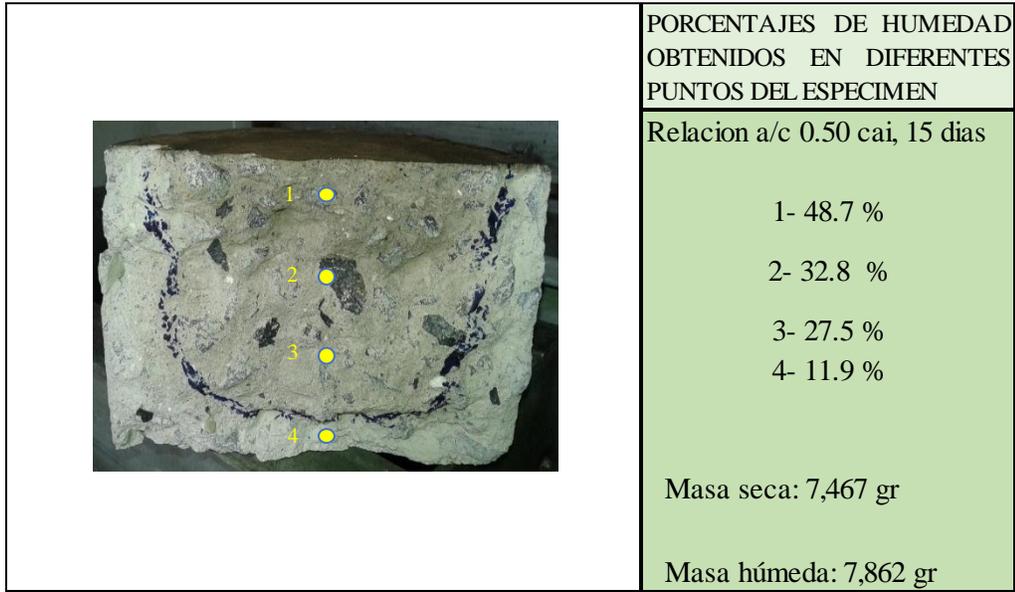


FIGURA 4.29 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.50 con aire incluido

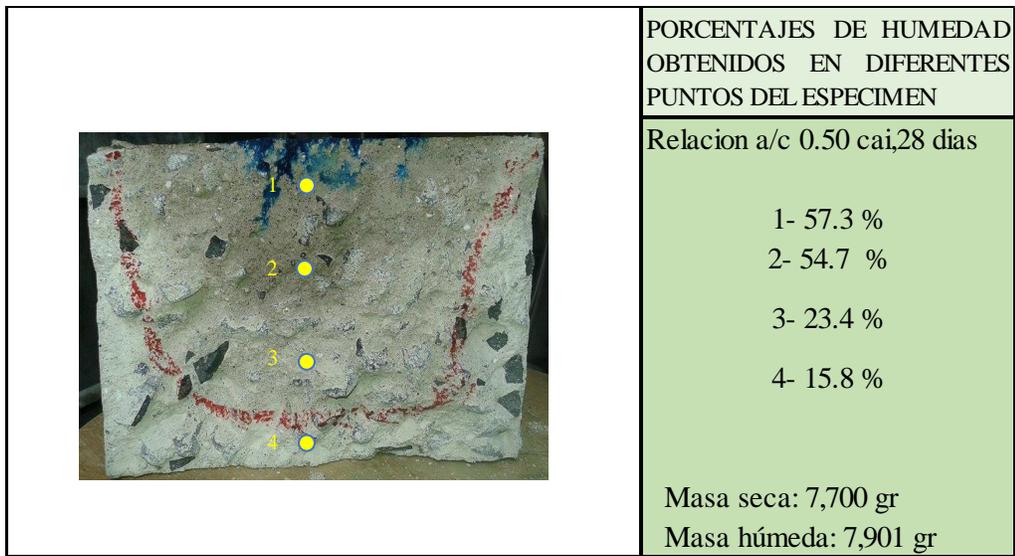


FIGURA 4.30 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.50 con aire incluido

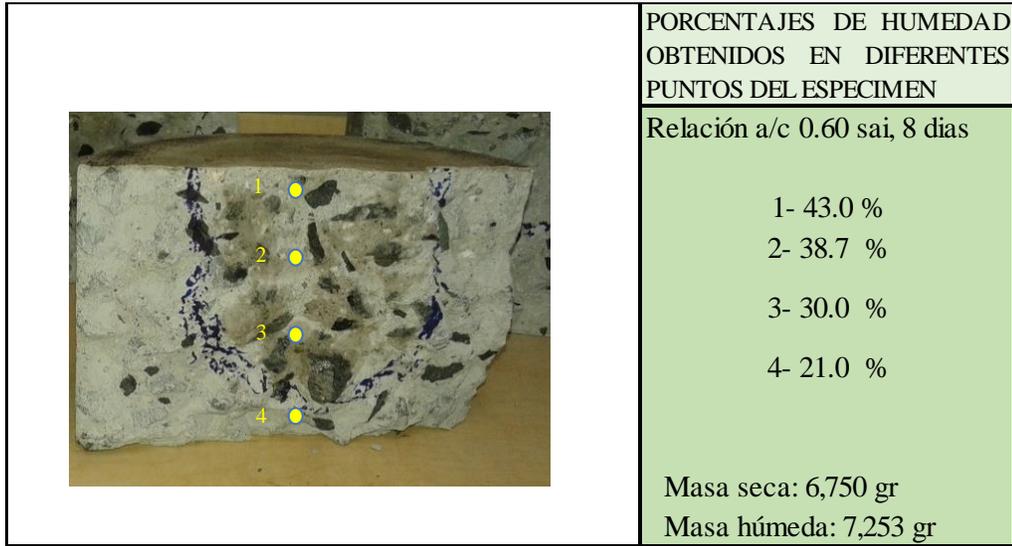


FIGURA 4.31 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.60 sin aire incluido



FIGURA 4.32 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.60 sin aire incluido

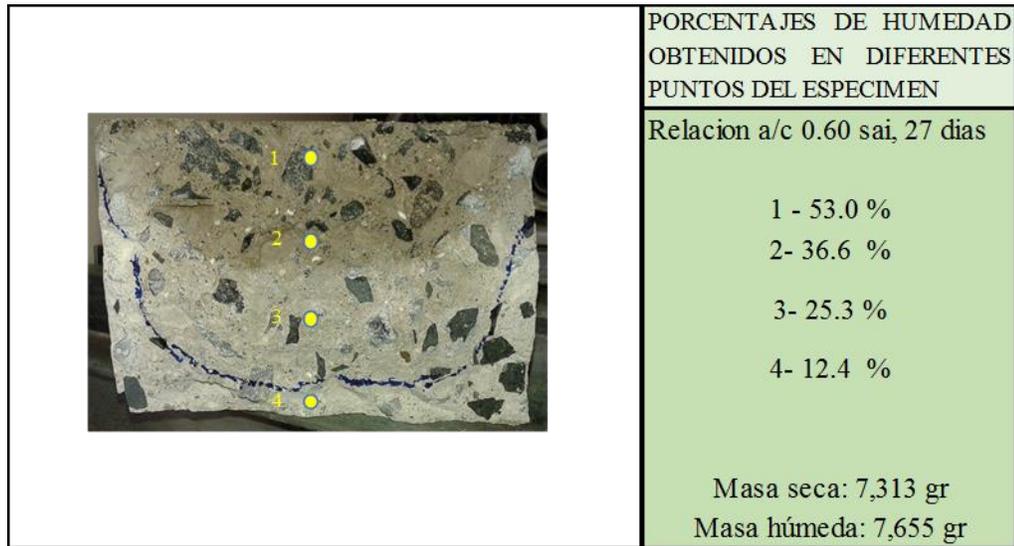


FIGURA 4.33 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.60 sin aire incluido

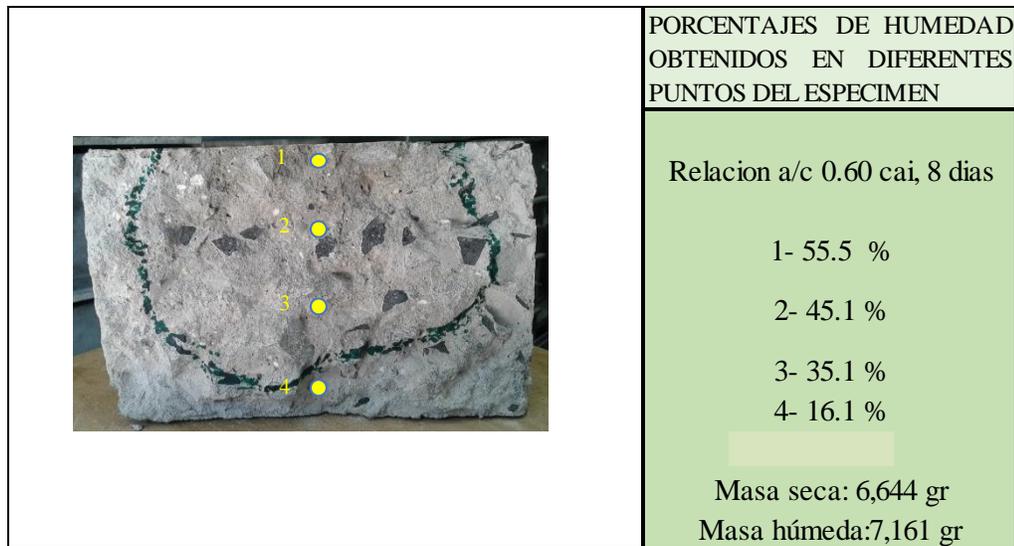


FIGURA 4. 34 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.60 con aire incluido

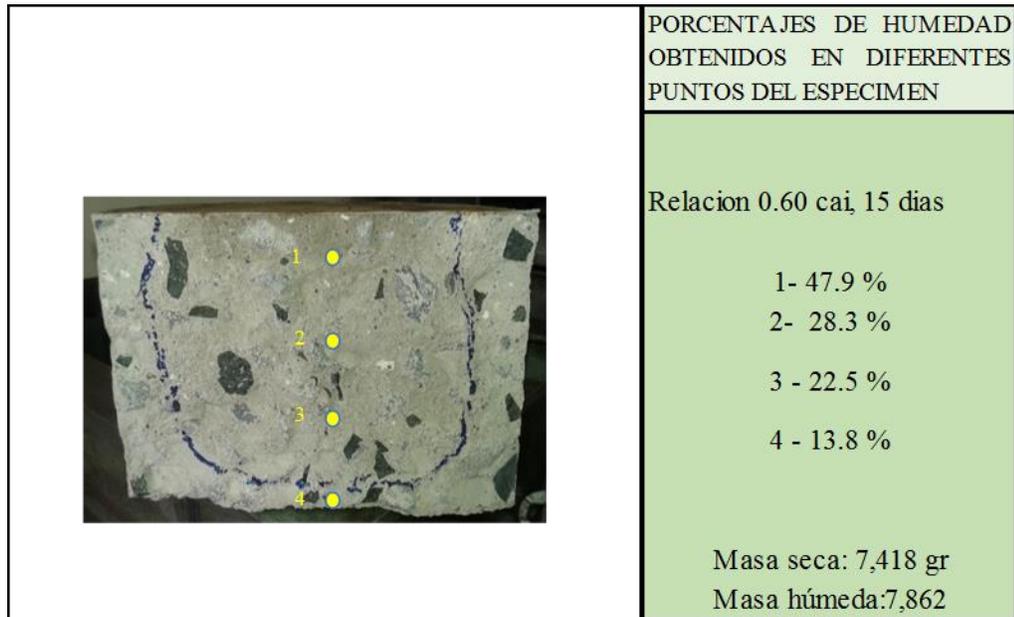


FIGURA 4.35 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.60 sin aire incluido

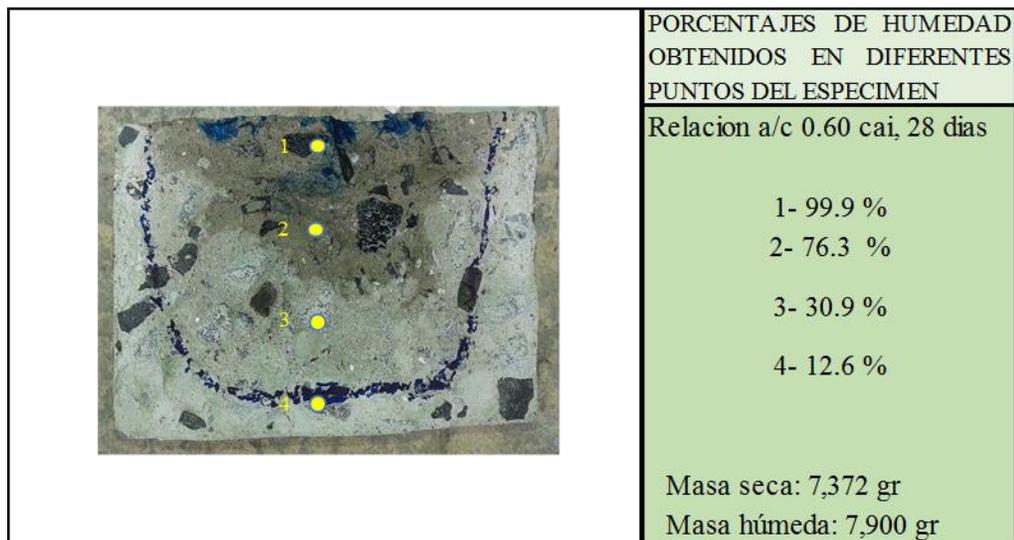


FIGURA 4.36 Porcentaje de humedad obtenido en diferentes puntos de espécimen ensayado en prueba de permeabilidad concreto relación A/C 0.60 con aire incluido

4.3 CORRELACIÓN

4.3.1 CORRELACIÓN PRESIÓN VS PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN CONCRETO

Relación A/C	Edad	Profundidad de Penetración (mm)	Presión (psi)
0.40 SAI	9 días	53	20
0.40 SAI	15 días	100	60
0.40 SAI	27 días	101	110

TABLA 4.2 Resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad, edad de los ensayos y presión aplicada concreto con relación agua/cemento 0.40 con aire incluido (SAI)

Relación A/C	Edad	Profundidad de Penetración (mm)	Presión (psi)
0.40 CAI	9 días	85	25
0.40 CAI	15 días	95	60
0.40 CAI	27 días	107	110

TABLA 4.3 Resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad, edad de los ensayos y presión aplicada concreto con relación agua/cemento 0.40 con aire incluido (CAI)

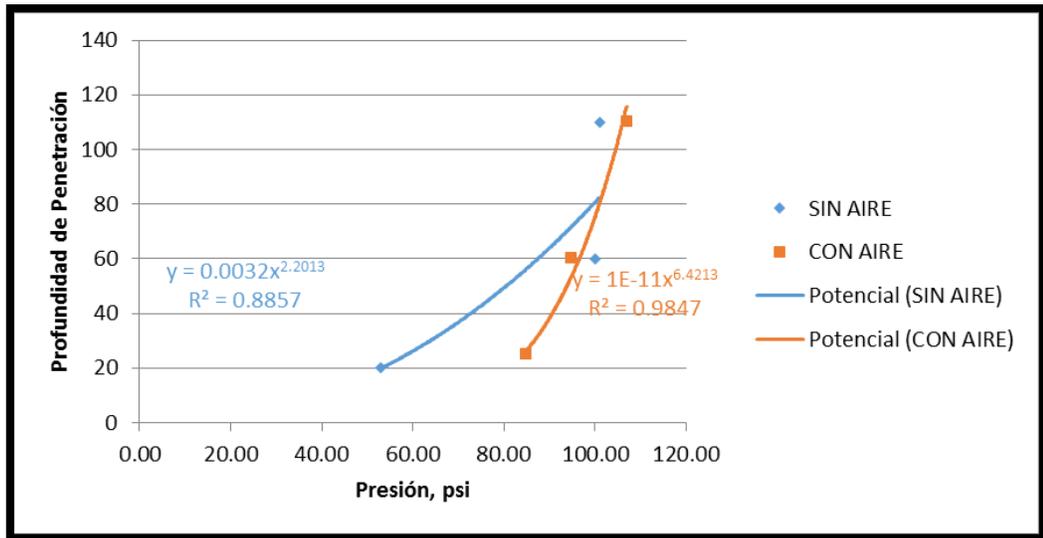


FIGURA 4.37 Gráfica correlación Presión vs Profundidad de penetración concreto relación agua/cemento 0.40 sin aire y con aire incluido

Relación A/C	Edad	Profundidad de Penetración (mm)	Presión (psi)
0.50 SAI	8 días	94	25
0.50 SAI	15 días	95	60
0.50 SAI	27 días	109	110

TABLA 4.4 Resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad, edad de los ensayos y presión aplicada concreto con relación agua/cemento 0.50 sin aire incluido (SAI)

Relación A/C	Edad	Profundidad de Penetración (mm)	Presión (psi)
0.50 CAI	8 días	95	25
0.50 CAI	15 días	100	60
0.50 CAI	28 días	107	110

TABLA 4.5 Resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad, edad de los ensayos y presión aplicada concreto con relación agua/cemento 0.50 con aire incluido (CAI)

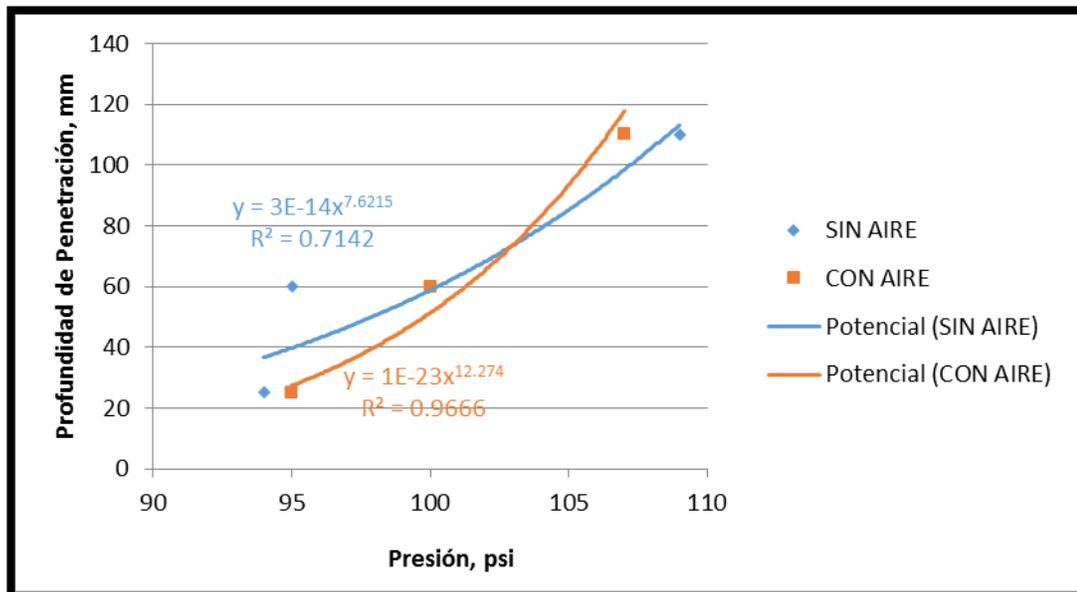


FIGURA 4.38 Gráfica correlación Presión vs Profundidad de penetración concreto con relación agua/cemento 0.50 con aire y sin aire incluido

Relación A/C	Edad	Profundidad de Penetración (mm)	Presión (psi)
0.60 SAI	8 días	98	25
0.60 SAI	15 días	104	60
0.60 SAI	27 días	110	110

TABLA 4.6 Resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad, edad de los ensayos y presión aplicada concreto con relación agua/cemento 0.60 sin aire incluido (SAI)

Relación A/C	Edad	Profundidad de Penetración (mm)	Presión (psi)
0.60 CAI	8 días	100	25
0.60 CAI	15 días	110	60
0.60 CAI	28 días	108	110

TABLA 4.7 Resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad, edad de los ensayos y presión aplicada concreto con relación agua/cemento 0.60 con aire incluido (CAI)

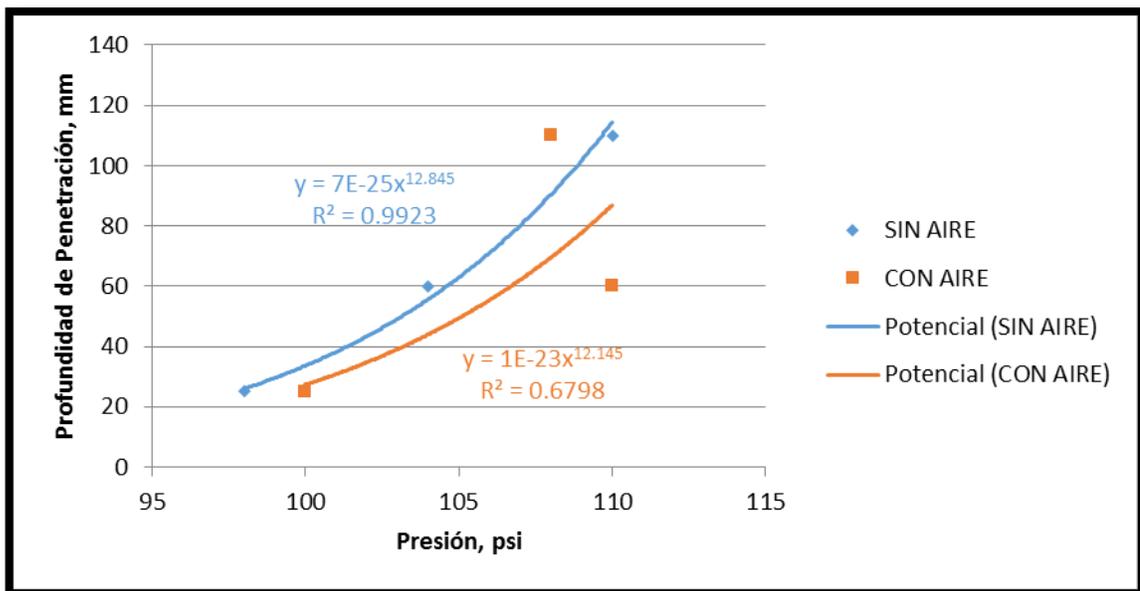


FIGURA 4.39 Gráfica correlación Presión vs Profundidad de penetración concreto con relación agua/cemento de 0.60 sin aire y con aire incluido

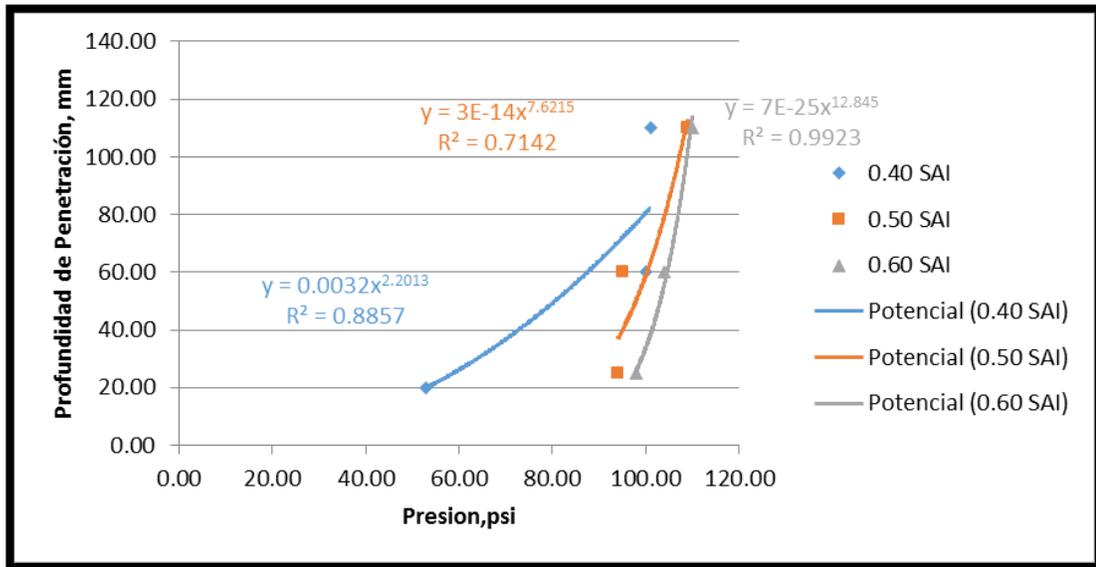


FIGURA 4.40 Gráfica correlación Presión vs Profundidad de penetración concreto con relación agua/cemento 0.40, 0.50 y de 0.60 sin aire incluido.

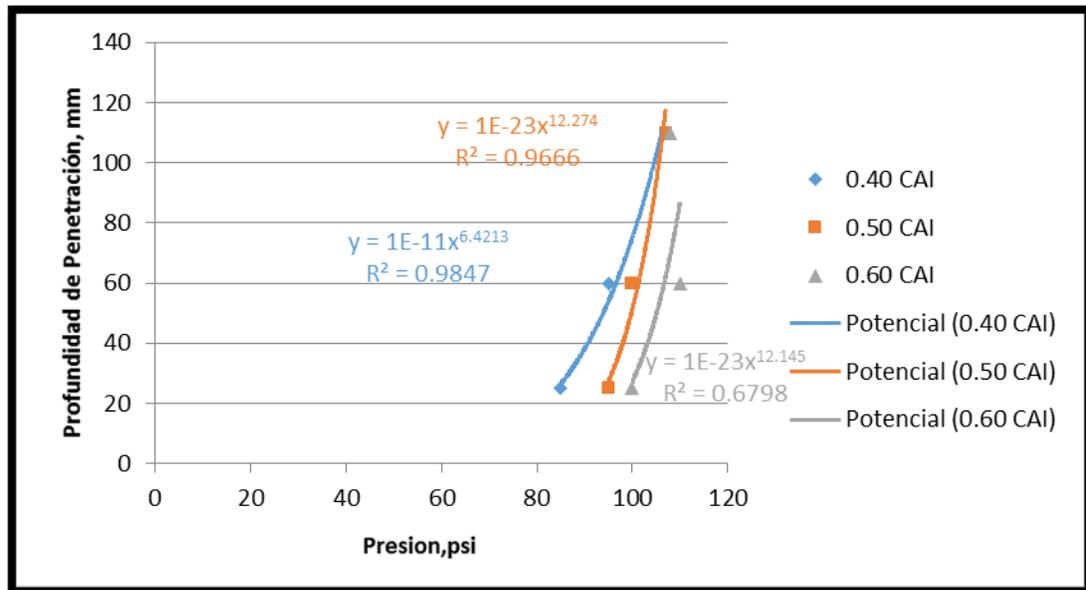


FIGURA 4.41 Gráfica correlación Presión vs Profundidad de penetración concreto con relación agua/cemento 0.40, 0.50 y de 0.60 con aire incluido.

4.3.2 CORRELACIÓN RELACIÓN A/C VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN

RESISTENCIA A COMPRESION A 28 DIAS	
Relación Agua/Cemento	Resistencia Promedio (kg/cm ²)
0.4 SAI	380.47
0.5 SAI	284.17
0.6 SAI	234.83

TABLA 4.8 Resultados obtenidas en los ensayos de resistencia a compresión a los 28 días para concreto sin aire incluido (SAI)

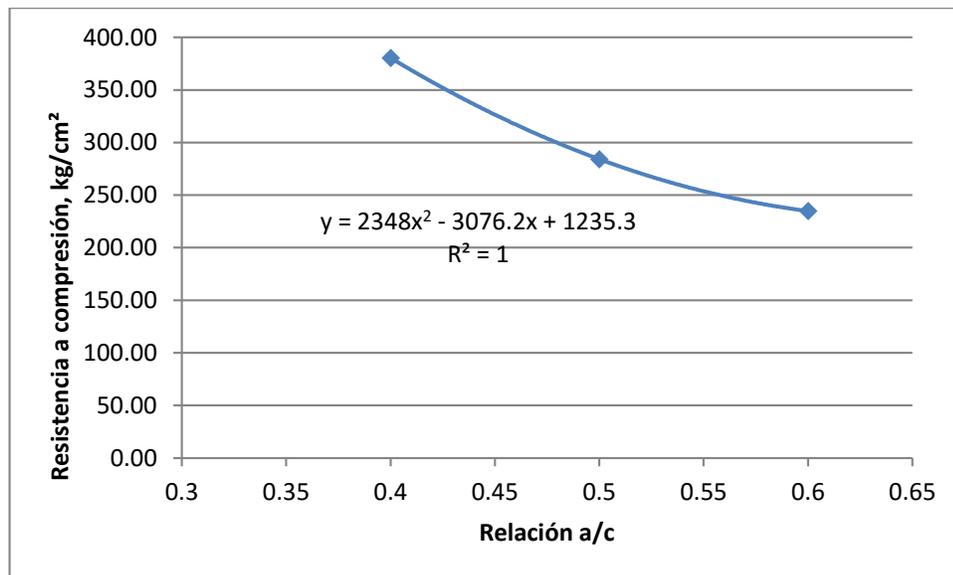


FIGURA 4.42 Gráfica Relación A/C vs Resistencia a compresión concreto sin aire incluido

RESISTENCIA A COMPRESION A 28 DIAS	
Relación Agua/Cemento	Resistencia Promedio (kg/cm ²)
0.4 CAI	360.91
0.5 CAI	261.95
0.6 CAI	214.86

TABLA 4.9 Resultados obtenidas en los ensayos de resistencia a compresión a los 28 días para concreto con aire incluido (CAI)

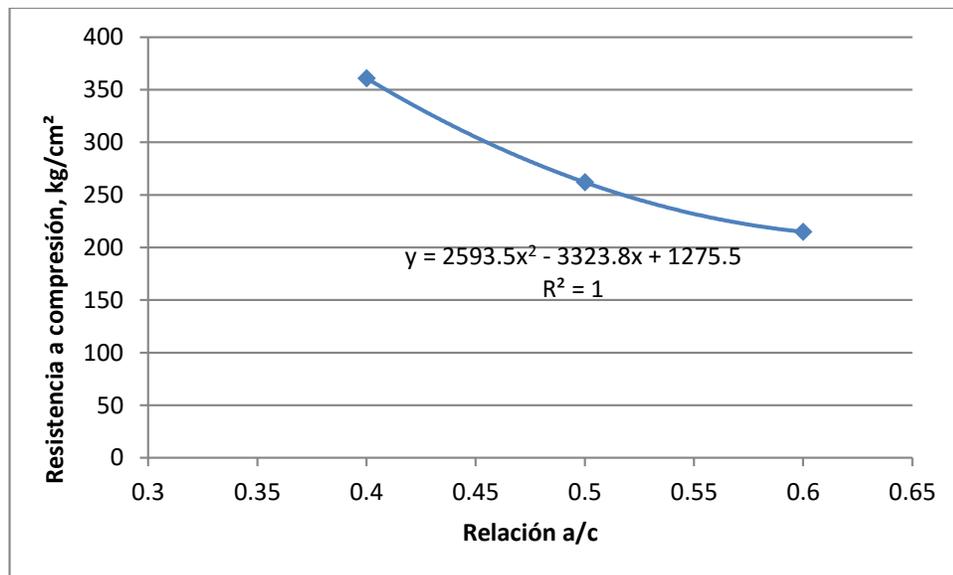


FIGURA 4.43 Gráfica Relación A/C vs Resistencia a compresión concreto con aire incluido

4.3.4 CORRELACIÓN RESISTENCIA A COMPRESIÓN VS PRESIÓN APLICADA

Relación A/C	Tiempo de curado (días)	Profundidad de Penetración (mm)	Presión (psi)	Resistencia (kg/cm ²)
0.4 SAI	7	53	20	267.65
	25	101	110	380.47
0.5 SAI	6	94	25	199.19
	27	109	110	284.17
0.6 SAI	6	98	25	164.51
	27	110	110	234.83

TABLA 4.10 Profundidad de penetración y Resistencia a compresión obtenidas a diferente edad de curado concreto sin aire incluido.

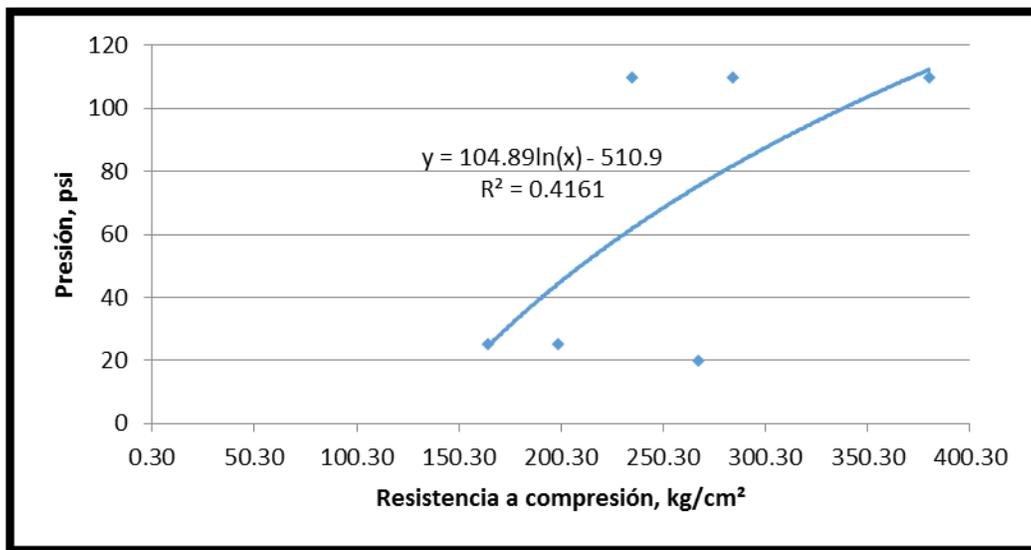


FIGURA 4.44 Gráfica correlación de Resistencia a compresión concreto sin aire incluido vs Presión aplicada

Relación A/C	Tiempo de curado (días)	Profundidad de Penetración (mm)	Presión (psi)	Resistencia (kg/cm ²)
0.4 CAI	7	85	25	242.60
	25	107	100	360.91
0.5 CAI	6	95	25	173.46
	26	107	110	261.95
0.6 CAI	6	100	25	140.43
	26	108	110	214.86

TABLA 4.11 Profundidad de penetración y Resistencia a compresión obtenidas a diferente edad de curado concreto con aire incluido

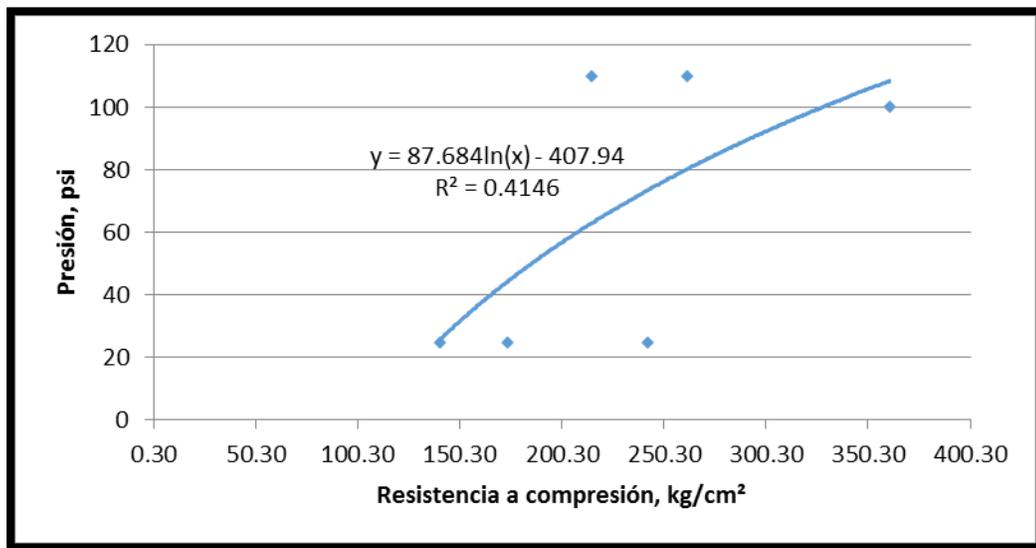


FIGURA 4.45 Gráfica correlación de Resistencia a compresión concreto con aire incluido vs Presión aplicada

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los resultados obtenidos en el capítulo 4 se pudo constatar que el equipo con el cual se realizaron los ensayos de permeabilidad funciona correctamente ya que se pudo obtener medidas de profundidad de penetración, en los ensayos realizados exceptuando el primer ensayo en el cual el equipo presento perdida de líquido y presión por lo cual se consideró aplicar grasa mecánica entre los empaques de neopreno obteniendo buenos resultados.

Para la investigación se consideraron tres relaciones agua/cemento en consecuencia se lograron diferentes resistencias mecánicas, lo cual no fue un parámetro para evaluar cual concreto es más o menos permeable.

La penetración del agua a presión no presentó una tendencia definida, los concretos se comportaron con mucha variabilidad ya que los valores fueron muy similares entre sí, independientemente de la relación a/c.

Al realizar las pruebas se presentaron valores altos de permeabilidad entre 53 mm y 110 mm estableciendo que según las normas técnicas estos concretos se consideran de alta permeabilidad ya que sobrepasan los valores máximos de 50 y 60 mm de profundidad de penetración que se establecen en la Norma NTC 4483 y UNE EN 12390-8 respectivamente.

En las mezclas realizadas con aditivo inclusor de aire se pudo constatar que mejoro la trabajabilidad en las mezclas, pero no se observó un aumento considerable en la impermeabilización del concreto.

Se presentaron cambios en la metodología de las pruebas optando por realizar los ensayos con diferentes tiempos, edad del concreto y presión aplicada esto con el fin de hacer el ensayo más práctico.

Las modificaciones que se tomaron fueron las siguientes:

- Se realizaron ensayos de permeabilidad para diferentes edades del concreto considerando una mínima de 8 días y máxima de 28 días
- El tiempo de aplicación de presión en los especímenes fue de 24 horas
- La presión aplicada al espécimen fue de acuerdo a la edad del concreto a más edad mayor presión siendo estas de 25 psi, 60 psi y 110 psi

En base a los resultados obtenidos mediante las pruebas de permeabilidad realizadas en esta investigación se puede comprobar que la permeabilidad del concreto al agua no depende de la resistencia del concreto, si no de muchos factores que se consideran en el marco teórico como lo son la permeabilidad de los agregados, la relación agua/cemento, el tiempo de hidratación,

Es posible utilizar la profundidad de penetración del agua como una valoración cualitativa del concreto, profundidades mínimas clasifican al concreto como impermeable así este es capaz de soportar las condiciones de exposición de la mayoría de los ataques que enfrenta durante su vida útil.

GRÁFICAS DE CORRELACIÓN

- Correlación Presión vs Profundidad de penetración

En la figura 4.40 se observan los resultados de las mezclas realizadas sin aditivo inclusor de aire, en esta gráfica se puede notar que la correlación entre ambas variables es muy alta, siendo la mezcla de relación $A/C = 0.60$ la que mayor relación guarda entre ambas variables obteniendo un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9923$. En las mezclas realizadas con aditivo inclusor de aire (figura 4.41) la que obtuvo una mayor uniformidad fue la realizada con la relación $A/C = 0.40$ siendo el coeficiente de determinación $R^2 = 0.9847$, con estos resultados se determinó que existe una mayor variabilidad cuando las relaciones A/C son más bajas y se obtuvo una mayor uniformidad cuando la relación A/C

era más alta, y es inversamente proporcional cuando las mezclas se realizaron con aditivo inclusor de aire. La función que más se aproxima es la Potencial.

- Correlación Relación A/C vs Resistencia a compresión

En lo que corresponde a la Resistencia a compresión (f^c), como única conclusión se dice que cumple con investigaciones realizadas al respecto, una mayor relación agua/cemento dará una menor resistencia, esto quiere decir que, a mayor cantidad de agua, se obtiene una menor resistencia, la línea de tendencia es polinómica de segundo orden cuya ecuación para las mezclas realizadas sin aditivo inclusor de aire (SAI) es $y = 2348 x^2 - 3076.2 x + 1235.3$ y para las realizadas con aditivo inclusor de aire (CAI) $y = 2593.5x^2 - 3323.8 x + 1275.5$, el coeficiente de determinación $R^2 = 1$ lo cual significa un ajuste lineal perfecto.

- Correlación Resistencia a compresión vs Presión aplicada.

En las figuras 4.44 y 4.45 se puede observar que la recta de regresión no pasa por todos los puntos, la función que más se aproxima es la logarítmica, el grado de ajuste viene determinado por el coeficiente de determinación R^2 , para el caso en las mezclas realizadas sin aditivo inclusor de aire fue de $R^2 = 0.4161$ y en las mezclas con aditivo inclusor de aire fue de $R^2 = 0.4146$, es decir que la variable resistencia es capaz de explicar el 41.61% de la variación en la presión aplicada.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

En base a los datos obtenidos llegamos a las siguientes conclusiones:

- La permeabilidad del concreto está influenciada principalmente por la permeabilidad de cada uno de los componentes y de sí misma. Entonces para obtener un concreto con baja permeabilidad es necesario lograr su mínima permeabilidad mediante su óptima compactación, pero esto dependerá de la calidad de los materiales, de un método de dosificación adecuado, de las relaciones agua/cemento, del tamaño y graduación del agregado grueso, mezclado, transporte, colocado y compactado y el tiempo de hidratación, del tipo de cemento y de ejecutar de forma correcta las prácticas de diseño y construcción entre otras.
- La penetración del agua a presión mostró una tendencia poco definida, los concretos se comportaron con mucha variabilidad ya que tanto los valores mínimos como los máximos fueron muy similares entre sí, independientemente de la relación a/c. Esto indicaría que concretos de muy distinta calidad presentan la misma permeabilidad, lo cual no resulta lógico.
- Considerando que se realizaron mezclas con relaciones agua/cemento de 0.40, 0.50 y 0.60 con lo cual se obtuvieron resistencias mecánicas, entre 380 kg/cm² y 214 kg/cm² concluimos que la resistencia mecánica del concreto no fue un factor que influyera o determinara que concreto era más o menos permeable.
- Se obtuvieron lecturas de penetración de agua en las pruebas realizadas, obteniendo valores entre 53-110 mm de profundidad de penetración de agua, en concreto con aire y sin aire incluido. Estas lecturas de penetración de agua podrían ser estimados como valores de permeabilidad del concreto, estos datos

tienen que validarse realizando más estudios con la metodología que se plantea y similares condiciones que se han expuesto en los ensayos realizados.

- No se pueden comparar los resultados obtenidos en las pruebas de permeabilidad con los valores que se establecen las normas técnicas NTC 4483 Y UNE EN 12390 -8 ya que se modificaron demasiadas variables:
 - La duración de la prueba que se consideró hacerla para un tiempo de 24 horas.
 - El tiempo de aplicación de presión que en dichas normas se considera de 48 horas se redujo a 24 horas con el objetivo de hacer más práctica la prueba y obtener valores de profundidad de penetración de una manera más rápida.
 - Las presiones aplicadas. Estas se fueron aumentando gradualmente conforme iba avanzando el proceso de curado del concreto
 - Las edades realizadas en las pruebas de permeabilidad fueron distintas a la establecida en la norma ya que en esta se establece una edad de más o menos 28 días para la realización del ensayo, para nuestro caso se realizaron a diferentes edades conforme se iba desarrollando la hidratación del cemento.

- La utilización de aditivos inclusores de aire ocasionan una disminución en la resistencia mecánica del concreto, al realizar las mezclas con este aditivo se pudo constatar que hubo un aumento en la trabajabilidad del concreto cuando realizaron las mezclas con relaciones agua/cemento bajas.

- Se puede concluir que los valores de penetración de agua son un buen indicador de durabilidad frente a la posible penetración de agentes agresivos en las estructuras de concreto.

5.2 RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio más amplio del tema y así lograr establecer una interpretación más clara de los valores de profundidad de penetración obtenidos en las pruebas permeabilidad se debe de tomar en cuenta la metodología que se plantea y considerar las condiciones que se han expuesto en los ensayos (tiempo de curado, granulometría de agregados, relaciones agua/cemento).
- Llevar a cabo una investigación de permeabilidad en función del tiempo, ya que el tiempo y el tipo de curado son factores importantes en la determinación de la permeabilidad del concreto, curados prolongados del concreto pueden resultar en valores de profundidad de penetración menores.
- Fabricar otro equipo para medir la permeabilidad con las mismas características y portabilidad del equipo con el cual se lograron realizar los ensayos, ya que se cuenta con la descripción técnica del equipo, esto con el fin de realizar más pruebas de manera simultánea y reducir el tiempo para la obtención de resultados.
- Realizar ensayos con diferente tipo de cemento (cemento marino A.R.S) debido a que la calidad del cemento es un factor que influye en la permeabilidad del concreto.
- Diseñar para obtener durabilidad, la permeabilidad del material y las condiciones a las que estará expuesto el concreto son factores estrechamente relacionados con la durabilidad y deben de tomarse en cuenta al diseñar el concreto.
- En ambientes con una elevada agresividad tomar como referencia el ensayo de profundidad de penetración para garantizar la calidad del concreto. 6.0

5.3 BIBLIOGRAFÍA

Libros:

- Sánchez de Guzmán Diego; Tecnología del concreto y del mortero; Bhandar editores; Quinta edición; 2001.
- Gerardo A. Rivera. L; Concreto Simple; Universidad del Cauca.
- Adam M. Neville; Tecnología del concreto; INCYC, México, 1999
- Manuel Gonzales de la Gotera, Ataque Químico del concreto, 1991.
- Un equipo simple y portable para desarrollar la prueba de permeabilidad al agua del concreto; Kumar Bhagoria, Hemant; I.R.S.E.; Vijayawada; 2006
- Monteiro Paulo J.M, Metha Kumar P. Concreto: Estructura, Propiedades y Materiales
- Monteiro Paulo J.M. Mehta Kumar P.; Instituto Colombiano Productores de cemento I.C.P.C, 1998.
- Kosmatka, Steven H.; Kerkhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU. 2004.

Normas:

- Código ACI 318-08 Capitulo 4: Requisitos de Durabilidad
- Norma Técnica Colombiana 4483; 1998; Método de Ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua.
- Norma española UNE EN 12390-8; “Ensayos de hormigón endurecido, Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión”; AENOR; Madrid, España.
- Instrucción de Hormigón Estructural, EHE 08, Cuarta edición, 2010.
- Práctica Estándar para reducción de las Muestras de Agregado al Tamaño de Prueba. ASTM C 702 -01

- Método de Ensayo Estándar para Contenido de Humedad Total del Agregado por Secado. ASTM 566 -97
- Método de Ensayo Estándar para Análisis por Malla de Agregados Grueso y Fino. ASTM C136-01
- Método de Ensayo Estándar para Densidad Bruta (Peso Unitario) y Vacíos en los Agregados. ASTM C 29 / C 29M –97.
- Método de Ensayo Estándar para Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica), y Absorción del Agregado Grueso. ASTM C 127 – 01
- Método de Ensayo Estándar para Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino ASTM Designación C 128 -00
- Método de prueba estándar para revenimiento de concreto de cemento hidráulico. ASTM Designación C143/C143M – 00
- Método de Ensayo Estándar para Esfuerzo de Compresión en especímenes cilíndricos de concreto. ASTM C39/C39M-01

Tesis:

- Arévalo, N.H, Barrillas, L.I; Silva, R.F. (2013), “*Adaptación de un método para medir la permeabilidad*”. (Trabajo de graduación). Universidad de El Salvador, Santa Ana, El Salvador.

Revistas:

- Sánchez de Guzmán, Diego; Instituto del Concreto, Colección básica del concreto Tomo I, Tecnología y propiedades, Segunda Edición. ASOCRETO. Bogotá.
- German Hermida Ph.D; Concreto Impermeable, Sika Colombia S.A; oct-vo-198-10/201

ANEXOS

7. ANEXOS

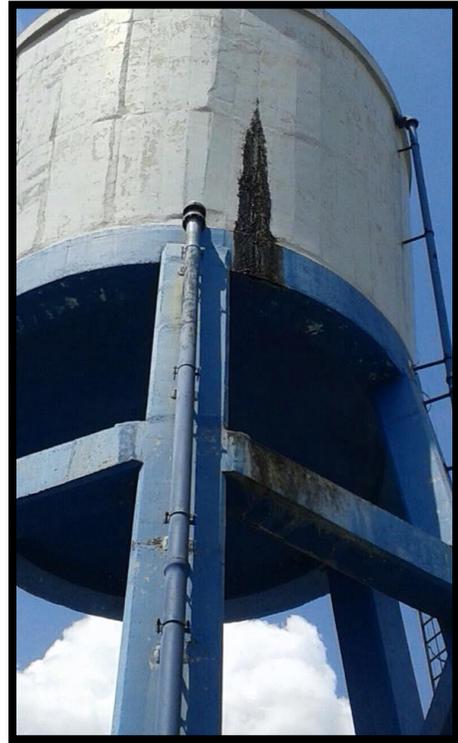
TANQUES ELEVADOS CON PROBLEMAS DE SALIDO DE LÍQUIDO



Fotografía 1: Tanque elevado ubicado en Colonia La Pradera, San Miguel.



Fotografía 2: Tanque elevado N° 2 ubicado en Colonia La Pradera, San Miguel



Fotografía 3 y 4: Tanque elevado ubicado en Santa María, Usulután



Fotografía 5: Tanque elevado ubicado en Iglesia Medalla Milagrosa, San Miguel.

FOTOGRAFÍAS DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO DAÑADAS EN ZONA COSTERA DE EL SALVADOR



Fotografía 6: Deterioro en el concreto y corrosión por cloruros en playa Las Tunas, La Unión



Fotografía 7: Deterioro en el concreto y corrosión del acero en antiguo muelle artesanal, La Unión



Fotografía 8: Deterioro en muelle Puerto de La Libertad



Fotografía 9: Pérdida de la capa superficial del concreto en muelle de la ciudad de La Unión



Fotografía 10: Deterioro en columna por contacto con agua de mar y organismos marinos, La Unión