



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN MEZCLAS DE
CONCRETO ELABORADO CON CEMENTO SEGÚN NORMA ASTM C1157
UTILIZANDO DIFERENTES RELACIONES AGUA-CEMENTO**

Allan Gabriel Colindres Ovando

Asesorado por el Ing. Plinio Estuardo Herrera Rodas

Guatemala, mayo de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN MEZCLAS DE
CONCRETO ELABORADO CON CEMENTO SEGÚN NORMA ASTM C1157
UTILIZANDO DIFERENTES RELACIONES AGUA-CEMENTO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ALLAN GABRIEL COLINDRES OVANDO
ASESORADO POR EL ING. PLINIO ESTUARDO HERRERA RODAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MAYO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL I | Ing. José Francisco Gómez Rivera |
| VOCAL II | Ing. Mario Renato Escobedo Martínez |
| VOCAL III | Ing. José Milton de León Bran |
| VOCAL IV | Br. Luis Diego Aguilar Ralón |
| VOCAL V | Br. Christian Daniel Estrada Santizo |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|-------------|--|
| DECANO | Ing. Angel Roberto Sic García |
| EXAMINADOR | Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero |
| EXAMINADOR | Ing. Juan Ramón Ordóñez Hernández |
| EXAMINADORA | Inga. María del Mar Girón Cordón |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN MEZCLAS DE
CONCRETO ELABORADO CON CEMENTO SEGÚN NORMA ASTM C1157
UTILIZANDO DIFERENTES RELACIONES AGUA-CEMENTO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 7 de noviembre de 2017.



Allan Gabriel Colindres Ovando

Guatemala, 11 de Marzo de 2019

Ingeniero Civil

José Gabriel Ordoñez Morales

Escuela de Ingeniería Civil

Área de Materiales y Construcciones Civiles

Facultad de Ingeniería, USAC

Ingeniero Ordoñez

Por este medio me dirijo a usted, para hacer de su conocimiento que como asesor del estudiante **ALLAN GABRIEL COLINDRES OVANDO** con número de carné **201403729**, he tenido a la vista el trabajo de graduación titulado **CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN MEZCLAS DE CONCRETO ELABORADO CON CEMENTO SEGÚN NORMA ASTM C1157 UTILIZANDO DIFERENTES RELACIONES AGUA-CEMENTO** por el cual me encuentro satisfecho.

En tal virtud, LO DOY POR APROBADO, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me despido.



Plinio Estuardo Herrera Rodas Plinio Estuardo Herrera Rodas
Ingeniero Civil
Colegiado No. 3876
Ingeniero Civil, Colegiado activo No. 3876

Asesor de Tesis



USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
 25 de abril de 2019

Ingeniero
 Hugo Leonel Montenegro Franco
 Director Escuela Ingeniería Civil
 Facultad de Ingeniería
 Universidad de San Carlos

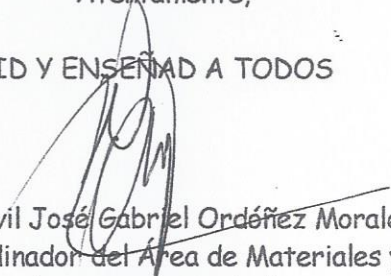
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN MEZCLAS DE CONCRETO ELABORADO CON CEMENTO SEGÚN NORMA ASTM C1157 UTILIZANDO DIFERENTES RELACIONES AGUA-CEMENTO** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Allan Gabriel Colindres Ovando quien contó con la asesoría del Ing. Plinio Estuardo Herrera Rodas.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


 Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales
 Coordinador del Área de Materiales y
 Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
 AREA DE MATERIALES Y
 CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/mrrm.





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Plinio Estuardo Herrera Rodas y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Allan Gabriel Colindres Ovando **CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN MEZCLAS DE CONCRETO ELABORADO CON CEMENTO SEGÚN NORMA ASTM C1157 UTILIZANDO DIFERENTES RELACIONES AGUA-CEMENTO** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, mayo 2019

/mrm.



Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.255-2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil del trabajo de graduación titulado: **"CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN MEZCLAS DE CONCRETO ELABORADO CON CEMENTO SEGÚN NORMA ASTM C1157 UTILIZANDO DIFERENTES RELACIONES AGUA-CEMENTO"** presentado por el estudiante: **Allan Gabriel Colindres Ovando** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, mayo de 2019

/echm



ACTO QUE DEDICO A:

| | |
|--|---|
| Dios | Por permitirme culminar este gran reto que me propuse y porque todo se lo debo a Él. |
| Mis padres | Victor Colindres y Mayra de Colindres, por su apoyo incondicional durante toda mi vida. |
| Mi hermano | Victor Colindres, por siempre estar conmigo para aconsejarme y apoyarme. |
| Mis padrinos | Julio Rosales y Nancy Colindres, por siempre estar presentes en mi vida. |
| Mis abuelos | Que desde el cielo están observando este momento tan especial. |
| Mi familia | Por ser parte importante de mi vida. |
| Familia Cempro | Por apoyarme en el desarrollo de este trabajo de graduación y en de mi vida profesional. |
| Ing. Estuardo Herrera e Ing. Ariel Osorio | Por invertir su tiempo asesorándome en el desarrollo este trabajo de graduación y compartir sus conocimientos con mí persona. |
| Amigos | Por ser parte fundamental de mi vida. |

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|--|---|
| Dios | Por acompañarme y guiarme durante toda mi vida. |
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Por abrirme las puertas de ese gran centro de enseñanza superior. |
| Facultad de Ingeniería | Por ser mi segundo hogar y por enseñarme a amar mi carrera. |
| Catedráticos de la Facultad de Ingeniería | Por ser una importante influencia en mi carrera y por compartir sus conocimientos. |
| CETEC | Por permitirme hacer todas mis pruebas en sus instalaciones y hacer uso de su equipo. |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | VII |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XI |
| GLOSARIO | XIII |
| RESUMEN..... | XVII |
| OBJETIVOS..... | XIX |
| INTRODUCCIÓN | XXI |
| | |
| 1. ANTECEDENTES | 1 |
| | |
| 2. RELACIÓN AGUA-CEMENTO, PROPIEDADES DEL CONCRETO Y SU IMPACTO EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES | 5 |
| 2.1. Relación agua-cemento..... | 5 |
| 2.2. Propiedades del concreto recién mezclado..... | 6 |
| 2.2.1. Trabajabilidad | 7 |
| 2.2.2. Sangrado y asentamiento..... | 8 |
| 2.2.3. Consolidación | 9 |
| 2.2.4. Calor de hidratación, tiempo de fraguado y endurecimiento | 10 |
| 2.3. Propiedades del concreto endurecido | 12 |
| 2.3.1. Curado..... | 12 |
| 2.3.2. Tasa de secado del concreto..... | 14 |
| 2.3.3. Resistencia | 17 |
| 2.3.3.1. Compresión | 18 |
| 2.3.3.2. Resistencia a flexión..... | 19 |

| | | |
|----------|---|----|
| 2.3.3.3. | Resistencia a la tensión directa o indirecta..... | 20 |
| 2.3.3.4. | Resistencia a la torsión | 20 |
| 2.3.3.5. | Resistencia al corte | 20 |
| 2.3.3.6. | Módulo elástico | 21 |
| 2.3.3.7. | Peso unitario o densidad..... | 21 |
| 2.3.3.8. | Permeabilidad | 22 |
| 3. | DURABILIDAD..... | 25 |
| 3.1. | Factores que afectan la durabilidad | 25 |
| 3.1.1. | Permeabilidad y difusión | 25 |
| 3.1.2. | Categorías de exposición..... | 28 |
| 3.1.3. | Agrietamiento | 30 |
| 3.1.4. | Tratamientos de protección..... | 31 |
| 3.2. | Mecanismos de deterioro y mitigación | 31 |
| 3.2.1. | Abrasión y erosión..... | 31 |
| 3.2.2. | Congelación y descongelación (deshielo) | 34 |
| 3.2.3. | Reacción álcali-sílice (RAS) | 36 |
| 3.2.4. | Carbonatación | 39 |
| 3.2.5. | Corrosión..... | 40 |
| 3.2.6. | Exposición al agua de mar | 42 |
| 4. | IMPORTANCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO | 45 |
| 4.1. | Importancia de los agregados | 45 |
| 4.2. | Importancia de un buen control de calidad..... | 45 |
| 4.3. | Concreto en proyectos viales..... | 47 |
| 4.3.1. | Calor..... | 47 |
| 4.3.2. | Combustible | 47 |
| 4.3.3. | Lumínica..... | 48 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.4. | Importancia de conocer el módulo elástico del concreto | 48 |
| 4.5. | Estadísticas que demuestren la masificación del uso del concreto..... | 49 |
| 5. | CONTROL DE CALIDAD EN CONCRETO FRESCO | 51 |
| 5.1. | Norma COGUANOR NTG 41052. Método de ensayo. determinación del asentamiento del concreto hidráulico | 51 |
| 5.1.1. | Generalidades | 51 |
| 5.1.2. | Procedimiento..... | 52 |
| 5.2. | Norma COGUANOR NTG 41053. Método de ensayo. Medición de la temperatura del concreto hidráulico recién mezclado | 54 |
| 5.2.1. | Generalidades | 54 |
| 5.2.2. | Procedimiento..... | 55 |
| 5.3. | Norma COGUANOR NTG 41017h5. Método de ensayo. Determinación de la densidad aparente, rendimiento y contenido de aire del concreto..... | 56 |
| 5.3.1. | Generalidades | 56 |
| 5.3.2. | Procedimiento..... | 56 |
| 5.4. | Norma COGUANOR NTG 41017h7. Método de ensayo. Determinación del contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado por el método de presión | 58 |
| 5.4.1. | Generalidades | 58 |
| 5.4.2. | Procedimiento..... | 59 |
| 5.5. | Norma COGUANOR NTG 41061. Práctica para la elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en obra..... | 61 |
| 5.5.1. | Generalidades | 61 |
| 5.5.2. | Procedimiento..... | 62 |

| | | |
|--------|--|----|
| 6. | CONTROL DE CALIDAD EN CONCRETO ENDURECIDO..... | 65 |
| 6.1. | Norma COGUANOR NTG 41017h1. Método de ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes de concreto | 65 |
| 6.1.1. | Generalidades..... | 65 |
| 6.1.2. | Procedimiento | 66 |
| 6.2. | Norma COGUANOR NTG 41017h2. Método de ensayo para determinar el esfuerzo de flexión del concreto (utilizando una viga simplemente soportada con cargas en los tercios de la luz)..... | 68 |
| 6.2.1. | Generalidades..... | 68 |
| 6.2.2. | Procedimiento | 69 |
| 6.2.3. | Cálculo del módulo de ruptura..... | 71 |
| 6.3. | Norma COGUANOR NTG 41017h16. Método de ensayo. Determinación del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson del concreto a compresión | 72 |
| 6.3.1. | Generalidades..... | 72 |
| 6.3.2. | Procedimiento | 74 |
| 6.3.3. | Cálculo de módulo de elasticidad y módulo de Poisson..... | 75 |
| 6.4. | norma COGUANOR NTG 41017h42. Método de ensayo. Profundidad de penetración de agua bajo presión..... | 77 |
| 6.4.1. | Generalidades..... | 77 |
| 6.4.2. | Procedimiento | 78 |
| 7. | RECOPIACIÓN, INTERPRETACIÓN, COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 81 |
| 7.1. | Resultados | 81 |
| 7.1.1. | Resultados de ensayos a los agregados..... | 81 |

| | | |
|-----------------------|---|-----|
| 7.1.2. | Diseño de mezcla teórico | 82 |
| 7.1.3. | Humedades de los materiales para mezcla práctica | 82 |
| 7.1.4. | Mezclas prácticas | 82 |
| 7.1.5. | Resultados en concreto fresco | 83 |
| 7.1.6. | Resultados en concreto endurecido | 84 |
| 7.1.6.1. | Resistencia a compresión..... | 84 |
| 7.1.6.2. | Módulo de ruptura..... | 87 |
| 7.1.6.3. | Módulo elástico..... | 89 |
| 7.1.6.4. | Penetración de agua bajo presión | 90 |
| 7.2. | Análisis de resultados..... | 91 |
| CONCLUSIONES | | 97 |
| RECOMENDACIONES | | 99 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 101 |
| ANEXOS | | 105 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Ensayo de revenimiento terminado..... | 8 |
| 2. | Ejemplo de sangrado | 9 |
| 3. | Equipo para calcular el tiempo de fraguado del concreto..... | 12 |
| 4. | Cambios de resistencia debido al curado de cilindros | 14 |
| 5. | Primera etapa del secado del concreto | 15 |
| 6. | Segunda etapa del secado del concreto | 16 |
| 7. | Tercera fase del secado del concreto | 17 |
| 8. | Etapas del secado del concreto | 17 |
| 9. | Variación de resistencias típicas | 18 |
| 10. | Ensayo a compresión del concreto | 19 |
| 11. | Tipos de porosidad en el concreto | 26 |
| 12. | Relación entre compresión, porosidad y permeabilidad..... | 27 |
| 13. | Abrasión del concreto..... | 32 |
| 14. | Abrasión en concretos..... | 33 |
| 15. | Esfuerzos en el concreto sometido a congelamiento | 35 |
| 16. | Fisuras por RAS..... | 37 |
| 17. | Ejemplo de corrosión en el concreto | 41 |
| 18. | Esfuerzo- deformación del concreto..... | 48 |
| 19. | Metros cuadrados de construcción..... | 50 |
| 20. | Molde para realizar ensayo de revenimiento en el concreto | 52 |
| 21. | Ensayo de asentamiento al concreto | 54 |
| 22. | Ensayo de temperatura del concreto..... | 55 |
| 23. | Recipientes según TMN del agregado | 56 |

| | | |
|-----|--|----|
| 24. | Ejemplo norma COGUANOR NTG 41017h5 | 58 |
| 25. | Ejemplo norma COGUANOR NTG 41017h7 | 61 |
| 26. | Requisitos del método de consolidación | 63 |
| 27. | Requisitos de moldeado por varillado | 63 |
| 28. | Ejemplo norma COGUANOR NTG 41061 | 64 |
| 29. | Ensayo a compresión del concreto | 66 |
| 30. | Esquema de los modelos de fractura típicos | 67 |
| 31. | Edades de ensayo y tolerancias admisibles | 68 |
| 32. | Diagrama de aparato de norma COGUANOR NTG 41017h2..... | 69 |
| 33. | Ensayo a flexión del concreto | 72 |
| 34. | Combinación de compresómetro y extensómetro..... | 73 |
| 35. | Ensayo módulo elástico del concreto..... | 76 |
| 36. | Ejemplo de equipo de ensayo..... | 77 |
| 37. | Ensayo de penetración de agua bajo presión..... | 79 |
| 38. | Profundidad de penetración de agua | 79 |
| 39. | Resistencia a compresión vrs relación agua-cemento..... | 84 |
| 40. | Replicación de resistencias, con relación a/c de 0 40..... | 85 |
| 41. | Replicación de resistencias con relación a/c de 0 50..... | 85 |
| 42. | Replicación de resistencias, con relación a/c de 0 60..... | 86 |
| 43. | Replicación de resistencias, con relación a/c de 0 70..... | 86 |
| 44. | Combinación de crecimiento de $f'c$ | 87 |
| 45. | Comparación entre corridas de módulo de ruptura..... | 88 |
| 46. | Módulo de ruptura promedio | 88 |
| 47. | Módulo elástico..... | 89 |
| 48. | Ensayo de penetración de agua bajo presión..... | 90 |

TABLAS

| | | |
|-------|--|----|
| I. | Edad aproximada para que los vacíos de un concreto se vuelvan discontinuos | 28 |
| II. | Categorías de exposición..... | 29 |
| III. | Resultados para el agregado fino de tipo basalto | 81 |
| IV. | Resultados para el agregado grueso de tipo basalto | 81 |
| V. | Diseño de mezcla teórico | 82 |
| VI. | Humedad de materiales | 82 |
| VII. | Mezcla práctica #1 | 82 |
| VIII. | Mezcla práctica #2 | 83 |
| IX. | Resultados de ensayos a mezcla en estado fresco | 83 |
| X. | Resultados de ensayos a compresión..... | 84 |
| XI. | Módulo de ruptura a 28 días | 87 |
| XII. | Módulo elástico del concreto..... | 89 |
| XIII. | Distancia de penetración de agua bajo presión | 90 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|--------------------------|--|
| a/c | Agua/cemento |
| cm | Centímetro |
| Kg | Kilogramo |
| Kg/cm² | Kilogramo fuerza sobre centímetro cuadrado |
| psi | Libra fuerza sobre pulgada cuadrada |
| L | Litros |
| MPa | Mega pascal (1x10 ⁶ Pascales) |
| μm | Micrómetro (1x10 ⁻⁶ metros) |
| mm | Milímetro |
| E | Módulo elástico |
| MR | Módulo de ruptura del concreto |
| Pa | Pascal [N/m ²] |
| % | Porcentaje |
| Pulg, Plg,“ | Pulgadas |
| f'c | Resistencia a la compresión del concreto |
| f'cr | Resistencia a la compresión del concreto requerida |

GLOSARIO

| | |
|----------------------------|--|
| Abrasión | Desgaste de una superficie por frotamiento y fricción. |
| ACI | American Concrete Institute. |
| AENOR | Asociación Española de Normalización y Certificación. |
| Agregado fino | Agregado que pasa el tamiz #4 (4,75 mm). |
| Agregado grueso | Agregado que es retenido en el tamiz #4 (4,75 mm). |
| AASHTO | American Association of State Highway and Transportation Officials. |
| ASTM | American Society for Testing and Materials. |
| COGUANOR | Comisión Guatemalteca de Normas. |
| Concreto endurecido | Concreto que ha desarrollado suficiente resistencia para soportar cargas estipuladas. |
| Concreto fresco | Concreto recién mezclado, aún plástico y trabajable. |
| Control de calidad | Estrategia que asegura el mejoramiento continuo de la calidad, cuyo objetivo es la satisfacción de los |

clientes, internos y externos, mediante el desarrollo permanente por mantener y mejorar la calidad de los productos y servicios, a través de la aplicación de técnicas y esfuerzos.

Curado

Proceso, a través del cual se mantienen; el concreto, mortero, en la condición húmeda y a una temperatura favorable, por el período de tiempo de sus primeras etapas, a fin de que se desarrollen las propiedades deseadas del material. El curado garantiza la hidratación y el endurecimiento satisfactorios de los materiales cementantes.

Espécimen

Muestra o parte de ella que se usa para ejecutar una prueba.

Fraguado

Proceso de endurecimiento del concreto, en el cual pasa de un estado plástico a un estado sólido, procedente de la reacción química del cemento y el agua.

Módulo de elasticidad

Relación que existe entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente para esfuerzos de tensión o compresión menores que el límite de proporcionalidad del material, es conocido con el símbolo E.

NTG

Norma Técnica Guatemalteca.

Pavimento

Combinación de subbase, base y carpeta de rodadura colocado sobre una subrasante para soportar las cargas de tráfico y distribuirlas al terreno natural.

Permeabilidad

Capacidad de un material de permitir que un flujo lo atraviese sin alterar su estructura interna.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación está enfocado al concreto, el cual es un material compuesto y es muy usado en el campo de la construcción. Por lo general, el concreto convencional está compuesto por arena, pedrín, agua y un material aglomerante que funciona como pegamento entre todos los componentes. Posteriormente, se han ido desarrollando otros componentes que se integran al concreto y que pueden mejorar las características y propiedades del concreto en función de sus necesidades.

Este trabajo incluye investigaciones realizadas anteriormente, ya sea modificando alguno de sus componentes o adicionando algún otro material para observar como este influye en sus propiedades mecánicas. Posteriormente, se tratan generalidades del concreto, tales como la relación agua-cemento, sus características al momento de elaborar la mezcla de concreto; es decir, sus propiedades en estado fresco, ya que en esta etapa el concreto se comporta como un fluido. También, características y propiedades del concreto en estado endurecido. Finalmente, se abordan temas de durabilidad del concreto, en el período de vida útil de este y los diferentes factores que pueden afectar esta propiedad.

El control de calidad del concreto es muy importante, tanto en estado fresco como endurecido, por lo que este debe realizarse de manera correcta para verificar adecuadamente todas las características y propiedades mecánicas del concreto. El objetivo del trabajo de graduación es determinar cómo estas características y propiedades se ven afectadas al momento de modificar factores críticos, como la relación agua-cemento.

OBJETIVOS

General

Determinar las características físicas y propiedades mecánicas en mezclas de concreto elaborado con cemento, según norma COGUANOR NTG 41095 (ASTM C1157) utilizando diferentes relaciones agua cemento.

Específicos

1. Determinar las características físicas del concreto en su estado fresco, para las cuatro relaciones agua-cemento a trabajar, según norma COGUANOR NTG 41053 (ASTM C1064), COGUANOR NTG 41052 (ASTM C143), COGUANOR NTG 41017 h5 (ASTM C138), COGUANOR NTG 41017 h7 (ASTM C231) y COGUANOR NTG 41061 (ASTM C31).
2. Determinar la resistencia a compresión del concreto a las edades de 7, 28, 56 días, para las cuatro relaciones agua cemento a trabajar, según norma COGUANOR NTG 41017 h1 (ASTM C39) y COGUANOR NTG 41067 (ASTM C1231).
3. Determinar la resistencia a la flexión del concreto a la edad de 28 días, para las cuatro relaciones agua cemento a trabajar, según norma COGUANOR NTG 41017 h2 (ASTM C78).

4. Determinar el módulo elástico del concreto a 28 días, para las cuatro relaciones agua cemento a trabajar, según norma COGUANOR NTG 41017 h16 (ASTM C469).
5. Determinar la permeabilidad del concreto a 56 días, para las cuatro relaciones agua cemento a trabajar, según norma COGUANOR NTG 41017 h42 (y española UNE-EN 12390-8).

INTRODUCCIÓN

Un concreto convencional está constituido por: cemento, agua, agregado grueso, agregado fino y aditivos. El cemento es el material aglomerante, que al momento de entrar en contacto con el agua reacciona y aglutina todas las partículas presentes en la mezcla, el agua mezclada con el cemento forman la pasta que une las partículas de agregados. Los agregados tanto gruesos como finos conforman la mayor parte del volumen en una mezcla de concreto.

Las mezclas de concreto se elaboraban utilizando únicamente los componentes descritos; sin embargo, hoy en día, con los altos requerimientos de desempeño del concreto, el uso de aditivos químicos y otras adiciones para concretos han pasado a ser componentes esenciales para lograr dichos requerimientos. Estos aditivos y adiciones se incorporan a la mezcla de concreto, haciendo posible la modificación de sus propiedades, tanto en estado fresco, como endurecido.

Como se mencionó anteriormente, en este trabajo de graduación se pretende determinar las características físicas y propiedades mecánicas de mezclas de concreto y cómo estas pueden variar en función de la relación agua-cemento utilizada. Para cada mezcla de concreto a elaborar se determinará lo siguiente:

- Resistencia a la compresión
- Resistencia a la flexión
- Modulo elástico del concreto
- Permeabilidad del concreto

Los materiales a utilizar son:

- Cemento tipo ARI (HE), según norma COGUANOR NTG 41095 (ASTM C1157).
- Aditivo reductor de agua de rango medio y retardante tipo B y D, según norma COGUANOR NTG 41070 (ASTM C494).
- Agregado grueso 3/8 pulgada.
- Agregado fino.

En todas las mezclas de concreto a realizar se utilizará la misma fuente de componentes, para que los resultados obtenidos sean comparables.

Se realizarán ensayos a compresión de cilindros a edades de 7, 28 y 56 días, para cada mezcla, según COGUANOR NTG (ASTM C31), COGUANOR NTG (ASTM C39) y COGUANOR NTG (ASTM C1231), cada tipo de agregado será caracterizado en laboratorio.

Se realizarán ensayos a flexión en vigas a la edad de 28 días, según norma COGUANOR NTG (ASTM C31) y COGUANOR NTG (ASTM C78), para cada mezcla. También, se realizará el ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático del concreto a la edad de 28 días, según norma COGUANOR NTG (ASTM C469), para cada mezcla.

Se realizarán ensayos de presión hidrostática a la edad de 56 días, según norma COGUANOR NTG 41017 h42 (y española UNE-EN 12390-8), para cada mezcla.

Se elaborará una recopilación de resultados para determinar cuáles son las características físicas y propiedades mecánicas de cada una de las mezclas de concreto realizadas. De esta manera se podrá contar con un documento de resultados actualizados de las características físicas y propiedades mecánicas de las mezclas de concreto con distinta relación agua cemento, utilizando componentes de la misma procedencia para cada mezcla.

1. ANTECEDENTES

Para conocer de los antecedentes de los estudios del concreto es necesario conocer la historia del cemento, ya que es este el encargado de unir todos los componentes y dar la fuerza necesaria para soportar carga. Los primeros materiales con base cementicia datan de los egipcios, esta cultura utilizaba un mortero para unir los grandes bloques con los que hacían sus construcciones; luego, más adelante en la historia se llega a los griegos y romanos que encontraron bancos de material volcánico, que al momento de ser mezclando con arena y caliza, se llegaba a producir un mortero de gran capacidad para resistir cargas.

En Inglaterra, gracias a investigaciones con distintos materiales se llegó a producir un material que constaba de caliza dura, molida y calcinada junto con arcilla, se llegaba a producir un material que al momento de agregársele agua producía una pasta que de nuevo era molida y calcinada para dar paso a un polvo fino, el cual es el antecedente directo del que se conoce en la actualidad. Posteriormente, se crea el cemento Portland y más adelante gracias a muchas investigaciones se llega a lo que hoy en día se conoce cemento.

Entrando en el ámbito del concreto, el cual es una combinación entre cemento, agregados y agua, que al momento de endurecer crea una masa muy resistente. La primera vez que se utilizó el concreto como tal, fue en 1774, en la construcción de un faro. Luego con el paso de los años, varias investigaciones y estudios, se fue mejorando su dosificación, ya sea probando diferentes tipos de agregados, cantidad de agua a utilizar, los diferentes tipos de cemento que se iban creando, entre otros.

Para eso se realizaron investigaciones de cómo era el desempeño con las variantes que se le hacían entre las cuales se medía el factor determinante del concreto, su resistencia a la compresión; pero más adelante se descubrió que el concreto no soporta únicamente fuerzas de compresión; en obras de pavimentos el concreto soporta esfuerzos de flexión, que es una combinación de compresión y flexión, y más adelante se fueron realizando más estudios de desempeño del concreto, ya sea su resistencia a sulfatos, reacción álcali-sílice, capacidad de soportar la penetración del agua, contracción por secado, etc. Pero siempre dichas investigaciones eran muy puntuales, en su mayoría se centraba en estudiar ya sea una característica o una propiedad del concreto, no en hacer una combinación de varias características físicas del concreto junto con sus propiedades mecánicas.

El ingeniero Ricardo Soto en su trabajo de graduación de 2008 se encargó de evaluar el desempeño del concreto con agregado pétreo y escoria de acería; las variables que se evaluaron fue compresión, flexión y adherencia de diferentes tipos de concreto; posteriormente, en otros trabajos de graduación se han encargado de evaluar otras propiedades mecánicas del concreto pero con agregados no convencionales; tal es el caso del ingeniero José Gonzáles Cabrera en julio de 2015, se encargó del estudio y la evaluación del concreto polimérico permeable para utilizarlo con un propósito ambiental; las propiedades evaluadas en dicho investigación fueron las siguientes: resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y resistencia a la tensión indirecta.

En comparación con el presente trabajo de graduación en donde los agregados que se utilizaron son los disponibles en el medio; se evaluó en estado fresco su revenimiento, temperatura, densidad práctica y contenido de aire. En estado endurecido se evaluaron 3 propiedades importantes, como lo es la resistencia a compresión, resistencia a la flexión y módulo elástico. Se

agregó el ensayo de profundidad de penetración de agua, ya que es un ensayo relativamente nuevo en nuestro medio, el cual da resultados muy importantes que se deben considerar en el diseño.

2. RELACIÓN AGUA-CEMENTO, PROPIEDADES DEL CONCRETO Y SU IMPACTO EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES

2.1. Relación agua-cemento

La relación agua-cemento fue descubierta por Duff Abrams, que luego de hacer un gran estudio de distintas mezclas de concreto pudo concluir que con un agregado dado, la resistencia depende únicamente de la relación que existe entre la masa de agua y la masa de cemento presente en la mezcla de concreto.

La relación agua-cemento (a/c) se puede definir como la relación que existe entre la cantidad de agua efectiva que llevará la mezcla de concreto y la cantidad en masa de material o materiales cementantes que estarán presentes en la mezcla de concreto.

La relación agua-cemento es un factor adimensional del cual dependen muchas características físicas y propiedades mecánicas en la mezcla de concreto, tales como su resistencia, trabajabilidad, contenido de aire, consistencia, etc. Este factor se puede definir como la relación que existe entre la cantidad de cemento utilizada o presente en la mezcla de concreto y la cantidad de agua utilizada en dicha mezcla.

$$\frac{a}{c} = \text{Relación agua~cemento}$$

Donde:

- a= masa de agua
- c= masa de cemento

Nota: los valores de 'a' y 'c' deben estar con la misma dimensional.

Ejemplo:

Supóngase que se tiene una fundición de un metro cúbico (1 m³), para la cual se utilizaran 400 kg de cemento con una relación agua igual a 0,45 y se desea conocer la cantidad de agua que se le debe adicionar.

Datos:

- Cemento: 400 kg
- Relación agua-cemento (a/c)= 0,45

$$\frac{a}{400} = 0,45$$

Despejando 'a' se obtiene que la cantidad de agua deberá ser de 180 kg.

2.2. Propiedades del concreto recién mezclado

El concreto recién mezclado debe de ser maleable o semifluido, incluso puede ser moldeado con la mano, en general el concreto recién mezclado debe ser capaz cumplir con los siguientes requisitos:

2.2.1. Trabajabilidad

La facilidad de colocar, consolidar, grado de resistencia a la segregación y acabado final del concreto recién mezclado se le conoce como trabajabilidad. La mezcla de concreto en su estado fresco debe ser trabajable, pero los ingredientes que lo componen no se deben de separar al momento de ser transportado y manipulado. Muchas propiedades del concreto están relacionadas a la trabajabilidad, incluyendo la consistencia y estabilidad.

Existen varios factores que pueden afectar la trabajabilidad del concreto, como los siguientes:

- El método y duración del transporte
- Cantidad y características de los materiales cementantes
- Consistencia del concreto (revenimiento)
- Clasificación, forma y superficie de los agregados finos y gruesos
- Contenido de aire
- Contenido de agua
- Concreto y temperatura ambiente
- Adiciones

Existen varios métodos de ensayo para conocer la trabajabilidad del concreto, pero la consistencia es considerada un indicador muy cercano de la trabajabilidad del concreto y el método de revenimiento del concreto (COGUANOR NTG-41052), es considerado el método más aceptado y usado para conocer la consistencia del concreto.

Figura 1. **Ensayo de revenimiento terminado**



Fuente: Cempro. *Centro Tecnológico de Cementos Progreso, Laboratorio de Concreto.*
<http://www.cempro.com/index.php/enlaces/centro-de-investigacion-y-desarrollo>. Consulta: 11 de octubre de 2018.

Una distribución uniforme de los agregados en la mezcla de concreto y con la presencia de aire retenido puede ayudar significativamente para controlar la segregación de la mezcla y mejorar la trabajabilidad.

2.2.2. Sangrado y asentamiento

Sangrado es el desarrollo de una capa de agua en la parte superior o sobre la superficie del concreto fresco recién colocado. Esto es causado por la sedimentación de las partículas sólidas y la simultánea migración de agua.

Figura 2. **Ejemplo de sangrado**



Fuente: KOSMATKA, Steven y WILSON, Michelle. *Diseño y control de mezclas de concreto*.
p. 155.

El sangrado se da después de colocar el concreto, entonces inicia un proceso natural en el cual las partículas más densas (agregados) tienden a descender y la partículas menos densas (agua) tiende a subir; el sangrado no debería de disminuir la calidad del concreto; pero si el sangrado es demasiado se creará una capa de agua en la superficie lo que va a modificar la relación agua-cemento cerca de la superficie entonces la parte superior de la fundición será muy débil y con poca durabilidad.

2.2.3. Consolidación

Un concreto debe ser uniforme en toda el área de la fundición y esa uniformidad se da por lo general con una buena consolidación. Con una correcta consolidación del concreto se puede además de hacerlo lo más uniforme posible; también, se podrá densificar el concreto, buena adherencia con el acero de refuerzo y lograr lo menos de vacíos posibles. Uno de los métodos más efectivos de consolidación es la vibración la cual hace que todas las partículas del concreto se muevan, reduciendo la fricción entre ellas y dando

las cualidades de un fluido grueso. La acción de la vibración permite el uso de mezclas más gruesas, que contengan una gran porción de agregado grueso y una porción pequeña de agregado fino.

A mayor tamaño máximo del agregado en el concreto y un agregado bien graduado; entonces, menos volumen será necesario para llenar con pasta y menos superficie del agregado debe ser cubierta con pasta; entonces, menos agua y cemento serán necesarias. La correcta consolidación de la mezcla de concreto da como resultado un concreto de calidad, pero un concreto no consolidado de manera correcta resulta en poros, concreto débil y con poca durabilidad.

La vibración, como método de consolidación, facilita en gran parte el acomodar todas las partículas del concreto, en donde no sería práctico consolidar a mano; pero se deben de tomar precauciones al utilizar este método, ya que si la vibración es excesiva; entonces, se puede llegar a segregar el concreto, es decir que se van a separar las partículas gruesas de las finas.

2.2.4. Calor de hidratación, tiempo de fraguado y endurecimiento

Se le conoce como calor de hidratación a la cantidad de energía liberada en forma de calor debido a la reacción química entre el cemento y el agua, al momento de entrar en contacto. Por lo general, con 0,4 veces (en masa) la cantidad de cemento en agua es lo necesario para completar la hidratación del cemento.

Conociendo que la cantidad de calor liberado cuando el cemento se hidrata, puede ser de ayuda en la planeación de una construcción. En áreas de mucho frío el calor de hidratación puede ayudar a proteger la construcción de daños debido a las bajas temperaturas; pero este calor puede ser perjudicial, ya que si se utiliza en estructuras masivas, el diferencial puede ser demasiado y la estructura se puede dañar.

El fraguado y endurecimiento del concreto, estas características inician al momento de que el agua es adicionada al cemento, con esto ocurre una reacción química entre el cemento y el agua, la cual es conocida como hidratación, ocupando un volumen mayor que el original.

El tiempo de fraguado está determinado en la norma ASTM C403, método estándar para el tiempo de fraguado del concreto por resistencia a la penetración. El tiempo de fraguado es determinado por la resistencia a la penetración, esta se hace por medio de un cálculo entre el área de penetración de la aguja y la fuerza de penetración, en la cual se divide en fraguado inicial (500 PSI) y fraguado final (4 000 PSI), para hacer dichas mediciones se utiliza el equipo mostrado en la figura 3.

Figura 3. **Equipo para calcular el tiempo de fraguado del concreto**



Fuente: Compasas. *Fraguado del concreto*. <http://compasas.com/ct11.html>. Consulta: 17 de octubre de 2018.

2.3. Propiedades del concreto endurecido

La siguiente sección describirá las propiedades del concreto endurecido.

2.3.1. Curado

Se le conoce como curado del concreto al procedimiento en el cual este se mantiene húmedo para lograr que el cemento dentro del concreto se pueda seguir hidratando y así poder alcanzar la resistencia solicitada; con el curado también se contribuye a que la fundición no se raje, para así no dañar el factor estético ni la resistencia de la estructura.

Para que un concreto aumente su resistencia con el aumento de la edad está dado por los siguientes factores:

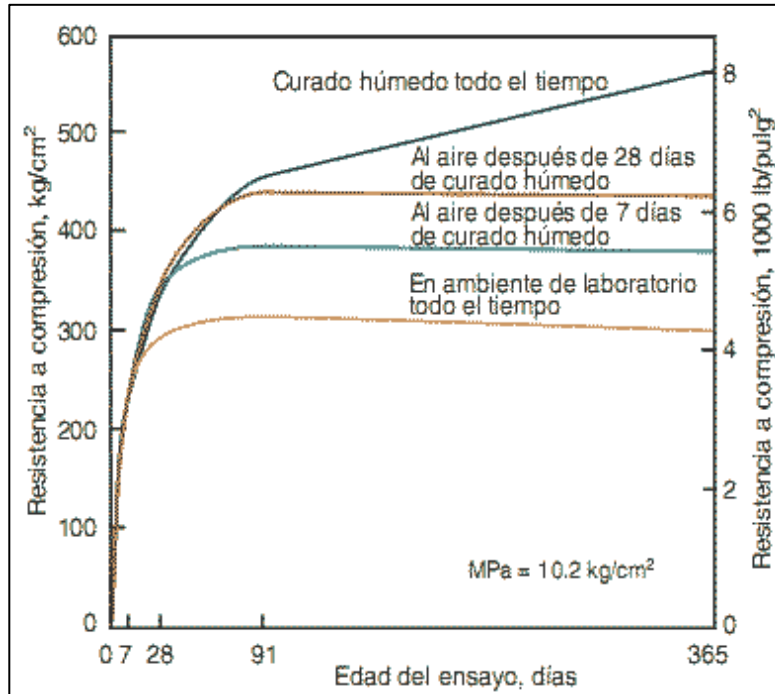
- Cemento hidratado presente.
- Concreto permanezca con humedad relativa mayor de 80 % aproximadamente (Powers 1948).
- Temperatura del concreto se mantenga favorable.
- Suficiente espacio para hidratación.

Cuando la humedad relativa del concreto desciende del 80 % o la temperatura del concreto desciende a menos de 10 °C, la hidratación y la ganancia de resistencia del concreto prácticamente se detienen.

La recomendación es curar por un mínimo de 7 días el concreto en fundiciones poco delicadas refiriéndonos a resistencia y para los trabajos que si se requiera de una alta resistencia curar el concreto por un mínimo de 14 días.

En la figura 4 se puede observar como el curado del concreto afecta la ganancia de resistencia con el tiempo en donde el concreto con menor resistencia a la edad de 365 días fue el que se dejó a temperatura ambiente del laboratorio; sin embargo, el concreto que estuvo curado en húmedo por los 365 días alcanzó la mayor resistencia y con tendencia a seguir aumentando su resistencia.

Figura 4. Cambios de resistencia debido al curado de cilindros



Fuente: BlogsPot. *Concreto endurecido*. <http://notasdeconcretos.blogspot.com/2011/04/concreto-endurecido-curado.html>. Consulta: 17 de octubre de 2018.

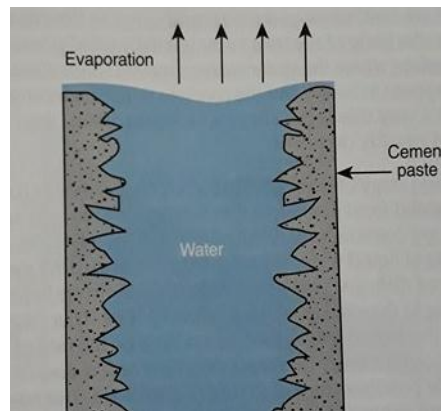
2.3.2. Tasa de secado del concreto

Conocer la tasa de secado del concreto ayuda para comprender las propiedades físicas del concreto, la tasa de secado del concreto se puede resumir en tres etapas, descritas a continuación.

Durante la primera etapa de secado (figura 5), el agua líquida se presenta en la superficie se evapora; esa tasa depende de la temperatura, humedad relativa y flujo de aire sobre la superficie. Mientras el agua se evapora en la superficie esta es reemplazada por agua que está dentro del concreto, para compensar el volumen el concreto repone esos lugares donde había agua

encogiéndose; pero si la evaporación es demasiada, el concreto se puede encoger demasiado y producir fisuras, las cuales posteriormente inducirán a una falla.

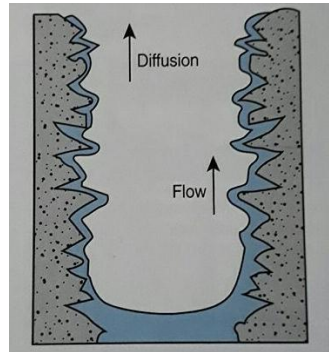
Figura 5. **Primera etapa del secado del concreto**



Fuente: KOSMATKA, Steven y WILSON, Michelle. *Diseño y control de mezclas de concreto*.
p. 167.

La segunda etapa (figura 6) inicia cuando el concreto ya no se puede encoger, el agua que estaba en la superficie empieza a retroceder a los poros y el agua se queda dentro de cada poro; luego, el agua se aferra a los laterales del concreto y forman una curva llamada menisco; sin embargo, la tasa de evaporación depende de gran manera de la temperatura, la humedad relativa y el flujo de aire sobre la superficie del concreto. En este punto el agua continua llenando la estructura porosa del concreto de forma continua.

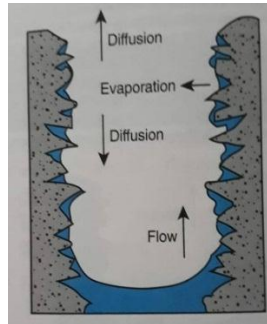
Figura 6. **Segunda etapa del secado del concreto**



Fuente: KOSMATKA, Steven y WILSON, Michelle. *Diseño y control de mezclas de concreto*.
p. 167.

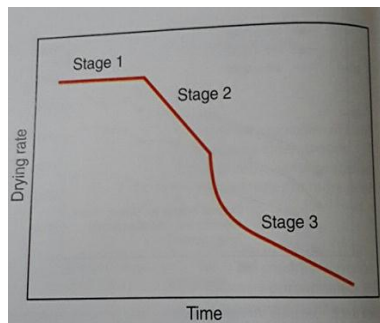
La tercera etapa del secado (figura 7) inicia cuando la suficiente agua se ha evaporado por debajo de la superficie del concreto que los poros ya no pueden seguir llenos con agua continuamente; esta etapa también es conocida como segunda tasa de caída (figura 8), porque la tasa de secado disminuye respecto del tiempo y es más lenta que la etapa dos. En esta etapa la tasa de secado depende menos de la temperatura, la humedad relativa y el flujo de aire en la parte superior del concreto porque la humedad se va a evaporar y se difundirá por todo el concreto hasta llegar a la superficie.

Figura 7. **Tercera fase del secado del concreto**



Fuente: KOSMATKA, Steven y WILSON, Michelle. *Diseño y control de mezclas de concreto*.
p. 168.

Figura 8. **Etapas del secado del concreto**



Fuente: KOSMATKA, Steven y WILSON, Michelle. *Diseño y control de mezclas de concreto*.
p. 168.

2.3.3. Resistencia

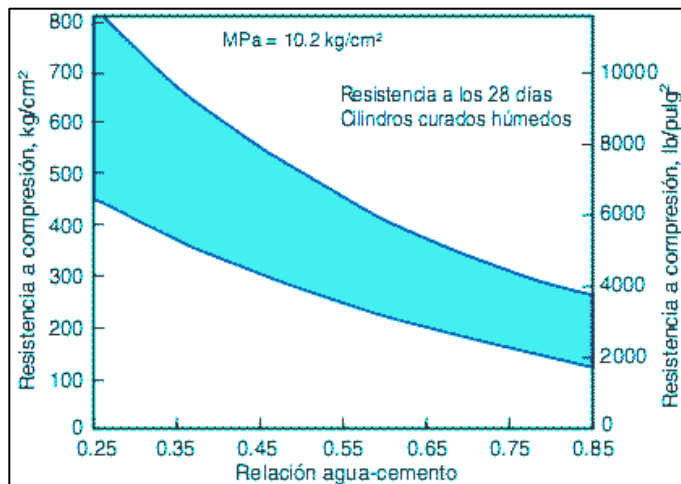
La resistencia de un material es la capacidad que este tiene para soportar diferentes tipos de cargas, ya sean compresivas, cortantes, flexionantes, tensión, penetración, entre otras. A continuación se describen los tipos de resistencia más conocidos en el medio.

2.3.3.1. Compresión

Resistencia a compresión mide la máxima resistencia de un concreto para una carga axial, generalmente expresada en megapascales o PSI a la edad de 28 días; se estima que a la edad de 7 días el concreto alcanza el 75 % de su resistencia, pero del rango de 56 a 90 días las resistencias están entre el 10 % al 15 % por encima de la de 28 días. Es frecuente determinar la resistencia a compresión a edades distintas de 28 días, pero estos datos son meramente informativos, dichas edades pueden ser a 1, 3, 7, 14, 56, 90 y 360 días.

La resistencia a compresión está dada por el símbolo $f'c$ y es excedida por la actual resistencia a compresión $f'cr$ (resistencia a compresión requerida). La resistencia a compresión que puede llegar a tener un concreto está influenciada por la relación agua-cemento.

Figura 9. Variación de resistencias típicas



Fuente: BlogsPot. *Resistencia a la compresión del concreto.*

<http://notasdeconcretos.blogspot.com/2011/04/resistencia-la-compresion-del-concreto.html>.

Consulta: 17 de octubre de 2018.

La resistencia a compresión es un valor muy utilizado en el diseño de puentes, edificios y otras estructuras; los concretos que se utilizan con más frecuencia son los que oscilan entre los 3 000 psi a 6 000 psi; concretos de mayor resistencia no es muy común que sean utilizados, pero se conoce que se han utilizado concretos entre los 10 000 psi a 20 000 psi para puentes o edificaciones de gran altura.

Figura 10. **Ensayo a compresión del concreto**



Fuente: BlogsPot. *Ensayo de compresión de cilindros de hormigón.*

<http://notasdeconcretos.blogspot.com/2011/04/resistencia-la-compresion-del-concreto.html>.

Consulta: 17 de octubre de 2018.

2.3.3.2. Resistencia a flexión

La resistencia a flexión y el módulo de ruptura del concreto es utilizada para el diseño de pavimentos y losas sobre el suelo, ya que para estas estructuras un lado de la losa estará sometido a tensión y el otro a compresión. La resistencia a compresión puede ser un índice para la resistencia a flexión. La resistencia a flexión por lo general está entre 7,5 y 10 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión del concreto en PSI.

2.3.3.3. Resistencia a la tensión directa o indirecta

El ensayo de tracción indirecta reproduce el estado de tensiones en la fibra inferior de la capa asfáltica o zona de tracción. La resistencia del concreto a la tensión directa esta aproximadamente entre el 8 % al 12 % de la resistencia a compresión del concreto y la resistencia a la tensión indirecta es aproximadamente del 8 % al 14 % de la resistencia a compresión del concreto.

2.3.3.4. Resistencia a la torsión

La resistencia a la torsión del concreto está relacionada al módulo de ruptura y las dimensiones del elemento. Presente correlaciones para el cálculo de la resistencia a la torsión.

2.3.3.5. Resistencia al corte

La resistencia al corte del concreto está dentro del código ACI 318-14, este en su capítulo 22 establece que la resistencia a corte de un concreto se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$V_c = 2\lambda\sqrt{f'_c}bd$$

Donde:

- λ = constante que depende del tipo de agregados utilizados (sección 19.2.4 ACI 318-14).
- f'_c = resistencia a compresión de concreto, lb./pulg.².
- b = ancho de la sección, pulg.

- d = distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal en tracción, pulg.

Las correlaciones mencionadas anteriormente están sujetas a los ingredientes que posee el concreto y también al ambiente en donde se realizaron y se almacenaran dichos especímenes.

2.3.3.6. Módulo elástico

El módulo elástico del concreto (E) da un parámetro entre la deformación normal y su deformación ante un esfuerzo normal ya sea para tensión o compresión del concreto siempre debajo del límite proporcional, para concretos con peso normal este parámetro es aproximadamente 57 000 veces la raíz cuadrada de la resistencia del concreto en lb./pulg.².

2.3.3.7. Peso unitario o densidad

Concretos convencionales, usados en pavimentos, casas y otras estructuras tienen una densidad entre los 2 200 kg/m³ y los 2400 kg/m³. El peso unitario o densidad del concreto también se pueden ver afectados por sus ingredientes, ya sea por la densidad de los agregados, la cantidad de aire atrapado, la cantidad de agua y el cemento que también se ven afectadas por el tamaño máximo del agregado.

El peso del concreto seco es igual al peso del concreto fresco recién mezclado, menos la cantidad de agua evaporada durante el periodo de secado del concreto.

Existe una gran gama de concretos que se crearon para satisfacer varias necesidades, estas densidades pueden variar desde los 240 kg/m³ para un concreto liviano, hasta los 6 000 kg/m³ para contrapesos o muros de radiación.

2.3.3.8. Permeabilidad

El concreto es una mezcla que se puede utilizar para muchas cosas, pero cuando es utilizado para retener agua o que están expuestas a condiciones severas deben tener una menor permeabilidad, la permeabilidad se puede definir como: capacidad de un material de permitir que un flujo lo atraviese sin alterar su estructura interna. La impermeabilidad es la habilidad del concreto que retener el agua cuando está bajo presión sin dejar visible cualquier fuga o filtración.

La permeabilidad de un concreto depende de varios factores, entre ellos están los siguientes:

- La permeabilidad de la pasta.
- La permeabilidad de los agregados.
- La calidad de la pasta y agregados en el lugar de transición.
- La relativa proporción de pasta a agregados.
- La permeabilidad de la pasta es importante ya que esta envuelve a todos los ingredientes del concreto, la permeabilidad de la pasta está relacionada a la relación agua-cemento, grado de hidratación del cemento y duración del curado en húmedo.

Una baja permeabilidad requiere una baja relación agua-cemento y un tiempo adecuado de curado del concreto, el aire atrapado agrega cualidades de descongelamiento del concreto.

La permeabilidad del concreto aumenta con el secado.

3. DURABILIDAD

La durabilidad puede ser definida como la habilidad del concreto de resistir la acción del clima, ataques químicos y la abrasión o desgaste mientras mantiene las propiedades deseadas, al cumplir con todas estas cualidades el concreto se convierte en un material muy durable ya que presta una vida útil muy amplia.

El concreto está expuesto a una gran variedad de condiciones dañinas, más que cualquier otro material de construcción. Existen muchas causas de deterioro del concreto, muchas de estas envuelven el movimiento de la humedad o de otra clase, tales como cloruros y sulfatos que están disueltos en el agua. Generalmente, a mayor resistencia del concreto a la penetración de agua, mayor es su resistencia a deteriorarse.

3.1. Factores que afectan la durabilidad

El concreto al ser un material de uso estructural, se utiliza en ambientes muy agresivos, en donde va a estar expuesto a condiciones climáticas extremas, las cuales pueden llegar a afectar el período de vida útil de la estructura, es por eso que dependiendo del ambiente en donde se hará uso del concreto, son las precauciones que se deben de tomar.

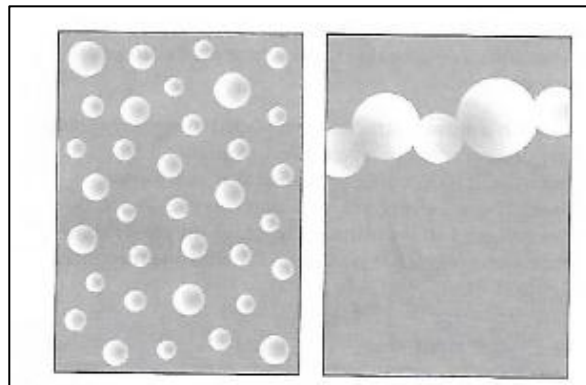
3.1.1. Permeabilidad y difusión

Todo concreto que vaya a estar expuesto a condiciones severas debería ser altamente impermeable. Como se mencionó en la sección 2.3.5., la

impermeabilidad es la habilidad del concreto que retener el agua cuando está bajo presión sin dejar visible cualquier fuga o filtración. Por otro lado, la difusión se puede definir como la facilidad en la que iones disueltos se pueden movilizar dentro del concreto. Al momento de disminuir la permeabilidad y la difusión de un concreto se mejora la resistencia al ciclo del congelamiento-descongelamiento, restauración, sulfatos, penetración ion-cloruro, entre otros ataque químicos.

La permeabilidad y la difusión del concreto se ven afectadas por la porosidad del concreto, la porosidad es el volumen de vacíos, representado en forma porcentual del volumen total de concreto. La permeabilidad se ve afectada por la conexión de estos vacíos entre sí.

Figura 11. **Tipos de porosidad en el concreto**

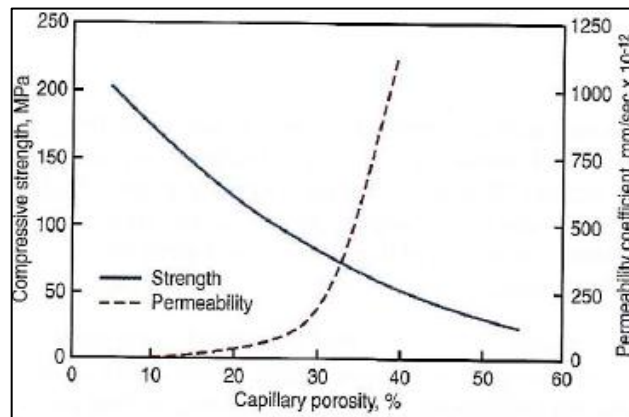


Fuente: KOSMATKA, Steven y WILSON, Michelle. *Diseño y control de mezclas de concreto*.
p. 196.

En la figura 11 se puede apreciar los dos tipos de porosidad que puede presentarse en un concreto; en ambos casos el volumen de vacíos es el mismo, pero la diferencia es que en el primera caso los vacíos están distribuidos de

manera uniforme por todo el volumen del concreto y en el segundo caso los poros están de manera continua y conectados; por consiguiente, el segundo caso será mucho más permeable que el primer caso.

Figura 12. **Relación entre compresión, porosidad y permeabilidad**



Fuente: KOSMATKA, Steven y WILSON, Michelle. *Diseño y control de mezclas de concreto*. p. 196.

En la figura 12 se observa que la porosidad y la resistencia a compresión del concreto son inversamente proporcionales, ya que al momento de que se aumente la porosidad en un concreto, su resistencia por consiguiente disminuirá, pero la relación entre la porosidad y la permeabilidad es directamente proporcional, como se muestra también en la figura 12 a medida que la porosidad aumenta, la permeabilidad también aumenta.

Para que en un concreto los poros se vuelvan discontinuos se requiere un tiempo necesario y Powers junto a otros estudiosos calcularon el tiempo necesario para que los vacíos de un concreto se vuelvan discontinuos en función de la relación agua-cemento del concreto, los resultados están tabulados a continuación:

Tabla I. **Edad aproximada para que los vacíos de un concreto se vuelvan discontinuos**

| Relación agua-cemento en masa | Tiempo requerido |
|-------------------------------|------------------|
| 0,40 | 3 días |
| 0,45 | 7 días |
| 0,50 | 14 días |
| 0,60 | 6 meses |
| 0,70 | 1 año |
| A/C>0,70 | Imposible |

Fuente: KOSMATKA, Steven y WILSON, Michelle. *Diseño y control de mezclas de concreto*. p. 196.

En la tabla I se observa la importancia de usar relaciones agua-cemento bajas, ya que con estos valores bajos el tiempo en que los vacíos dentro del concreto se vuelven discontinuos es mínimo; pero a mayores relaciones agua-cemento el tiempo aumenta de manera dramática, hasta que sea prácticamente imposible para el concreto eliminar la continuidad de los poros y, por consiguiente, tener una permeabilidad muy alta y una durabilidad baja.

3.1.2. Categorías de exposición

Toda estructura está expuesta a distintos factores que pueden afectar la durabilidad de la misma, el por eso que el ACI 318-14 ha clasificado los tipos de exposición a los cuales el concreto podrá estar sometido, la cuales son las siguientes:

- Categoría de exposición F: aplica para concreto exterior expuesto a la humedad y a ciclos de congelamiento y deshielo, con o sin productos químicos descongelantes.

- Categoría de exposición S: aplica para concretos en contacto con suelo o agua que contenga cantidades perjudiciales de iones sulfatos solubles en agua.
- Categoría de exposición W: aplica para concreto en contacto con agua pero no está expuesto a congelamiento y deshielo, cloruros o sulfatos.
- Categoría de exposición C: aplica para concreto no preesforzado y preesforzado expuesto a condiciones que requieren protección adicional del refuerzo contra la corrosión.

A continuación, en la tabla II se presentan como cada categoría de exposición se divide en subcategorías, dependiendo de la severidad, desde no aplica hasta exposición muy severa, y para cada una de estas categorías se estima un requisito mínimo de relación agua-cemento y resistencia a la compresión.

Tabla II. **Categorías de exposición**

| | Categoría de exposición | Max. a/c | Min. f'c (psi) |
|----------|--|-----------------|-----------------------|
| F | F0 (no aplica): para concretos que no estarán expuestos a ciclos de congelamiento y deshielo. | -- | 2 500 |
| | F1 (moderada): concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y expuesto a humedad ocasionalmente. | 0,45 | 4 500 |
| | F2 (severa): concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y expuesto continuamente a humedad. | 0,45 | 4 500 |
| | F3 (muy severa): concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo que estará expuesto continuamente a humedad y exposición a químicos o agua de mar. | 0,45 | 4 500 |
| S | S0 (no aplica) *Suelo: SO ₄ <0,10 % *Agua: SO ₄ <150 ppm | -- | -- |

Continuación de la tabla II.

| | | | |
|----------|--|------|-------|
| | S1 (moderado) *Suelo: 0,10 %<SO ₄ <0,20 % *Agua: 150 ppm<SO ₄ <1 500p pm *Agua de mar | 0,50 | 4 000 |
| | S2 (severa) *Suelo: 0,20 %<SO ₄ <2,00 % *Agua: 1 500 ppm<SO ₄ <10 000 ppm | 0,45 | 4 500 |
| | S3 (muy severa) *Suelo: SO ₄ >2,00 % *Agua: SO ₄ >10 000ppm | 0,40 | 5 000 |
| C | C0 (no aplica): concreto que no requiere protección adicional contra el inicio de corrosión del refuerzo. | -- | 2 500 |
| | C1 (moderada): concreto expuesto a humedad pero no a un agente externo de cloruros. | -- | 4 500 |
| | C2 (severa): concreto expuesto a humedad y a agentes externos de cloruros. | 0,40 | 5 000 |
| W | W0 (no aplica): Concreto seco o concreto en contacto con el agua donde no se requiere baja permeabilidad. | -- | 2 500 |
| | W1: concreto donde se requiera baja permeabilidad. | 0,50 | 4 000 |

Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Agrietamiento

Cualquier tipo de concreto, sin importar la calidad que este tenga, si se llega a presentar un grieta o fisura extensamente en el mismo, la humedad podrá entrar al concreto y esta afectara de manera perjudicial a la durabilidad del concreto, existen dos causas básicas por las cuales las grietas se pueden presentar:

- Esfuerzo debido a las cargas aplicadas sobre el elemento.
- Esfuerzo debido a los cambios de volumen cuando el concreto es restringido al expandirse o contraerse.

El agrietamiento aleatorio se puede evitar colocando de manera adecuada juntas en lugares estratégicos, con esto se logra predeterminar donde se localizara la grieta.

3.1.4. Tratamientos de protección

En concretos expuestos a ataques mecánicos y químicos, su primer defensa ante estos es un concreto de buena calidad, esto se puede mejorar al momento de aplicar al concreto tratamientos de protección, especialmente en ambientes severos, para evitar que sustancias entren en contacto con el concreto; adicionalmente, con concretos con una permeabilidad baja y con tratamientos en su superficie pueden ser usados para evitar que sustancia dañinas entren en contacto directo con el concreto.

3.2. Mecanismos de deterioro y mitigación

Son los procesos que pueden llegar a ocasionar un cambio perjudicial respecto del tiempo y puede llegar a afectar el comportamiento mecánico de los materiales con los que está hecho, estos en su mayoría suelen ser acumulativos e irreversibles. A continuación se muestran los deterioros más comunes en estructuras de concreto y como mitigarlos para evitar que afecten el comportamiento de la estructura.

3.2.1. Abrasión y erosión

La abrasión se define como el desgaste de una superficie por frotamiento y fricción. Mientras que la erosión se puede definir como la desintegración progresiva de un sólido por acción de la abrasión o cavitación de gases, fluidos o sólidos en movimiento.

Cuando un concreto está expuesto a esfuerzos de desgaste, el material fino puede ser disuelto, dependiendo de la fricción o de la rugosidad de la superficie con la que estará en contacto. Esto puede resultar en la abrasión de la superficie. Esfuerzos giratorios son los que son creados por los neumáticos de goma (suaves) o llantas de plástico (duro). Las llantas duras crean abrasión en la superficie, esto provoca la pérdida de la pasta que rodea al agregado y luego fracturándolo.

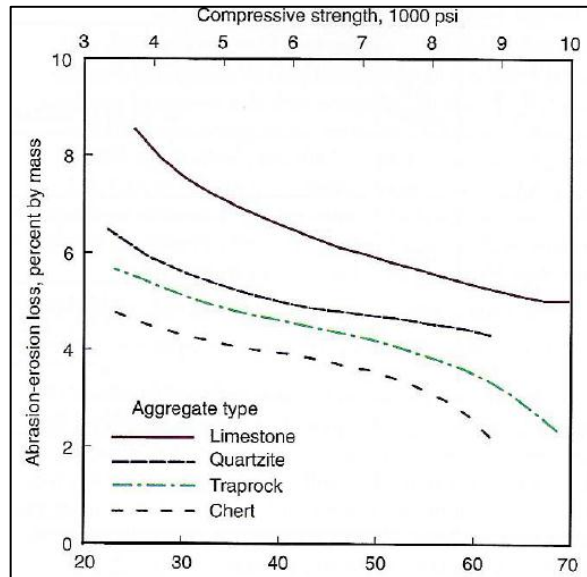
Figura 13. **Abrasión del concreto**



Fuente: ARQHYS. *Abrasión del hormigón*. <https://www.arqhys.com/construccion/abrasion-hormigon.html>. Consulta: 17 de octubre de 2018.

En la figura 13 se observa cómo debido a las fuerzas abrasivas la pasta que rodeaba al agregado se disolvió o se desgastó y, por consiguiente, el agregado grueso resalta sobre la superficie.

Figura 14. Abrasión en concretos



Fuente: KOSMATKA, Steven; WILSON, Michelle. *Diseño y control de mezclas de concreto*. p. 200.

En la figura 14 se muestran los resultados de ensayos de abrasión de mezclas de concreto con diferente resistencia a compresión y diferentes tipos de agregados, los agregados ensayados fueron:

- Caliza (línea sólida)
- Cuarzo (línea discontinua)
- Roca ígnea (línea discontinua con puntos)
- Esquisto (línea punteada)

También en la figura 14 se observa como la calidad de los agregados influye en gran parte en la resistencia a la abrasión del concreto, siendo la caliza uno de los materiales más vulnerables y el esquisto uno de los más resistentes a las acciones abrasivas en el concreto.

En una mezcla de concreto el contenido de agregados debe ser alto para que el espesor de la capa de pasta superficial se mantenga al mínimo sin comprometer el acabado final.

3.2.2. Congelación y descongelación (deshielo)

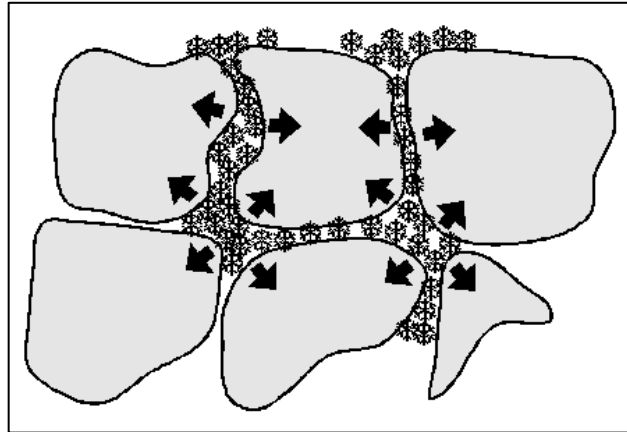
Los ciclos de congelamiento y deshielo no son un tema común en el medio, pero es importante conocer como estos pueden llegar a comprometer nuestra estructura si se viera expuesta a este clima.

Los concretos expuestos a climas con riesgo de estar sometidos a ciclos de congelamiento y descongelamiento y químicos descongelantes; estos requieren una resistencia para soportar dichas acciones climáticas dependiendo de su categoría de exposición las cuales pueden ir desde F1 (moderado), que abarca elementos en contacto ocasionalmente con humedad, hasta la F3 (muy severa), como podrían ser puentes en contacto constante con humedad, químicos y agua de mar congelada.

Cuando en un concreto que esta húmedo y esa agua empieza a congelar, esta produce presiones hidráulicas y osmóticas en los poros capilares de los agregados y de la pasta de cemento, si en algún punto estas presiones superan la resistencia a la tensión del concreto; entonces, el concreto empezará a fisurarse y posteriormente se producirá la ruptura. La acumulación sucesiva de los ciclos de congelamiento y deshielo produce una ruptura en la pasta y en los agregados, que eventualmente causarán expansión y deterioro del concreto.

En la figura 15 se observa cómo las particular de hielo dentro del concreto entre los agregados crean los esfuerzos de tensión en el concreto debido a que se expande y tiende a querer separar los agregados gruesos de la pasta.

Figura 15. **Esfuerzos en el concreto sometido a congelamiento**



Fuente: ARMADOR, Ángel. *Ciclos, hielo y deshielo del hormigón*.

<https://masqueingenieria.com/blog/ciclos-hielo-deshielo-hormigon/>. Consulta: 17 de octubre de 2018.

Hielo en cualquier parte del concreto, ya sea en los poros, grietas o vacíos, extrae agua de sus alrededores para seguir avanzando con su crecimiento, pero como algunos poros son muy pequeños para que los cristales del hielo se puedan formar, esta agua migra para lugares donde sí se pueda cristalizar.

Las presiones hidráulicas se crean por causa del 9 % de expansión del agua que se congela, en este proceso crecen cristales que desplazan al agua que no se ha congelado, si un poro está arriba de su saturación crítica, presiones hidráulicas resultan del proceso de congelamiento. A menores niveles de agua la presión hidráulica no existe.

3.2.3. Reacción álcali-sílice (RAS)

La reacción álcali-sílice fue reconocida desde 1930 como una fuente potencial de peligro para el concreto, hasta se ha llegado a pensar que agregados reactivos existen, la RAS no es muy común que se dé y afecte a las estructuras, a continuación se presentan razones para que se de esta condición:

- La mayoría de agregados son químicamente estables en los concretos de cemento hidráulico.
- Los agregados con buena reputación son abundantes.
- La mayoría de concretos en servicio son lo suficientemente secos para impedir la RAS.
- Usar las puzolanas u escorias correctas pueden controlar la RAS.
- En las mezclas de concreto, el contenido de álcali es lo suficientemente bajo para control el daño por RAS.
- Algunas formas de la RAS no producen expansiones perjudiciales para el concreto.

Para la reducción de la RAS se requiere comprender el mecanismo de la RAS apropiadamente, ya sea usando ensayos para identificar agregados potencialmente reactivos y si es necesario reducir la expansión y agrietamiento.

La reacción inicia con un ataque de los minerales silíceos en el agregado por los hidróxidos alcalinos derivados del álcali en el cemento. Entonces, se forma un gel que altera el contorno en el agregado, este gel no es dañino, el problema se da cuando entra en contacto con el agua, este empieza a hincharse su volumen.

Poder identificar la RAS es muy complicado, pero un indicador de que la RAS está presente es cuando se puede observar una red de fisuras (Figura 16), fisuras con exudación de un gel, articulaciones cerradas, desplazamientos de distintas partes de la estructura o fragmentos que se rompen fuera de la superficie.

Figura 16. **Fisuras por RAS**



Fuente: CETEC. *Presentación de cemento ultra performance*. p. 14.

Los productos formados por la RAS tienen una gran afinidad hacia la humedad, el absorber agua, este gel puede inducir presiones, expansión y el agrietamiento del agregado y de la pasta a su alrededor. La RAS se puede ver como los siguientes 2 pasos:

- Hidróxido alcalino + reactivo gel de sílice → (álcali-sílice gel)

- Álcali-sílice gel + humedad → expansión

La cantidad de gel formado en el concreto depende de la cantidad y tipo de sílice presente, la concentración de hidróxido alcalino y la disponibilidad de humedad.

Para que la RAS se produzca, se deben presentar las siguientes 3 condiciones:

- Presencia de sílice reactivo en el agregado
- Alta concentración de álcali en los poros
- Suficiente humedad

Si cualquiera de las tres condiciones mencionadas anteriormente no está presente la RAS no puede darse.

La mejor forma para prevenir la RAS es el tomar las precauciones necesarias antes de que el concreto sea colocado. El concreto estándar debe tener especificaciones para poder abordar la RAS. Estas modificaciones deben ser correctamente adaptadas para evitar limitar las opciones del productor del concreto.

La forma más efectiva de controlar la expansión debido a la RAS, es el diseñar mezclas de concreto especialmente para controlar la RAS, preferiblemente usando materiales locales. Esta práctica incluye el uso de materiales aglomerantes suplementarios o mezclando cemento probado para controlar la RAS o limitando el contenido de álcali en el concreto. También, existe otra forma de controlar la RAS, la cual es utilizando aglomerantes

especiales que son hechos para controlar esta reacción ya que en su composición poseen un bajo contenido de álcali.

3.2.4. Carbonatación

La carbonatación del concreto es el proceso donde el dióxido de carbono presente en la atmósfera penetra dentro del concreto y empieza a reaccionar con los agentes que hidratan al concreto, tales como el hidróxido de calcio, para la formación de carbonatos. Uno de los factores más importantes que se ven afectados por el efecto de la carbonatación es la reducción de pH dentro del concreto, ya que un concreto con pH alto ayuda a proteger las barras de refuerzo de la corrosión.

La carbonatación del concreto puede ser causada por el CO₂ presente en la atmósfera o por la presencia de agua carbonatada. El CO₂ va a reaccionar con el hidróxido de calcio para dar paso a que se forme el carbonato de calcio, reduciendo el pH del concreto.

El progreso de carbonatación depende de lo siguiente:

- Permeabilidad
- Composición del concreto
- Condiciones de exposición durante la carbonatación
- Duración de la exposición

La tasa de ingreso de la carbonatación al concreto se da con mayor velocidad con una humedad relativa media, aproximadamente 50 %, pero desde que la reacción envuelve la disolución del CO₂ en agua, humedad debe estar presente, pero en concreto muy húmedos el transporte del CO₂ a través

del concreto se vuelve más lento debido a que la solubilidad del agua es limitada.

La profundidad de penetración de la carbonatación se mide aplicando fenolftaleína a una pieza de concreto fracturada recientemente. La solución se tornara de un color rosado cuando el pH es mayor de 9,5, pero si el pH del concreto se ha visto reducido por otros efectos, como la carbonatación, la solución de fenolftaleína no tendrá un cambio de color.

3.2.5. Corrosión

El concreto debe proteger el acero de la corrosión, el alto pH del concreto, usualmente mayor a 13,0 crea una capa no corrosiva que protege al acero, pero la presencia de iones de cloruro ya sea por descongelantes o la presencia o contacto con el agua de mar puede destruir dicha capa y penetrar para crear la corrosión. La corrosión del acero tiene un efecto expansivo, el producto secundario creado por la corrosión es el óxido, lo cual induce a esfuerzos internos y posteriormente al desprendimiento del concreto sobre el acero.

En la figura 17 se observa como la corrosión del acero ha ido aumentando por todo el elemento estructural, desprendiendo varias partes de concreto.

Figura 17. **Ejemplo de corrosión en el concreto**



Fuente: BlogPost. *Corrosión del hacer de refuerzo.*

<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/corrosion-del-acero-de-refuerzo>. Consulta: 17 de octubre de 2018.

La corrosión es un proceso electromecánico para que la corrosión se de todos sus elementos deben estar presente: ánodo, cátodo, electrolito y una conexión eléctrica. Cuando se alcanza el límite de cloruro en el concreto, se forma una celda eléctrica a lo largo de todo el acero y el proceso electromecánico de corrosión comienza. Algunas áreas del acero actúan como ánodos, descargando la corriente de la celda eléctrica, en esta etapa el hierro empieza a formar parte de la solución.

Las áreas de acero que reciben la corriente son los cátodos donde son formados los iones de hidróxido, el hierro y los iones de hidróxido forman los hidróxidos de hierro. El hidróxido de hierro promueve la oxidación con lo da paso a la formación de óxido u otras formas de óxido de hierro. El volumen resultante de esta reacción química es aproximadamente seis veces el volumen original, lo que resulta en fisuras o en desprendimiento del concreto.

Una vez que la corrosión ha iniciado, la tasa de corrosión del acero es influenciada por resistividad eléctrica del concreto y contenido de humedad. Los factores que pueden afectar la corrosión del acero pueden ser los siguientes:

- Agua: actúa como un cátodo y ayuda a transportar los iones.
- Oxígeno: la corrosión disminuye de manera representativa cuando no está presente.
- El pH del concreto: el pH afecta la corrosión del concreto, con pH menores de 11 la capa que protege al acero de los iones de cloruro se rompe permitiendo el paso de estos y aumentando la tasa de corrosión.
- Cloruros: los iones de cloruro actúan como catalizadores para la reacción de la corrosión.
- Temperatura: la tasa de corrosión se duplica por cada 30 °C que aumenta la temperatura.
- Resistividad eléctrica del concreto: en algunas instalaciones eléctricas, corrientes que se pierden, pueden viajar a través del concreto y crear o aumentar la tasa de corrosión del concreto.

3.2.6. Exposición al agua de mar

Concreto con exposición al ambiente marino o en contacto con el agua de mar deben de tener cuidados especiales de diseño y materiales a utilizar en la mezcla para esta condición severa. Las estructuras expuesta o en contacto con el agua de mar son más vulnerables en las zonas de mareas altas o

salpicaduras donde hay ciclos repetitivos de secado y mojado o ciclos de congelamiento y deshielo.

Se debe notar que todos los ingredientes están presentes para que se den los siguientes mecanismos de deterioración:

- Corrosión
- Ataque de sulfatos
- Sustitución de iones de magnesio
- Reacción álcali-agregado
- Abrasión
- Daño por ciclos de congelamiento y deshielo
- Daño por embarcaciones y basura
- Carbonatación
- Cristalización de la sal

En concretos sumergidos en agua de mar la tasa de corrosión está limitada por la cantidad de oxígeno presente en su entorno; es decir, mientras el concreto se encuentre más profundo, la deterioración será menor. La zona crítica es el área de salpicadura por las siguientes razones:

- El oxígeno y el agua de mar están presentes de manera abundante
- Los ciclos de mojado y secado concentran la sal presente
- Los ciclos de congelamiento y deshielo se dan con el concreto saturado

4. IMPORTANCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO

4.1. Importancia de los agregados

Como se mencionó en el capítulo 3, muchos mecanismos de deterioro para el concreto vienen de parte de reacciones químicas (reacción álcali-sílice, corrosión, carbonatación, entre otros). Lo ideal en las mezclas de concreto es que los agregados que lo componen sean inertes; sin embargo, estudios han demostrado que los agregados siempre van a tener algún grado de reactividad, por lo cual es muy importante contener esta reactividad, ya que estas pueden afectar la durabilidad del concreto.

Existen varias soluciones para controlar esta reactividad, ya sea con la adición de puzolanas que ayudan a distribuir por todo el concreto las reacciones y a no estar concentrada en un solo punto, que el nivel de reactividad de los agregados sea bajo o utilizar un cemento que ayude a evitar reacciones químicas con los agregados. Si esta reactividad no se controla, propiedades del concreto como la resistencia a compresión, su estabilidad volumétrica, permeabilidad, entre otras pueden llegar a verse afectados.

4.2. Importancia de un buen control de calidad

El control de calidad se define como una estrategia que asegura el mejoramiento continuo de la calidad, cuyo objetivo es la satisfacción de los clientes, internos y externos, mediante el desarrollo permanente por mantener y mejorar la calidad de los productos y servicios, a través de la aplicación de

técnicas y esfuerzos. El control de calidad envuelve varias actividades y técnicas, tales como:

Qué es lo que se necesita:

- Metodología y diseño del producto.
- La inspección y pruebas para cerciorarse del cumplimiento de las especificaciones.
- El muestreo de las unidades a inspeccionarse.
- La revisión del producto.

Una forma de realizar el control de calidad es basarse en normas estandarizadas que detallan procedimientos, equipos necesarios y su verificación y lo que debe llevar el informe final; con resultados obtenidos se puede concluir si el producto evaluado cumple o no cumple con las especificaciones.

La importancia de realizar un correcto control de calidad es porque sirve como un indicador de la calidad del producto que se está recibiendo o del producto que se está despachando; pero si esto no se puede medir, entonces, no se podrá controlar este producto, si no se pudo controlar; entonces, no se puede dirigirlo hacia donde se desea llevar; si no se puede dirigir, entonces, no se puede mejorar y el propósito siempre debe enfocarse en la mejora continua.

Un concreto de baja calidad no afecta únicamente a la estructura, afecta a todas las partes interesadas que engloba dicha estructura, ya sea el desarrollador, el contratista, el comprador, entre otros.

La calidad del concreto puede ser mejorada realizando controles estrictos en las variables que se dan ya sea en la manufactura y ensayos.

4.3. Concreto en proyectos viales

Para proyectos viales, las soluciones para las pavimentaciones siempre han estado entre el asfalto y el concreto; ambos materiales son buenos, con desempeños diferentes; a continuación, se muestran algunas ventajas de utilizar el concreto.

4.3.1. Calor

Como el concreto tiene un color claro y no negro como el asfalto, entonces, este tiende a reflejar gran parte de los rayos del sol y no absorberlos y retener todo ese calor; entonces, los gradientes térmicos no son tan grandes como en el asfalto.

4.3.2. Combustible

Los pavimentos de concreto, por tener una superficie plana, alargan la vida de los vehículos al evitar que estos se dañen por imperfecciones en la superficie y con esto se minimiza el consumo de combustible para todos los vehículos; se tienen resultados de un ahorro de hasta 20 % en camiones tipo tráiler.

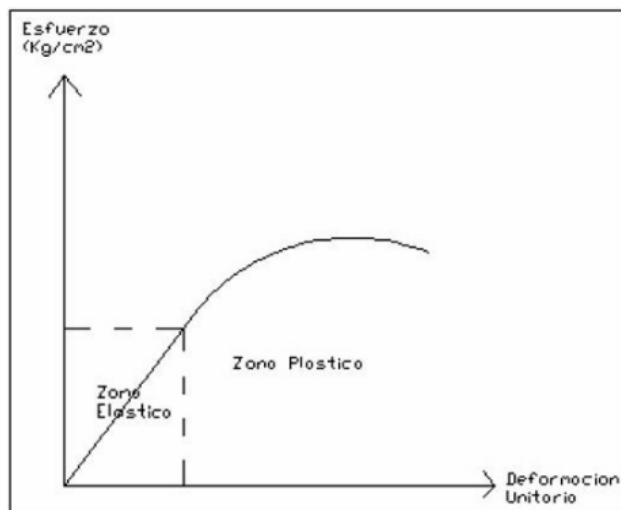
4.3.3. Lumínica

La superficie del concreto es tres veces más reflejante que la del asfalto, con esto se evitan contracciones muy bruscas por temperatura entre el día y la noche. Se brinda mayor seguridad durante la noche, ya que los silbines iluminan de mejor manera la superficie delante del vehículo.

4.4. Importancia de conocer el módulo elástico del concreto

El módulo elástico del concreto es la relación que existe entre el esfuerzo al que esté sometido (compresión) y su deformación unitaria, es por eso que es un valor que representa la rigidez de este. A continuación, se muestra la gráfica del comportamiento del concreto al ser sometido a esfuerzos de compresión y su deformación unitaria.

Figura 18. Esfuerzo- deformación del concreto



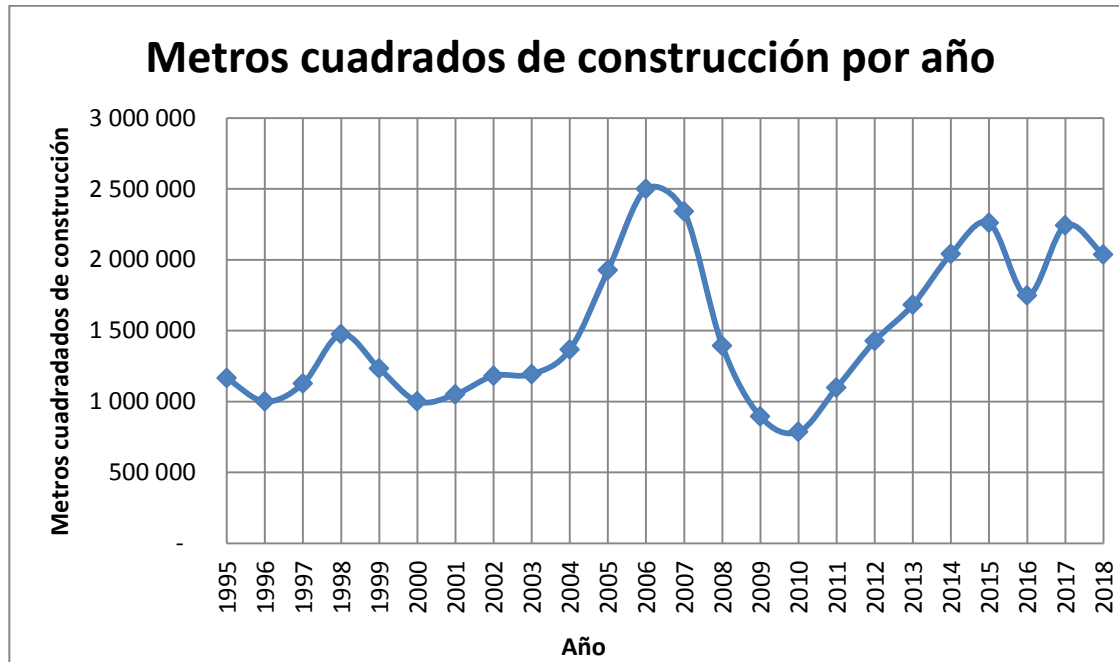
Fuente: OSORIO, Jesús. *Elasticidad del concreto*. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/elasticidad-del-concreto>. Consulta: 21 de noviembre de 2018.

En la figura 18 se observa las distintas fases por las que pasa el concreto al ser sometido a esfuerzos de compresión; la primera la cual abarca del 0 % al 45 % aproximadamente de su resistencia máxima, es la zona elástica, donde el concreto se deforma, pero al momento de retirar la carga regresa a su estado original. Luego, en la segunda fase, la cual abarca del 45 % al 98 % de su resistencia máxima, la cual es la zona plástica, en este punto todas las deformaciones sufridas por el concreto son permanentes; es decir, ya no regresa a su forma original, aunque se le retire la carga y, por último, la ruptura de ese material, donde el material falla y se produce una ruptura en el material.

4.5. Estadísticas que demuestren la masificación del uso del concreto

El concreto siempre ha estado presente en las construcciones pero en el siglo pasado era muy poco su uso, ya que se utilizaban materiales obsoletos, tales como el adobe; la siguiente gráfica muestra como han ido aumentando los metros cuadrados de construcción desde el año de 1995 a la actualidad.

Figura 19. **Metros cuadrados de construcción**



/*2018; datos hasta septiembre.

Fuente: Cámara Guatemalteca la Construcción. *Departamento de Estadística*. p. 8.

Los datos de la figura 19 corresponden a los 7 municipios más representativos del departamento de Guatemala; se observa como a finales de los 90s los metros cuadrados de construcción rondaban alrededor de 1 a 1,5 millones; luego, va aumentando, teniendo en el 2006 y 2007 más de 2 millones de metros cuadrados de construcción; después, un declive en los siguientes años; hasta que en 2011 empezó el aumento y con los datos de 2018 hasta finales del 2018 los metros cuadrados totales de construcción habrán superado los de 2017.

5. CONTROL DE CALIDAD EN CONCRETO FRESCO

5.1. Norma COGUANOR NTG 41052. Método de ensayo. determinación del asentamiento del concreto hidráulico

Esta norma es esencialmente equivalente a la norma ASTM C143.

5.1.1. Generalidades

Este método de ensayo se utiliza para la determinación del concreto hidráulico, ya sea en laboratorio como en campo.

Este método de ensayo tiene como finalidad proveer al usuario de un procedimiento para determinar el asentamiento de concretos plásticos hechos a base de cemento hidráulico. Este método es aplicable a concretos con un tamaño máximo nominal de 1 ½"; si el concreto posee partículas de mayor tamaño deberá ser tamizada en húmedo por el tamiz de 1 ½" para aplicar este ensayo.

Figura 20. **Molde para realizar ensayo de revenimiento en el concreto**



Fuente: Guestee075bf9. *Prueba de asentamiento en el concreto*. <https://es.slideshare.net/guestee075bf9/prueba-de-asentamiento-en-el-concreto>. Consulta: 21 de noviembre de 2018.

5.1.2. Procedimiento

Humedecer el molde y colocarlo en una superficie plana, rígida, no absorbente y húmeda. El molde debe ser mantenido firmemente en su lugar durante su llenado y limpieza de su perímetro, por el operador parado, sobre los estribos, o por un dispositivo de sujeción a una placa de base. De la muestra de concreto obtenida, inmediatamente llenar el molde en tres capas, cada una de aproximadamente $1/3$ del volumen del molde (un tercio del volumen del molde de asentamiento se llena a la altura de $2\ 5/8$ ", dos tercios del volumen se llenan a una altura de $6\ 1/8$ "). Colocar el concreto en el molde usando un cucharón. Mover el cucharón alrededor del perímetro de la abertura del molde para asegurar una distribución pareja del concreto con una mínima segregación.

Varillar cada capa 25 veces uniformemente en toda la sección transversal de cada capa. Para la capa del fondo es necesario inclinar la varilla ligeramente

y dar aproximadamente la mitad de los golpes cerca del perímetro, continuando con golpes verticales en forma de espiral hacia el centro. Varillar la capa del fondo en todo su espesor. Consolidar la segunda capa y la capa superior en todo su espesor, de tal manera que los golpes apenas penetren en la capa inferior en aproximadamente 1”.

Al llenar y varillar la capa superior (última capa), hacer que el concreto exceda la capacidad del molde antes de empezar a varillar. Si durante el varillado, la superficie del concreto queda abajo del borde superior del molde, agregar más concreto para mantener en todo momento un exceso de concreto sobre la superficie del molde. Después de haber varillado la última capa, emparejar la superficie del concreto mediante el enrase y rodamiento de la varilla de apisonamiento.

Continuar sosteniendo el molde firmemente hacia abajo y remueva el concreto del área que rodea la base del molde para evitar la interferencia con el movimiento del concreto que se está descargando. De inmediato retirar el molde, levantándolo cuidadosamente en dirección vertical. Levantar el molde una altura de 12” en 5 ± 2 segundos, con un movimiento ascendente uniforme sin movimientos laterales o de torsión. La prueba se debe realizar sin interrupción desde el inicio del llenado hasta la remoción del molde, en un periodo de 2 ½ minutos.

De inmediato medir el asentamiento determinando la diferencia vertical entre la parte superior del molde y el centro original desplazado de la superficie superior del espécimen.

Figura 21. **Ensayo de asentamiento al concreto**



Fuente: Abacotecnica. *Productos de calidad*. <https://www.abacotecnica.com/es/producto/control-de-calidad/>. Consulta: 26 de noviembre de 2018.

5.2. Norma COGUANOR NTG 41053. Método de ensayo. Medición de la temperatura del concreto hidráulico recién mezclado

Esta norma es esencialmente equivalente a la norma ASTM C1064.

5.2.1. Generalidades

Este método de ensayo cubre la determinación de la temperatura de mezclas de concreto hidráulico recién mezclado.

Este método de ensayo permite medir la temperatura de mezclas de concreto recién mezclado, la temperatura medida representa la temperatura al tiempo del ensayo y puede no ser indicativa de la temperatura del concreto recién mezclado a un tiempo posterior. Puede ser usado para verificar que el concreto satisfaga un requisito específico de temperatura.

5.2.2. Procedimiento

Colocar el dispositivo medidor de temperatura, de modo que el sensor de temperatura esté sumergido al menos 3” 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.

Figura 22. **Ensayo de temperatura del concreto**



Fuente: Cempro. *Centro Tecnológico de Cementos Progreso, Laboratorio de Concreto.*
<http://www.cempro.com/index.php/enlaces/centro-de-investigacion-y-desarrollo>. Consulta: 11 de octubre de 2018.

5.3. Norma COGUANOR NTG 41017h5. Método de ensayo. Determinación de la densidad aparente, rendimiento y contenido de aire del concreto

Esta norma es esencialmente equivalente a la norma ASTM C138.

5.3.1. Generalidades

Este método cubre la determinación de la densidad aparente de concreto recién mezclado y proporciona fórmulas para calcular el rendimiento de concreto, el contenido de cemento y el contenido de aire del concreto. El rendimiento se define como el volumen del concreto producido con una mezcla de cantidades conocidas de los materiales que la componen.

Figura 23. Recipientes según TMN del agregado

| Tamaño nominal máximo del agregado grueso | | Capacidad del recipiente [^] | |
|---|-------|---------------------------------------|-----|
| pulgadas | mm | Pie ³ | L |
| 1 | 25.0 | 0.2 | 6 |
| 1 ½ | 37.5 | 0.4 | 11 |
| 2 | 50.0 | 0.5 | 14 |
| 3 | 75.0 | 1.0 | 28 |
| 4 ½ | 112.0 | 2.5 | 70 |
| 6 | 150.0 | 3.5 | 100 |

Fuente: Norma COGUANOR 41017h5. *Método de ensayo. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico.* p. 198.

5.3.2. Procedimiento

Colocar el concreto en el recipiente en tres capas de aproximadamente el mismo volumen de una. Varillar cada capa con 25 golpes de varilla si usa

recipientes de volumen nominal de 14 L o menores, con 50 golpes cuando se usan recipientes de volumen nominal de 28 L y un golpe por cada 20 cm² (3 pulg²) de superficie en recipiente de mayor tamaño. Varillar cada capa uniformemente sobre toda la sección transversal, con el extremo redondeado de la varilla utilizando el número requerido de golpes. Varillar la capa interior en todo su espesor. Al varillar esta capa debe tenerse cuidado de no dañar el fondo del recipiente. Para cada capa superior, la varilla debe penetrar a través de la capa que se esté varillando y en la capa interior, aproximadamente 1”.

Después de varillar cada capa, golpear suavemente de 10 a 15 veces los lados del recipiente con el mazo apropiado usando la fuerza requerida para cerrar las oquedades o vacíos dejados por la varilla apisonadora y para liberar las burbujas grandes de aire que hayan sido atrapadas. Añadir la última capa evitando sobrellenar el recipiente. Al completar la consolidación del concreto, el recipiente de medida no debe contener un exceso o carencia sustancial de concreto. Un exceso de concreto de aproximadamente 1/8” por encima del tope del recipiente es lo óptimo. El enrasado se logra mejor presionando la placa de enrasado sobre la superficie superior del recipiente cubriendo aproximadamente dos tercios partes de esta y retirando la placa con un movimiento a manera de aserrado sobre el área cubierta.

Luego, colocar la placa en la parte superior del recipiente cubriendo los dos tercios originales de la superficie y avanzarla con una presión vertical y movimiento de aserrado sobre toda la superficie y continuar empujándola hasta que se deslice completamente fuera del recipiente. Varias pasadas con el borde de la placa inclinada producirán una superficie de acabado liso. Luego del enrasado, limpiar todo concreto en el exterior del recipiente y determinar la masa del concreto.

Figura 24. **Ejemplo norma COGUANOR NTG 41017h5**



Fuente: elaboración propia.

5.4. Norma COGUANOR NTG 41017h7. Método de ensayo. Determinación del contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado por el método de presión

Esta norma es esencialmente equivalente a la norma ASTM C231.

5.4.1. Generalidades

Este método de ensayo cubre la determinación del contenido de aire en el concreto hidráulico recién mezclado, mediante la observación del cambio de volumen del concreto producido por un cambio en la presión.

Este método de ensayo ha sido destinado para concretos y morteros elaborados con agregados relativamente densos, para los cuales el factor de corrección por agregado puede determinarse satisfactoriamente mediante la técnica descrita en la sección 6. No es aplicable para concretos hechos con agregados livianos, escoria de alto horno enfriada por aire, o agregados de alta porosidad; en estos casos, debe emplearse el método de ensayo C 173/C 173M. Tampoco puede aplicarse en concretos no plásticos, como los comúnmente utilizados en la fabricación de tubos y unidades de mampostería de concreto.

Este método de ensayo cubre la determinación del contenido de aire en el concreto hidráulico fresco recién mezclado. El ensayo tiene como fin determinar el contenido de aire en mezclas de concreto fresco, excluyendo cualquier aire que se encuentre dentro de los vacíos internos de las partículas de los agregados.

5.4.2. Procedimiento

Colocar el concreto en el recipiente de medición en tres capas de aproximadamente igual volumen. Varillar cada capa 25 veces, uniformemente sobre la sección transversal, con el extremo redondeado de la varilla. Varillar la primera capa del fondo en todo su espesor. Al varillar esta capa tenga cuidado de evitar causar daño al fondo del recipiente. Para cada capa superior, permita a la varilla penetrar a través de la capa que se está varillando y penetrar en la capa inferior, aproximadamente 1". Después de que cada capa haya sido varillada, golpee los lados del recipiente de medida, de 10 a 15 veces con el mazo para cerrar cualquier vacío dejado por la varilla de apisonar y para expulsar cualesquiera burbujas grandes de aire que pudieran haber quedado

atrapadas. Colocar la capa final de concreto de tal forma que se evite un sobrellenado excesivo.

Después de concluir la consolidación del concreto, enrase la superficie superior deslizando la regla enrasadora, apoyada en el reborde o pestaña superior del recipiente de medición, con un movimiento de aserrado hasta que el recipiente este justo al nivel de llenado. Al terminar la consolidación, el recipiente no debe presentar un exceso o deficiencia de concreto. La remoción de 1/8" durante el enrase se considera óptima. Cuando se emplee la placa de enrase, se debe aplicar el procedimiento descrito en la norma ASTM C138.

Limpiar totalmente las pestañas o bordes del recipiente y de la cubierta de ensamble, para que cuando esta se coloque en su lugar se logre un cierre hermético a presión. Ensamblar el aparato. Cerrar la válvula principal, de aire dispuesta entre la cámara de aire y el recipiente de medición, y abrir ambas válvulas de paso situadas en la tapa. Inyectar agua con una jeringa de látex, a través de una de las válvulas hasta que el agua misma surja en la válvula opuesta. Sacudir el medidor suavemente hasta que salga todo el aire por la misma llave de purga.

Cerrar la válvula de purga de aire de la cámara de aire y bombear aire en la cámara hasta que la aguja del medidor de presión este en la línea de presión inicial. Dejar pasar unos pocos segundos para que el aire comprimido se enfríe a temperatura normal. Estabilizar la aguja del medidor de presión en la línea de presión inicial, bombeando o expulsando aire, cuanto sea necesario, golpeando además ligeramente el medidor de presión con la mano. Cerrar ambas válvulas de paso colocadas en la cubierta. Abrir la válvula principal de aire entre la cámara de aire y el recipiente de medición. Golpear los lados del recipiente de medición ligeramente con el mazo para eliminar restricciones locales. Golpear

ligeramente el medidor de presión con la mano para estabilizar la aguja del mismo. Leer el porcentaje de aire de la carátula del indicador de presión.

Figura 25. **Ejemplo norma COGUANOR NTG 41017h7**



Fuente: elaboración propia.

5.5. Norma COGUANOR NTG 41061. Práctica para la elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en obra

Esta norma es esencialmente equivalente a la norma ASTM C31.

5.5.1. Generalidades

Esta práctica trata sobre los procedimientos para preparar y curar especímenes cilíndricos y de vigas de muestras representativas de concreto fresco para un proyecto de construcción.

El concreto utilizado para realizar los especímenes moldeados debe ser muestreado después de que hayan sido hechos todos los ajustes *in situ* de la dosificación de la mezcla, incluyendo la incorporación de agua de mezclado y aditivos. Esta práctica no es satisfactoria para preparar especímenes a partir de concreto que no tenga un asentamiento mensurable o que requiera otros tamaños o formas de especímenes.

5.5.2. Procedimiento

- Lugar de moldeo

Moldear los especímenes rápidamente en una superficie rígida a nivel, libre de vibración y otras perturbaciones, en un lugar tan cerca como sea posible de la ubicación donde vayan a ser almacenados.

- Colado de cilindros

Seleccionar la varilla para apisonar según tabla IV; luego determinar los requisitos de moldeo según tabla V; colocar el concreto en el molde en el número de capas requeridas de aproximadamente igual volumen. Golpear cada capa uniformemente sobre la sección transversal con el extremo redondeado de la varilla utilizando el número de golpes requerido. Golpear con la varilla la capa inferior en toda su profundidad. En el varillado de esta capa, tenga cuidado de no dañar el fondo del molde. Para cada capa siguiente, permita que la varilla penetre a través de la capa que está siendo compactada y en la capa de abajo aproximadamente 1".

Después de que cada capa sea varillada, golpee los lados exteriores del molde levemente 10 a 15 veces con un mazo, para cerrar cualquier vacío que

haya quedado con el varillado y liberar toda burbuja grande de aire que haya quedado atrapada. Utilizar la mano abierta para golpear los moldes cilíndricos de un solo uso, de calibre liviano que pueden dañarse si se golpean con un mazo. Después de golpear, enrarse cada capa de concreto a lo largo de los lados y extremos de los moldes de viga con un fratás o paleta u otra herramienta adecuada. Los moldes llenados insuficientemente deben ser ajustados con concreto representativo durante la consolidación de la capa superior. Se debe remover el concreto en exceso de los moldes llenados excesivamente.

Figura 26. **Requisitos del método de consolidación**

| Asentamiento mm (pulg) | Método de Consolidación |
|-------------------------------|--------------------------------|
| 25 [≥1] | Varillado o Vibración |
| 25 [<1] | Vibración |

Fuente: Norma COGUANOR 41017h5. *Método de ensayo. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico.* p. 198.

Figura 27. **Requisitos de moldeado por varillado**

| Tipo y Tamaño del Espécimen | Numero de Capas de Aproximadamente Igual profundidad | Numero de golpes de Varilla por capa |
|------------------------------------|---|---|
| Cilíndricos. | | |
| Diámetro mm [Pulg] | | |
| 100 [4] | 2 | 25 |
| 150 [6] | 3 | 25 |
| 225 [9] | 4 | 50 |
| Vigas: | | |
| Ancho. mm [Pulg] | | |
| 150 [6] a 200 [8] | 2 | Vea 9.3 |
| 200 [> 8] | 3 ó más de igual profundidad, cada una Sin exceder 150 mm [6pulg.] | Vea 9.3 |

Fuente: Norma COGUANOR 41017h5. *Método de ensayo. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico.* p. 198.

Figura 28. **Ejemplo norma COGUANOR NTG 41061**



Fuente: elaboración propia.

6. CONTROL DE CALIDAD EN CONCRETO ENDURECIDO

6.1. Norma COGUANOR NTG 41017h1. Método de ensayo. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes de concreto

Esta norma es esencialmente equivalente a la norma ASTM C39.

6.1.1. Generalidades

Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto, tales como cilindros moldeados y núcleos perforados. Se encuentra limitado al concreto que tiene una masa unitaria mayor que 800 kg/m^3 .

La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo por el área de la sección transversal del espécimen.

Los ensayos de compresión de especímenes curados en aire húmedo deben ser hechos tan pronto como sea práctico después de sacarlos del almacenamiento húmedo. Los especímenes de ensayo deben ser mantenidos húmedos por cualquier método conveniente durante el período entre que se sacan del almacenamiento húmedo y el ensayo. Deben ser ensayados en condición húmeda.

6.1.2. Procedimiento

- Colocación del espécimen

Coloque el bloque de apoyo plano (inferior), con su cara endurecida hacia arriba, sobre la mesa o platina de la máquina de ensayo directamente debajo del bloque de apoyo de asiento esférico (superior). Limpiar las caras de apoyo de los bloques de apoyo superior e inferior y del espécimen de ensayo y coloque el espécimen de ensayo sobre el bloque de apoyo inferior. Alinear cuidadosamente el eje del espécimen con el centro de empuje del bloque de asiento esférico.

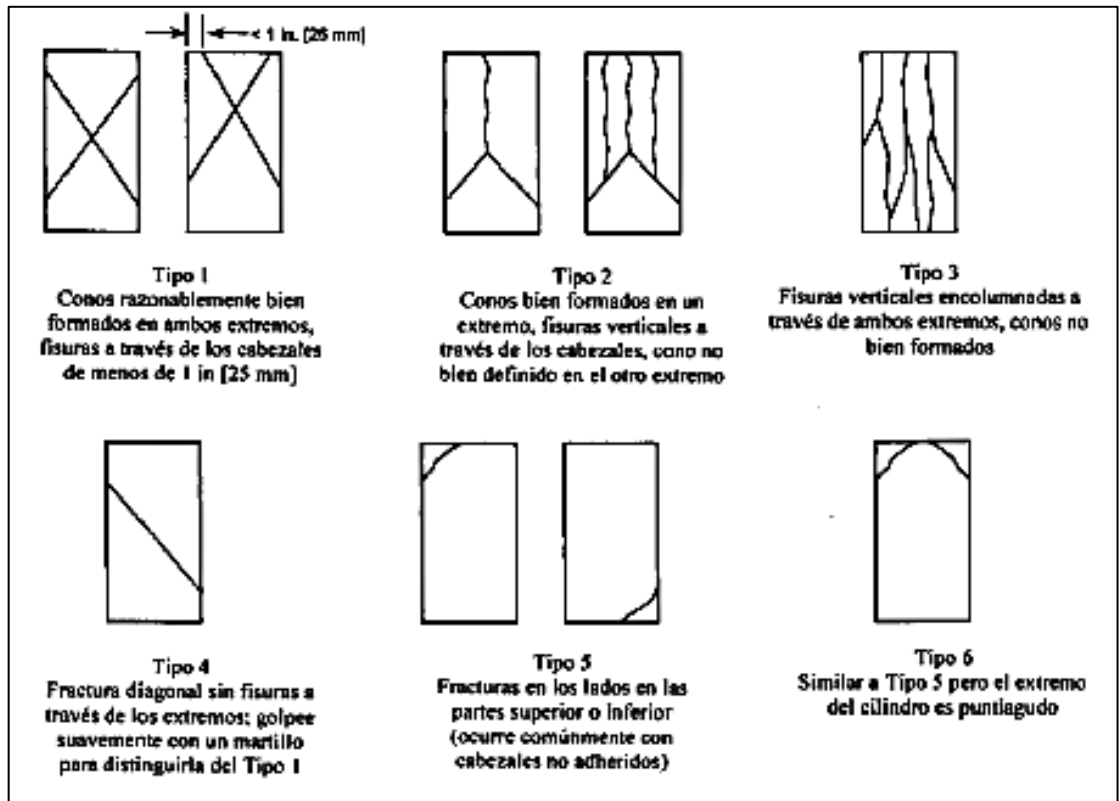
Aplicar la carga de compresión hasta que el indicador de carga muestre que la carga está decreciendo progresivamente y el espécimen muestre un patrón de fractura bien definido (tipos 1 a 4 en figura 30).

Figura 29. **Ensayo a compresión del concreto**



Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Esquema de los modelos de fractura típicos



Fuente: Norma COGUANOR 41017h5. *Método de ensayo. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico.* p. 198.

Todos los especímenes de ensayo para una edad de ensayo dada deben romperse dentro de las tolerancias de tiempo admisibles, como se describe en la siguiente tabla:

Figura 31. **Edades de ensayo y tolerancias admisibles**

| Edad de ensayo | Tolerancia admisible |
|-----------------------|-----------------------------|
| 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 2.2 % |

Fuente: Norma COGUANOR 41017h5. *Método de ensayo. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico.* p. 198.

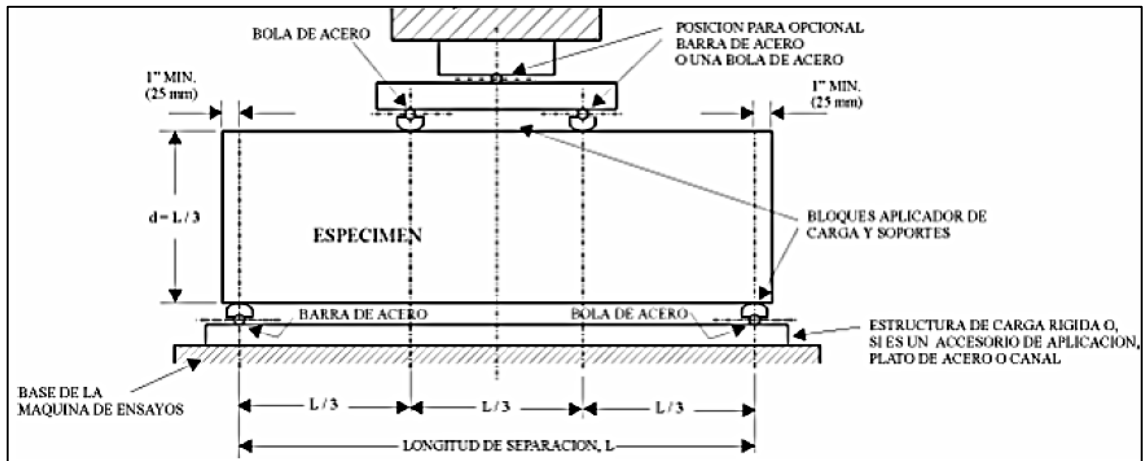
6.2. Norma COGUANOR NTG 41017h2. Método de ensayo para determinar el esfuerzo de flexión del concreto (utilizando una viga simplemente soportada con cargas en los tercios de la luz)

Esta norma es esencialmente equivalente a la norma ASTM C78.

6.2.1. Generalidades

Este método de ensayo cubre la determinación del esfuerzo de flexión del concreto que utiliza una viga simplemente soportada con cargas en los tercios de la luz.

Figura 32. Diagrama de aparato de norma COGUANOR NTG 41017h2



Fuente: Norma COGUANOR 41017h5. *Método de ensayo. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico.* p. 198.

6.2.2. Procedimiento

Los ensayos de flexión de los especímenes curados en húmedo deben ser realizados tan pronto como sea factible después de ser removidos del almacenamiento húmedo. El secado de las superficies del espécimen puede producir una reducción en la medida del esfuerzo de flexión.

Cuando se utilice especímenes moldeados, se debe girar el espécimen de ensayo sobre su lado con respecto a su posición como fue moldeado y centrarlo en los bloques soporte. Cuando se utilice especímenes cortados, colocar el espécimen de tal manera que la cara de tensión corresponda a la parte superior o inferior del espécimen como fue cortado del material original. Centrar el sistema de carga con relación a la fuerza aplicada. Poner los bloques de aplicación de carga en contacto con la superficie del espécimen en los tercios de la luz y aplicar una carga entre 3 % y 6 % de la última carga estimada.

Usando medidores de espesor tipo hoja de 0,10 mm (0,004 pulg) y 0,38 mm (0,015 pulg), determinar si cualquier vacío entre el espécimen y el aplicador de carga o los bloques soporte es más grande o menor que cada medida de espesor sobre una longitud de 25 mm (1 pulg) o más. Esmerilar, encabezar o usar bandas de cuero sobre la superficie de contacto para eliminar cualquier vacío en exceso de 0,10 mm (0,004 pulg). Las cintas de cuero deben ser uniformes de 6,4 mm (1/4 pulg) de espesor, de 25 mm a 50 mm (1 pulg a 2 pulg) de ancho y deben extenderse a través del ancho total del espécimen. Los vacíos en exceso de 0,38 mm (0,015 pulg) deben ser eliminados únicamente por encabezado o esmerilado.

Cargar el espécimen uniformemente y sin sacudidas. La carga debe ser aplicada a una velocidad constante hasta el punto de ruptura. Aplicar la carga a una velocidad que constantemente incremente el esfuerzo en la fibra extrema entre 0,86 MPa/min y 1,21 MPa/min (125 psi/min y 175 psi/min) hasta que la ruptura ocurra. La velocidad de carga se calcula usando la siguiente ecuación:

$$r = \frac{2Sbd^2}{L}$$

Donde:

- r= velocidad de carga
- S=velocidad de incremento de esfuerzo
- b= ancho promedio del espécimen
- d= espesor promedio del espécimen
- L=longitud de la separación de apoyos

6.2.3. Cálculo del módulo de ruptura

Si la fractura se inicia en la superficie de tensión dentro del tercio medio de la luz o longitud de separación entre apoyos, calcular el módulo de ruptura como sigue:

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

Donde:

- R= módulo de ruptura
- P= carga máxima aplicada indicada por la máquina
- L= longitud de la separación de apoyos
- b= ancho promedio del espécimen
- d= espesor promedio del espécimen

Si la fractura ocurre en la sección de tensión fuera del tercio medio de la luz o longitud de separación entre apoyos por no más de 5 % de la luz, calcular el módulo de ruptura como sigue:

$$R = \frac{3Pa}{bd^2}$$

Donde:

- R= módulo de ruptura.
- P= carga máxima aplicada indicada por la máquina.
- a= distancia promedio entre la línea de fractura y el soporte más cercano medido en la superficie en tensión de la viga.

- b = ancho promedio del espécimen.
- d = espesor promedio del espécimen.

Si la fractura ocurre en la sección de tensión fuera del tercio medio de la luz o longitud de separación entre apoyos por más de 5 % de la misma, descartar los resultados del ensayo.

Figura 33. **Ensayo a flexión del concreto**



Fuente: elaboración propia.

6.3. Norma COGUANOR NTG 41017h16. Método de ensayo. Determinación del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson del concreto a compresión

Esta norma es esencialmente equivalente a la norma ASTM-C469.

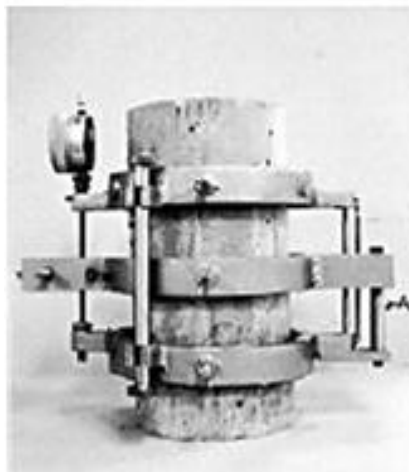
6.3.1. Generalidades

Este método cubre la determinación del módulo de elasticidad cuerda ó módulo de Young, y la relación de Poisson en cilindros de concreto y núcleos de concreto bajo esfuerzos de compresión longitudinal.

Este método proporciona una relación entre el esfuerzo y su deformación unitaria, y una relación entre la deformación unitaria transversal y la deformación unitaria longitudinal para el concreto endurecido a cualquier edad y condiciones de curado establecidas.

El módulo de elasticidad y la relación de Poisson, aplicables dentro de los rangos de esfuerzos de trabajo acostumbrados (0 % a 40 % de la resistencia última del concreto), son usados para el dimensionamiento de elementos reforzados o no reforzados, para establecer la cantidad de refuerzo y para calcular los esfuerzos para las deformaciones unitarias observadas.

Figura 34. **Combinación de compresómetro y extensómetro**



Fuente: Norma COGUANOR 41017h5. *Método de ensayo. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico.* p. 198.

6.3.2. Procedimiento

Mantener la temperatura y la humedad del ambiente lo más constantes que sea posible, durante el ensayo. Registrar cualquier fluctuación inusual de temperatura y de humedad en el informe.

Usar una pareja de los especímenes de ensayo para determinar la resistencia a compresión de acuerdo con el método de ensayo C 39, previo a realizar el ensayo del módulo de elasticidad.

Colocar el espécimen de ensayo, con el equipo de medición de deformación instalado, en la platina o bloque de apoyo inferior de la máquina de ensayo. Cuidadosamente alinear el eje del espécimen con el centro de la rótula del cabezal superior de apoyo. A medida que el bloque superior de apoyo se lleva lentamente a asentarse sobre el espécimen, rotar la parte móvil del bloque suavemente hasta que se obtenga un apoyo uniforme.

Cargar el espécimen por lo menos dos veces. No registrar datos durante la primera carga. Realizar los cálculos con base en los promedios de los siguientes ciclos de carga.

Durante la primera carga que es preliminar para el ajuste de los deformómetros, observar el funcionamiento de los mismos y corregir cualquier comportamiento inusual antes de las siguientes cargas. Obtenga cada conjunto de lecturas de la siguiente manera: Aplicar la carga continuamente y sin impactos. Ajustar la máquina de ensayo del tipo de tornillos de manera que el cabezal móvil se mueva a una velocidad aproximada de 1,25 mm/min cuando la máquina está corriendo libre. En máquinas que operan hidráulicamente, aplicar la carga a una velocidad constante dentro de un rango de 0,25 +/- 0,05 MPa/s.

Registrar sin interrupción del ensayo, la carga aplicada y la deformación unitaria al punto cuando la deformación unitaria longitudinal es de 50 millonésimas y al punto cuando la carga aplicada es igual al 40 % de la carga última.

La deformación unitaria longitudinal es igual a la deformación longitudinal total, dividida por la longitud de base efectiva del deformómetro. Si se desea determinar la relación de Poisson, registrar la deformación unitaria transversal en los mismos puntos. Si se va a determinar la curva esfuerzo-deformación unitaria tomar dos o más lecturas en puntos intermedios, sin interrupción de la carga; o utilizar un instrumento hacer registros continuos. Inmediatamente, después que se alcance la carga máxima prevista, excepto en el ciclo final de carga, reducir la carga a cero, a la misma velocidad como fue aplicada. Si el observador falla en realizar una lectura, completar el ciclo de carga y repetirlo. Registrar el ciclo de carga extra en el informe.

6.3.3. Cálculo de módulo de elasticidad y módulo de Poisson

- Módulo de elasticidad

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{\varepsilon_2 - 0,000050}$$

Donde:

- E= módulo de elasticidad.
- S2= esfuerzo correspondiente al 40 % de la carga última.
- S1= esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas.

- ε_2 = deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2, en millonésimas.
- Relación de Poisson

$$\mu = \frac{(\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1})}{\varepsilon_2 - 0,000050}$$

Donde:

- μ = relación de Poisson.
- ε_{t2} = deformación unitaria transversal en la altura media del espécimen producida por S2 en millonésimas.
- ε_{t1} = deformación unitaria transversal en la altura media del espécimen producida por S1 en millonésimas.

Figura 35. **Ensayo módulo elástico del concreto**



Fuente: elaboración propia.

**6.4. norma COGUANOR NTG 41017h42. Método de ensayo.
Profundidad de penetración de agua bajo presión**

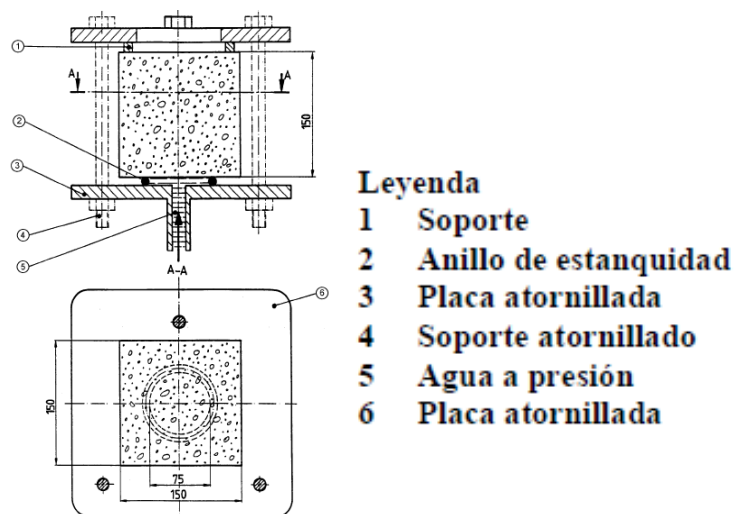
Esta norma es esencialmente equivalente a la norma UNE-EN A2390-8.

6.4.1. Generalidades

Esta norma especifica un método para determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión en concretos endurecidos que han sido curados en agua.

El agua es aplicada bajo presión a la superficie del concreto endurecido. A continuación, se divide la probeta por rotura en dos mitades y se mide la profundidad de penetración del frente de agua.

Figura 36. Ejemplo de equipo de ensayo



Fuente: Norma COGUANOR 41017h5. *Método de ensayo. Determinación del asentamiento del concreto hidráulico.* p. 198.

6.4.2. Procedimiento

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. Durante el ensayo, se observarán periódicamente el estado de las superficies de la probeta de ensayo no expuestas al agua a presión para observar la posible presencia de agua. Si se observaran filtraciones, se reconsiderará la validez del resultado y el hecho será anotado en el informe.

Después de aplicar la presión durante el tiempo especificado, se retirará la probeta del dispositivo de ensayo. Se limpia la cara a la que se aplicó la presión de agua para retirar el exceso de agua. Se rompe la probeta, y durante el examen, la cara de la probeta expuesta a la presión de agua se situará en el fondo. Tan pronto como la cara partida se ha secado de forma tal que se puede ver claramente la extensión del frente de penetración de agua, se marca en la probeta dicho frente de penetración. Se mide la profundidad máxima de penetración bajo la superficie de ensayo y se redondea al mm más próximo.

Figura 37. **Ensayo de penetración de agua bajo presión**



Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Profundidad de penetración de agua**



Fuente: elaboración propia.

7. RECOPIACIÓN, INTERPRETACIÓN, COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. Resultados

Los siguientes resultados fueron proporcionados por el CEJEC de Cementos Progreso S. A.

7.1.1. Resultados de ensayos a los agregados

Se presentan los resultados de los ensayos realizados al agregado fino y grueso.

Tabla III. **Resultados para el agregado fino de tipo basalto**

| | |
|---|----------|
| Densidad relativa (s.s.s.) | 2,65 |
| Absorción (%) | 2,10 |
| Módulo de finura (MF) | 2,67 |
| Densidad aparente compactada (kg/m ³) | 1 720,00 |
| Densidad aparente suelta (kg/m ³) | 1 460,00 |
| Pasa tamiz núm. 200 (0,075 mm) (%) | 12,00 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Resultados para el agregado grueso de tipo basalto**

| | |
|---|----------|
| Densidad relativa (s.s.s.) | 2,66 |
| Absorción (%) | 0,90 |
| Módulo de finura (MF) | 5,92 |
| Densidad aparente compactada (kg/m ³) | 1 562,00 |
| Densidad aparente suelta (kg/m ³) | 1 438,00 |
| Pasa tamiz núm. 200 (0,075 mm) (%) | 1,10 |

Fuente: elaboración propia.

7.1.2. Diseño de mezcla teórico

Se presenta el diseño de mezcla teórico, basado en el método ACI.

Tabla V. **Diseño de mezcla teórico**

| Relación. A/C | 0,40 | 0,50 | 0,60 | 0,70 |
|--------------------------------------|--------|--------|----------|----------|
| Cemento [Kg/m ³] | 510,00 | 400,00 | 325,00 | 270,00 |
| Agregado fino [Kg/m ³] | 882,00 | 992,00 | 1 071,00 | 1 133,00 |
| Agregado grueso [Kg/m ³] | 750,00 | 750,00 | 750,00 | 750,00 |
| Agua [Kg/m ³] | 205,00 | 200,00 | 195,00 | 190,00 |
| Aditivo [ml/Kg cto] | 3,50 | 3,50 | 3,50 | 3,50 |

Fuente: elaboración propia.

7.1.3. Humedades de los materiales para mezcla práctica

Resultados del ensayo de humedad presente en los agregados.

Tabla VI. **Humedad de materiales**

| Corrida | 1 | 2 |
|-----------------|--------|--------|
| Agregado fino | 4,17 % | 2,88 % |
| Agregado grueso | 0,74 % | 0,47 % |

Fuente: elaboración propia.

7.1.4. Mezclas prácticas

Resultados de las mezclas realizadas.

Tabla VII. **Mezcla práctica #1**

| Relación A/C | 0,40 | 0,50 | 0,60 | 0,70 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Cemento [Kg] | 25,50 | 20,00 | 16,30 | 13,50 |
| Agregado fino [Kg] | 45,10 | 50,70 | 54,70 | 57,90 |
| Agregado grueso [Kg] | 37,40 | 37,40 | 37,40 | 37,40 |
| Agua [Kg] | 9,39 | 9,02 | 8,69 | 8,37 |
| Aditivo [ml] | 89,25 | 70,00 | 57,05 | 47,25 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Mezcla práctica #2**

| Relación A/C | 0,40 | 0,50 | 0,60 | 0,70 |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Cemento [Kg] | 25,50 | 20,00 | 16,30 | 13,50 |
| Agregado fino [Kg] | 44,50 | 50,00 | 54,00 | 57,10 |
| Agregado grueso [Kg] | 37,30 | 37,30 | 37,30 | 37,30 |
| Agua [Kg] | 10,06 | 9,76 | 9,48 | 9,20 |
| Aditivo [ml] | 89,25 | 70,00 | 57,05 | 47,25 |

Fuente: elaboración propia.

7.1.5. Resultados en concreto fresco

Resultados de las mezclas realizadas en su estado fresco.

Tabla IX. **Resultados de ensayos a mezcla en estado fresco**

| Relación A/C | Resultado en estado fresco | | | | | | | |
|---|-----------------------------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|
| | 0,40 | | 0,50 | | 0,60 | | 0,70 | |
| Corrida | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Slump antes de aditivo [Plg] | -- | 1,25 | -- | 2,25 | -- | 2,50 | -- | 2,25 |
| Slump despues de aditivo [Plg] | 4,25 | 6,25 | 6,50 | 8,00 | 6,00 | 7,50 | 5,00 | 7,00 |
| Tara [Kg] | 3,84 | 3,84 | 3,84 | 3,84 | 3,84 | 3,84 | 3,84 | 3,84 |
| Volumen [Lts] | 7,04 | 7,04 | 7,04 | 7,04 | 7,04 | 7,04 | 7,04 | 7,04 |
| Recipiente + material [Kg] | 20,26 | 20,20 | 20,28 | 20,09 | 20,13 | 20,20 | 20,18 | 20,14 |
| Densidad compactada [kg/m ³] | 2.332,00 | 2.324,00 | 2.335,00 | 2.308,00 | 2.314,00 | 2.324,00 | 2.321,00 | 2.315,00 |
| % de aire [%] | 1,80 | 2,20 | 2,00 | 2,30 | 2,30 | 2,10 | 2,30 | 2,20 |
| Temp. ambiente [°C] | 19,50 | 19,00 | 20,50 | 19,50 | 21,00 | 19,50 | 22,00 | 19,00 |
| Temp. concreto [°C] | 21,00 | 18,00 | 21,00 | 19,00 | 21,00 | 19,00 | 21,50 | 18,50 |
| Densidad teórica- Densidad real [Kg/m ³] | 15,00 | 23,00 | 7,00 | 34,00 | 27,00 | 17,00 | 22,00 | 28,00 |
| Rendimiento | 1,01 | 1,01 | 1,00 | 1,01 | 1,01 | 1,01 | 1,01 | 1,01 |

Fuente: elaboración propia.

7.1.6. Resultados en concreto endurecido

Resultados de las mezclas realizadas en estado endurecido.

7.1.6.1. Resistencia a compresión

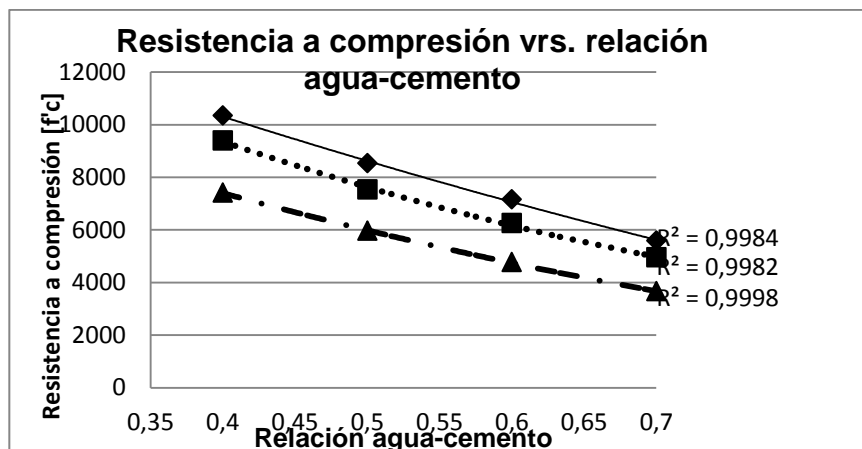
Resultados de resistencia a cargas comprensivas a las mezclas realizadas.

Tabla X. Resultados de ensayos a compresión

| R A/C | corrida | f'c 7 días [psi] | Promedio | f'c 28 días [psi] | Promedio | f'c 56 días [psi] | Promedio |
|-------|---------|------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|-----------|
| 0,40 | 1 | 7 190,00 | 7 410,00 | 9 120,00 | 9 390,00 | 9 910,00 | 10 340,00 |
| | 2 | 7 620,00 | | 9 660,00 | | 10 760,00 | |
| 0,50 | 1 | 5 950,00 | 5 960,00 | 7 500,00 | 7 530,00 | 8 620,00 | 8 530,00 |
| | 2 | 5 960,00 | | 7 560,00 | | 8 440,00 | |
| 0,60 | 1 | 4 580,00 | 4 770,00 | 5 920,00 | 6 260,00 | 6 940,00 | 7 155,00 |
| | 2 | 4 950,00 | | 6 600,00 | | 7 370,00 | |
| 0,70 | 1 | 3 660,00 | 3 660,00 | 4 880,00 | 4 950,00 | 5 470,00 | 5 590,00 |
| | 2 | 3 660,00 | | 5 010,00 | | 5 710,00 | |

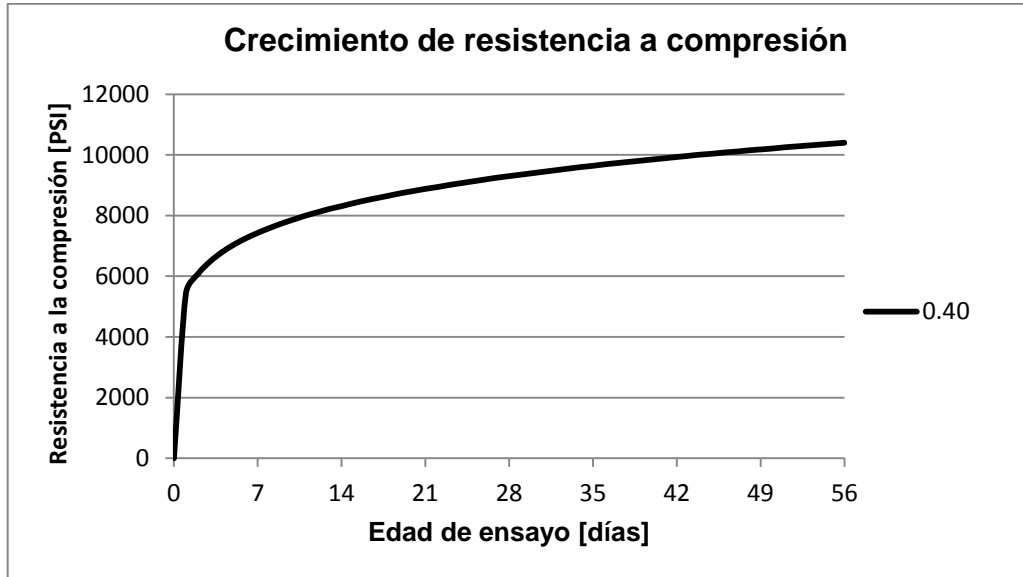
Fuente: elaboración propia

Figura 39. Resistencia a compresión vrs relación agua-cemento



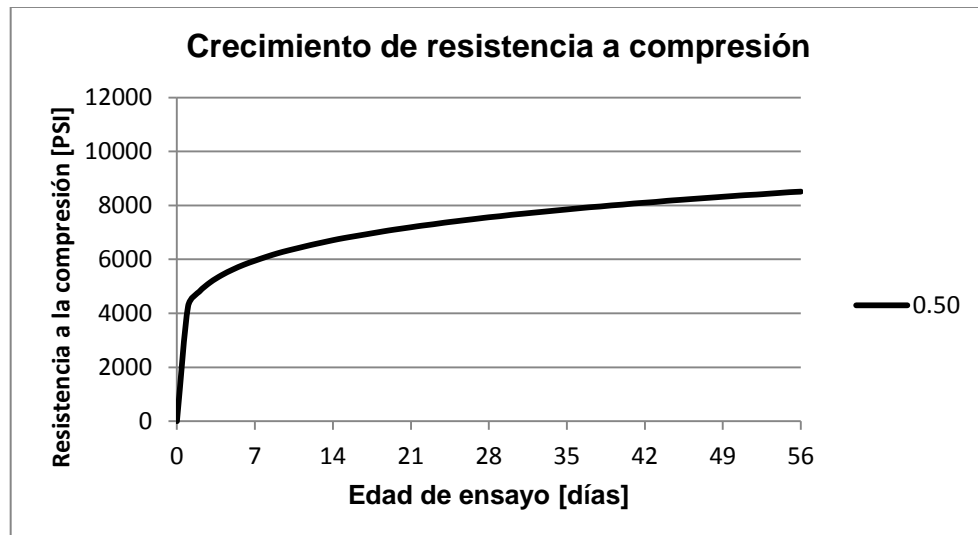
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Replicación de resistencias, con relación a/c de 0 40**



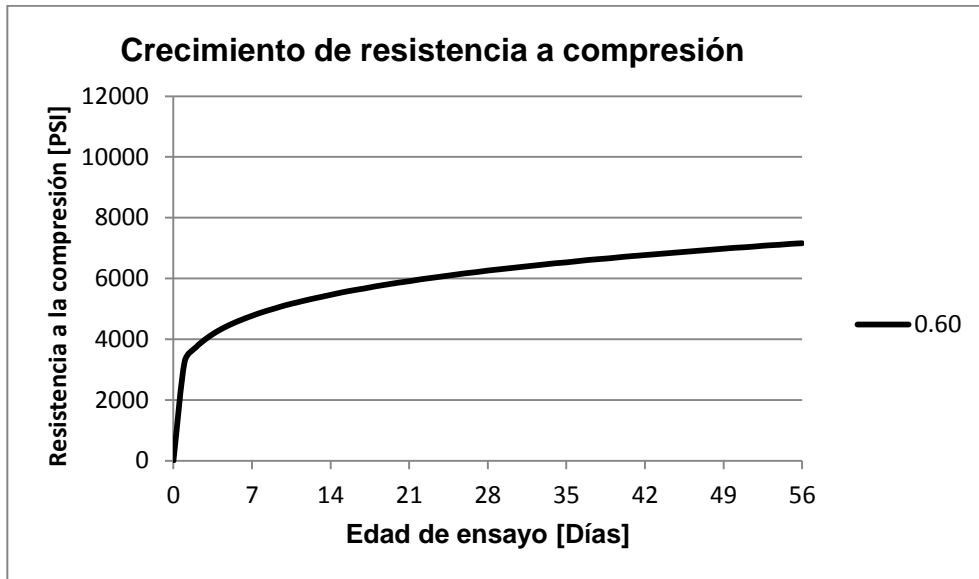
Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Replicación de resistencias con relación a/c de 0 50**



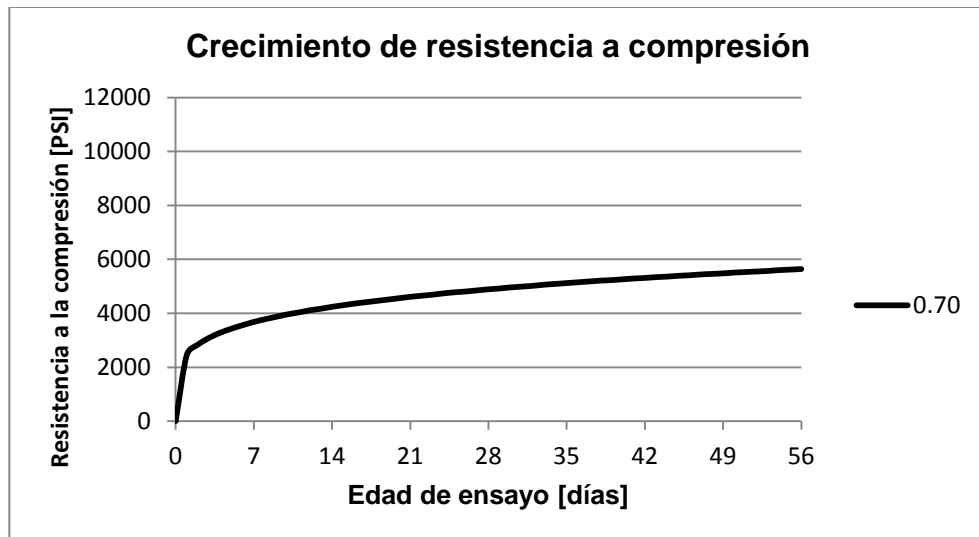
Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Replicación de resistencias, con relación a/c de 0 60**



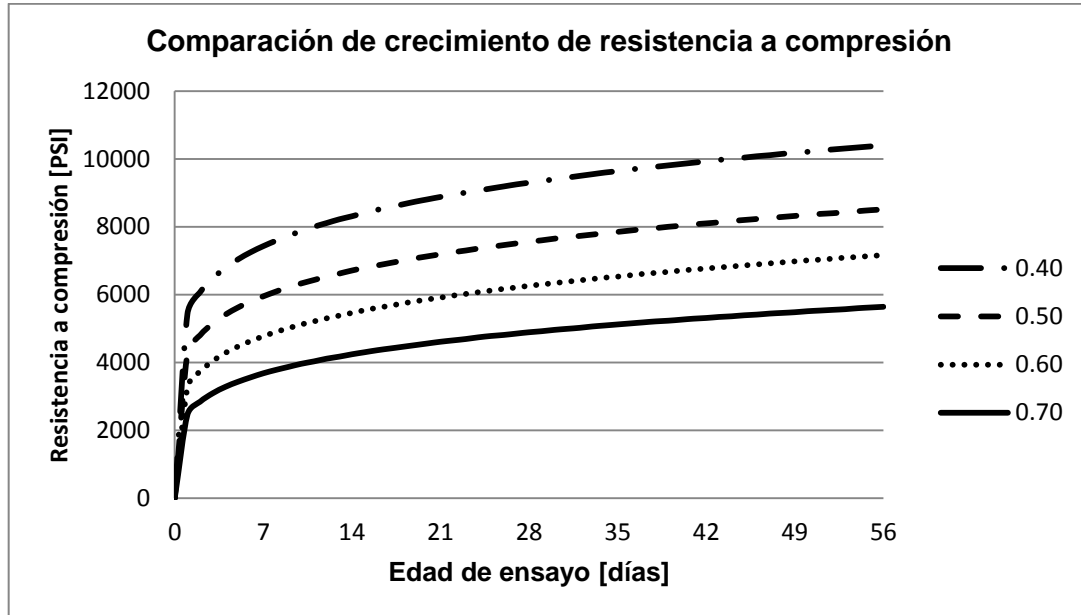
Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Replicación de resistencias, con relación a/c de 0 70**



Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **Combinación de crecimiento de f'c**



Fuente: elaboración propia.

7.1.6.2. **Módulo de ruptura**

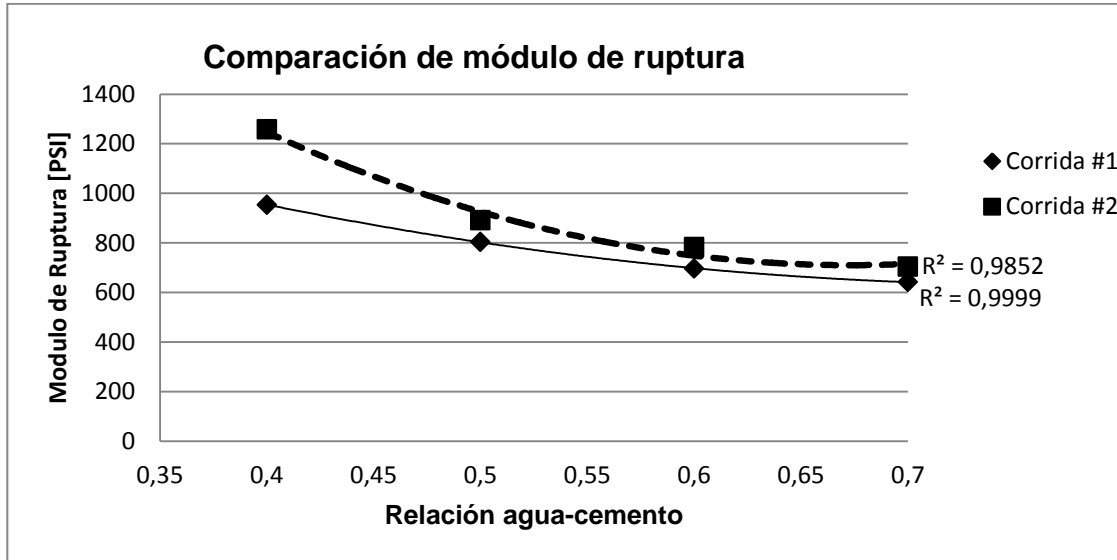
Resultados de resistencia a cargas de flexión a las mezclas realizados.

Tabla XI. **Módulo de ruptura a 28 días**

| R A/C | Corrida | MR 28 días [PSI] |
|-------|---------|------------------|
| 0,40 | 1 | 955,00 |
| | 2 | 1 260,00 |
| 0,50 | 1 | 805,00 |
| | 2 | 890,00 |
| 0,60 | 1 | 695,00 |
| | 2 | 785,00 |
| 0,70 | 1 | 640,00 |
| | 2 | 705,00 |

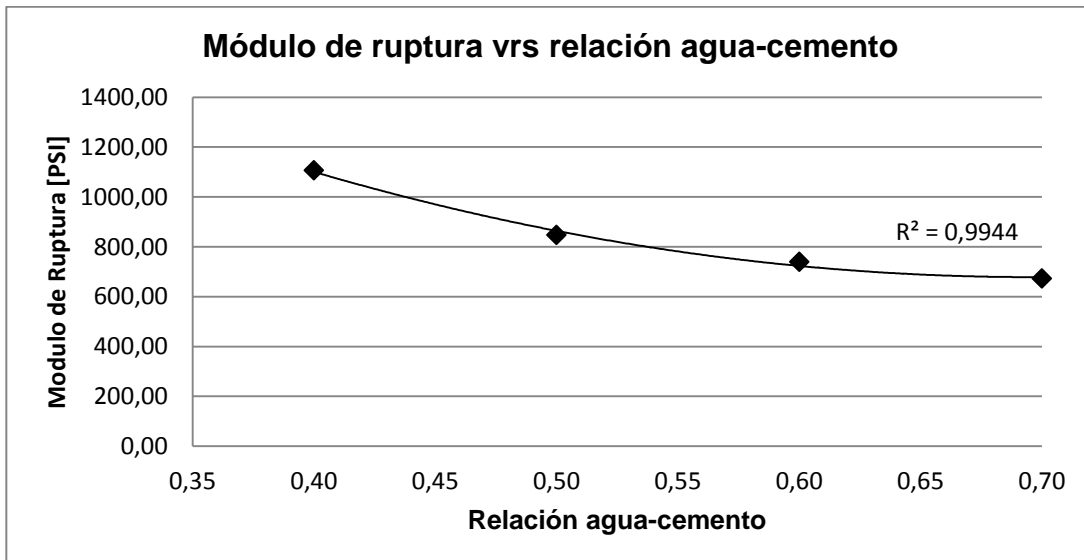
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. Comparación entre corridas de módulo de ruptura



Fuente: elaboración propia.

Figura 46. Módulo de ruptura promedio



Fuente: elaboración propia.

7.1.6.3. Módulo elástico

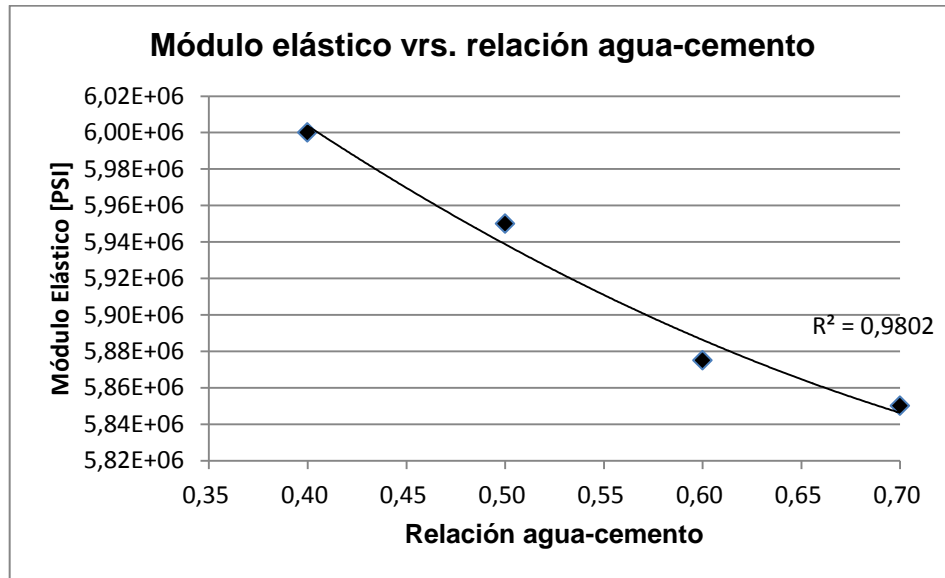
Resultados de módulo elástico a las mezclas realizadas.

Tabla XII. **Módulo elástico del concreto**

| R A/C | ME 28 días [PSI] |
|-------|------------------|
| 0,40 | 6,00E+06 |
| 0,50 | 5,95E+06 |
| 0,60 | 5,88E+06 |
| 0,70 | 5,85E+06 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Módulo elástico**



Fuente: elaboración propia.

7.1.6.4. Penetración de agua bajo presión

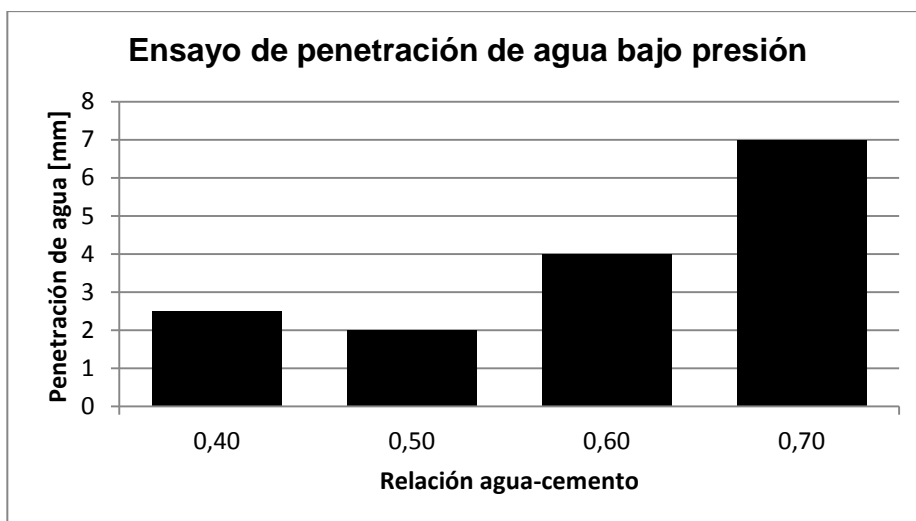
Resultados de penetración de agua a las mezclas realizadas.

Tabla XIII. Distancia de penetración de agua bajo presión

| R A/C | Penetración de agua [mm] |
|-------|--------------------------|
| 0,40 | 2,50 |
| 0,50 | 2,00 |
| 0,60 | 4,00 |
| 0,70 | 7,00 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 48. Ensayo de penetración de agua bajo presión



Fuente: elaboración propia.

7.2. Análisis de resultados

Los agregados utilizados en las mezclas de concreto fueron: polvo de piedra (0-1/4 pulgada), como agregado fino, y como agregado grueso, pedrín de 3/8 pulgada. Estos materiales se caracterizaron para conocer sus propiedades y verificar si cumplen con los requisitos de la norma COGUANOR NTG 41007 (ASTM C33) y del boletín educativo ACI E1-16. agregados para el concreto.

En el caso del agregado fino, se obtuvo una densidad relativa de 2,65, que es un valor aceptable, ya que según el boletín de ACI mencionado anteriormente establece un rango entre 2,30 y 2,90. En cuanto a la absorción del material, es un valor que indica cuánta agua absorbe el material para llegar a su estado saturado superficialmente seco (condición triple 's'). Este estado se alcanza cuando la superficie del material está seca, sin humedad libre, pero en el interior todos los poros y vacíos se encuentran saturados de agua. El agregado fino el valor de absorción fue de 2,10 %, otro valor que cumple con las recomendaciones de la guía ACI E1-16.

El módulo de finura, valor que indica que tan grueso o fino es el material, el agregado fino dio un valor de 2,67, que cumple con los requisitos establecidos por la norma COGUANOR NTG 41007 (ASTM C33), ya que el rango de módulo de finura debe estar entre 2,30 y 3,10.

Por último, el porcentaje que pasa tamiz #200, es un valor muy importante de determinar, ya que las partículas que pasan este tamiz pueden ser arcillas, las cuales afectan el desempeño del concreto, el valor para el agregado fino fue de 12 %. La norma COGUANOR NTG 41007 (ASTM C33), establece que para concretos sujetos a abrasión el porcentaje del material pasando el tamiz #200,

no deberá exceder de 7 %; sin embargo, también permite cambiar el límite máximo a 15 %, si con la prueba de azul de metileno (AASHTO TP 57) se obtienen valores máximos de 6 mg de azul por cada g de fino y que el concreto no esté sujeto a abrasión severa. En este sentido el agregado fino también cumple con este aspecto.

En el caso del agregado grueso los valores de densidad y absorción son similares a los del agregado fino. En el ensayo de densidad relativa (s.s.s.) y absorción se obtuvieron resultados de 2,66 % y 0,90 %, respectivamente. La guía ACI establece los mismos límites que para el agregado fino, de 2,30 a 2,90 para la densidad relativa y de 0 % a 8 % para la absorción.

En el caso de porcentaje de material que pasa tamiz #200, la norma establece un límite de 1%, pero se puede elevar a 1,50 %, si el material está libre de arcillas. El resultado que se obtuvo en este ensayo fue de 1,10 %, valor que también cumple con los parámetros dados por la norma COGUANOR NTG 41007 (ASTM C33).

La parte experimental de este trabajo fue elaborar mezclas de concreto variando la relación agua-cemento. Las relaciones a/c trabajadas fueron: 0,40, 0,50, 0,60 y 0,70. Se realizaron dos mezclas para cada relación, es decir, ocho mezclas de concreto en total.

Se llevó a cabo la caracterización a cada una de las mezclas en su estado fresco, dichos resultados se encuentran en la tabla IX, en ella se puede observar que la segunda corrida tuvo mayor revenimiento que la primer corrida, una posible razón fue que las fechas de hechura de la primera corrida fue el 7/12/2017 y la segunda corrida se realizó el día 13/12/2018; para esas fechas el clima estaba muy variado y el cemento tenía una fecha de producción de

04/12/2017, por lo cual al momento de realizar la primer corrida el cemento era de reciente producción y este posiblemente aún tenía una temperatura elevada; esto afecto al aditivo fluidificante que se le adicionó ya que al estar caliente el cemento lo que hizo fue disminuir el efecto del aditivo sobre la mezcla de concreto y para la segunda corrida este cemento ya no presentaba una temperatura elevada y no afecto el efecto del aditivo, esa es una posible razón de por qué se dio la diferencia de revenimiento entre cada mezcla y corrida.

Por otro lado las demás características en estado fresco se mantuvieron relativamente similares, no existieron variaciones significativas entre la densidad teórica del diseño de mezcla y la densidad real obtenida por un ensayo, eso se ve reflejado en el rendimiento de cada mezcla y la mayor variación presentada fue de 1 %.

En los resultados a compresión los cuáles abarca la tabla X y las figuras 39 a la 44, en la figura 39 se observan las resistencias que son inversamente proporcionales a la relación a/c, ya que a menor relación a/c se dan las mayores resistencias y se ve como la línea de tendencia tiene un aspecto lineal; pero la tendencia que presenta es polinómica de grado 2, en todas las edades ensayas (7 días, 28 días y 56 días). Las figuras 32, 33, 34 y 35 presentan de manera individual el crecimiento de cada una de las relaciones a/c trabajadas; mientras que la figura 44 presenta en una sola gráfica el crecimiento de las resistencias a compresión de las 4 relaciones a/c trabajadas.

En esta se observa que en todas las mezclas el aumento de resistencia a edades tempranas presenta un comportamiento exponencial, pero con el paso del tiempo esta ganancia va disminuyendo, creándose la asíntota a los 28 días donde se considera que el concreto ya alcanzó el 100 % de su resistencia, pero

como se observa el concreto sigue incrementando su resistencia con el paso del tiempo, pero de una manera más lenta.

Los resultados del módulo de ruptura del concreto están tabulados y graficados en la tabla XI y en las figuras 45 y 46; el comportamiento es similar al de la resistencia a compresión, se observa de nuevo una tendencia polinómica de grado 2; de igual manera la resistencia a la flexión disminuye a manera que la relación a/c aumenta; en la figura 45 se observa como fue el comportamiento de cada una de las corridas: en ambas el comportamiento fue como el de un polinomio de grado 2, igual que en la compresión; sin embargo, el comportamiento más cercano al del polinomio fue el de la corrida #1, ya que su correlación fue de 0,9999, lo cual es muy cercano a 1; ese valor tan cercano a uno significa que el comportamiento es igual al de un polinomio de grado 2, con un pequeño desfase, pero en su mayor parte es igual el comportamiento; por otro lado, en la corrida #2 se observa un valor de 0,9852, también es muy cercano a 1, y también se comporta como un polinomio de grado 2, pero esta presentará algunas áreas, donde el comportamiento ya no sea el de un polinomio, es decir que se salga de la curva. Por otro lado, en la figura 46, ya se tomó el promedio entre las dos corridas trabajadas, en esta se observa un tendencia polinómica con una correlación de 0,9944, la cual es menor que el de la corrida #1 y mayor que la corrida #2, pero siempre manteniendo la misma tendencia.

En los resultados de concreto fresco, compresión y flexión del concreto se observa que la segunda corrida siempre presentó resistencias mayores que la primer corrida en todas las edades trabajadas; sin embargo, la primer corrida fue la menos fluida, es decir, con un menor revenimiento, esto cabe resaltarlo para quitar la idea de que mientras más fluido o mayor revenimiento tenga el concreto, menor será la resistencia; esto únicamente se cumple cuando para

fluir el concreto se utiliza agua, pero si se utilizan aditivos para esto; entonces, el revenimiento es totalmente independiente de la resistencia del concreto.

Se observa que los resultados de MR del concreto presentan más variantes que los resultados a compresión, esto es debido a los especímenes para cada uno de estos ensayos; para compresión se hicieron cilindros de 4" * 8" y para flexión fueron vigas de 6" * 6" * 21"; la resistencia a flexión es mucho más sensible que la resistencia a compresión, es por eso que la hechura influye mucho, aunque los especímenes fueron realizados por personal certificado por el ACI; para realizar dichas pruebas cabe resaltar que esas variables se dieron por esa situación, sin embargo están dentro de norma.

En los resultados de módulo elástico, los que se presentan en la tabla XII y en la figura 47, se observa como la tendencia no está tan marcada como en los ensayos anteriores, pero siempre manteniendo una correlación aceptable de 0,9802 para un polinomio de grado 2; en la figura 47 se puede notar que a mayor relación a/c, menor será el módulo elástico, misma tendencia que se presenta en la resistencia a compresión y en el módulo de ruptura.

Por último, el ensayo de penetración de agua bajo presión, al ser un ensayo relativamente nuevo de realizarse en el medio, se esperaba que los resultados fueran iguales entre sí; sin embargo, no fue así, en la figura 48 se puede apreciar que a medida que aumenta la relación agua cemento, la permeabilidad del concreto también aumenta; es decir, que deja pasar más agua dentro del elemento, la única discrepancia se presenta en la relación a/c de 0,40 y 0,50, ya que la relación de 0,40 dejó que penetrara más agua que la de 0,50, pero la diferencia fue de 0,5 mm lo cual es mínimo, la permeabilidad del concreto y su relación a/c son directamente proporcionales.

CONCLUSIONES

1. Se determinó el comportamiento de las características físicas del concreto en estado fresco, detalladas en la tabla IX; la temperatura del concreto se mantuvo muy parecida en las 8 mezclas realizadas, debido probablemente a las condiciones del laboratorio. El asentamiento presentó una variación de más o menos una pulgada, lo cual es un comportamiento aceptable. La densidad práctica presentó una desviación aceptable respecto a la densidad teórica, basados en el rendimiento relativo que establece la norma COGUANOR NTG 41017h5 y, por último, el porcentaje de aire presente dentro de la mezcla se comportó de manera ascendente a medida que la relación a/c aumenta.
2. La resistencia a la compresión del concreto tuvo un comportamiento inversamente proporcional, teniendo a la relación a/c de 0,40 con el mejor desempeño y disminuyendo continuamente hasta la relación a/c de 0,70 se indica, esta última, la menor resistencia a la compresión. Esto va alineado a múltiples investigaciones realizadas por otros institutos y/o centros de investigación como ACI, PCA, ASTM, CETEC, IMCYC, entre otros, donde se demuestra que siempre se cumple ese comportamiento.
3. La propiedad mecánica del concreto de soportar esfuerzos de flexión es un parámetro muy solicitado en proyectos de pavimentación y dentro de la investigación realizada se presentó un comportamiento similar a la resistencia a compresión, de una manera inversamente proporcional a la relación a/c y se obtuvo una relación entre el MR del concreto y su

resistencia a la compresión, se resalta que el MR está en un rango entre 11 % a 14 % de la resistencia a compresión.

4. Implícitamente al estudiar el concreto se debe tener en cuenta el módulo elástico del concreto ya que va ligado en gran parte a la calidad de los agregados que lo componen; dentro del estudio llevado a cabo se tuvo un comportamiento inversamente proporcional; por ejemplo, a medida que aumenta la relación a/c, disminuye el módulo elástico, pero presenta diferencias menores entre cada relación a/c trabajada como los resultados de compresión y flexión antes mencionados debido a la influencia de los agregados mencionada anteriormente.

5. La profundidad de penetración de agua a presión da un parámetro para saber si el concreto presenta resistencia a que el agua penetre por dentro de sus elementos. El comportamiento que se obtuvo fue que a medida que aumenta la relación a/c el concreto presentaba menor resistencia a la penetración del agua; es decir, que el concreto será más permeable

RECOMENDACIONES

1. Los parámetros en estado fresco del concreto son muy sensibles, es necesario que dichas pruebas sean realizadas por personal especializado en dicho campo, que los equipos sean los indicados por las normativas y que se cumplan todas las especificaciones de la norma.
2. La resistencia a compresión del concreto es el valor más común y solicitado; sin embargo, también es necesario hacer otros ensayos para conocer otros indicadores de la durabilidad del concreto, dependiendo de qué tipo de estructura se hará.
3. La resistencia a flexión del concreto es un valor muy sensible, es necesario tener más cuidado en los controles, tanto en su estado fresco como en su estado endurecido; realizar correlaciones entre la resistencia a compresión y el módulo de ruptura del concreto proporciona información valiosa que puede ser utilizada en proyectos de construcción para utilizar el ensayo de compresión como criterio de aceptación del concreto.
4. Como los agregados influyen en gran manera en el módulo elástico del concreto, se puede explorar la variación del módulo elástico utilizando otra fuente de agregados, variando el cemento o probando con relaciones a/c más bajas, intermedias o más altas.

5. Debido a que la profundidad de penetración de agua en el concreto es un ensayo relativamente nuevo en el medio, es necesario que se realicen más repeticiones o incluso explorar otros ensayos, tales como el ensayo de porosidad en el concreto (ASTM C642), pruebas de contracción por secado del concreto (ASTM C157), entre otras pruebas que no son muy conocidas en el medio.

BIBLIOGRAFÍA

1. AASHTO. *Guía para el diseño de estructuras de pavimento*. Estados Unidos: AASHTO, 1993. 448 p.
2. Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR). *Norma COGUANOR NTG 41 007. Agregados para concreto especificaciones*. Guatemala: Ministerio de Economía, 2005. 24 p.
3. _____. *Norma COGUANOR NTG 41 095. Cementos hidráulicos especificaciones por desempeño*. Guatemala: Ministerio de Economía, 2011. 13 p.
4. _____. *Norma COGUANOR NTG 41 017H1. Método de ensayo, determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. Guatemala: Ministerio de Economía, 2012. 15 p.
5. _____. *Norma COGUANOR NTG 41 017-H2. Método de ensayo, para determinar el esfuerzo de flexión del concreto (utilizando una viga simplemente soportada con cargas en los tercios de la luz) ASTM C78-09*. Guatemala: Ministerio de Economía, 2012. 10 p.
6. _____. *Norma COGUANOR NTG 41 017H5. Método de ensayo, determinación de la densidad aparente, rendimiento y contenido de aire del concreto*. Guatemala: Ministerio de Economía, 2012. 9 p.

7. _____. *Norma COGUANOR NTG 41 017H7. Método de ensayo, determinación del contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado por el método de presión.* Guatemala: Ministerio de Economía, 2013. 21 p.
8. _____. *Norma COGUANOR NTG 41 052. Método de ensayo, determinación del asentamiento del concreto hidráulico.* Guatemala: Ministerio de Economía, 2013. 9 p.
9. _____. *Norma COGUANOR NTG 41 053. Método de ensayo, medición de la temperatura del concreto hidráulico recién mezclado.* Guatemala: Ministerio de Economía, 2013. 5 p.
10. _____. *Norma COGUANOR NTG 41 057. Práctica para el muestreo de concreto recién mezclado.* Guatemala: Ministerio de Economía, 2015. 7 p.
11. _____. *Norma COGUANOR NTG 41 061. Práctica para la elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra.* Guatemala: Ministerio de Economía, 2015. 14 p.
12. _____. *COGUANOR NTG 41 017-H16. Método de ensayo determinación del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson del concreto a compresión.* Guatemala: Ministerio de Economía, 2015. 13 p.
13. GONZÁLES CABRERA, José. *Estudio y evaluación de las características físicas y propiedades mecánicas del concreto polimérico permeable para su utilización en proyectos con fines*

ambientales. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2015. 188 p.

14. KOSMATKA, Steven; WILSON, Michelle. *Diseño y control de mezclas de concreto*. 15a ed. Estados Unidos: Asociación del Cemento Portland, 2011. 460 p.
15. SOTO SOLARES, Ricardo. *Evaluación y análisis de mezcla de concreto, elaborados con agregados de origen pétreo y escoria de acería*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 215 p.

ANEXOS

Anexo 1 Informe de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto



CEMENTOS PROGRESO, S.A.
CENTRO TECNOLÓGICO
15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera
Tel: 2286-4178 Fax: 2286-4181



Fecha impresión: 2019.01.18
Página: 1 de 1
Usuario: WAIFAN
OT: 31021-1
Fecha OT: 2018.01.09

| | |
|--|--|
| Cliente: CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO. | Proyecto: PROPIEDADES MECANICAS DEL CONCRETO |
| Dirección: 15 AV. 18-01 Z-6 FINCA LA PEDRERA | Dirección: 15 AV. 18-01 LP |
| Contacto: ESTUARDO HERRERA/ARIEL OSORIO | Muestra: CILINDROS |
| Teléfono: 22864100 | Analista: DELBERT VILLATORO |

INFORME DE ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO - NORMA NTG 41017 h1

| No. | Id. Cliente | Id. Especimen | Ubicación Elemento Fundido | Fecha Hechura | Fecha Rotura | Edad (días) | Tipo Concre (PSI) | Slump (in)/ Flujo (mm) | Masa (kg) | Area (mm ²) | Carga (KN) | Resis -tencia (N/mm ²) | Resis -tencia (PSI) | T. Rot |
|-----|-------------|---------------|----------------------------|---------------|--------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|-------------------------|------------|------------------------------------|---------------------|--------|
| 1 | | 31021-1-03 | CILINDROS | 2017.12.07 | 2018.01.04 | 28 | 0.4 | | 3.89 | 8091 | 489.0 | 61.7 | 8950 | 2 |
| 2 | | 31021-1-04 | CILINDROS | 2017.12.07 | 2018.01.04 | 28 | 0.4 | | 3.90 | 8091 | 518.3 | 64.1 | 9290 | 2 |
| 3 | | 31021-1-01 | CILINDROS | 2017.12.07 | 2017.12.14 | 7 | 0.4 | | 3.91 | 8091 | 411.8 | 60.9 | 7380 | 2 |
| 4 | | 31021-1-02 | CILINDROS | 2017.12.07 | 2017.12.14 | 7 | 0.4 | | 3.91 | 8091 | 390.5 | 48.3 | 7000 | 2 |
| 5 | | 31021-1-05 | CILINDROS | 2017.12.07 | 2018.02.01 | 56 | 0.4 | | 3.92 | 8091 | 569.5 | 70.4 | 10210 | 2 |
| 6 | | 31021-1-08 | CILINDROS | 2017.12.07 | 2018.02.01 | 56 | 0.4 | | 3.93 | 8091 | 635.7 | 76.2 | 11000 | 2 |

T. Rot: 1 = Cónica; 2 = Cónica y vertical; 3 = Columnar; 4 = Diagonal; 5 = Fractura en los extremos;
6 = Similar tipo 5 pero extremo puntiagudo

Observaciones:

[Firma]
Analista

[Firma]
Jefe Laboratorio/Coordinador

Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, identificado con un consecutivo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 22864178 o al correo laboratorioctc@cempro.com. Los resultados de ensayos se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse este informe, salvo que se haga integramente.

SGL-CT-CP-IE-02/Rev.06

Fuente: Cempro. Centro Tecnológico de Cementos Progreso.

<http://www.cempro.com/index.php/enlaces/centro-de-investigacion-y-desarrollo>. Consulta: 11 de octubre de 2018.

Anexo 2 Informe de ensayo resistencia a flexión con dos puntos de carga



CEMENTOS PROGRESO, S.A.
CENTRO TECNOLÓGICO
15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera
Tel: 2286-4178 Fax: 2286-4181
INFORME DE ENSAYO RESISTENCIA A FLEXIÓN
CON DOS PUNTOS DE CARGA - NORMA NTG 41017 h2


Fecha impresión: 2018.03.19
Página: 1 de 1
Usuario: WAIFAN
OT: 31021
Fecha OT: 2018.01.05

| | |
|--|---|
| Cliente: CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO. | Proyecto: PROPIEDADES MECANICAS DEL CONCRETO |
| Dirección: 15 AV. 18-01 Z-6 FINCA LA PEDRERA | Dirección: PROPIEDADES MECANICAS DEL CONCRETO |
| Contacto: ESTUARDO HERRERA/ARIEL OSORIO | Muestra: VIGA |
| Teléfono: 22864100 | Analista: WILSON AIFAN |

| No. | Id. Cliente | Identificación Especimen | Fecha Hechura | Fecha Rotura | Edad (días) | Masa (kg) | Largo (mm) | Ancho (mm) | Alto (mm) | Módulo Rotura (N/mm ²) | Módulo Rotura (kg/cm ²) |
|-----|-------------|--------------------------|---------------|--------------|-------------|-----------|------------|------------|-----------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 31021-5 | 31021-09 | 2017.12.13 | 2018.01.10 | 28 | 28.98 | 538 | 148 | 155 | 8.64 | 88.07 |
| 2 | 31021-5 | 31021-10 | 2017.12.13 | 2018.01.10 | 28 | 29.92 | 536 | 148 | 164 | 8.71 | 88.82 |
| 3 | 31021-6 | 31021-11 | 2017.12.13 | 2018.01.10 | 28 | 28.91 | 536 | 147 | 156 | 6.66 | 68.84 |
| 4 | 31021-6 | 31021-12 | 2017.12.13 | 2018.01.10 | 28 | 28.90 | 536 | 148 | 155 | 5.73 | 58.41 |
| 5 | 31021-7 | 31021-13 | 2017.12.13 | 2018.01.10 | 28 | 28.89 | 536 | 147 | 155 | 5.18 | 52.81 |
| 6 | 31021-7 | 31021-14 | 2017.12.13 | 2018.01.10 | 28 | 28.95 | 536 | 149 | 164 | 6.62 | 57.33 |
| 7 | 31021-8 | 31021-15 | 2017.12.13 | 2018.01.10 | 28 | 28.84 | 536 | 149 | 155 | 4.59 | 46.78 |
| 8 | 31021-8 | 31021-16 | 2017.12.13 | 2018.01.10 | 28 | 29.00 | 535 | 148 | 153 | 5.12 | 52.18 |
| 9 | 31021-1 | 31021-01 | 2017.12.07 | 2018.01.04 | 28 | 29.26 | 536 | 150 | 166 | 6.09 | 62.10 |
| 10 | 31021-1 | 31021-02 | 2017.12.07 | 2018.01.04 | 28 | 29.31 | 536 | 150 | 155 | 7.08 | 72.02 |
| 11 | 31021-2 | 31021-03 | 2017.12.07 | 2018.01.04 | 28 | 29.07 | 536 | 149 | 155 | 5.64 | 57.52 |
| 12 | 31021-2 | 31021-04 | 2017.12.07 | 2018.01.04 | 28 | 29.31 | 536 | 150 | 157 | 6.44 | 55.50 |
| 13 | 31021-3 | 31021-05 | 2017.12.07 | 2018.01.04 | 28 | 29.12 | 536 | 151 | 155 | 4.75 | 48.45 |
| 14 | 31021-4 | 31021-07 | 2017.12.07 | 2018.01.04 | 28 | 28.70 | 536 | 149 | 153 | 4.61 | 46.98 |
| 15 | 31021-4 | 31021-08 | 2017.12.07 | 2018.01.04 | 28 | 28.78 | 536 | 147 | 156 | 4.25 | 43.30 |
| 16 | 31021-3 | 31021-05 | 2017.12.07 | 2018.01.04 | 28 | 28.77 | 536 | 149 | 155 | 4.85 | 49.47 |

Observaciones: MUESTREO REALIZADO POR EL CLIENTE.


Analista



Jefe Laboratorio/Coordinador
SGL-CT-CP-IE-10/Rev.04

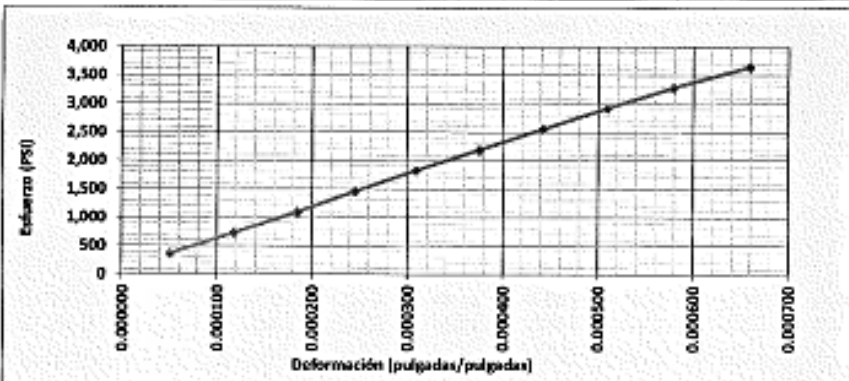
Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, identificado con un consecutivo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 22864178 o al correo laboratorioctec@cempro.com. Los resultados de ensayos se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse este informe, salvo que se haga íntegramente.



Fuente: Cempro. Centro Tecnológico de Cementos Progreso.

<http://www.cempro.com/index.php/enlaces/centro-de-investigacion-y-desarrollo>. Consulta: 11 de octubre de 2018.

Anexo 3 Informe de ensayo módulo estático de elasticidad y módulo de Poisson en concreto

|  Cementos Progreso Centro Tecnológico 15 Ave. 18-D1, zona 6 La Pedrera, Ciudad de Guatemala Tel: 2796-4178 Email: laboratorio@cempro.com | | OT: | 31021-1 | | | | | | | | | | |
|--|------------------------------------|------------------|-----------------|-------------|---------------|-------------|-----------|--------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|--------|-------------------|
| | | FECHA OT: | 12/12/2017 | | | | | | | | | | |
| | | PÁGINA: | 1 DE 1 | | | | | | | | | | |
| | | IMPRESION: | 09:45:28:8 | | | | | | | | | | |
| CLIENTE: | CEDEC | | | | | | | | | | | | |
| CONTACTO: | ESTUARDO HERRERA / ARIEL OSORIO | | | | | | | | | | | | |
| DIRECCIÓN: | 15 AVE. 18-01 ZONA 6 LP | | | | | | | | | | | | |
| MUESTRA: | CILINDROS 4" X 8" | | | | | | | | | | | | |
| PROYECTO: | PROPIEDADES MECANICAS DEL CONCRETO | | | | | | | | | | | | |
| INFORME DE ENSAYO | | | | | | | | | | | | | |
| MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDAD Y MÓDULO DE POISSON EN CONCRETO | | | | | | | | | | | | | |
| ASTM C 469 | | | | | | | | | | | | | |
| DATOS DE ENSAYO | | | | | | | | | | | | | |
| Id. Cilindro | Tipo de curado | Fecha de hechura | Fecha de ensayo | Edad (días) | Diámetro (mm) | Altura (mm) | Masa (kg) | Resistencia a compresión | | Módulo de Elasticidad | | | Módulo de Poisson |
| | | | | | | | | PSI | KN/m ² | PSI | kg/cm ² | MPa | |
| 31021-1-01 | ESTÁNDAR | 2017-12-07 | 2018-01-27 | 81 | 101.6 | 284.0 | 3.01 | 9,117 | 42.0 | 3,790,000 | 484,265 | 36,845 | 0.28 |



| | |
|--|--|
|  Edwin Manjón Analista de Laboratorio |  Jairo / Coordinador de Laboratorio |
|--|--|

Este informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al tel. 2286-6178 o al correo laboratorio@cempro.com.

Los resultados de ensayo se sitúan únicamente a las muestras presentadas por el cliente, sin deber reproducirse este informe, salvo que se haga integrarlo.

Observaciones:

LA RESISTENCIA A COMPRESION CORRESPONDE AL PROYECTO DE LOS DISEÑOS No. 31021-1-03 Y 04

* MUESTRAS PROCEDENTES DEL CLIENTE.

Fuente: Cempro. Centro Tecnológico de Cementos Progreso.

<http://www.cempro.com/index.php/enlaces/centro-de-investigacion-y-desarrollo>. Consulta: 11 de octubre de 2018.

Anexo 4 **Informe de ensayo profundidad de penetración de agua bajo presión al concreto endurecido**

| | | | | | |
|---|------------------------------------|---|-------------|---|--|
|  | | CEMENTOS PROGRESO S.A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 18-01, zona 8 La Pedrera Tel: 2286-4100 Fax: 2286-4179 ceate@cempro.com | | OT: 31821-2 FECHA OT: 2017-11-23 PÁGINA: 1 DE 1 | |
| Cliente: | CIVD CÉTEC | Teléfono: | 2286-4100 | | |
| Dirección: | 15 AV 18-01 ZONA 8 LA PEDRERA | Análisis: | WILSON AFAN | | |
| Contacto: | ARIEL OSORIO / ESTUARDO HERRERA | Fecha de Ingreso: | 2018-05-31 | | |
| Proyecto: | PROPIEDADES MECANICAS DEL CONCRETO | | | | |
| INFORME DE ENSAYO PROFUNDIDAD DE PENETRACION DE AGUA BAJO PRESION AL CONCRETO ENDURECIDO NORMA NTC 41617 IN-2 | | | | | |

| No. | ID. De muestra | Fecha de hechura | Edad en días | Fecha de ensayo | Tipo de concreto | Diametro (mm) | Hora inicio de ensayo | Ubicación, elemento fundido | Promedio de penetración (mm) | Profundidad máxima penetración (mm) |
|-------|----------------|------------------|--------------|-----------------|------------------|---------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 31821-2 | 2017-12-07 | 56 | 2018-02-01 | - | 102.5 | 11:00 | - | 0 | 0 |
| NOTA: | | | | | | | | | | |


 Jefe de Laboratorio


 Jefe de Laboratorio / Coordinador

Observaciones:
 Este Informe es original únicamente si cuenta con holograma de seguridad, identificado con un código único, para verificar la validez del mismo puede comunicarse al 22864178 o al correo laboratorioceate@cempro.com

Fuente: Cempro. Centro Tecnológico de Cementos Progreso.

<http://www.cempro.com/index.php/enlaces/centro-de-investigacion-y-desarrollo>. Consulta: 11 de octubre de 2018.