



UNIVERSIDAD CENTRAL
FACULTAD DE INGENIERÍA

**Trabajo final de graduación para optar al grado académico de Licenciatura en
Ingeniería Civil**

**Diseño de mezcla de concreto para 175 kg/cm² y 210
kg/cm², utilizando el mismo agregado con los tres diferentes
cementos (Cemex, Holcim y Fortaleza)**

**Autor del estudio realizado:
Raymond Acosta Ramírez**

**Tutor:
Ángelo Murcia Quesada**

San José, Costa Rica

Agradecimientos a

Dios y a la Virgen por la fuerza que me dieron en los momentos felices, tristes y de desesperación, pues nunca me dejaron solo a lo largo de mi vida y me han guiado por un buen camino. Gracias a su gran amor y misericordia, los cuales me han permitido ser la persona que soy en estos momentos. Gracias por la guía y la fortaleza que me han brindado para ser un hombre de bien.

Mi más sincero agradecimiento a la Universidad Central por darme la oportunidad de concluir y formarme como profesional, así como a todos los docentes por su esfuerzo y profesionalismo.

A los diferentes profesionales que, con su valiosa colaboración, enriquecieron este trabajo, ya que nos brindaron apoyo para su elaboración, especialmente:

Castro y de la Torre.

Orlando de la Torre.

Mario de la Torre.

En general, a todas las personas que contribuyeron de forma directa o indirecta a la realización del presente trabajo de graduación.

Dedicatoria a Dios Todopoderoso

Primero doy gracias a Dios y la Virgen por ser mis guías y por brindarme protección y sabiduría para poder concluir esta carrera de Ingeniería Civil, unos de los sueños logrados y sé que vendrán muchos más. Gracias por ayudarme a superar mis propios límites, proporcionarme fuerzas, darme mucha sabiduría para poder cambiar mi destino y guiarme a través de la senda del triunfo.

A mi esposa, Susana de la Torre, por apoyarme e impulsarme a terminar la carrera de Ingeniería Civil. Ella siempre creyó en mí, me impulsó y me enseñó lo que es el amor, la honradez y la integridad, como mujer y madre. Por confiar en mí y por toda su entrega y sacrificio, mil gracias; sin su ayuda y consejos no sería quien soy.

Agradezco a mi hijo, Christopher Acosta, por brindarme su cariño y porque fue una gran inspiración.

También dedico esta tesis a mis padres, Carlos Acosta y Ana Ramírez, y a mis suegros, que siempre me apoyaron y aconsejaron con palabras de aliento y sabiduría. Muchas gracias y que Dios los bendiga.

Tabla de contenidos

Capítulo I: Problema	6
1.1. Planteamiento del problema	6
1.3. Objetivo general.....	6
1.4. Objetivos específicos.....	6
1.5. Justificación	7
1.6. Antecedentes internacionales.....	8
1.6.1. Evaluación de morteros para albañilería y revestimientos elaborados a base de cementos mezclados con escorias de horno	8
1.6.2. Modificación de las propiedades de las matrices cementantes mediante la adición de nanopartículas de sílice. Universidad Autónoma de Nuevo León.....	9
1.6.3. Determinación de la influencia de las nanomoléculas de sílice en el concreto frente a un factor que afecta su durabilidad	10
1.6.4. La evolución de la industria del cemento con énfasis en Latinoamérica	11
1.7. Antecedentes nacionales.....	12
1.7.1. Análisis de la resistencia a la compresión de concretos y cementos hidráulicos costarricenses	12
1.7.3. Resistencia del mortero hidráulico a cinco edades diferentes utilizando cinco tipos de cemento nacional	14
1.7.4. Desempeño del concreto permeable con sustitución parcial del material cementante por material vítreo y las variaciones del tipo de cemento hidráulico.....	15
1.8. Alcances	16
1.9. Limitaciones.....	17
Capítulo II: Marco teórico.....	18
2.1. Historia cementera de Costa Rica	18
2.2. Desarrollo tecnológico	22
2.3. Producción nacional de cemento.....	27

2.3.1	Tipos de productos	27
2.3.2	Cemento	28
2.3.3	Cemento hidráulico Portland.....	29
2.3.4	Cementos hidráulicos combinados o adicionados	31
2.3.5	Componentes de los cementos hidráulicos adicionados	32
2.3.6	Control de calidad	35
2.3.7	Diseño de mezcla según ACI 211.1	35
2.3.8	Normativa costarricense	37
2.3.9	Reglamento Técnico: RTCR 479:2015	38
2.3.10	INTE C147:2018	38
2.3.11	Normativa internacional	40
2.3.12	Pruebas de laboratorio	43
Capítulo III: Metodología.....		56
3.1.	Tipo de investigación.....	56
3.2.	Muestras y ensayos.....	58
3.3.	Ejemplos de malas prácticas con el cemento.....	61
Capítulo IV: Resultados.....		64
4.1.	Resultados.....	64
4.2.	Conclusiones.....	68
4.3.	Recomendaciones.....	69
Bibliografía.....		71

Índice de figuras

Figura 1 Materias primas	26
Figura 2	46
Figura 3 Gráfica granulométrica	48
Figura 4 Escala de impurezas orgánicas presentes en un agregado ensayado	50

Índice de cuadros

Cuadro 1 Especificaciones para el cemento hidráulico.....	28
Cuadro 2 Tipos de cemento Portland para manufactura	30
Cuadro 3 Tipos de cementos hidráulicos aprobados por la normativa costarricense ...	31
Cuadro 4 Requerimientos químicos para el cemento a utilizar en la mezcla de concreto	37
Cuadro 5 Requerimientos físicos para el cemento Portland tipo 1	38
Cuadro 6 Resistencia a la compresión de los cementos hidráulicos	39
Cuadro 7 Características geométricas y de espesor del molde.....	44
Cuadro 8 Desgaste de los agregados gruesos abrasión de los Ángeles ASTM C131/C131M	45
Cuadro 9 Selección del tamaño de la muestra de prueba	47
Cuadro 10 Impurezas orgánicas en el agregado fino para concreto	51
Cuadro 11 Pesos mínimos indicados para las muestras de ensayo.....	52
Cuadro 12 Tamaño máximo nominal del agregado frente al volumen del medidor	55
Cuadro 13 Resultados del cemento Holcin ug para 175 kg/cm ²	64
Cuadro 14 Resultados del cemento Cemex ug para 175 kg/cm ²	64
Cuadro 15 Resultados del cemento Fortaleza ug para 175 kg/cm ²	65
Cuadro 16 Resultados del cemento Holcin ug para 210 kg/cm ²	65
Cuadro 17 Resultados del cemento Cemex ug para 210 kg/cm ²	66
Cuadro 18 Resultados del cemento Fortaleza ug para 210 kg/cm ²	66
Cuadro 19 Precios del cemento.....	67

Capítulo I: Problema

1.1. Planteamiento del problema

En Costa Rica, en el área de la construcción mediana a alta, existe un desconocimiento de la calidad del cemento que se vende. En la presente investigación se buscó comprobar la calidad del cemento y su resistencia por medio de un diseño de mezcla de concreto para que este sea aprovechado de la mejor forma.

Sin importar el tipo de actividad que desarrollen, en los últimos años, la mayoría de las empresas han demostrado un fuerte interés por lograr un desempeño sólido y eficaz de las construcciones.

La industria del cemento es una de las más desarrolladas a nivel mundial debido a su importancia en el área de la construcción, por lo que además representa un gran impacto al medio ambiente, ya que genera el 6,97 % de las emisiones de CO₂ provenientes de las fuentes estacionarias (Metz *et al.*, 2005).

1.2. Pregunta de investigación

¿Cómo determinar y evaluar las características específicas, como homogeneidad y calidad, en los diferentes tipos de cementos de las tres distribuidoras a nivel nacional?

1.3. Objetivo general

- Identificar las distintas características que presentan las tres marcas distribuidoras de cemento en Costa Rica, según los procesos de producción, tomando en cuenta la homogeneidad, la calidad y su funcionalidad.

1.4. Objetivos específicos

- Indicar las características específicas de producción, homogeneidad, calidad y funcionalidad de las tres marcas de cemento que se distribuyen en el país.
- Comparar las características en términos técnicos.
- Definir si existen diferencias en las distintas marcas de cemento del país.

1.5. Justificación

El concreto es el material de construcción más utilizado a nivel mundial, pues es empleado en edificaciones, viviendas, infraestructura pública, puentes, carreteras, entre otros, por lo que es de suma importancia que su calidad sea óptima y así garantizar las características para las cuales fue diseñado. En el caso de las viviendas es muy común que el concreto sea elaborado en el mismo sitio de la construcción y que no exista un control de calidad adecuado, lo cual provoca que no se llegue a desarrollar la resistencia y las características necesarias de cada elemento estructural. Por lo tanto, es importante realizar estudios que evidencien la calidad y la durabilidad del cemento.

Tomando en cuenta lo anterior, el Instituto Costarricense del Cemento y Concreto (ICCYC) y el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (CFIA) han realizado estudios de análisis de la calidad de los concretos elaborados en obra en el país. Dichos estudios se han llevado a cabo en cuatro zonas: Gran Área Metropolitana, Guanacaste, Pacífico Central y San Carlos. Según el CFIA, estas regiones fueron elegidas por presentar un crecimiento muy alto en el número de construcciones durante el año en que se llevó a cabo el estudio.

Mediante estos informes se contó con suficiente información para establecer un panorama general de la calidad del concreto en las viviendas y otras edificaciones en Costa Rica, así como una lista de cuidados y recomendaciones para garantizar la elaboración correcta de concretos hechos en obra y un diseño efectivo.

Esta investigación supone un análisis extenso y detallado realizado por medio de datos cuantitativos y cualitativos, en donde se recopilaban fuentes teóricas y comparaciones entre las distintas tecnologías, que permitieron evidenciar y concluir las mejores alternativas. El aporte fue un documento técnico basado en investigación y el análisis científico para deducir las diferencias y las características del concreto realizado con diferentes marcas de cemento.

1.6. Antecedentes internacionales

1.6.1. Evaluación de morteros para albañilería y revestimientos elaborados a base de cementos mezclados con escorias de horno

En este trabajo, Molina (2006) le dio seguimiento a la línea de investigación del Centro de Investigaciones de Ingeniería sobre las escorias de hornos generadas en la planta Sidegua, ubicada en el municipio de Masagua, departamento de Escuintla. Este autor partió de los resultados obtenidos por el Ing. Edgar Solórzano en su trabajo de graduación: *Caracterización de la escoria de hornos de la Planta SIDEGUA como puzolana artificial*. Bajo las especificaciones de la norma ASTM C-595, se fabricaron y se caracterizaron dos cementos mezclados con escoria de hornos para luego seleccionar el que obtuvo mejores resultados y, con este, elaborar morteros de albañilería y revestimiento.

Con el mortero de albañilería se fabricaron prismas que después fueron ensayados para evaluar su comportamiento a compresión, corte, fricción y adherencia. Por su parte, el mortero de revestimiento fue aplicado a un muro de mampostería tradicional ubicado en la intemperie para así valorar su adherencia, apariencia, resistencia a la compresión y tensión. Los resultados obtenidos permitieron clasificar tanto a los cementos mezclados como a los morteros examinados según las normas ASTM aplicables al caso.

En la investigación se menciona que todo proceso de transformación de materia prima deriva en la generación de subproductos, que, salvo pocas excepciones, no se destinan a ningún uso en particular. Uno de estos es la escoria de hornos, la cual, en países con gran producción de aceros, es aprovechada por la industria de la construcción como una puzolana artificial en la fabricación de cementos mezclados. También, se establece que la fineza de un cemento determina su capacidad de retención del agua. Dicha capacidad produce una mejor hidratación del cemento, de manera que se trata del factor definitivo de la resistencia a la compresión. Estos hallazgos demuestran que se trata de una tesis relevante para tomar como base en la presente investigación.

1.6.2. Modificación de las propiedades de las matrices cementantes mediante la adición de nanopartículas de sílice. Universidad Autónoma de Nuevo León

En la presente investigación, Castillo (2015) examinó el efecto de adicionar nanopartículas de sílice a dos matrices semejantes buscando establecer su influencia en las propiedades finales de dichos materiales. Para llevar a cabo esta evaluación, se adicionaron las nanopartículas en dosificaciones desde 0,30 %-5,0 % en peso, con la finalidad de determinar en cuál dosificación se obtenían los mejores resultados.

Una de las conclusiones obtenidas de esta investigación es que, al utilizar este tipo de materiales, el mayor reto a superar es la correcta dispersión de las nanopartículas en las matrices cementantes, ya que, de no asegurar dicha dispersión y debido a la alta energía superficial que poseen las nanopartículas, se presenta una tendencia natural a aglomerarse, lo que conforma materiales de tamaños muy superiores a los que se presentan en su estado original y así se pierde su ventaja de uso.

Para prevenir este efecto y como resultado de la primera etapa de esta investigación, se propuso un método de mezclado. En dicho método se empleó como dispersante un aditivo superplastificante (en adelante llamado SP) a base de policarboxilato de calcio en dosificaciones de 0,5 % en peso, el cual se adicionó a ambas matrices cementantes.

Los resultados obtenidos sugieren que algunas propiedades —tales como la resistencia mecánica a la compresión, la resistencia a la flexión y, sobre todo, la resistencia al ataque químico por sulfatos— se ven mejoradas mediante la adición de nanopartículas de sílice. Este incremento en su efectividad se observó tanto en la matriz de cemento Portland como en la matriz de cemento sulfoaluminoso. Los resultados finales de la investigación mostraron que la resistencia mecánica a la compresión para un cemento Portland ordinario se mejoró hasta en un 40 % a la edad de 24 horas cuando se adicionaron las nanopartículas en porcentaje de 0,50 % en peso. Sin embargo, los resultados para el resto de las edades no presentaron mejoría.

Por un lado, para la matriz de cemento sulfoaluminoso (en adelante CSA), los mejores resultados se obtuvieron también con la dosificación de 0,50 % en peso con relación al cemento, sin embargo, la mejoría no fue de la misma magnitud a la obtenida con la matriz

de cemento Portland. Por el otro, cuando se adicionaron las nanopartículas de sílice, la resistencia al ataque químico por sulfatos mostró una mejoría de hasta un 80 % para la matriz de cemento sulfoaluminoso. Este resultado sugiere que la matriz con nanopartículas presenta una mayor densificación, lo que, por ende, propicia un menor grado de porosidad.

1.6.3. Determinación de la influencia de las nanomoléculas de sílice en el concreto frente a un factor que afecta su durabilidad

Aguilar (2017) menciona en su tesis que, durante los últimos años, se han intensificado las investigaciones relacionadas con el mejoramiento de los materiales utilizados en las obras de ingeniería, con el objetivo de incrementar la efectividad de sus propiedades y economizar su costo de fabricación y de uso. En este campo, una de las últimas tecnologías con muchas aplicaciones es la nanotecnología, que, como su nombre lo indica, se desarrolla a escalas nanométricas, en donde un nanómetro es la millonésima parte de un milímetro.

En el marco de la nanotecnología es que se desarrolló dicho trabajo, cuyo objeto principal fue la determinación de la influencia de las nanopartículas de sílice en el concreto frente a la acción de agentes que son agresivos para este. Se trata de agentes que afectan su durabilidad considerando los efectos superficiales y estructurales, físicos y químicos de esta acción en el concreto.

Para determinar la influencia de estas nanomoléculas se realizó un trabajo experimental, que consistió en un ensayo de inmersión de pequeños discos de concreto con árido fino o mortero, así como distintas adiciones de nanosílice en el porcentaje del peso del cemento, en una solución de sulfato de sodio. A partir de este ensayo, se desprendieron tres tipos de análisis:

El primero estuvo relacionado con la pérdida o la disminución de masa de cada una de las muestras en forma posterior a su inmersión. El segundo fue un análisis del pH de la solución utilizada en forma previa y posterior al ensayo de inmersión. Por último, se expuso un análisis de microscopía electrónica en la muestra que sufrió mayor deterioro y

la que fue menos dañada, producto de la acción de los sulfatos en el ensayo de inmersión. Además, se hizo una comparación de los resultados del primer análisis mencionado con los de una investigación anterior referente al estudio de las resistencias mecánicas (flexotracción y compresión) y las trabajabilidad de probetas de mortero, idénticas a las empleadas en esta investigación.

1.6.4.La evolución de la industria del cemento con énfasis en Latinoamérica

En la investigación de Diaz (2012) se menciona que el cemento es uno de los principales materiales utilizados en la industria de la construcción. La demanda y la producción a nivel mundial tienen diferentes comportamientos de acuerdo con la región y el desarrollo de los diferentes países. A través de toda la historia de la producción de cemento, este ha ido evolucionando hasta convertirse en un material que responde a la mayoría de las necesidades mecánicas que exigen las construcciones modernas.

En el primer capítulo de este trabajo de graduación se establecen las características físicas y químicas del cemento, su estructura y los demás elementos generales, mientras que en el segundo se recopiló información de la historia del uso de los materiales cementantes en las civilizaciones antiguas como los griegos, los egipcios y los romanos, incluyendo las civilizaciones maya y azteca. Con esto se marca el inicio de la búsqueda de los ahora conocidos como cementos Portland de la actualidad.

Seguidamente, en los capítulos tres y cuatro, se aborda cómo se descubrió el cemento portland y cómo se fue modificando entre los siglos XVIII y XIX. La región latinoamericana presenta una gran demanda tanto en el consumo como en la producción de este material debido al inmenso potencial que implica para la construcción. Esto se da porque en la mayoría de los países de la región, conocidos como “en vías de desarrollo”, el crecimiento se observa con la aparición de infraestructura a grandes escalas.

Contrario a lo que sucede en los países desarrollados, como los europeos y los norteamericanos (Estados Unidos y Canadá), la demanda y la producción del producto se han reducido no solo por la reciente crisis económica, sino también por la disminución en infraestructura. Por esta razón, empresas transnacionales como Holcim, Cemex y la

francesa Lafarge han cerrado plantas productoras en muchos países europeos y han colocado plantas sucursales en los latinoamericanos o han comprado acciones de las empresas productoras de cada nación, lo que trae mejores beneficios y ganancias aún mayores.

Así es como Latinoamérica demanda y produce cemento. Ejemplos de lo anterior son Brasil y México, cuya situación actual es de competencia a nivel mundial, pues constituyen los mayores productores de la región. Todo esto se encuentra especificado por medio de cuadros y gráficos en los capítulos cuatro y cinco del trabajo.

Por su parte, la situación del cambio climático y la contribución a la destrucción de la capa de ozono de gases como el dióxido de carbono, provenientes de la fabricación de cemento debido a la producción de clínker, han sido temas de discusión en los últimos años. Ahora, las investigaciones están siendo enfocadas tanto en la búsqueda de un cemento con las características físicas, químicas y mecánicas ideales a menor costo como en uno amigable con el ambiente, para lo cual se ha tratado de disminuir la producción del clínker, que asciende a las millones de toneladas. Estas investigaciones se han centrado en sustituir en algún porcentaje al clínker por materiales cementicios suplementarios o reemplazar algún producto de hidratación del cemento, lo que creará nuevas reacciones que emitan menos gases perjudiciales para el ambiente.

1.7. Antecedentes nacionales

1.7.1. Análisis de la resistencia a la compresión de concretos y cementos hidráulicos costarricenses

En Costa Rica, la producción de cementos presenta una serie de características técnicas, lo cual deviene directamente de los procesos de fabricación, los métodos utilizados, las materias primas y los estándares de calidad necesarios para su distribución en el país; sin embargo, también existen limitaciones que se desprenden de la poca competitividad de fabricantes a nivel nacional.

La comercialización de cementos varía según el uso y la utilidad que estos tengan. Los cementos hidráulicos son parte de la gama de tecnologías empleadas actualmente en el

país, por lo que es imperativo conocer cuáles son las características específicas de cada uno para determinar de manera acertada los procesos de resistencia y la calidad de los concretos aplicados en las distintas obras civiles.

En su trabajo de investigación, Zúñiga (2020) menciona que la mayoría de los cementos hidráulicos comercializados en el país son combinados o mezclados, de manera que es fundamental investigar el comportamiento de cada tipo en términos mecánicos y sus efectos en el concreto y, además, realizar comparaciones entre los diferentes proveedores del mismo tipo. Además, se determina que los estudios acerca del comportamiento de dichos materiales deben realizarse con periodicidad, ya que las tecnologías de los cementos hidráulicos varían con el tiempo y pueden surgir cambios en la normativa nacional.

El marco normativo y técnico que establece la legislación costarricense respecto a los requisitos del cemento hidráulico fue un insumo importante para el abordaje de la investigación en curso, ya que permitió conocer de manera general algunas normas que deben cumplir los fabricantes de cemento. Asimismo, resultó esencial que los estudios en relación con los cementos se llevaran a cabo periódicamente y tomando en cuenta los múltiples factores que determinan la calidad de los cementos y los concretos en todo su complejo proceso de producción y aplicación. Al respecto, Zúñiga (2020) señala:

El estudio de los concretos debe realizarse de manera periódica, debido a que las características de los materiales utilizados en su fabricación pueden variar a través del tiempo y la fuente de origen también puede cambiar. Además, la tecnología de los cementos hidráulicos avanza con el tiempo en busca de mejoras en el desempeño del material, por lo que probablemente la proporción de materiales utilizados en la fabricación de los cementos está en constante cambio (p.3).

Es clara la importancia del estudio continuo con respecto a los cementos, ya que la fiscalización de la calidad depende en gran medida de las revisiones. La investigación de Zúñiga (2020) plantea un gran aporte, pues establece una serie de datos que sirvieron de referencia y, además, brinda todo un marco metodológico de mucha utilidad y aportes teóricos de uno de los tipos de cemento distribuidos a nivel nacional.

1.7.2. Resistencia frente a relación A/C del concreto a tres edades y con dos tipos de cemento (UG y MP-AR)

Conocer de manera profunda las características del cemento fabricado en Costa Rica es de gran importancia para su posterior abordaje teórico y práctico. Resulta esencial abordar el amplio espectro de condiciones que determinan los cementos, tanto su fabricación como todo su proceso de producción, transporte y aplicación, considerando las distintas técnicas que existen para este último punto. Valverde (2013) plantea su investigación desde la revisión del comportamiento del concreto por su misma aplicación, sin embargo, incluye una amplia gama de factores, que van desde la materia prima utilizada hasta rasgos específicos sobre los agregados y sus cantidades.

El estudio de Valverde (2013) muestra los resultados correspondientes al análisis del comportamiento de la resistencia con respecto a la relación A/C para concretos, utilizando cementos nacionales de tipo UG y MP-AR, así como dos clases de agregado fino, arena y polvo piedra, a las edades de 7, 28 y 56 días. Se emplearon las relaciones A/C de 0,55, 0,65, 0,75 y 0,85 debido a las limitaciones del trabajo. Dado que no se usaron aditivos bajo estas condiciones, fue imposible compactar correctamente las mezclas con una relación A/C menor a 0,55, mientras que las mezclas con relación A/C mayor a 0,85 se volvieron muy fluidas, lo que trajo como consecuencia su filtración en los moldes.

La revisión periódica de las condiciones que determinan la calidad del cemento en el país fue de gran relevancia y le aportó a la investigación insumos fundamentales, pues permitió tener un andamiaje sólido para su buen desarrollo y análisis. Otro punto importante es la correcta conceptualización de los términos y las pautas a la hora de investigar y profundizar sobre los aspectos técnicos de los materiales como el cemento o el concreto.

1.7.3. Resistencia del mortero hidráulico a cinco edades diferentes utilizando cinco tipos de cemento nacional

En este proyecto de investigación, Mora (2016) llevó a cabo una detallada revisión sobre el comportamiento de la resistencia a la compresión del mortero hidráulico utilizando

cemento de origen nacional (dos marcas), UG-AR (dos marcas) y MP (una marca), así como dos tipos de agregado fino (río y tajo). El objetivo era establecer un marco de conocimiento sólido acerca de cómo se comportan algunos concretos en el tiempo, un aspecto muy poco estudiado a nivel nacional e internacional.

Las dinámicas de los concretos y sus características permitieron rastrear las falencias o las fortalezas de estos mediante su fabricación y determinar el porqué de los problemas que presentan, es decir, la investigación fue un pilar fundamental a la hora de establecer y estructurar los avances en materia de durabilidad, calidad y seguridad.

Como en el mercado se encuentran diferentes tipos de arenas y cementos, estos llegan a desarrollar diferentes resistencias, pese a que la relación agua-cemento se mantenga constante. Por ello, resultó fundamental saber o desarrollar la correlación que se puede generar entre la relación agua-cemento y la resistencia, según los materiales a utilizar (Mora, 2016, p. 8).

La investigación se nutrió teóricamente de dichos proyectos realizados para conocer y mejorar cada detalle involucrado en los procesos del cemento y el concreto.

1.7.4. Desempeño del concreto permeable con sustitución parcial del material cementante por material vítreo y las variaciones del tipo de cemento hidráulico

En este trabajo se estudió el desempeño mecánico y permeable de cuatro concretos permeables diferentes. Para ello, se emplearon cuatro tipos de cemento hidráulico y una sustitución del 10 % de estos por vidrio molido. En los concretos permeables realizados se usó cemento Portland de tipo CP II F, CP II Z, CP IV y CP V, respectivamente, mientras que el vidrio era transparente de tipo soda-cal y poseía un tamaño de partícula de 75 μm . Este proyecto se efectuó en la Universidad Regional de Blumenau (FURB), Brasil, en alianza de investigación con el Tecnológico de Costa Rica (TEC), para lo cual se utilizó la metodología de dosificación de Nguyen (2014).

Una vez elaborados los concretos, se procedió a estudiar el comportamiento mecánico de la compresión de cilindros a flexión de prismas y el comportamiento permeable de placas. Los resultados demostraron que el concreto con mejor comportamiento mecánico

fue aquel en donde se utilizó CP V y 10 % de sustitución de vidrio molido, además, los cuatro concretos contaban con un coeficiente de permeabilidad estadísticamente igual.

Según los antecedentes tratados en la investigación actual, se aprecia que los estudios realizados lograron dar resultados positivos con respecto al desempeño mecánico del concreto hidráulico con sustitución parcial del cemento, lo cual impulsa a que más investigadores determinen las mezclas óptimas. Tal como indican Fernández Arrieta *et al.* (2010), a diferencia del concreto hidráulico convencional, el concreto permeable utiliza una proporción de los materiales de manera distinta, pues la cantidad de agregado fino disminuye considerablemente, incluso puede ser inexistente, y, por lo tanto, el resultado de la mezcla es un agregado grueso cubierto por la pasta. De esta manera, se aumentaron los espacios vacíos del producto, lo cual permitió obtener su característica principal: la permeabilidad.

Si bien es cierto que el concreto hidráulico permeable posee una baja resistencia a la compresión en comparación con el concreto hidráulico convencional, esto sucede porque los agregados y la pasta tienen una menor superficie de contacto y, en consecuencia, una menor cantidad de enlaces entre sus componentes. No obstante, además de su permeabilidad, este concreto hidráulico posee un menor peso unitario.

Esta investigación fue tomada como referencia sobre los materiales constructivos modernos empleados en la actualidad, de los cuales se ha probado su eficacia, durabilidad, entre otros factores importantes por considerar en el proyecto.

1.8. Alcances

- Deducir las diferencias y las características del concreto realizado con distintas marcas de cemento.
- Indicar las características específicas de producción, homogeneidad, calidad y funcionalidad de las tres marcas de cemento que se distribuyen en el país.
- Comparar las características en términos técnicos.

1.9. Limitaciones

- No se realizaron planos constructivos por el tiempo en que se debía llevar a cabo la investigación.
- No se estudiaron detalles de la hidrología subterránea de la construcción.
- No se hicieron comentarios negativos sobre ninguna empresa o institución.

Capítulo II: Marco teórico

La importancia de la investigación en materiales de construcción se ha intensificado en los últimos años, pues es imperativo adaptar cada vez mejor los elementos y los componentes a las distintas necesidades a las que son sometidos constantemente, además, de mejorar sus propiedades y disminuir sus costos de producción y fabricación. De esta forma, el objetivo es maximizar los estándares de calidad y adaptabilidad del cemento según las condiciones exógenas en las cuales se aplique. La historia del cemento presenta una serie de cambios técnicos y características que han buscado su continuo mejoramiento. En Costa Rica, dicha industria se ha concentrado en pocos consorcios y empresas que han monopolizado el mercado interno.

Para determinar la influencia de las distintas tecnologías se realizó una revisión teórica bibliográfica sobre las principales características históricas de los cementos en Costa Rica, los cuales se han empleado en las distintas obras de infraestructura civil a nivel nacional. Además, se hizo una comparación entre las múltiples aristas que intervienen en la estructura técnica de los cementos en el país. A continuación, se presentan una serie de elementos teóricos que brindan sustento a la investigación.

2.1. Historia cementera de Costa Rica

En 1949 se abrió un concurso para la construcción de la primera planta de fabricación de cemento del país, pero fue declarado sin lugar por el Gobierno debido a la poca certeza de los estudios de factibilidad. En 1955, un nuevo concurso fue abierto, en donde participaron diez compañías, pero nuevamente resultó pronunciado desierto. Luego, en 1957, la historia se repitió por tercera vez, cuando un nuevo anuncio publicado por el INVU y El Ferrocarril también fue fallido. Para ese momento, parecía que la construcción de una planta productora de cemento nacional no llegaría a concretarse.

Sin embargo, en 1960, la unión de siete empresas para ganar la licitación dio origen a lo que hoy es Holcim Costa Rica. Después de varios intentos fallidos de algunas empresas, un grupo de costarricenses presentó al Gobierno un proyecto para la construcción de la

planta y, de ahí, la generación de muchos beneficios al país. En aquel momento, El Salvador, Guatemala y Nicaragua ya contaban con su propia planta y estaba en construcción la planta de Honduras, lo que reflejaba el crecimiento de este tipo de industria en Centroamérica. Entonces, Costa Rica era el único país del istmo sin su propia planta, a pesar de que datos del informe de la Comisión Económica para América Latina (Cepal) de 1955 demostraban que el consumo de cemento per cápita era mayor que en cualquiera de los otros países centroamericanos, de manera que se estaba produciendo una pérdida de más de un millón de dólares anuales producto de las importaciones de cemento.

Así, el 17 de abril de 1961, el Estado declaró abierto el concurso para la licitación de la construcción de una planta destinada a la producción de cemento, mientras que el contrato de dicha construcción fue firmado entre el Gobierno de la República y la Industria Nacional de Cemento S.A. el 29 de agosto de 1961, para luego ser legitimado por la Asamblea Legislativa el 14 de noviembre de 1961. Después de la firma de este contrato, se contaba con dos posibles ubicaciones para la construcción de la planta: Cartago y Barranca de Puntarenas. La primera siempre fue considerada como el sitio ideal debido a sus grandes yacimientos de piedra caliza (materia prima básica para la fabricación de clínker), la cercanía a las principales vías de comunicación y el acceso al Valle Central.

Así, en 1962, se inició la obra de construcción de la planta de producción de Cementos Incsa, ahora llamada Holcim Costa Rica, en Agua Caliente de Cartago, y se formó la sociedad entre 2 300 accionistas costarricenses y el consorcio suizo Holderbank, hoy Holcim Ltda., el cual aportó parte de los recursos necesarios para el arranque de la obra. El consorcio Holcim es una sociedad domiciliada en Suiza y, en la actualidad, se ha convertido en el mayor productor de cemento del mundo. Esta asociación le ha permitido a Holcim tener acceso a tecnologías de producción y herramientas de administración avanzadas, lo cual ha significado el logro de altos niveles de eficiencia en la fabricación del cemento.

En Costa Rica, la producción de cementos ha presentado una serie de características particulares debido a su dinámica en cuanto a la explotación y la comercialización. Además, el marco jurídico nacional ha determinado en gran parte la apertura comercial

de dicho producto durante décadas, favoreciendo en demasía a las pocas empresas que producen en el país. Al respecto, el Ministerio de Economía, Industria y Comercio (2015) señala:

En Costa Rica, el mercado del cemento se caracteriza por una estructura duopólica, con, al menos, un 98% del mercado en manos de dos empresas: Cemex y Holcim. Ambas se distribuyen el mercado, con una fuerte integración vertical que les permite tener participación en toda la cadena de valor, desde la producción hasta la comercialización. Adicionalmente, un estudio de la COPROCOM advierte que el costo de producción respecto al precio de venta alcanza una diferencia de 142% (p.1).

Con la emisión de un reglamento técnico en el 2005, estas dos empresas y el Instituto Costarricense del Cemento y Concreto firmaron un acuerdo con el MEIC sobre seis barreras de mercado, las cuales no contaban con un sustento técnico real y mucho menos estudios que las validaran. Dichas barreras consistían en un “empaque de 50 kilos; comercialización de cemento a granel el mismo día de producción; comercialización dentro de los 45 días siguientes a la fecha de empaque” (MEIC, 2015); esta última con un gran beneficio para acaparar casi la totalidad del mercado interno, ya que prácticamente imposibilitaba la importación de cemento del mercado internacional, lo que, a su vez, provocaba la inflación de los precios bajo un duopolio y una competencia interna por poco inexistente. Además, mediante el reglamento, se estableció la creación de un registro de importadores que exigía la adopción de requerimientos químicos para cementos hidráulicos, en donde se definía la lista de metales pesados y el pago de una garantía por parte de los importadores.

Las rígidas dinámicas y las normas comerciales en relación con la comercialización del cemento en el país conllevaron a una serie de características que permearon no solo en su precio y distribución, sino también en algunas de las especificaciones y las limitaciones técnicas que presentaba el cemento a nivel nacional. El cambio respecto a las normas implementadas en el 2015 generó un mercado más competitivo y la introducción de cementos procedentes de otros países, especialmente chinos. Salazar (2017) menciona que “la fuerte tendencia de aumento ocurre desde el 2015, cuando el Ministerio de

Economía Industria y Comercio (MEIC) transformó los reglamentos de cementos hidráulicos, para flexibilizar el plazo de comercialización y las condiciones de almacenamiento, entre otros aspectos” (p. 1).

El Ministerio de Economía, Industria y Comercio estableció los alcances y los objetivos de las modificaciones al Reglamento Técnico de Cemento, mediante los cuales se buscaba reducir los obstáculos técnicos al comercio de este producto en el mercado nacional, instaurando una serie nueva de requerimientos técnicos basados en estudios y evaluaciones de otros países como EE. UU., Chile, Perú, México y la región centroamericana, que en su normativa no definen “un plazo de vencimiento o de comercialización, sino únicamente señalan la fecha de empaque y las condiciones de almacenamiento que se deben seguir” (CentralAmericaData, 2015).

Estas modificaciones se dispusieron con los lineamientos estandarizados de que el productor o el importador es responsable de conocer, a través de los respectivos estudios técnicos, el tiempo de duración que puede tener el cemento respecto a los métodos de empacamiento, traslado y almacenaje. Al respecto, CentralAmericaData (2015) menciona lo siguiente:

Otro de los cambios que se incorpora es la eliminación del peso máximo de 50 kg por empaque, ya que esta condición no debe incluirse en un reglamento técnico, ya que se encuentra regulada por el artículo 18 del Decreto Ejecutivo No. 25235-MTSS “Reglamento de Seguridad en Construcciones”, en el que se establecen las condiciones que deben imperar para el levantamiento y transporte de cargas del trabajador. A la vez se eliminó la limitación en la comercialización del cemento a granel que obligaba a comercializarlo el mismo día de la producción, con lo cual se hacía imposible su importación. Esta reforma entra en vigencia una vez publicada en el Diario Oficial La Gaceta. No obstante, se concederá un plazo de tres meses a partir de esta publicación, para que los productos que se están comercializando actualmente en el mercado, ajusten su etiqueta.

A su vez, estos cambios produjeron una serie de reformas en un corto plazo, que respondían a las nuevas tendencias del desarrollo a nivel nacional e internacional, según lo afirma Cubillo (2018):

La industria cementera de Costa Rica ha experimentado cambios en los últimos años. Desde una nueva normativa del cemento, hasta el compromiso que adquirieron de disminuir lo más posible la huella de carbono, son parte de ese paso hacia adelante que ha dado la producción del cemento y concreto en el país (p. 1).

Además, Campos (2018), mencionada por Cubillo (2018) establece:

La industria ha cambiado en el proceso constructivo, las metas en la reducción de la huella de carbono son importantes, eso hace que no solamente se trabaje con combustibles fósiles normales, sino que haya iniciado todos los procesos de eco generación, Costa Rica ha trabajado en esto y en la sustitución del Clinker, hasta donde se puede porque no nos es posible sustituirlo en su totalidad (p. 2).

2.2. Desarrollo tecnológico

El desarrollo tecnológico evidenciado en la producción y la elaboración del cemento para sus varios usos, ya sea a nivel industrial, urbanístico o en las distintas obras de civiles, también ha sido tangible mediante los estudios y las tecnologías utilizadas durante su proceso de elaboración. Estos estudios y tecnologías buscan adaptarse a las necesidades y las exigencias de los mercados no solo respecto estándares de calidad y su adecuación a las distintas características de las obras, sino, además, en materia ambiental y la sostenibilidad que amerita el contexto mundial y ambiental actual, lo que los convierte en un eje central de la industria cementera y el desarrollo sostenible. Al respecto, Proarquitectura (2016) señala lo siguiente:

El cemento está considerado como uno de los materiales prioritarios de la construcción, el cual se utiliza para viviendas, edificios, puentes y todo tipo de construcciones. Actualmente, la industria cementera trabaja en la dirección del desarrollo sostenible, donde se requiere de una visión a largo plazo, que obligue a las empresas a centrarse en preservar la calidad de vida, lo que significa respetar las necesidades humanas y los ecosistemas, tanto locales como globales. Con ello, y gracias al fin de la crisis en el sector, buscan seguir siendo un referente

internacional en la aplicación de las mejores técnicas disponibles y en el desarrollo de productos innovadores para compatibilizar su evolución con el desarrollo sostenible (p. 1).

Dentro de procesos como la globalización, la industria del cemento se ha ido posicionando mediante la incorporación de nuevas técnicas y tecnologías, las cuales han abierto el espectro de su producción según las necesidades actuales nacionales e internacionales, adaptándose al contexto y el entorno ambiental actual. Ortiz (2017) establece:

Esta industria no es ajena a los nuevos desarrollos tecnológicos, a la digitalización y a la globalización, que desde el sector se abordan de manera decidida y con una clara visión a largo plazo. La industria del cemento quiere ser competitiva y sostenible a efectos de poder generar para nuestra sociedad los materiales de construcción de alta calidad y eficiencia que necesita y seguir creando empleo estable y de muy valiosa cualificación. Nuestro sector aspira a situarse a la vanguardia de la tecnología, con la innovación y la eficiencia como claves del modelo industrial sectorial. Aunque queda mucho por hacer, hace ya varios años que las empresas cementeras iniciaron su andadura para acometer la transformación digital y su integración global a lo largo de su cadena de valor, coordinando, conectando y optimizando la relación de todos los actores que componen su ecosistema industrial (p. 5).

De acuerdo con Ortiz (2017), la conectividad está transformando la industria cementera, la cual “viene impulsada por el procesamiento de datos en masa, la capacidad de conexión en tiempo real, la producción personalizada bajo demanda y un referencial de fábricas inteligentes” (p. 5). Este nuevo desarrollo apunta hacia la automatización de la producción y su inevitable optimización en el uso de energía, materias primas y cadenas de producción, con el objetivo de mejorar los “flujos de información con una mayor eficiencia para generar soluciones para la construcción que respondan a las demandas de la sociedad del siglo XXI, con altas prestaciones y con un mayor valor añadido de prestaciones técnicas y contribución ambiental” (Ortiz, 2017. p. 5). Además, dicho autor agrega lo siguiente:

Una industria centenaria como la del cemento ha sido protagonista de las revoluciones industriales anteriores, desde el uso de la energía de vapor, pasando por el de la energía eléctrica y la posterior incorporación de las tecnologías de la automatización y de la información. Hoy en día, en un contexto de disrupción tecnológica permanente sin precedentes que constituye el germen de la actual revolución digital, la industria del cemento quiere mostrar su capacidad y disposición para acometer esta nueva transformación, acogiendo nuevos sistemas como el procesamiento de datos en masa, la capacidad de conexión en tiempo real, la producción personalizada bajo demanda y un referencial de fábricas inteligentes (p. 6).

Dentro de un contexto que exige la adaptación de los modelos de producción debido al evidente impacto ambiental y la pérdida acelerada de los recursos naturales, la sociedad y la industria han cambiado profundamente conforme a los nuevos escenarios tecnológicos e industriales. Ortiz (2017) menciona que “el mundo afronta retos de impacto global como el deterioro ambiental, la escasez de recursos naturales y los cambios demográficos, que nos afectan a todos y como no, también a la industria” (p. 6). La rapidez y la versatilidad con la cual la industria de cemento ha ido cambiando responde la modernización a nivel mundial y las modificaciones impulsadas por las tecnologías: “Al mismo tiempo, la competencia aumenta en un mercado global imponiendo retos añadidos de mayor eficiencia y competitividad” (Ortiz, 2017, p. 7).

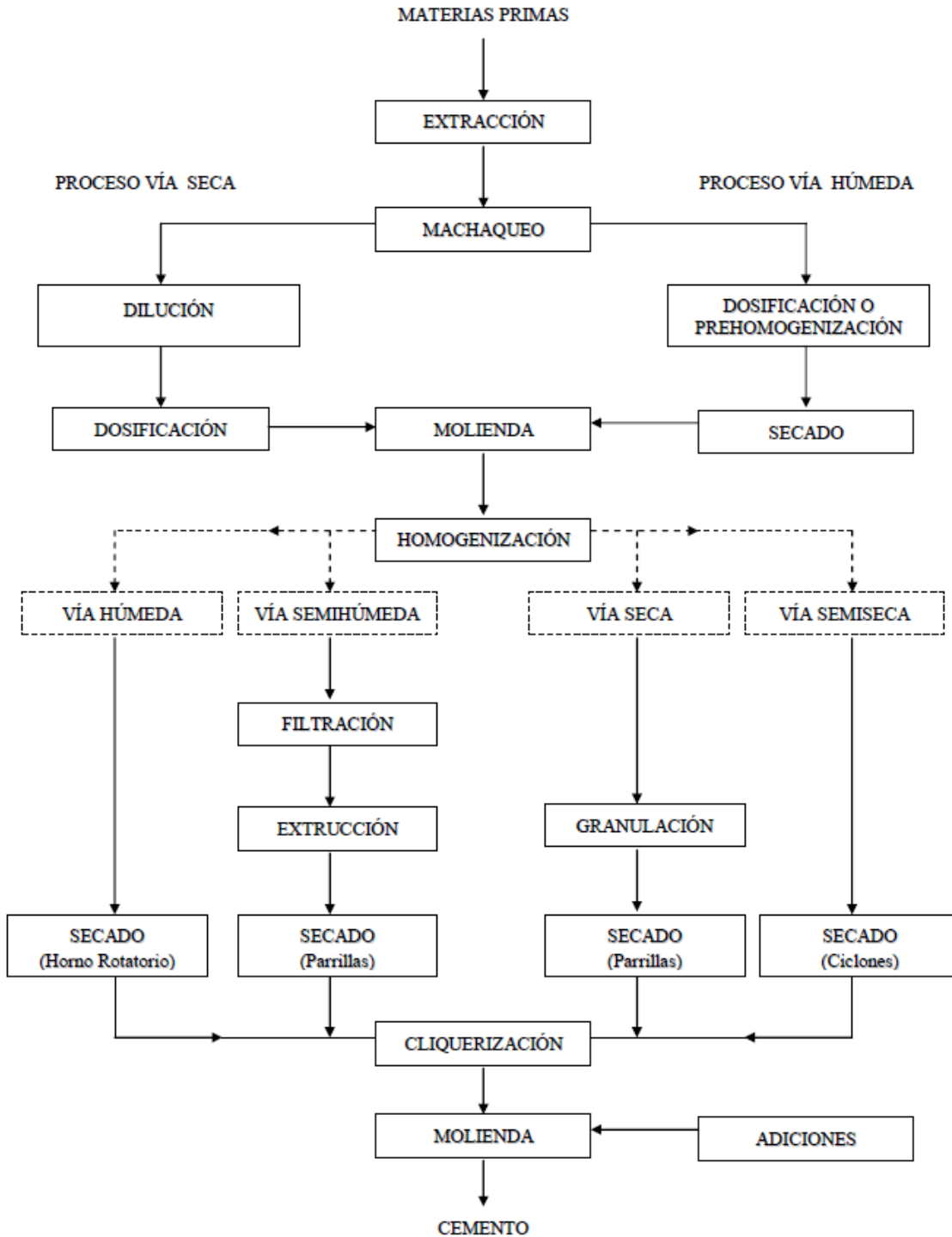
La digitalización de los procesos de producción y comercialización jugará un papel clave en la búsqueda y desarrollo de soluciones a esos retos desde el punto de vista industrial. Representa por ello el medio más eficaz para mantener y expandir una base de producción sólida que ha empezado ya a acometer los retos de la industria conectada. Retrasar la puesta en marcha de esta transformación podría tener muy graves consecuencias; más aun teniendo en cuenta que los principales indicadores anticipados proyectan un mundo muy diferente del actual, con unos cambios en los mercados que se están acelerando (Ortiz, 2017, p. 7).

El proceso de producción del cemento pasa por una serie de etapas que son de suma importancia. Cada uno de sus elementos atraviesa complejas estructuras industriales que

han ido cambiando conforme a las tecnologías empleadas y los avances en aspectos técnicos. En el siguiente diagrama se logran visualizar dichas etapas de manera general.

Figura 1

Materias primas



Nota. Tomado de Campos et al. (2017). *Ahorro de Energía en la Industria del Cemento.* UPME.

Actualmente, la industria cementera busca seguir los criterios de desarrollo sostenible, lo que requiere trabajar de cara al futuro y que las empresas se centren en preservar la calidad de vida, respetando las necesidades humanas y los ecosistemas, tanto locales como globales.

2.3. Producción nacional de cemento

2.3.1 Tipos de productos

El cemento es un reactivo hidráulico producido con materiales como caliza y arcillas, cuya composición química debe ser controlada. El crudo, combinación de estos materiales calcáreos y arcillosos, se funde a 1 400 grados centígrados para generar el clínker, el cual es la base para la producción del cemento. El clínker es combinado con aditivos — entre ellos, el yeso y la puzolana— para dar como resultado el bien conocido cemento Portland.

En la actualidad, la producción de cementos compuestos (variaciones del cemento Portland) se ha diversificado por las exigencias de los clientes. De tal manera, Holcim Costa Rica se ha visto en la tarea de fabricar diversos tipos de cemento para sus clientes, manteniendo estándares de calidad y servicio. Los tipos de cemento que produce Holcim Costa Rica S.A. son:

- Portland tipo I (MP): este cemento se utiliza en forma generalizada para la confección de concretos y morteros.
- Portland de alta resistencia: es un cemento diseñado para generar concretos de alta resistencia inicial y final.
- Concremix: es un concreto seco hecho a partir de la mezcla de arena y piedra producto de la trituración de las calizas, así como cemento de óptima calidad. El Concremix se produce bajo la norma ASTM C 387.
- Pegamix: es un mortero para el cual se mezclan técnicamente arena, producto de la manufactura de calizas, y cemento de óptima calidad. El Pegamix se fabrica bajo la norma ASTM C387-N.

- Carboazul: es una enmienda en forma de polvo finamente molido de coloración blanco-hueso, que ayuda a mejorar los procesos químicos, físicos y microbiológicos del suelo.
- Portland 1P ASTM C595: por sus características, este cemento es ideal para las aplicaciones de concreto en zonas costeras, lugares de contacto con aguas y suelos ácidos, plantas de tratamiento, zonas industriales, pavimentos de alto tránsito, etc.

2.3.2 Cemento

Según el MOPT (2010), en el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010), el cemento, al entrar en contacto con el agua, forma la pasta cementante, la cual se endurece a causa de la reacción química que se provoca. De acuerdo con el CR-2010, el cemento hidráulico debe cumplir con la norma AASHTO M 85, como se muestra en el siguiente cuadro 1.

Cuadro 1

Especificaciones para el cemento hidráulico

Tipo	Especificación
Cemento Portland, tipo I, II, o V	AASHTO M 85
Cemento hidráulico, mezclado, tipo IS, IP, P.	AASHTO M 240
Cemento de mampostería	ASTM C 91

Nota. Tomado del *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes* (2010, p. 647, tabla 701-1).

Es importante tomar en cuenta que el Reglamento Técnico para Cementos Hidráulicos, RTCR 383: 2004 Cementos Hidráulicos es la norma que se debe cumplir en cuanto a la calidad de los cementos utilizados en el país. En este reglamento se instaura la

comercialización de cementos con la calidad necesaria para el uso humano, así como se establecen parámetros y especificaciones de calidad de los cementos hidráulicos y sus componentes, sean estos producidos dentro del territorio nacional o fuera de él.

El cemento hidráulico es un material inorgánico finamente molido que, al mezclarse con agua, forma una pasta que se fragua y se endurece debido a la reacción química generada con la hidratación; una vez que se ha endurecido, este conserva su estabilidad y su resistencia. Dicho material se compone de clínker y sulfato de calcio, también conocido como yeso (Inteco, 2018).

Asimismo, Kosmatka y Wilson (2011) indican:

La reacción química de hidratación comienza tan pronto como el cemento entra en contacto con el agua. Cada partícula de cemento forma una capa fibrosa en su superficie que se extiende gradualmente hasta enlazarse con otras capas o se adhiere a sustancias adyacentes. Esta acumulación fibrosa resulta en rigidez progresiva, endurecimiento y desarrollo de resistencia (p. 9).

Por ello, esta red de cristales o red fibrosa continúa formándose a través del tiempo, mientras aún se encuentre presente el cemento no hidratado y haya condiciones favorables de humedad y temperatura.

2.3.3 Cemento hidráulico Portland

Según Zúñiga (2020), el cemento hidráulico es el más básico y puro, ya que no tiene materiales adicionales (aditivos). Este se compone principalmente de silicatos de calcio, los cuales favorecen el proceso de ganancia de resistencia. A manera de resumen, este autor menciona los pasos para la manufactura del cemento Portland:

- Para la obtención del clínker la materia prima suele ser rocas calizas, esquisto, arcillas o mineral de hierro, estos se trituran reduciendo su tamaño hasta 125 mm.
- Luego se vuelve a triturar hasta un tamaño de 20 mm y se almacenan por separado.

- Posteriormente se dosifican de acuerdo con el requerimiento y se vuelven a triturar hasta hacerlas un polvo fino y se mezcla.
- Luego se lleva a la calcinación a unos 1500°C en hornos rotatorios donde las materias primas se transforman químicamente en el clínker.
- Al enfriarse el clínker se muele junto con el yeso para convertirlo en Cemento Portland. Los cementos Portland son manufacturados para cumplir con las especificaciones de ASTM C150. Esta norma abarca los siguientes tipos de cemento Portland (p. 7).

Los cementos Portland son manufacturados para cumplir con las especificaciones de ASTM C150. Esta norma abarca los siguientes tipos de cemento Portland:

Cuadro 2

Tipos de cemento Portland para manufactura

Tipos de cemento Portland	
Tipo	Designación
Tipo I	Normal
Tipo IA	Normal con aire incluido
Tipo II	Moderada resistencia a los sulfatos
Tipo IIA	Moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido
Tipo II (MH)	Moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos
Tipo II (MH)A	Moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido
Tipo III	Alta resistencia inicial
Tipo IIIA	Alta resistencia inicial con aire incluido
Tipo IV	Bajo calor de hidratación
Tipo V	Alta resistencia a los sulfatos

Nota. Tomado de *Design and Control of Concrete Mixtures* (2011), citado por Zúñiga (2020).

2.3.4 Cementos hidráulicos combinados o adicionados

Este tipo de cementos hidráulicos son producidos mediante la trituración uniforme y conjunta o por la mezcla de dos o más clases de materiales finos. Según Portland Cement Association (PCA), los materiales de adición generalmente usados son cemento Portland, cemento de escoria, cenizas volantes, humo de sílice, arcilla calcinada, otros materiales puzolánicos, cal hidratada y combinaciones premezcladas de estos materiales (Kosmatka y Wilson, 2011).

En Costa Rica, los cementos hidráulicos más utilizados y producidos son adicionados. Los cementos hidráulicos adicionados deben cumplir con los requerimientos de las normas ASTM C595 (Especificación Estándar para Cementos Hidráulicos Combinados) o ASTM C1157 (Especificación Estándar de Desempeño para Cementos Hidráulicos).

Cuadro 3

Tipos de cementos hidráulicos aprobados por la normativa costarricense

Tipo	Designación
Tipo I	Cemento Portland ordinario
Tipo ME	Cemento hidráulico modificado con escoria de alto horno
Tipo MF	Cemento hidráulico modificado con humo de sílice
Tipo MP	Cemento hidráulico modificado con puzolana, ceniza volante o esquisto
Tipo MC	Cemento hidráulico modificado con caliza
Tipo MM	Cemento hidráulico modificado mixto

Nota. Tomado de INTE C147:2018.

2.3.5 Componentes de los cementos hidráulicos adicionados

La norma costarricense INTE C147:2018 (anteriormente INTE 06-11-15:2015) especifica cuáles son los componentes que pueden utilizarse en la fabricación de los cementos adicionados. Dichos componentes se detallan a continuación.

Clinker de cemento Portland

Material hidráulico que debe estar constituido, en al menos dos tercios de su masa, por silicatos de calcio (C3S y C2S) y el resto por fases del clinker, que contengan aluminio, hierro, entre otros. Dentro de los compuestos principales del clinker están los siguientes:

- Silicato tricálcico (C3S): también llamado “alita”. Este se hidrata y se endurece rápidamente y es en gran parte responsable del fraguado y la resistencia iniciales de la pasta de cemento hidráulico. En general, la resistencia inicial del concreto del cemento hidráulico es mayor con mayores porcentajes de C3S.
- Silicato dicálcico (C2S): es conocido como “belita”. Este se hidrata y se endurece lentamente y contribuye en gran medida al aumento de la resistencia a edades superiores a una semana, por lo que se encarga de la resistencia final a la pasta del cemento hidráulico.
- Aluminoferrita tetracálcica (C4AF): es producto del uso de materias primas de hierro y aluminio para reducir la temperatura durante la fabricación del cemento. Contribuye poco o en ninguna medida al desarrollo de resistencia y brinda el característico color gris.
- Aluminato tricálcico (C3A) es el que genera más calor de hidratación, da mayor velocidad de fraguado y produce variaciones de volumen del cemento hidráulico.
- Sulfato de calcio (CaSO₄): también llamado yeso, se agrega al cemento en la molienda final para que reaccione con el aluminato tricálcico (C3A) y así formar etringita. El sulfato de calcio controla la hidratación del C3A para que el cemento no fragüe demasiado rápido. Ayuda a controlar la contracción por secado (Kosmatka y Wilson, 2011).

Escoria granulada de alto horno

Es el material vítreo formado a partir de la escoria fundida generada en altos hornos como subproducto del hierro utilizado en la fabricación del acero. Según la norma INTE C147, esta debe estar constituida, en al menos dos tercios de su masa, por la suma de óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO) y dióxido de silicio (SiO₂). El resto de su masa contiene óxido de aluminio (Al₂O₃) y pequeñas cantidades de otros compuestos.

Materiales puzolánicos

De acuerdo con Kosmatka y Wilson (2011), los materiales puzolánicos se producen a partir de depósitos minerales naturales. Algunos requieren tratamiento térmico para convertirse en material puzolánico y otros, como las cenizas volcánicas, necesitan un procesamiento mínimo. En Costa Rica existen puzolanas naturales, puzolanas naturales calcinadas, cenizas volantes síliceas o cenizas volantes calcáreas y esquistos calcinados.

Las características y la composición del material puzolánico deben ser las establecidas en la Tabla 2 de la norma INTE C147:2018 para los cementos tipo MP (modificado con puzolana) y MM (modificado mixto). En Norteamérica, estos materiales “han sido utilizados para controlar el aumento de calor, mejorar la resistencia al ataque de sulfatos y mitigar la reacción álcali-sílice” (Kosmatka y Wilson, 2011, p. 71).

Caliza

La caliza es beneficiosa debido a que cumple una función de relleno, al completar la fracción más fina de la granulometría del cemento sin aumentar la cantidad necesaria de agua, lo cual ocasiona una especie de bloqueo de los poros capilares en la matriz (Díaz *et al.*, 2013). En Costa Rica, la caliza debe seguir los requisitos mostrados en la tabla 2 de la norma INTE C147:2018.

Humo de sílice

El humo de sílice es la sílice no cristalina ultrafina producida en hornos de arco eléctrico como subproducto industrial de metales de silicio. Este se utiliza en aplicaciones donde se necesita un alto grado impermeabilidad y también en concreto de alta resistencia

(Kosmatka y Wilson, 2011). A nivel nacional, las propiedades químicas y físicas del humo de sílice deben ser las establecidas en la norma INTE C279, la cual es equivalente a la ASTM C1240 (Especificación Estándar para Humo de Sílice utilizado en Mezclas Cementantes).

Agregados

Son aquellos materiales inertes, de forma angular, naturales o artificiales, que — aglomerados por el cemento hidráulico en presencia de agua— forman un material compacto, que puede ser mortero o concreto (Rivera, 2006). Según lo señalan Kosmatka y Wilson (2011), los agregados constituyen de un 60 % a 75 % del volumen del concreto y tienen influencia en las propiedades, tanto en estado fresco como endurecido, y la economía de las mezclas.

Agregado grueso

Esta clasificación se da según la granulometría del material. En este caso, el agregado grueso son aquellas partículas que tienen un tamaño superior a 4,75 mm (tamiz no. 4). Comúnmente, se le conoce como piedra o roca. Algunas de sus características más importantes y con mayor influencia en las mezclas del concreto hidráulico son: origen, porcentaje de absorción, granulometría, tamaño máximo, contenido de finos, pérdida por abrasión y textura superficial (Chan *et al.*, 2003; Kosmatka y Wilson, 2011; Xu *et al.*, 2020).

Agregado fino

El agregado fino son aquellas partículas de tamaño inferior a 4,75 mm (tamiz no. 4) y no menor de 0,075 mm (tamiz no. 200). Este es usualmente nombrado arena. Algunas de sus características más importantes y con mayor influencia en las mezclas del concreto hidráulico son: origen, absorción, granulometría, módulo de finura, cantidad de material más fino que el tamiz no. 200 y porcentaje de materia orgánica (Chan *et al.*, 2003; Guerrero Sánchez y Hoyos Muñoz, 2020).

Arena de sílice

Según la especificación ASTM C778-17, esta es definida como una “arena de sílice compuesta casi en su totalidad por granos naturalmente redondeados de cuarzo casi puro, utilizada para preparar morteros en el ensayo de cementos hidráulicos”.

2.3.6 Control de calidad

Brenes y Ugalde (2020) mencionan que los concretos hechos en obra debe ser evaluados para garantizar el buen funcionamiento del material, más aún cuando este tiene fines estructurales como vigas, columnas, cimientos, placas de fundación, pavimentos, losas de entresijos, etc. Una forma de verificar el cumplimiento de los requisitos mínimos de la resistencia es mediante pruebas de falla a la compresión y la comparación de los valores obtenidos con la norma. En Costa Rica, la normativa que rige los requerimientos del concreto es el Código Sísmico, en donde se especifica que “la resistencia mínima especificada del concreto en compresión debe ser 210 kg/cm^2 ”.

El CFIA y el ICCYC se han dado a la tarea de realizar este control de calidad de los concretos hechos en obra a lo largo del país, específicamente en las regiones con un crecimiento considerable respecto a años anteriores. Desde el 2005, estos estudios se han efectuado en la GAM, Guanacaste, Pacífico Central y San Carlos, lo que ha permitido obtener resultados representativos de la calidad de las viviendas de concreto del país.

2.3.7 Diseño de mezcla según ACI 211.1

El ACI 211.1-91 (reaprobado en 2002) se denomina Práctica Estándar para la Selección de Proporciones para Concreto Normal, Pesado y Masivo. Esta práctica describe el procedimiento para concretos de cemento hidráulico fabricados con o sin otros materiales cementantes y adiciones químicas. Los cementos hidráulicos a los que se refiere son los cubiertos por las normas ASTM C150 (cementos Portland) y la ASTM C595 (cementos adicionados). Cabe destacar que no se mencionan los cementos cubiertos por la norma ASTM C1157, la cual contiene las equivalencias de los cementos costarricenses.

En la sección de anexos se muestra un cuadro con las equivalencias de los cementos de producción nacional con los cementos que establece la ASTM. Este método provee una primera aproximación de las proporciones revisadas mediante los lotes de prueba en el laboratorio o el campo, que se ajustan según sea necesario, para así producir las características deseadas del concreto hidráulico. De igual forma, cuando se utilizan aditivos químicos u otros materiales distintos del cemento, el concreto reproporcionado debe verificarse mediante lotes de prueba en el laboratorio o el campo.

Por su parte, Solano (2003) menciona que dentro de esta clasificación del ACI se encuentran los concretos que emplean agregados de peso normal y pesado, también se incluye el concreto masivo. El ACI 211.1 da las pautas a seguir para las proporciones de las mezclas destinadas a estos tipos de concreto.

Concreto normal

Son los concretos que emplean agregados gruesos de peso normal. Se trata del tipo de concreto de mayor empleo en la industria de la construcción. Los pesos unitarios de estos agregados gruesos son del orden de 1 440 a 1 760 kg/m³ y la densidad del concreto es de 2 200 a 2 530 kg/m³, dependiendo del tamaño máximo del agregado empleado y la cantidad de aire (Solano, 2003).

Concreto pesado

Es el concreto en el que se emplean agregados pesados como el mineral hierro, la barita, troquelados de hierro, etc. Los valores de la gravedad específica de los agregados gruesos varían entre 3,4 a 7,5 y, a partir de estos, se pueden obtener pesos del concreto de hasta 5 600 kg/m³. El concreto pesado es empleado principalmente en reactores nucleares e instalaciones similares cuando se requiere la protección de rayos gamma y rayos X (Solano, 2003).

Concreto masivo

Es el concreto que, por su volumen de colocación, es suficientemente grande. Además, este amerita que se tomen medidas para controlar la generación del calor durante la hidratación del cemento y el consiguiente cambio volumétrico por pérdida de agua, con el fin de reducir al máximo el agrietamiento. Es posible utilizar agregados de tamaño

máximo hasta de 15,2 cm (6”), pero no es necesario que sean concretos con agregados de tamaño grande. Dicho tipo de concreto no solo se aplica a estructuras masivas de presas o cimentaciones, sino que hay estructuras grandes que pueden ser de gran masa, por lo que la generación de calor de hidratación resulta importante. Estos concretos se deben diseñar como concreto masivo (Solano, 2003).

Concreto ACI 211.2

En esta clasificación se encuentra únicamente el concreto confeccionado con agregados de peso liviano, que se denomina concreto estructural liviano. En dicho apartado de ACI se desarrolla el método de diseño para este tipo de concreto (Solano, 2003).

2.3.8 Normativa costarricense

El Reglamento Técnico de Costa Rica 383 define los requerimientos en cuanto a la calidad del cemento en el país, mientras que el CR-2010 establece los siguientes límites (MOPT, 2010):

Cuadro 4

Requerimientos químicos para el cemento a utilizar en la mezcla de concreto

Componentes del cemento	Especificación CR- 2010	Especificación RTCR 383
MgO	6 % máx.	6 % máx.
SO ₃	3,5	4 % máx.
Residuo insoluble	0,75 % máx.	
Pérdida por ignición	3 % máx.	

Nota. Tomado del *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR 2010).*

Cuadro 5

Requerimientos físicos para el cemento Portland tipo 1

Propiedades físicas del concreto	Especificación CR-2010	Especificación RTCR 383
Contenido de aire	12 % máx.	12 % máx.
Finura	260 m ² /kg	
Expansión autoclave	0,8 % máx.	0,8 % máx.
Compresión 24 horas	12 min.	10 min.
Compresión 3 días	24 mín.	17 min.
Tiempo de fraguado	375-420 máx.	45-420

Nota. Tomado del *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR 2010)*.

2.3.9 Reglamento Técnico: RTCR 479:2015

El Reglamento Técnico RTCR 479:2015: Materiales de la Construcción. Cementos Hidráulicos tiene como objetivo establecer el procedimiento de evaluación de la conformidad para evaluar y controlar la calidad de los cementos hidráulicos producidos localmente o importados. En este se declara que el ECA (Ente Costarricense de Acreditación) es quien respalda la veracidad de los resultados de calidad de los ensayos realizados a los cementos hidráulicos que deseen ser comercializados en Costa Rica. Además, se señalan los requisitos químicos y mecánicos que deben cumplir con la norma INTE 06-11-15:2015.

2.3.10 INTE C147:2018

Inteco es el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica, asociación privada y sin fines de lucro creada en 1987. La Ley No. 8279 lo reconoce como el Ente Nacional de Normalización, por lo que también es el encargado de generar la normativa

correspondiente a nivel nacional en el ámbito de la construcción. En relación con los cementos hidráulicos, en el 2015, esta institución publicó la norma INTE-06- 11-15:2015, denominada Cemento Hidráulico. Especificaciones y Requisitos, la cual actualmente ha sido sustituida por la versión vigente: INTE C147:2018 Cemento Hidráulico. Requisitos.

Su objetivo es definir los parámetros y las especificaciones de calidad de los cementos hidráulicos y sus componentes, los cuales normalmente se usan en el territorio nacional, sean producidos localmente o importados. Asimismo, se establece la clasificación de dichos cementos por tipo con sus respectivas especificaciones. Esta norma no aplica para cementos sulfoaluminados ni cementos petroleros (Inteco, 2018, p. 4).

Como se mencionó antes, esta norma cambió su código a INTE C147:2018, que corresponde a su versión vigente, sin embargo, ya que el reglamento RTCR 479:2015 menciona el código anterior de dicha norma, muchos de los proveedores a nivel nacional continúan utilizando la versión anterior, pues, en esencia, cumple el mismo objetivo de la designación actual.

La composición típica de los cementos hidráulicos según su tipo, denominación y grado de sustitución se puede observar en la sección de anexos. Esta norma establece los siguientes requisitos de resistencia a la compresión para los cementos hidráulicos nacionales.

Cuadro 6

Resistencia a la compresión de los cementos hidráulicos

Clases de resistencia	1 día	3 días	7 días	28 días
17	–	–	7	17
21	–	5	11	21
25	–	11	18	25
28	–	13	20	28
	12	24	–	*

Nota. La resistencia mínima requerida a los 28 días puede ser acordada entre el proveedor y el comprador. Tomado del INTE C147:2018.

2.3.11 Normativa internacional

A continuación, se muestra la descripción de algunas normas de la American Society of Testing and Materials (ASTM), citadas por Zúñiga (2020).

ASTM C150-20/Especificación Estándar para Cemento Portland

Esta norma cubre los diez tipos de cemento Portland que fueron presentados en el cuadro 2. Incluye los requerimientos físicos y químicos que debe cumplir dicho tipo de cementos hidráulicos.

ASTM C595-20/Especificación Estándar para Cementos Hidráulicos Mezclados

Se refiere a los cementos hidráulicos mezclados para aplicaciones generales y especiales, en los cuales se utiliza escoria, puzolana, piedra caliza o combinaciones de estos con cemento Portland o clínker. Esta especificación prescribe ingredientes, proporciones y algunos requisitos de rendimiento.

ASTM C702-18/Práctica Estándar para Reducción de Muestras de Agregado a Tamaño de Ensayo

Esta práctica cubre tres métodos para la reducción de las muestras grandes del agregado al tamaño apropiado para el ensayo. Estas técnicas se encuentran destinadas a minimizar las variaciones de las características medidas entre las muestras de ensayo seleccionadas y la muestra grande.

ASTM D75-19/Práctica Estándar para Muestreo de Agregados

Esta práctica incluye el muestreo de agregados gruesos y finos para la investigación preliminar de la fuente potencial de suministro, el control del producto en la fuente de suministro, el control de las operaciones en el lugar de uso y la aceptación o el rechazo de los materiales.

ASTM C127-15/Método de Ensayo Estándar para Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso

Este método cubre la determinación de gravedad específica y absorción de los agregados gruesos. La gravedad específica es una cantidad adimensional, que se expresa como seca al horno, saturada superficie seca o relativa aparente. Se calcula mediante la inmersión en agua de una muestra del agregado.

ASTM C128-15/Método de Ensayo Estándar para Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino

Este método abarca la determinación de gravedad específica y absorción de los agregados finos. La gravedad específica es una cantidad adimensional, que se expresa como seca al horno, saturada superficie seca o relativa aparente. Se calcula mediante la inmersión en agua de una muestra del agregado y la aplicación del método gravimétrico o volumétrico.

ASTM C29-17a/Método de Ensayo Estándar para "Peso Unitario" y Vacíos en el Agregado

Este método incluye la determinación de la densidad aparente ("peso unitario") del agregado en condición compactada o suelta y los vacíos calculados entre partículas en los agregados finos, gruesos o mixtos. Es aplicable a agregados que no excedan los 125 mm de tamaño máximo nominal. ASTM C117-17 Método de Ensayo Estándar para Materiales Más Finos que el Tamiz 0,075 mm (No. 200) en Agregado Mineral por Lavado: cubre la determinación por lavado de la cantidad de material más fino que el tamiz 0,075 mm. Las partículas de arcilla y otras se dispersan con el agua de lavado, así como los materiales solubles en agua. Incluye dos procedimientos: uno en que solo se usa agua y otro donde se emplea humectante. Se utilizó el procedimiento A (solo agua) a menos que se indique lo contrario.

ASTM C136-19/Método de Ensayo Estándar para Análisis por Tamizado de Agregados Finos y Gruesos

Este método cubre la determinación de la distribución de las partículas del agregado fino o grueso por tamizado. Los resultados se utilizan para determinar el cumplimiento de la

distribución del tamaño de la partícula con los requisitos de especificación aplicables. Para determinar con precisión el material más fino que el tamiz no. 200, dicho método debe realizarse junto con la prueba C117.

ASTM C778-18 Especificación Estándar para Arena Estándar

Esta especificación abarca la arena estándar para uso en el ensayo de los cementos hidráulicos. La arena estándar es arena de sílice, compuesta casi en su totalidad por granos naturalmente redondeados de cuarzo casi puro.

ASTM C230-20 Especificación Estándar para Mesa de Flujo para Uso en Ensayos de Cemento Hidráulico

Esta especificación incluye los requisitos para la mesa de flujo y los aparatos accesorios empleados en la realización de pruebas de flujo para la consistencia de morteros en los ensayos del cemento hidráulico como, por ejemplo, el método de ensayo C1437.

ASTM C1437-20 Método de Ensayo Estándar para Flujo del Mortero de Cemento Hidráulico

Este método de ensayo se utiliza para determinar el flujo de los morteros del cemento hidráulico y los morteros que contienen materiales cementantes distintos de los cementos hidráulicos. No es usual que el flujo sea un requerimiento en las especificaciones del cemento. Dicho método se usa comúnmente en los ensayos, los cuales requieren que el mortero tenga un contenido de agua que proporcione un nivel de flujo específico.

ASTM C109-20b Método de Ensayo Estándar para Resistencia a la Compresión de Morteros de Cemento Hidráulico (Usando Especímenes Cúbicos de 50 mm)

Este método de prueba proporciona un medio para determinar la resistencia a la compresión del cemento hidráulico y otros morteros, cuyos resultados pueden emplearse para determinar el cumplimiento con las especificaciones.

AASHTO M-85

Se trata de las especificaciones estándar para el cemento Portland. Alvarado (2013) menciona que esta norma hace referencia a la composición química del cemento Portland

y sus propiedades físicas. Los resultados de dichas pruebas deben caer dentro de los límites definidos por la norma, también se especifica qué métodos de ensayo aplicar para obtener cada dato.

2.3.12 Pruebas de laboratorio

Gravedad específica y absorción, agregado grueso ASTM C127

Cañas (s.f.) señala que este método de prueba cubre la determinación de la densidad media de una cantidad de partículas del agregado grueso (no incluye el volumen de vacíos entre partículas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso. Dependiendo del procedimiento usado, la densidad (kg/m^3) o (lb/ft^3) se expresa como seca al horno (OD), saturada superficialmente seca (SSC) o densidad aparente, igualmente sucede con la densidad relativa (gravedad específica).

Determinación de la densidad masiva (peso unitario) y los vacíos en los agregados (combos) ASTM C29/C29M

En ASTM C 29 se define la densidad total o bruta (*bulk density*) o el peso unitario de los agregados como la masa de un volumen unitario de agregado, que incluye el volumen de las partículas individuales y el de los vacíos entre las partículas. De forma resumida, el peso unitario consiste en determinar la densidad total como el resultado de dividir la masa de un agregado en estado seco (en un determinado nivel de consolidación o compactación) y el volumen que este ocupa, incluyendo los vacíos del aire entre partículas y los de absorción, lo cual se expresa en lb/ft^3 (kg/m^3).

Los resultados obtenidos en este ensayo son necesarios para las proporciones de las mezclas del concreto hidráulico y las conversiones masa/volumen en la aceptación de los materiales en la obra. El término común para denominar la densidad total en agregados es la “determinación del peso volumétrico suelto” y el “varillado del agregado”, que se abrevian PVS y PVV, respectivamente.

Este ensayo consiste en que, con base en el tamaño máximo nominal del agregado, se selecciona el volumen mínimo apropiado del molde a utilizar para determinar el peso

unitario. Las características geométricas y de espesor del molde están reguladas como se muestra en el cuadro 7.

Cuadro 7

Características geométricas y de espesor del molde

Tamaño máximo nominal del agregado		Capacidad del depósito	
Pulgadas	mm	pie³	L (m³)
½	12.5	1/10	2.8 (0.0028)
1	25.0	1/3	9.3 (0.0093)
1 ½	37.5	½	14 (0.014)
3	75	1	28 (0.028)
4	100	2 ½	70 (0.070)
5	125	3 ½	100 (0.100)

Nota. Capacidad del depósito medidor (molde) en función del tamaño máximo nominal del agregado.

Desgaste de los agregados gruesos abrasión de los Ángeles ASTM C131/C131M

Lanamme UCR menciona que este procedimiento ha sido ampliamente utilizado como un indicador de la calidad relativa o la competencia de varias fuentes de agregados que tienen una composición mineral similar. Los resultados no permiten validar comparaciones que sean hechas entre fuentes de diferente origen, composición o estructura. Asimismo, los límites de la especificación se deben asignar con extremo cuidado, considerando los tipos de agregados disponibles y su desempeño histórico en los usos finales específicos.

Cuadro 8

Desgaste de los agregados gruesos abrasión de los Ángeles ASTM C131/C131M

Tamaño de mallas (aberturas cuadradas)		Masa por tamaño indicado, g			
Pasando	Retenido	Graduación			
		A	B	C	D
37,5 mm (1 ½ pulg)	25,0 mm (1 pulg)	1 250 ± 25	-	-	-
25,0 mm (1 pulg)	19,0 mm (¾ pulg)	1 250 ± 25	-	-	-
19,0 mm (¾ pulg)	12,5 mm (1/2 pulg)	1 250 ± 10	2 500 ± 10	-	-
12,5 mm (1/2 pulg)	9,5 mm (3/8 pulg)	1 250 ± 10	2 500 ± 10	-	-
9,5 mm (3/8 pulg)	6,3 mm (1/4 pulg)	-	-	2 500 ± 10	-
6,3 mm (1/4 pulg)	4,75 mm (No.4)	-	-	2 500 ± 10	-
4,75 mm (No.4)	2,36 mm (No.8)	-	-	-	5 000 ± 10
Total		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

Nota. Tomado de ASTM C131.

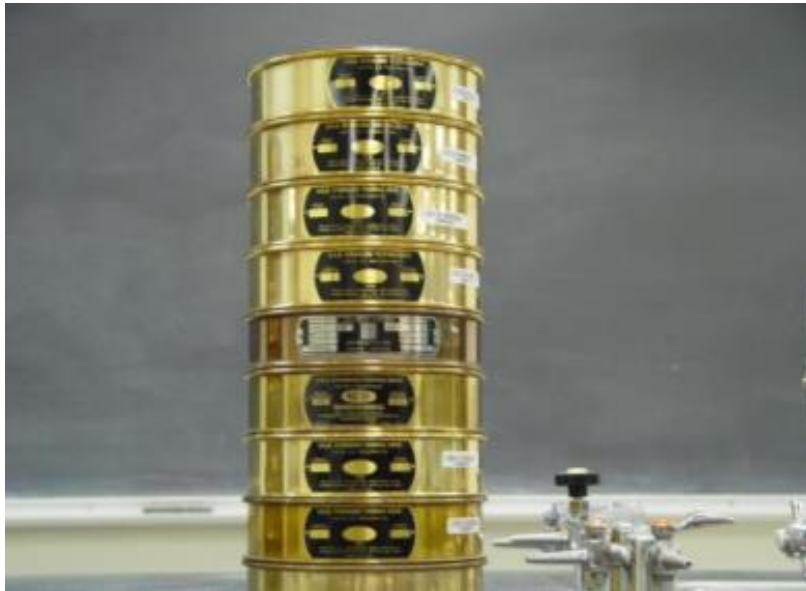
Análisis por tamizado de los agregados fino y grueso ASTM c136 (Granulometría)

Según las normas ASTM y la Guía de Laboratorio Construcción I, UCA (1996), por granulometría o análisis granulométrico de un agregado se entiende todo procedimiento manual o mecánico mediante el cual se pueden separar las partículas constitutivas del agregado según tamaños, de manera que se coloquen las cantidades en peso de cada tamaño que aporta al peso total.

Para separar por tamaños, se utilizan las mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo del agregado en cada una de ellas. En la práctica, los pesos de los distintos tamaños se expresan como porcentajes retenidos en las mallas con respecto al total de la muestra. Dichos porcentajes retenidos se calculan tanto parciales como acumulados, ya que con estos últimos se procede a trazar la gráfica de los valores del material (granulometría).

Figura 2

Tamices superpuestos



Nota. Tomado de la *Guía de Laboratorio Construcción* (1996).

El análisis de tamaño de partículas en el agregado se puede realizar en dos partes: el Método de Ensayo Estándar para Material Más Fino que la Malla No. 200 (75 μ m) en Agregado Mineral por Lavado (ASTM C 117–95), que, a su vez, presenta dos procedimientos: uno usando solo agua para la operación de lavado y el otro que incluye un agente humectante, el cual ayuda a separar el material más fino que la malla de 75 μ m (no. 200).

La norma propone que, cuando no se especifique cuál es el método de ensayo que se debe utilizar, el procedimiento será el que solo emplea agua. En algunas ocasiones, el material fino está adherido a las partículas grandes, tal como algunos revestimientos de arcillas y revestimientos en agregados que han sido extraídos de mezclas bituminosas. En estos casos, dicho material se separará con mayor rapidez mediante un agente humectante en el agua. Este método de ensayo es propuesto debido a que el material más fino que 75 μ m puede ser separado de las partículas gruesas de una manera más eficiente y, además, resultar completamente tamizado en húmedo que a través del

tamizado en seco. Por tal razón, cuando se necesitan determinaciones precisas de un material más fino que la malla de 75 m en agregado fino o grueso, este método es usado en la muestra, de forma previa al tamizado en seco (norma ASTM C 136).

El resultado de este método de ensayo es incluido en los cálculos del análisis por tamizado de los agregados gruesos y fino (ASTM C 136) y la cantidad total de material más fino que la malla de 75 m por lavado, más la obtenida por tamizado en seco de la misma muestra; estos datos se reportan con los resultados alcanzados con el método de ensayo C 136. Usualmente, la cantidad de material adicional más fino de 75 m conseguida en el proceso de tamizado en seco es pequeña. Si esta fuera grande, la eficiencia de la operación de lavado podría ser verificada, pues es posible que sea una indicación de la degradación del agregado. Para el ensayo, se escogió una muestra de material en función del tamaño máximo nominal de sus partículas según la siguiente tabla:

Cuadro 9

Selección del tamaño de la muestra de prueba

Máximo tamaño nominal (mm.)	Mínimo de masa a utilizar (g)
4.75	300
9.5	1000
19.0	2500
37.5	5000

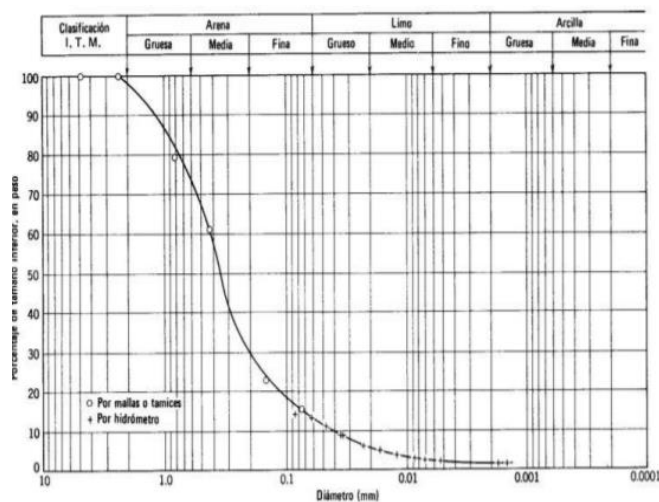
En el ensayo, se lava una muestra de agregado de una manera prescrita usando solo agua o agua con un agente humectante especificado. El agua de lavado decantada, que contiene material disuelto y suspendido, se pasa a través de la malla no. 200. La pérdida en masa resultante del tratamiento de lavado se calcula como el porcentaje de masa de la muestra original y se reporta como el porcentaje del material más fino que las mallas de 75 m por lavado.

Gráfica granulométrica e indicadores

La curva granulométrica es una representación gráfica de los resultados del ensayo de granulometría. Esta se ilustra en un papel denominado "log-normal", por tener en la horizontal una escala logarítmica y, en la vertical, una escala natural.

Figura 3

Gráfica granulométrica



Nota. Curva granulométrica de un suelo areno-limoso, representado en un papel "log-normal" (distribución acumulada). Dominio público.

Gravedad específica y absorción, agregado fino ASTM C128

Generalmente, la gravedad específica (densidad relativa) es la característica utilizada para el cálculo del volumen ocupado por el agregado en las mezclas que contienen agregados, tales como concreto de cemento portland, concretos bituminosos y otras mezclas, que son proporcionadas o analizadas con base en un volumen absoluto. Los valores de absorción se emplean para calcular el cambio dentro de las partículas constituyentes en la masa de un agregado debido al agua absorbida en el espacio de los poros en comparación a cuando dicha masa está seca.

Procedimiento

Respecto a un espécimen de agregado, este se sumerge en agua por 24 + 4 horas para, esencialmente, llenar los poros. Luego, se retira del agua, se seca el agua de la superficie de las partículas (por medio del aire o el calor en una plantilla) y se determina la masa. A continuación, el espécimen (o una porción de este) es colocado en un recipiente graduado para establecer su volumen a partir del método gravimétrico. Por último, el espécimen se seca al horno y se define su masa. Utilizando los valores de masa obtenidos y las fórmulas de este método es posible calcular la densidad, la gravedad específica (densidad relativa) y la absorción.

Impurezas orgánicas en agregado fino para concreto (colorimetría) ASTM C40/C40M

Este método de ensayo se utiliza para hacer una determinación preliminar de la aceptabilidad de los agregados finos con respecto a los requisitos de la especificación ASTM C33, que se relaciona con las impurezas orgánicas. De esta forma, el objetivo principal de dicho procedimiento es brindar una advertencia de que pueden estar presentes cantidades perjudiciales de impurezas orgánicas. Según el Método de Ensayo ASTM C87, cuando un espécimen es sometido a este ensayo y produce un color más oscuro que el de la solución o el vidrio de referencia, se aconseja realizar el ensayo para evaluar el efecto de las impurezas orgánicas en la resistencia del mortero

Procedimiento

Se llena un recipiente de vidrio con el agregado fino a ensayar; luego, se agrega una solución de hidróxido de sodio y, seguidamente, se tapa y se agita. Después de que termina el agitado, este recipiente se deja reposar y, de acuerdo con el color de la suspensión formada, se determina el contenido de impurezas orgánicas presentes en el agregado ensayado.

Figura 4

Escala de impurezas orgánicas presentes en un agregado ensayado



Nota. Vidrios de color estándar. Determinación del material más fino que el tamiz no. 200 en agregados por lavado ASTM C117.

Según Inteco (2018):

1.1 Esta norma cubre la determinación por lavado de la cantidad de material más fino que el tamiz de 75 μm (N° 200) en agregados. Las partículas de arcilla y otras partículas de agregados que se dispersan por el agua de lavado y los materiales solubles en agua, se remueven de los agregados durante el ensayo. 1.2 Se incluyen dos procedimientos, el primero solo utiliza agua para la operación de lavado y el segundo incluye un agente humectante para ayudar en la pérdida del material más fino que el tamiz de 75 μm (N° 200) del material más grueso. A menos que se especifique de otra manera, se debe utilizar el procedimiento A (agua únicamente).

1.3 Los valores indicados en unidades del SI son los normalizados. 1.4 El texto de esta norma hace referencias a notas y notas al pie de página que proporcionan material explicativo. Estas notas y notas al pie de página (excluyendo aquellas en tablas y figuras) no serán consideradas como requisitos de la norma.

1.5 Esta norma no pretende solucionar todos los problemas de seguridad que puedan estar asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma, establecer las medidas de seguridad e higiene ocupacional, y determinar la aplicabilidad de restricciones regulatorias antes de usarla.

1.6. Esta norma se elaboró de conformidad con los principios internacionalmente reconocidos sobre normalización establecidos en la Decisión sobre los principios para el desarrollo de normas, guías y recomendaciones internacionales emitidos por el Comité de Obstáculos Técnicos al Comercio (OTC) de la Organización Mundial del Comercio.

Si se va a realizar el lavado a una muestra previo a la granulometría, entonces se debe aportar lo que indica la norma ASTM C136, sino es necesario incorporar al menos cuatro veces lo establecido a continuación o lo especificado en la norma ASTM D75.

Cuadro 10

Impurezas orgánicas en el agregado fino para concreto

Tamaño máximo Nominal		Masa Mínima
mm	No. de malla	g
4,75 o menor	4 o menor	500
9,5	3/8	1000
19	3/4	2500
37,5 o mayor	11/2 o mayor	5000

Nota. Tomado de ASTM C117, citado por LanammeUCR.

Partículas friables y arcillosas en los agregados ASTM C142/C142M

Se determina la masa de la muestra; luego, se extiende una capa delgada en el fondo del recipiente, se cubre con agua destilada y se deja reposar. Seguidamente, se quiebran

las partículas en partículas más pequeñas con el pulgar y, después, se tamiza la muestra y se determina el porcentaje de arcillas y partículas friables.

Requerimientos

Las muestras de ensayo del agregado fino consisten en partículas del agregado más grueso que la malla de 1,18 mm (no. 16), el cual debe tener una masa no menor a 25 g. Se separan las muestras de ensayo del agregado grueso en diferentes tamaños usando las siguientes mallas: 4,75 mm (no. 4), 9,5 mm (3/8 pulgada), 19,0 mm (3/4 pulgada) y 37,5 mm (1 ½ pulgada). Estas muestras de ensayo requieren pesar no menos de lo indicado a continuación:

Cuadro 11

Pesos mínimos indicados para las muestras de ensayo

Tamaño de partículas para hacer Muestra de Ensayo	Peso mínimo de la muestra de ensayo, g.
4,75 a 9,75 mm (No.4 a 3/8 pulg.)	1000
9,5 a 19,0 mm (3/8 a ¾ pulg.)	2000
19,0 a 37,5 mm (3/4 a 1 ½ pulg.)	3000
sobre 37,5 mm (1 ½ pulg.)	5000

En el caso de mezclas de agregado fino y grueso, el material debe ser separado y trabajado con lo indicado anteriormente. Todas las muestras necesitan ser lavadas según la norma ASTM C11.

Fabricación de especímenes de concreto (cilindro) ASTM C31/C31M

Según Inteco (2019):

- Esta práctica cubre los procedimientos para hacer y curar especímenes de cilindros y vigas a partir de muestras representativas de concreto fresco para un proyecto de construcción.

- El concreto empleado para hacer los especímenes moldeados debe ser muestreado después de que se han hecho todos los ajustes en sitio para las proporciones de la mezcla, incluyendo la adición del agua de mezcla y los aditivos. Esta práctica no es apropiada para hacer especímenes de concretos que no tienen un revenimiento medible o que requieran otras formas o tamaños de especímenes.
- Los valores indicados en cualquier unidad del SI, son los normalizados.
- Esta norma no tiene el propósito de indicar todos los problemas y cuidados asociados con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma el establecer los cuidados apropiados y las prácticas de salud, seguridad y ambientales para determinar la aplicabilidad de las limitaciones regulatorias antes de su uso. (Advertencia-Las mezclas frescas cementantes hidráulicas son cáusticas y pueden causar quemaduras químicas en la piel y tejido en exposiciones sobre prolongadas).
- El texto de las notas de referencia de esta norma proporciona material explicativo. Estas notas no deben ser consideradas como requisitos de esta norma.
- Esta norma se elaboró de conformidad con los principios internacionalmente reconocidos sobre normalización establecidos en la Decisión sobre los principios para el desarrollo de normas, guías y recomendaciones internacionales emitidos por el Comité de Obstáculos Técnicos al Comercio (OTC) de la Organización Mundial del Comercio.

Determinación de la resistencia a la compresión del concreto ASTM C39/C39M

Este ensayo permite la determinación de la resistencia a la compresión (f_c) de los especímenes cilíndricos de concretos moldeados en laboratorio o campo u obtenidos por medio de la extracción de núcleos. Se limita a concretos con un peso unitario mayor que 800 kg/m³.

Dicho método de ensayo consiste en la aplicación de una carga de compresión uniaxial a los cilindros moldeados o los núcleos a una velocidad de carga especificada ($0.25 \pm$

0.05 MPa/s). La resistencia a la compresión del espécimen se calcula dividiendo la carga máxima obtenida durante el ensayo entre el área de la sección transversal del espécimen.

Se debe proveer al laboratorio los especímenes e indicar claramente la fecha de moldeo y la fecha en la cual se especifica la falla, por ejemplo, 7 días, 28 días, 56 días, etc. Además, se debe señalar si los especímenes necesitan tiempo de curado en la cámara y coronamiento. Si no se va a colocar coronamiento, resulta esencial definir la forma en que se desea que se preparen los especímenes para así garantizar la planicidad en sus caras (pulido o con almohadilla de neopreno). El laboratorio no se responsabiliza por los cilindros que no cumplen con la especificación.

Densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire del concreto por el método gravimétrico ASTM C138/C138

Este ensayo cubre la determinación de la densidad del concreto fresco y permite determinar, por medio de fórmulas, el rendimiento, el contenido de cemento y el contenido de aire en el concreto. El rendimiento se define como el volumen de concreto producido a partir de una mezcla con cantidades conocidas de materiales.

También, este ensayo posibilita conocer las propiedades de una mezcla de concreto fresco para el control de la mezcla dada, cuando es requerido, y brinda un valor para la densidad y el rendimiento de la mezcla, así como una estimación de su contenido de aire. Es aplicable a las mezclas de concreto fresco fabricadas tanto en laboratorio como en campo.

Una muestra obtenida de la mezcladora o de una batida de concreto fresco se coloca en un molde con medidas estándares y, dependiendo del revenimiento del concreto (3.4), se establece el método de consolidación de la muestra en el molde (apisonado o vibrado). Al terminar la consolidación del concreto, se eliminan los sobrantes por medio de enrazado y se determina el peso de la muestra en el molde. Con estos valores se calcula la densidad. Para el cálculo del rendimiento y el contenido de aire, se requiere saber la masa de cada uno de los componentes en la mezcla, incluyendo el agua, y las densidades de los materiales.

Se deben aportar los agregados (piedra y arena) y el cemento, si se requieren los aditivos, e indicar el diseño de la mezcla por peso. La cantidad de agregados debe ser suficiente para producir un volumen de concreto mayor que el especificado a continuación, lo cual depende del tamaño máximo del agregado.

Cuadro 12

Tamaño máximo nominal del agregado frente al volumen del medidor

Tamaño máximo nominal del agregado [mm]	Volumen del medidor [L]
25	6
37.5	11
50	14
75	28
112	70
150	100

Nota. Creado a partir de la información encontrada en la página del LanameUCR.

Capítulo III: Metodología

3.1. Tipo de investigación

Comprender de manera amplia y profunda las características y los principales elementos que componen la investigación dentro de un amplio espectro de aristas, enfoques, modelos y paradigmas es de gran relevancia a la hora de emprender un proceso de investigación. La realización de este trabajo brindó un andamiaje sólido de los principales elementos que componen y determinan un camino de investigación cuantitativa y mixta, pues se establecieron parámetros de gran importancia con respecto a los tipos de cementos que se producen y se comercializan en el país.

La investigación cualitativa tiene un potencial muy importante para el estudio de elementos físicos como lo es el cemento y, además, ha ganado espacio en los círculos académicos. Una de las tareas cruciales de este tipo de investigación es el manejo de la información que permite la construcción de datos en el análisis.

El abordaje metodológico de la investigación se desprende de la necesidad de cumplir con los objetivos planteados, para lo cual se utiliza una serie de líneas teóricas-metodológicas, junto con instrumentos de recolección y análisis de los datos. Por su parte, el análisis se centra en una gama de aristas metodológicas y contextuales, donde la investigación se realiza a partir de la experiencia observada, analizada y obtenida a través de los instrumentos utilizados. En este caso, el objeto de estudio es una parte integral del proceso, no un agente que se observa desde afuera de manera aislada.

Según Barrantes (2006), el método es el procedimiento para lograr los objetivos, lo cual, mediante el estudio analítico y crítico de los métodos de investigación, se relaciona de manera directa con los enlaces teóricos entre el sujeto y el objeto de conocimiento.

Además, se establece el enfoque cuantitativo como base del análisis. Resulta fundamental señalar que la recolección de datos, su tabulación, así como la utilización de herramientas para la cuantificación concreta de características específicas en el ambiente de estudio hace necesaria la implementación de ciertas pautas de la

investigación cualitativa, lo que deja como resultado una variedad de abordajes metodológicos.

La investigación aquí desarrollada presentó un método analítico descriptivo, en el cual, a partir de casos específicos y particulares, se abordaron las características químicas y físicas del cemento en Costa Rica para así determinar las causas estructurales y relacionar los distintos elementos analizados en torno a la problemática bajo estudio. Asimismo, las bases teóricas fueron de suma importancia a la hora del desarrollo y el estudio de las fuentes. Sin embargo, el uso de instrumentos y elementos de laboratorio para las pruebas físicas de resistencia y las químicas de composición también resultó un pilar en la obtención de información de casos puntuales, pues fue un insumo específico para el análisis y la interpretación del fenómeno aquí abordado.

Debido a que la recolección de datos cuantitativos para el análisis fue solo una parte del trabajo de investigación, se puede afirmar que, en conjunto, el estudio consistió en una tarea de síntesis, la cual no se limitó superficialmente a acumular información, sino, más bien, a generar nuevos conocimientos a partir de esta. Se debe aclarar que el objetivo final fue obtener datos descriptivos a partir del análisis cualitativo, según lo mencionan López y Sandoval (2011). Estos autores afirman que “la investigación cualitativa es la que produce datos descriptivos, con las propias palabras de las personas, habladas o escritas y la conducta observable. Constituida por un conjunto de técnicas para recoger datos” (p. 3).

López y Sandoval (2011) brindan una serie de pautas y características esenciales para llevar a cabo una investigación desde un enfoque cualitativo, aunque se debe recalcar que el aquí utilizado fue mixto, ya que se emplearon herramientas estadísticas y de medición, como las pruebas físicas y químicas y los cuadros de observación, con el objetivo de recolectar y tabular datos para su posterior análisis.

Como se mencionó anteriormente, la base del análisis se centró en una gama de aristas metodológicas y contextuales, donde el proceso de investigación se llevó a cabo mediante los datos arrojados a partir de los análisis de los materiales y los cementos estudiados. En este caso, el objeto de estudio fue una parte integral del proceso productivo.

De esta manera, se logró valorar el gran espectro que separa un fenómeno hasta su eventual análisis. Se debe tener en cuenta que la funcionalidad de un determinado enfoque, en este caso el mixto, se deriva del correcto abordaje sistemático del método científico, en el cual es necesario respetar una serie de procedimientos y pasos con el fin de obtener resultados lo más objetivos y verídicos posibles.

La sistematización del análisis y, eventualmente, la síntesis de los resultados son fundamentales en una investigación de carácter analítico, donde se valoran múltiples variables. Sin embargo, si no se engloban en un método y una técnica específica, estas variables podrían sesgar la información, los datos y, por ende, los resultados. Al respecto, López y Sandoval (2012) indican la importancia del buen uso del método:

La investigación por ser sistemática, genera procedimientos, presenta resultados y debe llegar a conclusiones, ya que la sola recopilación de datos o hechos y aún su tabulación no son investigación, sólo forma parte importante de ella. La investigación tiene razón de ser por sus procedimientos y resultados obtenidos (p. 3).

3.2. Muestras y ensayos

Retomando las características de los cementos producidos y comercializados en Costa Rica, Zúñiga (2020) menciona:

Los cementos hidráulicos costarricenses son adicionados o combinados, por lo que contienen materiales, como adiciones, en sustitución de un porcentaje del clínker. Cada tipo de cemento contiene adiciones en diferente proporción, por ello es importante conocer cuál es el comportamiento de los concretos según el cemento hidráulico con el cual se fabriquen. Las tecnologías de los cementos hidráulicos y las características de los componentes adicionados pueden variar a lo largo del tiempo, ello hace que sea necesario el estudio periódico del comportamiento del concreto hidráulico a nivel nacional (p. 3).

Es fundamental establecer parámetros reales y actualizados con base en datos y estudios específicos, que determinen las características de los cementos, entre ellas, la

resistencia, la durabilidad, la permeabilidad y la composición. A su vez, esto depende de varios aspectos como los materiales utilizados, los agregados y los métodos empleados para su fabricación. Según el Laboratorio de Ensayos para Cementos (CNCP), dichas pruebas son necesarias por las siguientes razones:

Las pruebas que se realizan son del tipo mecánico, físico y químico. Estas sirven para determinar las propiedades del cemento:

- resistencia a la compresión;
- sanidad;
- reactividad potencial de los agregados con los álcalis;
- consistencia normal;
- tiempo de fraguado inicial y final.

Este tipo de ensayos permite, entre otros factores, determinar:

- la habilidad de la pasta del cemento para mantener su volumen;
- el tiempo que se dispone para la mezcla, el transporte, la colocación en obra y la compactación correcta de los morteros;
- que la mezcla cumpla con los requerimientos de la resistencia especificada (p. 1).

Según Delgado *et al.* (2020), algunas de las pruebas y los ensayos que se pueden realizar para determinar las propiedades y las características de los cementos son los siguientes:

MM/A (E-C) – 28: Es un cemento modificado hidráulico mixto, conteniendo en total una cantidad de escoria granulada de alto horno (E) y caliza (C) entre el 6 % y 20 % en masa, compuesto principalmente por clinker, clase A. Resistencia mínima de 28 MPa a los 28 días de curado.

MM/B (P-C) – 28: Cemento modificado hidráulico mixto, conteniendo en total una cantidad de materiales puzolánico (P) y caliza (C) entre el 21 % y 35 % en masa

(modificado mixto), clase B. Resistencia mínima de 28 MPa a los 28 días de curado.

MP A – AR: Cemento modificado hidráulico puzolánico, compuesto por clinker y conteniendo entre el 6 % y 20 % de puzolana (P) en masa, de alta resistencia inicial. Resistencia mínima de 12 MPa a 1 día de curado y 24 MPa a los 3 días de curado.

Agregados: agregado fino y grueso de dos procedencias. La primera fuente corresponde a agregados extraídos de río, la segunda mediante extracción de tajo (p. 29).

Otro aspecto por considerar son los agregados, los cuales deben cumplir una serie de especificaciones:

Respecto a los agregados gruesos, están constituidos principalmente por partículas fracturadas. Según especificaciones en la norma ASTM C33/C33M-18, los agregados gruesos en ambas fuentes cumplen con los límites granulométricos establecidos para un tamaño nominal de 12,5 mm a 4,75 mm y sus porcentajes de abrasión son inferiores al 50% (16 % para el caso del agregado de procedencia de río y 19 % para el caso del agregado de procedencia de tajo). Sus densidades relativas (2,63 para agregado de procedencia de río y 2,56 para agregado con procedencia de tajo) los clasifican como agregados con densidades normales. Respecto a los agregados finos, cumplen con la granulometría sugerida en la norma ASTM C33/C33M-18. Sus densidades relativas 2,49 para agregado de procedencia de río y 2,55 para agregado con procedencia de tajo los clasifican como agregados con densidades normales (p. 30).

La metodología se basa en dos importantes procesos: en primer lugar, una profunda revisión de los antecedentes y los referentes teóricos que brindan un marco conceptual sólido, así como una serie de pautas, reglamentos y tecnicismos que se deben emplear en la elaboración y los procesos industriales del cemento. En segundo lugar, una serie de pruebas solicitadas a un laboratorio especializado, el cual cuenta con los instrumentos

necesarios para los estudios y el análisis. Es así como ese abanico gigante de posibilidades y caminos por seguir se va reduciendo conforme avanza el proceso de recolección y tabulación de los datos. Además, dichos datos, por su carácter cuantificable, se pueden definir como conceptos y datos descriptibles y observables, que se analizan sistemáticamente para la obtención de un resultado científico.

3.3. Ejemplos de malas prácticas con el cemento

Con el fin de conocer más a detalle las prácticas constructivas que perjudican la calidad del concreto hecho en obra, se presenta una compilación tomada de los anexos de los estudios de control de calidad mencionados en este informe. El CFIA y el ICCYC se dieron a la tarea de definir el problema de ciertas prácticas, así como la solución idónea para evitarlas. A continuación, se describen dichas prácticas:

1. Mezclado de los agregados en el apilamiento

Problema: Al tener agregados gruesos y finos entremezclados, se pierde el control y la precisión en la proporción de estos en la mezcla. Solución: Apilar cada material por separado.

2. Deficiente preparación del terreno y las prácticas de colocación

Problema: Las irregularidades en el terreno producen puntos frágiles donde la losa de concreto se puede agrietar. Al no haber materiales base adecuados, tampoco existe una estructura de soporte adecuada. Además, se da una deficiente colocación del acero de refuerzo por la temperatura. Por último, las mezclas inadecuadas de concreto para las losas generan una mala estética y funcionalidad. Solución: Asegurar la uniformidad del material granular de base, capacitar al personal en la correcta ubicación de la malla de refuerzo y utilizar mezclas de concreto diseñadas para la aplicación (ICCYC-CFIA, 2006).

3. Equipo personal de seguridad y condiciones en obra

Problema: La carencia de equipo de protección y seguridad básico aumenta las posibilidades de accidentes. Solución: Invertir en equipo de seguridad como cascos, chalecos reflectores, anteojos de protección, guantes, líneas de vida, mascarillas,

zapatos especiales, entre otros (ICCYC-CFIA, 2006), así como preparar el área de trabajo con las condiciones de seguridad ocupacional.

4. Mezclado de concreto “a pala” y en el suelo

Problema: Con este tipo de mezclados no se logran concretos homogéneos, lo cual reduce las resistencias. Solución: Utilizar una batidora para mezclar el concreto en la obra.

5. Limpieza y orden del lugar de trabajo

Problema: Los escombros, la basura y la mala disposición de materiales provoca atrasos en las obras, accidentes y desperdicios. Solución: Establecer lugares específicos para la colocación de escombros, basura y materiales, y definir lineamientos de operación sobre este aspecto (ICCYCCFIA, 2007).

6. Contaminación con el material orgánico

Problema: En los concretos, la materia orgánica provoca resistencias deficientes. Solución: Utilizar agregados limpios y bien graduados para lograr las mezclas especificadas en el diseño (ICCYC-CFIA, 2007).

7. Dosificación del agua con manguera hasta cierta consistencia

Problema: No hay medida en la cantidad del agua agregada a la mezcla, la cual, en exceso, reduce la resistencia a la compresión del concreto. Solución: El agua debe de ser dosificada en recipientes marcados para conocer la cantidad vertida en cada batida de mezcla y así cumplir con el estipulado por el diseño (ICCYC-CFIA, 2020).

8. Concreto excedente con agua para “evitar fraguado”

Problema: Los sobrantes de la colocación del concreto se dejan en carretillos o recipientes para usar luego. Solución: El concreto debe mezclarse de acuerdo con la cantidad que va a ser colocada. Una vez que el cemento entra en contacto con el agua, ya se inicia la reacción química. El concreto sobrante debe de ser descartado. Es recomendable colocar el concreto hecho en obra dentro de los primeros treinta minutos de haber sido mezclado (ICCYC-CFIA, 2020).

9. Almacenamiento de los sacos de cemento

Problema: Almacenamiento de sacos de cemento sobre el suelo y sin que sean tapados. En este caso, los sacos de cemento absorben la humedad del suelo, lo que inicia el fraguado. Una vez que comienza este proceso, si el cemento es utilizado, se puede perder hasta un 50 % de su resistencia en el concepto final (ICCYC-CFIA, 2020).

Solución: Utilizar tarimas para el almacenaje de los sacos de cemento, cubrirlos y protegerlos del agua, así como separarlos de paredes de 10 a 15 cm.

Capítulo IV: Resultados

4.1. Resultados

En este apartado se muestran los principales resultados obtenidos de los distintos análisis realizados para este trabajo.

Cuadro 13

Resultados del cemento Holcim ug para 175 kg/cm²

Tipos de cemento	Cantidad por metro cúbico	Edad (días)	Resistencia MPa (kg/cm ²)	Proyección a 28 días MPa (kg/cm ²)
Cemento Holcim	313 kg	7	13,4 (136)	20,6 (210)
		14	16,8 (172)	20,5 (209)
		28	20,3 (207)	----
		28	19,7 (201)	----
		28	20,1 (205)	----

Cuadro 14

Resultados del cemento Cemex ug para 175 kg/cm²

Tipos de cemento	Cantidad por metro cúbico	Edad (días)	Resistencia MPa (kg/cm ²)	Proyección a 28 días MPa (kg/cm ²)
Cemento Cemex	304 kg	7	13,5 (138)	20,8 (212)
		14	17,4 (178)	21,2 (217)
		28	20,9 (214)	----
		28	21,6 (220)	----
		28	20,8 (212)	----

Cuadro 15

Resultados del cemento Fortaleza ug para 175 kg/cm²

Tipos de cemento	Cantidad por metro cúbico	Edad (días)	Resistencia MPa (kg/cm ²)	Proyección a 28 días MPa (kg/cm ²)
Cemento Fortaleza	292 kg	7	13,6 (139)	21,0 (214)
		14	17,5 (179)	21,4 (218)
		28	20,8 (212)	----
		28	20,1 (205)	----
		28	20,6 (210)	----

Interpretación de los datos obtenidos

Después de haber realizado una comparación con los resultados obtenidos entre los tres tipos de cementos utilizados (Holcim, Cemex y Fortaleza) para el diseño de la mezcla para 175 kg/cm², se llegó a la conclusión de que, para lograr la resistencia de la mezcla requerida, con el Fortaleza se requiere utilizar menos cemento, lo que representa una economía para el proyecto a desarrollar.

Cuadro 16

Resultados del cemento Holcim ug para 210 kg/cm²

Tipos de cemento	Cantidad por metro cúbico	Edad (días)	Resistencia MPa (kg/cm ²)	Proyección a 28 días MPa (kg/cm ²)
Cemento Holcim	360 kg	7	16,5 (168)	25,3 (258)
		14	19,8 (202)	24,2 (247)
		28	25,5 (250)	----
		28	24,1 (246)	----
		28	25,0 (255)	----

Cuadro 17

Resultados del cemento Cemex ug para 210 kg/cm²

Tipos de cemento	Cantidad por metro cúbico	Edad (días)	Resistencia MPa (kg/cm ²)	Proyección a 28 días MPa (kg/cm ²)
Cemento Cemex	338 kg	7	16,2 (165)	24,9 (254)
		14	21,0 (215)	25,7 (262)
		28	24,7 (252)	----
		28	24,7 (252)	----
		28	24,1 (246)	----

Cuadro 18

Resultados del cemento Fortaleza ug para 210 kg/cm²

Tipos de cemento	Cantidad por metro cúbico	Edad (días)	Resistencia MPa (kg/cm ²)	Proyección a 28 días MPa (kg/cm ²)
Cemento Fortaleza	327 kg	7	16,2 (165)	24,9 (254)
		14	20,7 (212)	25,3 (258)
		28	25,1 (256)	----
		28	24,3 (248)	----
		28	24,7 (252)	----

Interpretación de los datos obtenidos

Luego de haber efectuado una comparación con los resultados obtenidos entre los tres tipos de cementos utilizados (Holcim, Cemex y Fortaleza) para el diseño de mezcla para 210 kg/cm², se llega a la conclusión de que, para lograr la resistencia de la mezcla requerida, con el Fortaleza se requiere utilizar menos cemento, lo que representa una economía para el proyecto a desarrollar.

Cuadro 19

Precios del cemento

Distribuidor de cemento	Marca de cemento	Precio
Rep Romara de Costa	Fortaleza	₡ 6 949,50
Rica		
Construplaza	Holcin	₡ 6 860,00
Depósito Lagar Santa Ana	Cemex	₡ 6 950,00

Después de haber realizado la comparación de los precios por saco de cemento, se llega la conclusión de que la diferencia no es considerable, ya que, cuando se va a llevar a cabo un proyecto, se pueden negociar los precios para obtener un descuento.

El enfoque de los diferentes diseños de mezcla es tratar de buscar y determinar con cuál cemento se logra una mejor optimización del diseño para la resistencia requerida, utilizando los tres tipos de cemento que se venden en el mercado costarricense, en donde se emplea un mismo agregado para todos los tipos.

Como se sabe, la cantidad de cemento se optimiza con base en el comportamiento de la mezcla para alcanzar la resistencia de diseño requerida, que, a su vez, está relacionada de manera directa con la resistencia propiamente del cemento. En este caso, la diferencia en la cantidad de cemento de una determinada marca para una misma resistencia, usando los mismos agregados, indica que se logra alcanzar una misma resistencia con algunos cementos, empleando una menor cantidad de cemento por m³. Lo anterior demuestra que dichos cementos presentan mejores propiedades que otros, mientras que, en términos de costo, su uso generaría ahorro económico a un proyecto.

Asimismo, cabe destacar que la diferencia en el peso del cemento de sacos se debe a que presenta varios porcentajes de humedad. Además, los sacos de cementos fueron comprados en distintos depósitos de materiales.

4.2. Conclusiones

- Se indicaron y se definieron las características específicas de producción, homogeneidad, calidad y funcionalidad de las tres marcas de cemento que se distribuyen en el país.
- Se realizaron comparaciones entre las tres marcas de cemento que se distribuyen en el país desde sus características técnicas, normativas y jurídicas.
- De acuerdo con las pruebas realizadas, se determinó que, según la relación A/C, el cemento Fortaleza resulta ser el más trabajable como concreto (siempre y cuando se sigan las indicaciones establecidas sobre la dosificación de los materiales), en otras palabras, este cemento ofrece una mayor resistencia al momento de ser usado en los proyectos.
- Generalmente, aquellas mezclas elaboradas con el mismo tipo de cemento no representan una diferencia significativa en sus promedios de resistencia a la compresión, esto sin importar el tipo de agregado empleado. Por ello, el componente más determinante en el desarrollo de la resistencia de la mezcla es el cemento utilizado.
- Según los resultados obtenidos de la ruptura de los cilindros de prueba a los 28 días de edad, utilizando los cementos Holcim ug, Cemex ug y Fortaleza ug, se considera que las mezclas dosificadas y diseñadas usando dichos cementos cumplirán con las resistencias estipuladas de 17,2 MPa (175 kg/cm²) y 20,6 MPa (210 kg/cm²) a la compresión simple a los 28 días de edad.
- En lo que respecta a las pruebas de los agregados, la piedra quintilla utilizada para el diseño de la mezcla cumple con el ítem de pérdida por abrasión, pero, en cuanto a la graduación, no lo hace con la malla de 9,5 mm (3/8"); sin embargo, en el resto de mallas, esta piedra quintilla sigue con la graduación no. 7 de la especificación ASTM C33 del agregado grueso para concreto. En el caso del agregado fino, este respeta el requisito de impurezas orgánicas, no así el de partículas friables de la especificación ASTM C33 para el agregado fino. Además, en lo que se relaciona a su graduación, dicho agregado no cumple en las mallas de 4,75 mm (# 4), 0,30 mm (# 50), 0,15 mm

(# 100) y 0,075 mm (# 200). El resto de las mallas obedece la especificación del agregado fino para concreto. A pesar del aspecto señalado tanto en la graduación de los agregados gruesos y finos como en el ensayo de las partículas friables de la arena, las mezclas confeccionadas presentaron una adecuada trabajabilidad y seguirán las resistencias requeridas de diseño, mientras que la experiencia profesional señala que estos agregados se han empleado por años en Costa Rica sin observar que los concretos resultantes mostraran una pérdida de sus propiedades o alteraciones, por lo que dichos agregados pueden usarse en la producción del concreto.

- Los principales problemas de los concretos hechos en obra son la falta de un adecuado diseño de mezcla y la inexistencia de una cultura organizacional comprometida con el control de la calidad de los productos.
- Con respecto a la mezcla, una mala práctica muy común es el exceso de agua para obtener concretos con mayor trabajabilidad. Esta acción lo que provoca es una afectación directa a la resistencia del concreto. Es común que, al realizar mezclas con batidora, se agregue agua directamente de la manguera, buscando “al tanteo” el punto más manejable del concreto, por lo que no hay una medida de dosificación.

4.3. Recomendaciones

- Regular las medidas para la dosificación de los materiales agregados al momento de realizar las mezclas para el concreto.
- En cuanto lo anterior, es importante tener contenedores, preferiblemente con unidades en litros, para la dosificación del agua en la mezcla.
- Si se dosifica por volumen, no se deben mezclar distintos tipos de medidas que puedan ser estandarizadas (cajones, baldes o carretillos).
- Luego de la colada de estos concretos en los elementos estructurales de los diferentes proyectos, se recomienda levantar una muestra de prueba para cada tipo de resistencia. De esta forma, resulta posible verificar si en los distintos campos se logran resultados similares a los obtenidos en esta investigación.

- Realizar pruebas a las mezclas cada vez que se preparan batidas nuevas, esto con el fin de evaluar la homogeneidad de las tandas.
- En la producción comercial es conveniente dar seguimiento a las variables fundamentales que rigen la buena calidad del concreto, tales como las siguientes variaciones:
 - las características básicas de cada agregado, en especial los finos;
 - las proporciones, la relación agua-cemento y la trabajabilidad del conjunto;
 - la variación estadística de la resistencia a la compresión a diferentes edades.
- Esto permite implantar un sistema de ajuste continuo que optimice los resultados de la calidad de los concretos por colocar durante la ejecución de la obra.
- Hacer una adecuada limpieza del terreno para la colocación del cemento.
- Contar con materiales de buena calidad (cemento, agregados, bloques de concreto y acero de refuerzo).
- Almacenar adecuadamente los materiales que serán utilizados en los distintos proyectos.
- Tener un equipo adecuado de trabajo.
- Revisar el apartado de *Malas prácticas con el cemento* que aparece en este documento para así evitar algunas de estas acciones.
- Al dosificar por volumen, no mezclar distintos tipos de medidas (cajones, baldes o carretillos).
- Realizar un control de calidad para obtener mezclas seguras y resistentes.

Bibliografía

- Aguilar, R. (2017). *Determinación de la influencia de las nanomoléculas de sílice en el concreto frente a un factor que afecta su durabilidad*.
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2007/bmficia2831d/doc/bmficia2831d.pdf>
- Alvarado. (2013). *Manual para la construcción de losas de concreto para pavimento rígido*. PR-962901-3.
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3231/manual_construccion_losas_concreto_pavimento_rigido.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Barrantes, R. (2006). *Investigación: Un camino al conocimiento. Un enfoque cualitativo, cuantitativo y mixto*. Euned.
- Brenes y Ugalde. (2020). *Calidad del Concreto en Viviendas de Costa Rica*.
[https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/calidad_del_concreto_en_vivie ndas_de_costa_rica.pdf](https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/calidad_del_concreto_en_vivie_ndas_de_costa_rica.pdf)
- Chinchilla Mora, N. M. (2016). *Resistencia del mortero hidráulico a cinco edades diferentes utilizando cinco tipos de cemento nacional* (Trabajo Final de Graduación para grado de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica).
<https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6730>
- Castillo, C. (2015). *Modificación de las propiedades de matrices cementantes mediante la adición de nanopartículas de sílice*. Universidad autónoma de nuevo León.
<http://eprints.uanl.mx/9270/1/1080215111.pdf>
- Cañas. (s.f.). *Densidad total (peso unitario) y vacíos en agregados para concreto*.
[https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/PESOS %20UNITARIOS%20Y%20%25%20VACIOS.pdf](https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/PESOS%20UNITARIOS%20Y%20%25%20VACIOS.pdf)
- Delgado *et al.* (2020). *Desarrollo de resistencia a la compresión en concreto con cementos modificados*. Rev. Métodos y Materiales/LanammeUCR.
- Díaz, O. (2012). *La evolución de la industria del cemento con énfasis en Latinoamérica*. Universidad de Guatemala. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3377_C.pdf
- Elizondo Valverde, G. O. (2013). *Resistencia vs. Relación A/C del concreto a tres edades y con dos tipos de cemento (UG y MP-AR)* (Trabajo Final de Graduación para

- grado de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica).
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3211/resistencia_relacion_a_c_concreto_tres_edades.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Inteco. (2019). *INTE C19:2019. Fabricación y curado de especímenes de concreto para ensayo en el campo*. <https://www.inteco.org/shop/inte-c19-2019-fabricacion-y-curado-de-especimenes-de-concreto-para-ensayo-en-el-campo-4516#attr=>
- Inteco. (2018). *INTE C147:2018*. San José, Costa Rica.
- Inteco. (2018). *Determinación por lavado del material que pasa por el tamiz 75 μm (N° 200) en agregados minerales. Método de ensayo*.
<https://www.inteco.org/shop/inte-c49-2018-determinacion-por-lavado-del-material-que-pasa-por-el-tamiz-75-m-n-200-en-agregados-minerales-metodo-de-ensayo-2896#attr=>
- Kosmatka, S. H. y Wilson, M. L. (2011). *Design and Control of Concrete Mixtures – The Guide to Applications, Methods and Materials*.
<https://faculty.uml.edu/ehajduk/Teaching/14.310/documents/EB001.15.pdf>
- Lanamme UCR. (s.f.). *Densidad (Peso Unitario), Rendimiento y Contenido de Aire del concreto*. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/ensayos/3-concreto/3.07.pdf>
- Lanamme UCR. (s.f.). *Material más fino que 0,075 mm (malla No. 200) por lavado del material*. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/ensayos/1-agregados/1.05.pdf>
- Lanamme UCR. (s.f.). *Gravedad específica y absorción, agregado fino ASTM C128*.
<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/ensayos/1-agregados/1.08.pdf>
- Lanamme UCR. (s.f.). *Impurezas orgánicas en agregado fino para concreto (Colorimetría) ASTM C40/C40M*. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/ensayos/1-agregados/1.24.pdf>
- Lanamme UCR. (s.f.). *Partículas friables y arcillosas*.
<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/ensayos/1-agregados/1.17.pdf>
- Lanamme UCR. (s.f.). *Abrasión en Máquina de los Ángeles para agregados de tamaño menor o igual a 37,5 mm (1 ½ pulg)*.
<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/ensayos/1-agregados/1.10-1.11.pdf>
- López, N. y Sandoval, I. (2011). *Métodos y técnicas de investigación cuantitativa y cualitativa*. Universidad de Guadalajara.

- Molina. (2006). *Evaluación de morteros para albañilería y revestimientos elaborados a base de cementos mezclados con escorias de horno*.
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2608_C.pdf
- MOPT. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010)*.
- Quintana, A. (2006). *Metodología de Investigación Científica*.
- Rojas Ramos, A. (2020). *Desempeño de concreto permeable con sustitución parcial del material cementante por material vítreo y variaciones de tipo de cemento hidráulico* (Trabajo Final de Graduación para grado de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica).
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/12241/TFG_Andre%cc%81s_Rojas_Ramos.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Universidad Centroamericana. (1996). *Análisis de tamaño de partículas por tamizado en agregado fino y grueso y determinación de material más fino que el tamiz no. 200 (75 μ m) en agregado mineral por lavado*. <https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/GRANULOMETRIA.pdf>
- Zúñiga Coto, A. R. (2020). *Análisis de la resistencia a la compresión de concretos y cementos hidráulicos costarricenses* (Trabajo Final de Graduación para grado de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica).
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/12337/TFG_Anllel_Raquel_Zu%C3%B1iga_Coto.pdf?sequence=1&isAllowed=y