

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

UNIDAD DE TITULACIÓN

**PROPUESTA DE DOSIFICACIÓN PARA HORMIGÓN CELULAR
UTILIZANDO POLVO DE ALUMINIO EN DIFERENTES
FRACCIONES DE PESO RESPECTO AL CEMENTO Y SU
INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL
HORMIGÓN.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MENCIÓN EN ESTRUCTURAS**

AUTOR: RAMOS RIVERA KLEBER PATRICIO

Kleber.ramos@epn.edu.ec

Director: ING. VILLACIS TRONCOSO EUGENIA DE LAS MERCEDES

mercerdes.villacis@epn.edu.ec

QUITO MARZO DEL 2021

DECLARACIÓN

Yo, Kleber Patricio Ramos Rivera, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Kleber Patricio Ramos Rivera

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Kleber Patricio Ramos Rivera, bajo mi supervisión.

Eugenia de las Mercedes Villacís Troncoso

DIRECTOR

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo se lo dedico a mis padres Klever y Susana quienes compartieron conmigo cada momento a pesar de la distancia, brindándome todo su cariño y apoyo lo cual permitió que nunca me dé por vencido.

A mi hermana Paola por siempre estar presente, acompañándome, brindándome apoyo moral y una cálida sonrisa.

A mis abuelos paternos Ángel y Graciela que con su ejemplo me enseñaron el valor de la perseverancia, el emprendimiento y el trabajo duro.

A mis abuelos maternos Juan y Mercedes que inculcaron en mi la sencillez, solidaridad y honestidad, valores fundamentales en la formación humana de cualquier persona de bien.

A mis demás familiares que nunca me dejaron solo y siempre se mantuvieron optimistas ante mí, especialmente a Zoila quien considero como una segunda madre y continuamente me demuestra su interés y cariño.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por las bendiciones derramadas en mi hogar y con mi familia.

De igual manera mi agradecimiento a la Escuela Politécnica Nacional quien me abrió sus puertas, a mis queridos profesores quienes me brindaron una formación de calidad, especialmente a mi directora de Tesis la MSc. Mercedes Villacís quien se esforzó por ayudarme a llegar al punto en el que me encuentro y a cumplir importantes objetivos como culminar el desarrollo de mi tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	I
CERTIFICACIÓN.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABLAS.....	XII
RESUMEN.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
CAPÍTULO 1.....	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 ALCANCE	3
1.4 JUSTIFICACIÓN	3
CAPÍTULO 2.....	5

2.	FUNDAMENTO TEÓRICO	5
2.1	MATERIALES QUE CONFORMAN EL HORMIGÓN EN EL ECUADOR.....	5
2.1.1	AGREGADOS PÉTREOS	5
2.1.2	AGREGADOS GRUESOS	6
2.1.3	AGREGADOS FINOS	9
2.1.4	CEMENTO	11
2.1.5	AGUA.....	14
2.2	POLVO DE ALUMÍNIO	15
2.3	HORMIGÓN CELULAR	16
2.3.1	TIPOS DE HORMIGÓN CELULAR.....	16
2.3.2	VENTAJAS Y DESVENTAJAS	17
2.4	FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN	19
	CAPÍTULO 3.....	21
3.	METODOLOGÍA.....	21
3.1	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	21
3.1.1	GRANULOMETRÍA	21
3.1.2	PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN	25
3.1.3	DENSIDAD APARENTE, SUELTA Y COMPACTA	30
3.1.4	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD.....	31
3.1.5	ABRASIÓN	33
3.1.6	CONTENIDO ORGÁNICO EN ARENA	35
3.2	DOSIFICACIÓN	37

3.2.1	ELECCIÓN DEL ASENTAMIENTO	38
3.2.2	ELECCIÓN DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL	38
3.2.3	SELECCIÓN DE LA CANTIDAD DE AGUA DE MEZCLADO.....	39
3.2.4	ESTIMACIÓN DE LA RELACIÓN AGUA-CEMENTO (A/C)	40
3.2.5	DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE CEMENTO.....	40
3.2.6	ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE AGREGADOS	41
3.2.7	CORRECCIÓN POR HUMEDAD.....	41
3.2.8	REEMPLAZO DEL CEMENTO POR POLVO DE ALUMINIO.....	42
3.3	HORMIGONADO DE LOS CILINDROS.....	42
3.3.1	MEZCLA DE MATERIALES	42
3.3.2	MOLDEO DE LOS CILINDROS.....	43
3.3.3	CURADO DEL HORMIGÓN.....	43
3.4	ENSAYOS REALIZADOS.....	44
3.4.1	ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE	44
3.4.2	ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA.....	46
3.4.3	ENSAYO DE PERMEABILIDAD	47
3.4.4	MÓDULO DE ELASTICIDAD	48
	CAPÍTULO 4.....	50
4.	RESULTADOS	50
4.1	DOSIFICACIÓN	50
4.1.1	DOSIFICACIÓN BASE.....	50
4.1.2	DOSIFICACIÓN CON INCLUSIÓN DE POLVO FINO DE ALUMINIO	51

4.2	COMPRESIÓN.....	51
4.3	TRACCIÓN INDIRECTA.....	53
4.4	PERMEABILIDAD.....	53
4.5	MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	54
	CAPÍTULO 5.....	56
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
5.1	CONCLUSIONES.....	56
5.2	RECOMENDACIONES.....	58
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
	ANEXO 1.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
	GRANULOMETRÍA.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
	ANEXO 2.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
	PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
	ANEXO 3.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
	DENSIDAD APARENTE SUELTA Y COMPACTA.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
	ANEXO 4.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
	ABRASIÓN.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
	ANEXO 5.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
	CONTENIDO ORGÁNICO.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
	ANEXO 6.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
	DOSIFICACIÓN.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
	ANEXO 7.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

CORRECCIÓN POR HUMEDAD	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ANEXO 8	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
INFORME ENSAYO DE COMPRESIÓN	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ANEXO 9	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
INFORME ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ANEXO 10	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
INFORME ENSAYO DE PERMEABILIDAD	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ANEXO 11	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
INFORME ENSAYO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Tamizadora y tamices	22
Figura 2 Serie de tamices	24
Figura 3 Agregado fino lavado y sumergido	26
Figura 4 Molde tronco cónico con material en S.S.S.	26
Figura 5 Determinación de la condición S.S.S. en finos	27
Figura 6 Aplicación de vacío al picnómetro	27
Figura 7 Agregado grueso lavado y sumergido	29
Figura 8 Moldes para densidad suelta y compacta	30
Figura 9 Máquina de los Ángeles.....	34
Figura 10 Comparación con la escala de Gardner	37
Figura 11 Esquema de ensayo de compresión	44
Figura 12 Ensayo de compresión	45
Figura 13 Modos de falla ensayo a compresión	45
Figura 14 Esquema de ensayo de Tracción indirecta	46
Figura 15 Modo de falla de Tracción indirecta.....	47
Figura 16 Armado del ensayo de permeabilidad	48

Figura 17 Ensayo de Módulo de elasticidad.....	49
Figura 18 Curva de endurecimiento de las probetas.....	52
Figura 19 Resistencia a Compresión diferentes edades y porcentajes.....	52
Figura 20 Comparación de las Resistencias a Tracción	53
Figura 21 Penetración promedio.....	54
Figura 22 Resultado de los módulos de elasticidad	55
Figura 23 Curva Granulométrica de Finos.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 24 Curva Granulométrica de Agregado Grueso.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 25 Resultado del ensayo de contenido orgánico	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Requerimientos de graduación para agregado grueso	6
Tabla 2	Porcentaje máximo permitido de sustancias perjudiciales en árido grueso	8
Tabla 3	Requerimientos de graduación para agregado fino	9
Tabla 4	Porcentajes permitidos de sustancias perjudiciales en árido fino.....	10
Tabla 5	Tipos de cemento Portland	12
Tabla 6	Requisitos físicos obligatorios para algunos tipos de cemento Portland.....	13
Tabla 7	Concentraciones límites en agua.....	15
Tabla 8	Propiedades del polvo de Aluminio	16
Tabla 9	Características físicas del hormigón celular	19
Tabla 10	Valores orientativos de la relación agua/cemento.....	20
Tabla 11	Tamaño de la muestra respecto al tamaño nominal del agregado grueso	23
Tabla 12	Gradación para Abrasión de partículas menores a 37.5mm	33
Tabla 13	Carga abrasiva	34
Tabla 14	Escala de Gardner	36
Tabla 15	Valores de asentamiento recomendados	38
Tabla 16	Tamaño máximo de agregado	39
Tabla 17	Cantidad de agua de mezclado, lt/m ³ de hormigón.....	39

Tabla 18 Relación agua-cemento recomendada.....	40
Tabla 19 Volumen del agregado grueso [m ³]	41
Tabla 20 Dosificación del hormigón base (10 cilindros).....	50
Tabla 21 Dosificaciones con polvo de Aluminio (10 cilindros)	51
Tabla 22 Resistencia a compresión de las probetas	51
Tabla 23 Resistencias a tracción indirecta de cilindros.....	53
Tabla 24 Penetración de agua en las muestras	54
Tabla 25 Módulos de Elasticidad de distintas dosificaciones.....	55
Tabla 26 Granulometría de Agregado Fino	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 27 Granulometría de Agregado Grueso	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 28 Peso específico y absorción de finos	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 29 Peso específico y absorción de gruesos	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 30 Densidad aparente de agregado fino	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 31 Densidad aparente de agregado grueso	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 32 Ensayo de Abrasión	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 33 Propiedades del agregado fino	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 34 Propiedades del agregado grueso.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 35 Propiedades del cemento	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 36 Condiciones de Dosificación	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 37 Dosificación para 1 metro cúbico de hormigón	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 38 Corrección de dosificación por humedad	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 39 Dosificación con corrección de humedad	¡Error! Marcador no definido.

Tabla 40 Dosificación para 1 cilindro de 10x20 cm ¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

La presente investigación analiza la adición de polvo de aluminio en la mezcla para cilindros de hormigón, en diferentes porcentajes de peso respecto al cemento (0.1%,0.15%,0.2%,0.3%,0.4%), y comparar los resultados obtenidos entre ellos tanto en ensayos de compresión simple (ASTM C39, 2018), tracción indirecta (ASTM C496, 2017) y permeabilidad (UNE_EN_12390-8, 2004).

El interés de esta investigación en el ámbito académico, se da por la innovación que el hormigón celular puede aportar al sector constructivo en nuestro país, pues este posee grandes beneficios como resistencia al fuego, aislamiento sonoro y térmico, y una densidad más baja que un hormigón tradicional. (Rengifo & Yupangui, 2013)

En cuanto a la parte experimental de la investigación inicialmente se obtuvo la dosificación con cada uno de los porcentajes del polvo de aluminio en peso respecto al cemento, se procedió al hormigonado de los cilindros de acuerdo a la norma (ACI 211.1), una vez curados se procedió a realizar los ensayos pertinentes, para los cuales se realizaran 10 cilindros por cada porcentaje en peso, 2 para tracción indirecta, 2 para permeabilidad y 6 para ensayos de compresión simple, dando un total de 50 cilindros de 100mm por 200mm.

Finalmente, los resultados se basarán en una comparación de las características que posean cada grupo de cilindros, además de un análisis costo beneficio respecto a los hormigones tradicionales.

Palabras clave: polvo de aluminio, hormigón celular, construcción, hormigón convencional

ABSTRACT

The present investigation tries to analyze the addition of aluminum powder in the mix for concrete cylinders, in different percentages of weight with respect to the cement (0.1%, 0.15%, 0.2%, 0.3%, 0.4%), and to compare the results obtained between them in both simple compression (ASTM C39, 2018), indirect tensile (ASTM C496, 2017) and permeability (UNE_EN_12390-8, 2004) tests.

The interest of this research in the academic field is due to the innovation that cellular concrete can contribute to the construction sector in our country, although it is true that it has great benefits such as acoustic and thermal insulation, fire resistance and a higher density. Lower than traditional concrete. (Rengifo and Yupangui, 2013)

As for the experimental part of the confirmed investigation, verify the dosage with each of the percentages of aluminum powder by weight with respect to cement, proceed to concreting the cylinders according to the standard (ACI 211.1), once cured they will proceed to carry out the pertinent tests, for any 10 cylinders are made for each percentage by weight, 2 for indirect traction, 2 for permeability and 6 for simple compression tests, giving a total of 50 cylinders of 100 by 200 mm.

Finally, the results will be based on a comparison of the characteristics of each group of cylinders, in addition to a cost-benefit analysis with respect to traditional concretes.

Keywords: aluminum powder, cellular concrete, construction, conventional concrete

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El hormigón es una de las herramientas más relevantes en la industria constructiva, especialmente en Ecuador. Su historia se encuentra ligada a la historia misma del hombre, desde el momento en que surgió la necesidad de un espacio que le brindase vivir con comodidad y seguridad. El humano ha aplicado sus mayores esfuerzos en la manera de como delimitar el espacio del entorno cumpliendo requerimientos específicos. (Cervantes Abarca, 2008)

En Ecuador el concreto es considerado como el material más usado constructivamente hablando, y esto ha sido así a lo largo de los años, sin embargo, factores como la alta densidad y el peso en los hormigones convencionales ha supuesto un inconveniente, donde la carga muerta juega un papel fundamental. Los elementos estructurales son muy pesados, particularmente las losas de entrepiso y azoteas, que soportan su propio peso y un adicional de carga viva, las mismas que se transmiten a las vigas, columnas y finalmente a los cimientos. (Cervantes Abarca, 2008)

Todo lo anterior da como resultado que la estructura sea muy pesada, dado que para aguantar el peso de las losas se buscan opciones como vigas con grandes peraltes, columnas robustas y grandes cimentaciones, lo cual a la final se traduce en un costo de obra elevado.

Como método de solución a estas cualidades particulares del hormigón convencional se propone el uso de hormigones celulares o livianos (Cervantes Abarca, 2008), lo cual los hace muy aptos para losas, muros, etc.

El hormigón celular es un material homogéneo el cual posee en su interior una red de poros o pequeños espacios vacíos de entre 0.1 y 1 mm (Pinilla, 2013), por lo cual su densidad es menor a un hormigón tradicional. Para obtener un hormigón celular no se utiliza agregado grueso y a la mezcla se le adiciona polvo de aluminio,

el cual reacciona químicamente con el cemento produciendo desprendimiento de hidrógeno y creando así millones de micro esferas de aire distribuidas al interior de la mezcla. (*Tipos de Hormigón y sus propiedades*, 2007),(Vera, 2013). El hormigón celular fue creado con el objetivo de tener un material con buen aislamiento, solidez y trabajabilidad (Rengifo & Yupangui, 2013), además que: “ofrece una solución constructiva integral poniendo al alcance un sistema altamente eficiente, limpio, rápido y versátil.” (Mairongo, 2018).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia en las propiedades físico mecánicas que el hormigón presenta ante la adición de polvo fino de aluminio en diferentes porcentajes de peso respecto al cemento

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la dosificación a utilizar en los diferentes especímenes de hormigón celular y hormigonado de los mismos, en los cuales se empleará la metodología de la norma ACI 211.1
- Evaluar la resistencia a compresión que presentan los diferentes cilindros de hormigón celular mediante la norma (ASTM C39, 2018)
- Evaluar la resistencia a tracción indirecta de los cilíndricos de hormigón celular con las diferentes variaciones en la dosificación del polvo de aluminio (ASTM, 2012).
- Determinar el grado de permeabilidad que presentan los especímenes de hormigón celular (UNE_EN_12390-8, 2004)

1.3 ALCANCE

El presente estudio considera un análisis en la dosificación del hormigón convencional, en la cual se reemplazará un porcentaje en peso de cemento por polvo de aluminio para elaborar hormigón celular, se emplearán materiales comunes como: ripio, cemento, arena y agua; para lo cual se tomará en cuenta los criterios del ACI 211.1 y se elaborarán probetas para el análisis del módulo de elasticidad, tracción indirecta, compresión simple y grado de permeabilidad.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El hormigón celular posee grandes características dentro del ámbito constructivo, especialmente por su baja densidad que ayuda a disminuir el peso de las estructuras, así como otras grandes ventajas que deberían ser tomadas en cuenta y aprovechadas al momento de la concepción de una estructura.

El presente tema de investigación busca complementar el conocimiento en mecánica de materiales al intentar obtener información de las propiedades mecánicas y físicas del hormigón adicionando distintos porcentajes en peso de polvo de aluminio, y comparar los resultados obtenidos de los diferentes especímenes, determinando así la influencia del aluminio en las propiedades del hormigón.

No existe un método de diseño de hormigón que considere la adición del polvo de aluminio dentro de la normativa del ACI 211.1. Sin embargo, el aporte en la presente investigación será la elaboración de cilindros de hormigón celular, con diferentes porcentajes en peso del polvo de aluminio respecto al cemento (0.10%,0.15%,0.20%,0.3%,0.4%), se fabricarán 10 cilindros por cada porcentaje, dando un total de 50 cilindros, a los cuales se les someterá a diferentes ensayos para determinar sus características físico mecánicas, cumpliendo la normativa que el ASTM presenta para cada ensayo, y posteriormente comparando los resultados obtenidos para cada tipo de cilindros elaborados.

El hormigón celular es un tipo de tecnología que debería implementarse en el país, si bien su costo de producción es algo elevado respecto al hormigón tradicional, sus propiedades adicionales bien valen el costo extra que este representa. Su utilización es bastante versátil, desde acabados y decoración hasta ciertos elementos estructurales dependiendo de la dosificación que sea empleada es su elaboración.

El hormigón celular al ser un tipo de hormigón de baja densidad beneficia a las grandes empresas productoras de hormigón, al igual que a calculistas y constructores que tienen la visión de concebir estructuras más livianas que con el uso del hormigón tradicional, sin perder sus características, sino más bien aumentando sus beneficios.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 MATERIALES QUE CONFORMAN EL HORMIGÓN EN EL ECUADOR

2.1.1 AGREGADOS PÉTREOS

Son materiales los cuales proceden de la roca, en la mayoría de ocasiones se los encuentra en la naturaleza. Estos agregados están constituidos por partículas, mismas que están cubiertas de manera parcial o total por la precipitación de carbonatos, sílice, sulfatos, material orgánico o en general por sedimentos, los cuales dificultan su determinación. (Maiza & Marfil, 2010)

Es de suma importancia tomar en cuenta el tipo y la calidad que presenten los agregados, debido que estos ocupan frecuentemente del 60% al 70% de la mezcla total del concreto, por ende, es clara su notable repercusión en las propiedades de la mezcla y posteriormente en su durabilidad. (Villarroel & Ortiz, 2011)

Algunas características para los agregados son:

- Deben ser limpias y duras, a medida de lo posible estas no deben ser reactivas con el cemento y presentar una adecuada granulometría (INECYC & APRHOPEC, 2007)
- No deben tener formas largas como aguja (INECYC & APRHOPEC, 2007)
- Para obtener valores óptimos de resistencia se aconseja utilizar agregados de superficie rugosa. Agregados como el canto rodado son útiles cuando se desea un hormigón de baja resistencia. (INECYC & APRHOPEC, 2007)

¿Cómo debe ser la forma de los agregados?

La cantidad de cemento a utilizar será mayor en caso que se emplee agregados gruesos con formas inadecuadas, esto para alcanzar una buena resistencia. Las formas alargadas se consideran inadecuadas, su porcentaje se verá limitada en la mezcla por la relación del largo, ancho y espesor.

Las partículas cuya relación longitud, ancho sea mayor a 1.5 o a su vez la relación espesor, ancho sea menor a 0.5 se considerarán no aptas para la mezcla. (INECYC & APRHOPEC, 2007)

2.1.2 AGREGADOS GRUESOS

Granulometría

Son materiales que consisten principalmente en grava o piedra triturada, escoria de alto horno o a su vez una combinación de los anteriores, los cuales deberán cumplir requisitos específicos. La mayoría de agregados superan los 5mm, llegando a estar en un intervalo de entre 9.5mm y 38mm. Los agregados que sean fácilmente triturables, serán eliminados de inmediato. (ASTM C33, 2003)

Tabla 1 Requerimientos de graduación para agregado grueso

NÚMERO DE TAMAÑO	TAMAÑO NOMINAL (Tamices con aberturas cuadradas)	CANTIDADES MÁS FINAS QUE PASAN POR CADA TAMIZ DE LABORATORIO (ABERTURAS CUADRADAS), PORCENTAJE EN MASA													
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	300µm
		4 pulg.	3 ½ pulg.	3 pulg.	2 ½ pulg.	2 pulg.	1 ½ pulg.	1 pulg.	¾ pulg.	½ pulg.	3/8 pulg.	Nº 4	Nº 8	Nº 16	Nº 50
1	90 a 37,5 mm (3½ a 1½ pulg.)	100	90 - 100	...	25 - 80	...	0 - 15	...	0 - 5	...	...	...	...	...	...
2	63 a 37,5 mm (2½ a 1½ pulg.)	...	...	100	90 - 100	35 - 70	0 - 15	...	0 - 5	...	...	...	...	...	...
3	50 a 25 mm (2 a 1 pulg.)	...	...	...	100	90 - 100	35 - 70	0 - 15	...	0 - 5	...	...	...	...	...
357	50 a 4,75 mm (2 pulg a Nº 4)	...	...	...	100	95 - 100	...	35 - 70	...	10 - 30	...	0 - 5	...	...	...
4	37,5 a 19 mm (1½ a ¾ pulg.)	...	...	...	...	100	90 - 100	20 - 55	0 - 15	...	0 - 5	...	...	...	...
467	37,5 a 4,75 mm (1½ pulg. a Nº 4)	...	...	...	...	100	95 - 100	...	35 - 70	...	10 - 30	0 - 5	...	...	...
5	25 a 12,5 mm (1 a ½ pulg.)	...	...	...	...	...	100	90 - 100	20 - 55	0 - 10	0 - 5	...	...	...	...
56	25 a 9,5 mm (1 a 3/8 pulg.)	...	...	...	...	...	100	90 - 100	40 - 85	10 - 40	0 - 15	0 - 5	...	...	...
57	25 a 4,75 mm (1 pulg a Nº 4)	...	...	...	...	...	100	95 - 100	...	25 - 80	...	0 - 10	0 - 5	...	...
6	19 a 9,5 mm (¾ a 3/8 pulg.)	...	...	...	...	...	...	100	90 - 100	20 - 55	0 - 15	0 - 5	...	...	...
67	19 a 4,75 mm (¾ pulg a Nº 4)	...	...	...	...	...	...	100	90 - 100	...	20 - 55	0 - 10	0 - 5	...	...
7	12,5 a 4,75 mm (½ pulg a Nº 4)	...	...	...	...	...	...	...	100	90 - 100	40 - 70	0 - 15	0 - 5	...	...
8	9,5 a 2,36 mm (3/8 pulg a Nº 8)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 - 100	10 - 30	0 - 10	0 - 5	...
89	9,5 a 1,18 mm (3/8 pulg a Nº 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	90 - 100	20 - 55	5 - 30	0 - 10	0 - 5
9	4,75 a 1,18 mm (Nº 4 a Nº 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 - 100	10 - 40	0 - 10	0 - 5

Fuente: (INECYC & APRHOPEC, 2007)

Clasificación

Según su origen los agregados gruesos se pueden clasificar en ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Las rocas ígneas forman entre el 65 y 70% de la corteza terrestre, se forman del enfriamiento del magma, que son rocas fundidas por las altas temperaturas.

Las rocas sedimentarias son formadas a partir de material depositado en la zona externa de la corteza terrestre formando capas.

Las rocas metamórficas tienen su origen en otras rocas, las cuales han estado sujetas a altas presiones y temperaturas, pero sin llegar a fundirse. (Maiza & Marfil, 2010)

Algunos requisitos de la norma ASTM

“Para poder aceptar o rechazar una muestra del árido grueso, el ingeniero a cargo del diseño del concreto debe especificar el uso y la aplicación de este según la siguiente tabla” (ASTM C33, 2003)

Tabla 2 Porcentaje permitido de sustancias perjudiciales en árido grueso

Designación de clase	Tipo o localización del concreto	Porcentaje máximo permitido						
		Trozos de arcilla y partículas frágiles	Chert (roca sedimentaria rica en sílice)	Total de arcilla, partículas frágiles y chert	Material que pasa por el tamiz No. 100	Carbón y lignito	Abrasión	Sulfato de magnesio
Regiones con climas severos*								
1S	Zapatas, cimentaciones, columnas y vigas no expuestas a la intemperie, losas interiores con revestimientos	10			1	1	50	
2S	Losas interiores sin revestimiento	5			1	0.5	50	
3S	Cimentaciones sobre la rasante, muros de contención, pilas, pilotes y vigas expuestos a la intemperie	5	5	7	1	0.5	50	18
4S	Pavimentos, cubiertas, calzadas, bordillos, patios, pisos de garajes, pórticos de entradas o estructuras que estén en constante contacto con el agua	3	5	5	1	0.5	50	18
5S	Concreto arquitectónico expuesto a la intemperie	2	3	3	1	0.5	50	18
Regiones con climas moderados**								
1M	Zapatas, cimentaciones, columnas y vigas no expuestas a la intemperie, losas interiores con revestimientos	10			1	1	50	
2M	Losas interiores sin revestimiento	5			1	0.5	50	
3M	Cimentaciones sobre la rasante, muros de contención, pilas, pilotes y vigas expuestos a la intemperie	5	8	10	1	0.5	50	18
4M	Pavimentos, cubiertas, calzadas, bordillos, patios, pisos de garajes, pórticos de entradas o estructuras que estén en constante contacto con el agua	5	5	7	1	0.5	50	18
5M	Concreto arquitectónico expuesto a la intemperie	3	3	5	1	0.5	50	18
Regiones con climas despreciables***								
1N	Losas con alto tráfico, cubiertas de puentes, pisos, veredas, pavimentos	5			1	0.5	50	
2N	Todas las otras clases de concreto	10			1	1	50	

*Regiones con climas severos: Un clima frío donde el concreto está expuesto a heladas, es decir congelación y descongelación repetida, u otros agentes agresivos, también abarca escenarios donde el contacto con el agua es permanente o frecuente, formando un ambiente húmedo.

**Regiones con climas moderados: Un clima donde las heladas suceden de manera ocasional pero el concreto no estará expuesto a la intemperie ni a agentes agresivos externos.

***Regiones con climas despreciables: Un clima donde el concreto es raramente expuesto a las heladas en presencia de humedad.

Fuente: (ASTM C33, 2003)

2.1.3 AGREGADOS FINOS

Granulometría

El agregado fino es aquel que pasa por el tamiz # 4 pero es retenido en el tamiz 200. Estos áridos consisten principalmente en arena natural o reciclada u otro agregado reciclado combinado con este, deben cumplir con una granulometría adecuada. (ASTM C33, 2003)

Tabla 3 *Requerimientos de graduación para agregado fino*

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA (a)
mm	pulgadas	
9.5	3/8	100%
4.75	No. 4	95%-100%
2.36	No. 8	80%-100%
1.18	No. 16	50%-85%
600 μm	No. 30	25%-60%
300 μm	No. 50	5%-30%
150 μm	No. 100	0-10%

Fuente: (ASTM C33, 2003)
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

Algunos requisitos de la norma ASTM

Las partículas deben ser durables, impolutas, sólidas y libres de elementos químicos absorbidos que pudiesen perjudicar la correcta hidratación y la consistencia del hormigón. (Villaruel & Ortiz, 2011)

Tabla 4 *Porcentajes permitidos de sustancias perjudiciales en árido fino*

MATERIAL	PORCENTAJE MÁXIMO PERMITIDO
Para hormigón sometido a abrasión	3.0 %
Para cualquier tipo de hormigón	5.0 %
Terrones de arcilla y partículas frágiles	3.0 %
Partículas livianas (carbón y lignito) *cuando la apariencia del hormigón es importante.	0.5 %
Para cualquier otro hormigón	1.0 %

Fuente: (ASTM C33, 2003)
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

La cuantía de agregado fino que pase por los tamices No.50 y No.100 perjudican tanto la trabajabilidad como la textura superficial por lo que es recomendable que solo del 10% al 30% de la cuantía pase por el tamiz No.50 (Villarroel & Ortiz, 2011)

Módulo de finura

Es un indicador de la finura del material, mientras más grande el módulo, más grueso el agregado. El módulo es extremadamente útil para el cálculo de las porciones de finos y grueso presentes en la pasta de cemento, el módulo de finura del árido fino debe estar dentro de un rango entre 2.3 y 3.1 para un óptimo uso ingenieril. (ASTM C33, 2003)

Contenido de humedad

Si el material posee la capacidad de absorber agua esto producirá la disminución de la relación agua cemento, por el otro lado si posee agua en la superficie aumentará la relación. En el primer escenario el hormigón disminuirá su trabajabilidad, en el segundo mermará su resistencia. (Villaruel & Ortiz, 2011)

2.1.4 CEMENTO

Los cementos son conglomerantes hidráulicos, estos tienen procedencia inorgánica y mineral. Se llaman conglomerantes hidráulicos a los productos que, mediante un amasado con agua se endurecen, producto de reacciones químicas entre sus constituyentes, ya sea que estén expuestos al aire o sumergidos en el agua. (INECYC & APRHOPEC, 2007)

El cemento es un material de construcción que se forma de la mezcla de varios elementos adhesivos. Debe su nombre a la denominación romana "opus caementitium" cuya traducción es obra cementicia. Actualmente el hormigón sigue comportándose como un adhesivo, pero su mayor uso se encuentra en la construcción de grandes edificaciones y en definitiva todo tipo de construcciones relacionadas a obras de ingeniería civil. (Valdez, Suarez, & Proaño, 2010).

Tabla 5 Tipos de cemento Portland

TIPO	DESCRIPCIÓN	NORMA		
		INEN	ASTM	
PUROS	I	Uso común	152	C 150
	II	Moderada resistencia a sulfatos y calor de hidratación	152	C 150
	III	Elevada resistencia inicial	152	C 150
	IV	Bajo calor de hidratación	152	C 150
	V	Alta resistencia acción de sulfatos	152	C 150
Los tipos IA, IIA, IIIA incluyen incorporación de aire				
COMPUESTOS	IS	Portland con escoria de altos hornos	490	C 595
	IP	Portland puzolánico	490	C 595
	P	Portland puzolánico (Cuando no se requieren resistencias iniciales altas)	490	C 595
	I(PM)	Portland puzolánico modificado	490	C 595
	I(SM)	Portland con escoria modificado	490	C 595
	S	Cemento de escoria	490	C 595
POR DESEMPEÑO	GU	Uso en construcción en general	2380	C 1157
	HE	Elevada resistencia inicial	2380	C 1157
	MS	Moderada resistencia a sulfatos y calor de hidratación	2380	C 1157
	HS	Alta resistencia a los sulfatos	2380	C 1157
	MH	Moderado calor de hidratación	2380	C 1157
	LH	Bajo calor de hidratación	2380	C 1157
	Si adicionalmente tiene R, indica baja reactividad con áridos álcali-reactivos			

Fuente: (INECYC & APRHOPEC, 2007)
 Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

Tabla 6 Requisitos físicos obligatorios para algunos tipos de cemento Portland

CONCEPTO	TIPO DE CEMENTO						
	PUROS		COMPUESTOS		POR DESEMPEÑO		
	INEN 152		INEN 490		INEN 2380		
	I	II	IP-I(PM)	IP(MS)	GU	HE	MS
Contenido de aire en el mortero % máximo	12	12	12	12	(*)	(*)	(*)
Finura (m ² /kg) mínimo							
Turbidímetro	160	160	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
Permeabilidad del aire	260	280	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
Expansión en autoclave % máximo	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Contracción en autoclave % máximo	-	-	0.2	0.2	0.8	0.8	0.8
Resistencia a los sulfatos Expansión a 180 días % máximo	-	-	(**)	0.1	-	-	0.1
Tiempo de fraguado inicial							
Método de Vicat (minutos)							
No menor a:	45	45	45	45	45	45	45
No mayor a:	375	375	420	420	420	420	420

Resistencia a compresión (MPa)							
1 día mínimo	-	-	-	-	-	10.0	-
3 días mínimo	12.0	10.0	13.0	11.0	10.0	17.0	10.0
7 días mínimo	19.0	17.0	20.0	18.0	17.0	-	17.0
28 días mínimo	28.0	28.0	25.0	25.0	-	-	-

(*) Las normas INEN 490 Y 2380 indican que estas características deben ser reportadas en los certificados entregados por el productor.

(**) El valor máximo de expansión 0.1% es requisito opcional para estos tipos de cementos, sin embargo, los cementos IP nacionales generalmente lo cumplen.

Fuente: Extraído de INECYC & APRHOPEC, 2007
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

2.1.5 AGUA

El agua de amasado en el hormigón desempeña un papel de gran relevancia, interviene en la hidratación del cemento, otorgándole la trabajabilidad necesaria al hormigón para un correcto comportamiento en obra. La cantidad de agua no debe excederse de la necesaria ya que el exceso se puede evaporar y pueden crearse huecos en el hormigón que resultan en la disminución de su resistencia. Por otro lado, no debe disminuirse tanto la cantidad pues se obtendrían masas muy poco trabajables las cuales sería de difícil colocación en obra. (Jimenez, 2000).

El agua de curado, en el proceso de fraguado, tiene como objetivo evitar que el hormigón se seque, mejorar la hidratación e impedir una prematura retracción. Tanto el agua de amasado como de curado deben cumplir algunas condiciones para que su desempeño sea eficaz.

Generalmente las aguas potables son idóneas tanto para mezclado y curado del hormigón. Para proyectos de hormigón, tanto en masa como armado si no se conoce los antecedentes del agua, esta deberá ser sometida a ensayos que constaten que no altera de manera negativa las propiedades del hormigón. Se

rechazará automáticamente las que presenten Hidratos de Carbono, pH inferior a 5 o si incumplen las características dadas en la siguiente tabla.

Tabla 7 Concentraciones límites en agua

CONCENTRACIONES EN AGUA DE MEZCLA	LÍMITES (MAX)
Cloruros, como Cl	
Para hormigón pretensado	500 miligramos/litro
Para hormigón armado o con elementos metálicos embebidos	1000 miligramos/litro
Sulfatos, como SO_4	3000 miligramos/litro
Álcalis, como $(Na_2O + 0.658 K_2O)$	600 miligramos/litro
Total de sólidos (por masa)	50000 miligramos/litro

Fuente: (INECYC & APRHOPEC, 2007)
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

2.2 POLVO DE ALUMÍNIO

El aluminio es un metal que en su estado puro presenta un color plateado, en varias ocasiones también presenta un color blanco metálico, es blando, dúctil y maleable. Se extrae de los minerales criolita y bauxita.

Es utilizado en varios campos, como en la construcción de aviones y automóviles; es usado también como aditivo pulverizado para la construcción.

El polvo de aluminio se define como pequeñas partículas con tamaños aproximadamente definidos. Este polvo tiene como fin la incorporación de aire en el hormigón. (Peña & Zambrano, 1992)

Tabla 8 *Propiedades del polvo de Aluminio*

PROPIEDADES	VALOR
Peso molecular [gr/mol]	26.97
Punto de ebullición [°C]	2056
Punto de fusión [°C]	660
Peso específico 20 [°C]	2.70

Fuente: (Peña & Zambrano, 1992)
 Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

2.3 HORMIGÓN CELULAR

Se los denomina también como hormigones livianos, y son aquellos que mediante métodos en el proceso de elaboración se han hecho más ligeros respecto al hormigón convencional compuesto por cemento, grava y arena, el cual ha sido considerado como el principal material en el área de la construcción durante muchos años.

Los primeros hormigones livianos aparecieron en el imperio Romano en el año 20 a.C. Estos hormigones resultaban de la mezcla de materiales cementantes a partir de limos quemados con materiales de baja densidad como la piedra pómez. (Valdez et al., 2010)

Al tener hormigones de baja densidad es posible tener como ventajas la reducción de la carga muerta, mayor rapidez de construcción y una conductividad térmica baja. Se ha demostrado que al utilizar hormigones livianos se logra un tiempo de ejecución en obra menor en comparación al uso de materiales tradicionales.

2.3.1 TIPOS DE HORMIGÓN CELULAR

Para la elaboración de hormigones livianos se incluye aire, espuma o algún material cuya reacción genere micro cápsulas de aire al interior de la mezcla, provocando así la reducción de su densidad. El hormigón liviano puede ser utilizado de relleno, como aislante, y como material estructural de alto desempeño. (Valdez et al., 2010)

Hormigones celulares gaseados

Se los obtiene mediante la incorporación de determinados productos químicos que reaccionan con el cemento, produciendo un desprendimiento de gas que queda ocluido en la masa en forma de burbujas uniformes.

El conglomerante que se usa generalmente es el cemento portland, aunque también se pueden utilizar cales de gran pureza y finura, por otro lado, como agentes generadores de gas pueden emplearse:

- Polvo de aluminio, reacciona con el cemento produciendo un desprendimiento de hidrógeno, es importante que este polvo sea lo más puro posible.
- Agua oxigenada e hipoclorito de calcio producen desprendimiento de oxígeno
- Carburo cálcico que reacciona con el agua produce acetileno

Hormigones espumados

Son similares a los gaseosos antes mencionados, con la diferencia que en estos, los huecos son generados por una sustancia espumosa que produce burbujas de aire en la masa, sin embargo las propiedades no varían mucho respecto a los gaseados (Valdez et al., 2010)

2.3.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS HORMIGONES DE BAJA DENSIDAD

El hormigón liviano, debido a los agregados o a su vez, al tipo de mezcla, presentan ciertas características físicas y químicas, que dotan a este tipo de hormigón de ciertas características, las cuales se debe tomar en consideración de acuerdo al tipo de proyecto que se quiera ejecutar. Estas ventajas se presentan a continuación:

- Disminución del peso de la estructura y cargas de cimentación
- Ahorro considerable en el consumo de energía eléctrica, específicamente en lugares con climas extremos
- La compactación no es requerida
- Fraguado uniforme y controlado
- La colocación y el acabado son más económicos
- Presenta buena aislación térmica y acústica
- Presenta una resistencia al fuego superior que el concreto tradicional
- Presenta un bajo módulo de elasticidad y una excelente trabajabilidad

A su vez, el hormigón celular también cuenta con desventajas las cuales es necesario tomar en cuenta con la misma importancia como las ventajas

- Los agregados livianos usualmente son más caros que la grava común
- Debido a su bajo módulo de elasticidad se pueden producir mayores deformaciones en comparación a un hormigón convencional
- Presenta una contracción por secado mayor a la del hormigón tradicional
- “Debido a su gran absorción es difícil determinar el grado de incidencia en la relación agua-cemento” (Valdez et al., 2010)

Tabla 9 Características físicas del hormigón celular

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL HORMIGÓN CELULAR	VALOR
Calor específico en W.h/Kg.°K	0.28
Conductividad térmica en w/m. °K	0.11-0.20
Dilatación térmica en mm/m	0.008
Punto de fusión en °C	1.100-1.200
Módulo de elasticidad E en Kg/cm ²	14.000-30.000
Absorción del agua en g/dm ³ máxima en 14 horas	210
Retracción en mm/m	0.15-0.45
pH	9-10

Fuente: (Peña & Zambrano, 1992)
 Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

2.4 FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

Para hablar acerca de la fabricación del hormigón es de suma importancia tocar el tema de la dosificación, la dosificación de un hormigón se define como la determinación de las porciones en que hay que mezclar para conseguir una masa que cuente con las características y propiedades requeridas en el proyecto. La dosificación se la puede percibir como algo demasiado complejo debido que depende de muchos factores, algunos relacionados con las propiedades requeridas por el hormigón, otros por las propiedades de los materiales y algunos ligados a los medios de fabricación, transporte y colocación. (Jimenez, 2000)

Tabla 10 Valores guía de la relación agua/cemento en función de la resistencia a compresión a 28 días

RESISTENCIA DEL HORMIGÓN (N/mm ²)		ÁRIDOS RODADOS		ÁRIDOS MACHACADOS	
Características f_{ck}	Media f_{cm}	CEM-I/32.5	CEM-I/42-5	CEM-I/32.5	CEM-I/42-5
20	28	0.55	0.60	0.65	-
25	33	0.50	0.55	0.60	0.65
30	39	0.45	0.50	0.55	0.60
35	44	0.40	0.45	0.50	0.55
40	50	-	0.40	0.45	0.50

Fuente: (Jimenez, 2000)
 Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Una vez que se tienen los agregados se procede a realizar su caracterización mediante los ensayos dictados por la norma (ACI 211.1, 2009), los cuales a su vez ayudan a determinar sus propiedades físicas y mecánicas, mismas que posteriormente se utilizan en la determinación de una correcta dosificación de hormigón. Dichos ensayos se enlistan a continuación.

- Granulometría
- Peso específico y absorción
- Densidad aparente, suelta y compacta
- Determinación del contenido de humedad
- Abrasión
- Contenido orgánico en arenas

Los ensayos antes mencionados están descritos en la normativa, así como su metodología, procedimiento y la manera correcta de interpretar sus resultados.

3.1.1 GRANULOMETRÍA

El ensayo dicta que se coloque una serie de tamices en tamaño de apertura decreciente de arriba hacia abajo, el material seco ingresa por la parte de arriba y queda retenido en las distintas mallas de acuerdo a su tamaño.



Figura 1 Tamizadora y tamices
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

Para el agregado grueso es importante seleccionar el tamaño de la muestra tomando en cuenta el tamaño máximo nominal que se indica en la tabla 11 (ASTM C136, 2007). Mientras que para el agregado fino la muestra no deberá ser menor a 300 [g].

Tabla 11 *Tamaño de la muestra respecto al tamaño nominal del agregado grueso*

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL [mm]	TAMAÑO MÍNIMO DE LA MUESTRA [Kg]
9.5	1
12.5	2
19.0	5
25.0	10
37.5	15
50.0	20
63.0	35
75.0	60
90.0	100
100.0	150
125.0	300

Fuente: (ASTM C136, 2007)
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

La serie de tamices a elegir para los agregados están en función de las diferentes gradaciones que tiene el agregado, representados en las tablas 1 y 3 del presente documento.



Figura 2 Serie de tamices
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

Los datos sacados de la granulometría son útiles al momento de representarlos en la curva granulométrica, para esto es necesario considerar las ecuaciones presentadas a continuación:

$$\%Retenido = \frac{\text{Peso retenido}}{\text{Peso total}} \times 100$$

$$\%Ret. \text{ Acumulado} = \%Ret. \text{ tamiz anterior} + \%Ret. \text{ tamiz actual}$$

$$\%Pasa = 100 - \%Ret. \text{ Acumulado}$$

El módulo de finura es un valor utilizado para definir un árido, este valor es más grande en un árido grueso en comparación de un fino y permite saber en qué tamiz se retiene el 50% del material (Luna, 2014).

$$MF = \frac{\Sigma(\%Retenido \text{ acumulado de los tamices serie Tyler})}{100}$$

Otros datos importantes que se pueden obtener de la curva granulométrica es el D10 (diámetro que corresponde al 10% del suelo), D30 (diámetro que corresponde al 30% del suelo) y D60 (diámetro que corresponde al 60% del suelo). Conocidos estos datos es también importante conocer el coeficiente de uniformidad (C_u) y el coeficiente de curvatura (C_c). Estos parámetros nos indican la uniformidad y la heterogeneidad que presentan los agregados en la curva.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}}$$

Los resultados de los ensayos de granulometría se muestran en el Anexo 1

3.1.2 PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN

La absorción se la puede definir como el aumento de masa de los agregados producto de la entrada de agua en los poros de las partículas.

Por otro lado, el peso específico es el peso de las fracciones sólidas del agregado, dividido para su volumen. Dentro del mismo concepto entra “el peso específico en condición de superficie saturada seca, el cual relaciona la masa total y el volumen de los agregados saturados de agua” (Luna, 2014).

El proceso para realizar el ensayo se encuentra a detalle en las normas (ASTM C127, 2015) para el caso del agregado grueso y (ASTM C128, 2015) correspondiente al agregado fino.

Procedimiento de ensayo para árido fino

- El primer paso es lavar el agregado con el propósito de eliminar polvo, limos y/o materia orgánica que pueda contener.
- Posteriormente se lo sumerge en agua durante 24 horas para lograr su saturación.



Figura 3 Agregado fino lavado y sumergido
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

- Se procede a determinar la condición de superficie saturada seca (S.S.S.), para lo cual se extrae 500 g de la muestra saturada.
- Colocar la muestra en una bandeja e introducirla al horno hasta que se complete el secado superficial.
- Llenar el molde tronco cónico con el material y apisonar 25 veces con el pistilo, dejándolo caer desde una distancia de 3.5 cm.



Figura 4 Molde tronco cónico con material en S.S.S.
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

- Retirar el material excedente y levantar el molde. La condición S.S.S. se obtiene cuando el material se desliza al momento de levantar el molde.

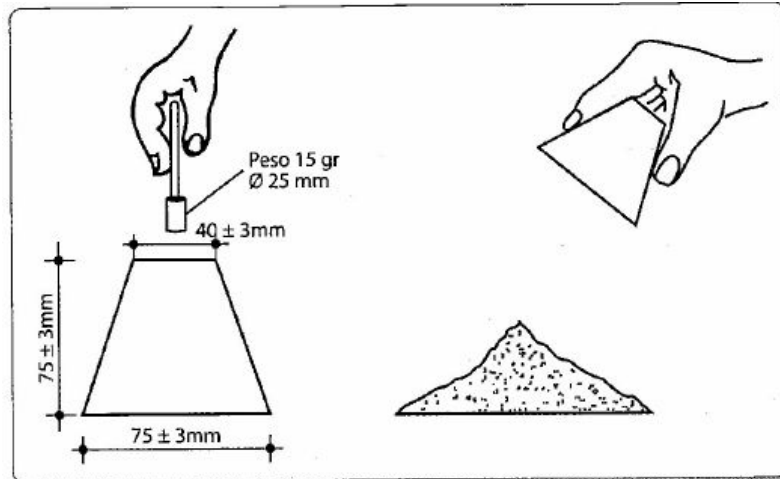


Figura 5 Determinación de la condición S.S.S. en finos
Fuente: (Luna, 2014)

- Posteriormente se toma una muestra de 500 g en estado S.S.S. y se lo vierte en un picnómetro llenado previamente con 250 ml de agua.
- Mediante el uso de una bomba se aplica vacío al picnómetro con el objetivo de eliminar el aire atrapado en el interior.



Figura 6 Aplicación de vacío al picnómetro
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

- Llenar el picnómetro con agua hasta la línea de aforo, intentando evitar la introducción de aire.

- Pesar el picnómetro con agua y arena, posteriormente medir la temperatura del líquido.
- Con el valor de la temperatura, determinar el valor del picnómetro lleno de agua.
- Vaciar el contenido del picnómetro en una bandeja anteriormente pesada.
- Meter la bandeja al horno durante 24 horas con una temperatura de 110 °C.
- Finalmente se toma el peso del recipiente con la muestra seca.

Las ecuaciones a utilizar se presentan a continuación

$$\text{Peso del material seco [g]} = P5 = P4 - P3$$

$$\text{Peso específico [g/cm}^3] = \frac{P5}{P2 + P0 - P1}$$

$$\text{Densidad S.S.S. [g/cm}^3] = \frac{P0}{P2 + P0 - P1}$$

$$\text{Absorción de agua [\%]} = \frac{P0 - P5}{P5} \times 100$$

En donde:

P5 = Peso seco del material [g]

P4 = Peso del recipiente más el material seco [g]

P3 = Peso del recipiente [g]

P2 = Peso del picnómetro más el agua calculado a la temperatura tomada [g]

P1 = Peso del picnómetro más la muestra y más el agua [g]

P0 = Peso del material el S.S.S. [g]

Procedimiento de ensayo para árido grueso

- Lavar el árido para eliminar el polvo fino que suele estar adherido y dejar sumergido en agua durante 24 horas para lograr su saturación.



Figura 7 Agregado grueso lavado y sumergido
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

- Inmediatamente después secar el árido con una franela hasta que pierdan brillo, de esta manera conseguiremos la condición de S.S.S.
- Determinar el peso del árido en condición S.S.S.
- Sumergir una canasta en un recipiente con agua y obtener su peso sumergido.
- Sumergir la canasta con el material en agua y tomar su peso.
- Calcular el peso del material sumergido.
- Sacar el material del agua y colocar en un recipiente previamente pesado.
- Dejar el recipiente en el horno durante 24 horas con una temperatura de 105 °C. y finalmente calcular el peso de la muestra seca.

En este caso las fórmulas a utilizar se presentan a continuación:

$$\text{Peso específico [g/cm}^3] = \frac{P3}{P1 - P2}$$

$$\text{Peso específico en superficie saturada seca [g/cm}^3] = \frac{P1}{P1 - P2}$$

$$\text{Absorción de agua [\%]} = \frac{P1 - P3}{P3} \times 100$$

En donde:

P3 = Peso de la muestra seca [g]

P2 = Peso de la muestra sumergida en agua [g]

P1 = Peso de la muestra en S.S.S. [g]

Los resultados obtenidos en los ensayos de peso específico y absorción se muestran en el Anexo 2

3.1.3 DENSIDAD APARENTE, SUELTA Y COMPACTA

Esta propiedad es de mucha importancia, sobre todo al momento de realizar la dosificación de manera volumétrica.

Dependiendo del árido, fino o grueso se utiliza un tipo específico del molde. El ensayo se encuentra descrito a detalle en (ASTM C29, 2014).



Figura 8 Moldes para densidad suelta y compacta
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

Procedimiento de ensayo densidad suelta

- Necesitamos un recipiente del cual debemos saber su volumen y peso.

- Posteriormente llenamos el recipiente con el material sin producir demasiada vibración.
- Finalmente enrasamos y pesamos el recipiente con el material.

Procedimiento de ensayo densidad compacta

- Respecto a la densidad compacta difiere de la suelta en que el contenedor debe ser llenado con el material en tres capas, cada una de estas deberá ser compactada con 25 golpes de la varilla de compactación.
- De la misma manera al final se procede a enrasar y pesar el contenedor con el material.

Tanto para la densidad suelta y compacta se utiliza la misma fórmula:

$$\text{Densidad Aparente } [g/cm^3] = \frac{P2 - P1}{V}$$

En donde:

P2 = Peso del contenedor más el material [g]

P1 = Peso del contenedor vacío [g]

V = Volumen del contenedor [cm³]

Los resultados obtenidos en los ensayos de densidad suelta y compacta se muestran en el Anexo 3

3.1.4 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

Es una propiedad determinante, debido que de este parámetro influye directamente una buena dosificación del hormigón.

Así, si la arena y/o la grava a utilizar presentan mucha humedad, al mezclar todos los materiales dará como resultado una pasta con menos consistencia que la

deseada, su trabajabilidad será mucho mayor y por consecuencia la resistencia se verá disminuida de manera significativa.

Por otro lado, si la arena y/o la grava están demasiado secas, estas pueden absorber el agua hasta saturarse, aminorando el agua disponible para la correcta hidratación del cemento lo que dará como resultado una pasta seca, poco manejable y con reducción considerable de su trabajabilidad.

Por lo indicado anteriormente es relevante la determinación del contenido de humedad de los agregados de esta manera poder realizar una corrección de las cantidades de agua del material y las que requiere la mezcla para alcanzar la resistencia deseada.

Procedimiento de ensayo

- Para determinar el contenido de humedad es necesario colocar el material (200 a 400 gramos) en un recipiente del cual conozcamos su peso.
- Introducimos el recipiente en el horno por 24 horas.
- Finalmente pesamos el recipiente con el material seco.

El porcentaje de humedad se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$W [\%] = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de material seco}} \times 100$$

$$W [\%] = \frac{P2 - P3}{P3 - P1} \times 100$$

En donde:

P3 = Peso del recipiente más el material seco [g]

P2 = Peso del material húmedo más el recipiente [g]

P1 = Peso del recipiente [g]

3.1.5 ABRASIÓN

La finalidad del ensayo es que se produzca un desgaste en la superficie del agregado, mediante la aplicación de una carga abrasiva con la ayuda de esferas de acero, se somete todo el conjunto a un proceso de rotación en la Máquina de los Ángeles (Luna, 2014).

El ensayo de abrasión se encuentra normado en (ASTM C131, 2014) en la cual se menciona a detalle el método de ensayo.

Procedimiento de ensayo

- Para empezar, se debe elegir la gradación y revoluciones para la muestra, esto en función de la granulometría obtenida.

Tabla 12 Gradación para Abrasión de partículas menores a 37.5mm

TAMICES		MASA [g]			
Pasante	Retenido	Gradación			
		A	B	C	D
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	No. 4			2500±10	
No. 4	No. 8				5000±10
Total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Nº de esferas		12	11	8	6
Nº de revoluciones		500	500	500	500

Fuente: (ASTM C131, 2014)
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

- Una vez que se obtiene la gradación, se procede a seleccionar la carga abrasiva que se utilizará en el ensayo.

Tabla 13 Carga abrasiva

GRADACIÓN	NÚMERO DE ESFERAS	MASA DE LA CARGA [gr]
A	12	5000±25
B	11	4584±25
C	8	3330±20
D	6	2500±15

Fuente: Modificado de (Luna, 2014)
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

- Al obtener estos datos, se colocan dentro de la máquina de los Ángeles la muestra y las esferas metálicas y se procede a girar el tambor a 33 rpm.



Figura 9 Máquina de los Ángeles
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

- Al terminar con las 100 primeras vueltas se debe retirar el material de la máquina y pasarlo por el tamiz N° 12, se deberá pesar el material retenido.
- Se vuelve a colocar todo el material dentro de la máquina, junto con el material abrasivo durante 400 vueltas más para finalizar el ensayo.
- El material será pasado por el tamiz N° 12 y se pesará el material retenido.

- Finalmente se calcula el porcentaje de abrasión y el coeficiente de uniformidad mediante las ecuaciones a continuación

$$V [\%] = \frac{A - B}{A} * 100$$

$$CU = \frac{\text{Porcentaje de pérdida a 100 rev}}{\text{Porcentaje de pérdida a 500 rev}}$$

$$CU = \frac{A - B}{A - C}$$

Donde:

V = Abrasión [%].

A = Peso inicial de la muestra [g]

B = Peso retenido en el tamiz 12 a las 100 vueltas [g]

C = Peso retenido en el tamiz 12 a las 500 vueltas [g]

Los resultados del ensayo de abrasión se presentan en el Anexo 4

3.1.6 CONTENIDO ORGÁNICO EN ARENA

El presente método es realizado para conocer la presencia de compuestos orgánicos en arenas naturales. La presencia de estos compuestos a menudo puede causar problemas en la fabricación de hormigón, tanto en la hidratación del cemento como en el desarrollo de la resistencia.

El ensayo se realiza con moderada facilidad siguiendo lo estipulado en la norma (ASTM C40, 2014).

Procedimiento de ensayo

- Se prepara una solución, disolviendo 3 partes de hidróxido de sodio en 97 partes de agua.
- El agregado fino se coloca en un envase de vidrio transparente en donde pueda leerse un volumen de 130 ml.
- Posteriormente se procede a llenar el envase con el hidróxido de sodio hasta la marca de los 200 ml.
- Tapar el envase y agitarlo, procurando que todas las partículas entren en contacto con la solución.
- Dejar reposar durante 24 horas. Luego de ese periodo de tiempo se compara el color de la mezcla en la placa de Gardner y se le asigna un valor de acuerdo a la escala.

Tabla 14 *Escala de Gardner*

Color normalizado escala Gardner No.	Orden en la placa del comparador	Observación
5	1	Uso permitido
8	2	
11	3	Normalizado de referencia
14	4	Uso no permitido
16	5	

Fuente: (NTE INEN 855)



Figura 10 Comparación con la escala de Gardner
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

Los resultados de la prueba de contenido orgánico se presentan en el Anexo 5

3.2 DOSIFICACIÓN

Con el fin de obtener un resultado de calidad, el método utilizado para este proyecto fue el propuesto por el “American Concrete Institute” (ACI 211.1), debido que presenta buenos resultados, además de ser un método muy difundido y aceptado.

En la práctica, se debe tomar en cuenta cualquier circunstancia que pueda afectar las propiedades de los elementos, puesto que esto influirá de manera directa con la calidad final de la mezcla. Otro punto a tener en cuenta durante la dosificación es cuál será la finalidad de dicho hormigón y en qué va a ser empleado.

3.2.1 ELECCIÓN DEL ASENTAMIENTO

El asentamiento viene dado dependiendo del tipo de elemento en el cual se va a emplear al hormigón. La importancia del asentamiento radica en evitar mezclas muy húmedas, las cuales traen como consecuencias hormigones porosos, de baja resistencia y poco durables. En la tabla 15 se encuentran los valores de asentamiento recomendados.

Tabla 15 *Valores de asentamiento recomendados*

ASENTAMIENTO RECOMENDADO PARA VARIOS TIPOS DE CONSTRUCCION		
TIPOS DE CONSTRUCCION	ASENTAMIENTO [cm]	
	máximo	mínimo
Fundaciones: paredes y zapatas reforzadas	12.7	5
Zapatas simples, caisson y muros de subestructura	10	2.5
Losas, vigas y paredes reforzadas	15	7.6
Pavimentos y veredas	7.6	5
Construcción	7.6	2.5

Fuente: (ACI 211.1, 2009)
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

3.2.2 ELECCIÓN DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL

Este parámetro está en función tanto de las dimensiones del elemento estructural en el cual se vaya a emplear, así como también del tipo de construcción. Para optimizar el beneficio económico es importante escoger el agregado de mayor tamaño, puesto que con esto es posible reducir la pasta a utilizar.

Tabla 16 *Tamaño máximo de agregado*

TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO RECOMENDADO PARA VARIAS OBRAS				
DIMENSION MÍNIMA DE LA SECCIÓN cm (plg)	TIPOS DE CONSTRUCCIÓN			
	PAREDES, VIGAS, COLUMNAS	MUROS SIN REFUERZO	LOSAS FUERTEMENTE ARMADAS	LOSAS LIGERAMENTE ARMADAS O SIN REFUERZO
6,4 a 12,7 (2,5 a 5)	1,27 a 1,9 (1/2 a 3/4)	1,9 (3/4)	1,9 a 2,5 (3/4 a 1)	1,9 a 3,8 (3/4 a 1/2)
15,2 a 28,0 (6 a 11)	1,9 a 3,8 (3/4 a 1 1/2)	3,8 (1 1/2)	3,8 (1 1/2)	3,8 a 7,6 (1 1/2 a 3)
30,5 a 73,7 (12 a 29)	3,8 a 7,6 (1 1/2 a 3)	7,6 (3)	3,8 a 7,6 (1 1/2 a 3)	7,6 (3)
76,2 ó más (30 ó más)	3,8 a 7,6 (1 1/2 a 3)	15,2 (6)	3,8 a 7,6 (1 1/2 a 3)	7,6 a 15,2 (3 a 6)

Fuente: (ACI 211.1, 2009)

3.2.3 SELECCIÓN DE LA CANTIDAD DE AGUA DE MEZCLADO

Se refiere a la cantidad de agua para producir un metro cúbico de hormigón con la consistencia deseada, y esto depende del asentamiento, del tamaño máximo del agregado y de la cantidad de cemento. La tabla a continuación presenta valores aproximados de la cantidad de agua, tanto para hormigones normales como para aquellos con inclusión de aire.

Tabla 17 *Cantidad de agua de mezclado, lt/m³ de hormigón*

TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO GRUESO								
ASENTAMIENTO cm (plg)	0,95 (3/8)	1,27 (1/2)	1,9 (3/4)	2,54 (1)	3,81 (1 1/2)	5,08 (2)	7,62 (3)	15,24 (6)
HORMIGÓN SIN INCLUSIÓN DE AIRE								
2,5 a 5,1 (1 a 2)	208	198	183	178	163	153	144	124
7,6 a 10,2 (3 a 4)	228	218	203	193	178	168	158	139
15,2 a 17,8 (6 a 7)	243	228	213	203	188	178	168	149
Porcentaje de Aire Atrapado %	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5	0,3	0,2
HORMIGÓN CON INCLUSIÓN DE AIRE								
2,5 a 5,1 (1 a 2)	183	178	163	153	144	134	124	109
7,6 a 10,2 (3 a 4)	203	193	178	168	158	149	139	119
15,2 a 17,8 (6 a 7)	213	203	188	178	168	158	149	129
Porcentaje de Aire Atrapado %	8,0	7,0	6,0	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0

Fuente: (ACI 211.1, 2009)

3.2.4 ESTIMACIÓN DE LA RELACIÓN AGUA-CEMENTO (A/C)

Una correcta elección de la relación agua-cemento supone un hormigón de buena calidad, respecto a términos de resistencia y durabilidad. Si bien la relación agua-cemento no es el único parámetro que influye en la fabricación del hormigón, si representa una parte importante, puesto que asegura una pasta adecuada para soportar ciertas condiciones previstas. Otros aspectos importantes a mencionar son la calidad de los materiales, la forma de mezclado y el tipo de curado.

“La relación agua-cemento depende de manera directa de la resistencia a la compresión que se requiera” (ACI 211.1, 2009). Así las recomendaciones vienen dadas en la siguiente tabla.

Tabla 18 *Relación agua-cemento recomendada*

RELACIÓN AGUA/CEMENTO (a/c) (Litros/Kg Cemento)	LITROS DE AGUA POR CADA SACO DE 50 Kg DE CEMENTO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PROBABLE A LOS 28 DÍAS (Kg/cm ²)	
		HORMIGÓN SIN INCLUSIÓN DE AIRE	HORMIGÓN CON INCLUSIÓN DE AIRE
0,353	17,5	425	325
0,445	22,5	350	280
0,530	26,5	280	210
0,623	31,0	210	180
0,705	35,5	180	140
0,800	40,0	140	110

Fuente: (ACI 211.1, 2009)

3.2.5 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE CEMENTO

El cemento necesario para la pasta es fácilmente calculable una vez se obtenga la relación agua-cemento y la cantidad de agua necesaria para la mezcla. Estos datos fueron sacados de tablas anteriormente.

$$\text{Cantidad de cemento [kg/m}^3\text{]} = \frac{\text{Volumen de agua [lt/m}^3\text{]}}{\text{Relación A/C [lt/kg]}}$$

3.2.6 ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE AGREGADOS

Este valor se toma en base a la tabla a continuación, la cual depende de coeficientes obtenidos previamente como el módulo de finura del agregado fino y el tamaño máximo nominal del agregado grueso.

Tabla 19 Volumen del agregado grueso [m^3]

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO GRUESO		VOLUMEN EN M3 DE AGREGADO GRUESO SECO Y COMPACTADO, POR M3 DE HORMIGÓN							
		MÓDULO DE FINURA DEL AGRAGADO FINO							
cm	plg	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90	3,00
1,00	3/8	0,470	0,460	0,450	0,440	0,430	0,420	0,410	0,400
1,25	1/2	0,560	0,550	0,540	0,530	0,520	0,510	0,500	0,490
1,90	3/4	0,660	0,650	0,640	0,630	0,620	0,610	0,600	0,590
2,54	1	0,710	0,700	0,690	0,680	0,670	0,660	0,650	0,640
3,81	1 1/2	0,770	0,760	0,750	0,740	0,730	0,720	0,710	0,700
5,08	2	0,800	0,790	0,780	0,770	0,760	0,750	0,740	0,730
7,62	3	0,850	0,840	0,830	0,820	0,810	0,800	0,790	0,780
15,24	6	0,910	0,900	0,890	0,880	0,870	0,860	0,850	0,840

Fuente: (ACI 211.1, 2009)

Una vez obtenido la cantidad de árido grueso a utilizar, el siguiente paso es determinar la cantidad de agregado fino. Para lo cual se suma el volumen de agua, cemento y agregado grueso y se sustrae del total que viene a ser el metro cúbico, como se muestra a continuación.

$$V_{arena} = 1m^3 - (V_{agua} + V_{ripió} + V_{cemento})$$

Los cálculos acordes al procedimiento ACI 211.1 para obtener la dosificación del hormigón base se encuentran en el Anexo 6

3.2.7 CORRECCIÓN POR HUMEDAD

El ajuste por humedad es una parada obligatoria en el procedimiento de una buena dosificación, los agregados pueden presentar un contenido de agua superior o inferior a la condición de superficie saturada seca (SSS), lo que provocará que el agua en la mezcla sea diferente a la que se tenía contemplada y por consiguiente variará también la relación agua-cemento.

Para realizar dicho ajuste es necesario reducir el agua de la mezcla que corresponda a la humedad que aportan los agregados, en otras palabras, se

sustraer el porcentaje de absorción de los agregados del contenido de humedad total (ACI 211.1, 2009).

$$\Delta W = W_m * \left(\frac{100 + \%Ab}{100 + W\%} - 1 \right)$$

Donde:

ΔW = Diferencia de agua, entre condición saturada y estado natural [kg]

W_m = Peso del material en estado natural [kg]

$\%Ab$ = Porcentaje de absorción de material [%]

$W\%$ = Contenido de humedad del agregado [%]

La corrección por humedad de la dosificación se encuentra en el Anexo 7

3.2.8 REEMPLAZO DEL CEMENTO POR POLVO DE ALUMINIO

Las proporciones a utilizar del polvo de aluminio respecto al cemento se determinaron de forma experimental, en ensayos de factibilidad previo a la realización del presente trabajo de investigación, tomando como punto de partida la relación aluminio-cemento del 0.4% (Cervantes Abarca, 2008). Dichos ensayos concluyeron en el uso del aluminio en 0.10%, 0.15%, 0.20%, 0.30% y 0.40% respecto al peso del cemento. Cabe destacar que los valores del agua, ripio y arena obtenidos en la dosificación no serán alterados.

3.3 HORMIGONADO DE LOS CILINDROS

3.3.1 MEZCLA DE MATERIALES

Es importante tener todos los materiales pesados y listos para la mezcla, para proceder a colocar en la concretora hasta que se evidencie una mezcla homogénea (ASTM C192, 2007).

Se recomienda que el primer material a colocar en la mezcladora sea el agua, con el objetivo de hidratar la misma y evitar que la arena o el cemento generen polvo.

Posteriormente se recomienda poner el agregado grueso, el fino, el cemento y finalmente el polvo de aluminio, esto se mezcla hasta que se visualice una pasta uniforme. Sin embargo, el tiempo de mezclado no deberá ser menor a ocho minutos (ASTM C192, 2007).

Es importante que a la hora de la mezcla se eviten contratiempos que modifiquen la relación agua-cemento, como puede ser el uso de agregados demasiado calientes (recién sacados del horno), ya que absorberán mucha agua y producirán una pasta de hormigón demasiado seca, nada manejable y con un asentamiento de cero en el ensayo del cono de Abrams.

3.3.2 MOLDEO DE LOS CILINDROS

Cuando la mezcla esté lista se procede a colocarla en los moldes cilíndricos los cuales deberán estar aceitados con el fin de facilitar el desencofrado y evitar que el hormigón se adhiera. Se ocuparon moldes plásticos de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura con un sistema de desencofrado por aire a presión.

La mezcla deberá ser colocada en los moldes en dos capas, en cada una se deberá realizar 25 varilladas y 15 golpes con el uso de un martillo de goma, esto con el fin de producir una vibración y eliminar el exceso de aire de la mezcla (ASTM C192, 2007).

Una vez llenado los moldes deberán permanecer en un área plana durante 24 horas antes de poder ser desencofrados y puestos a curar.

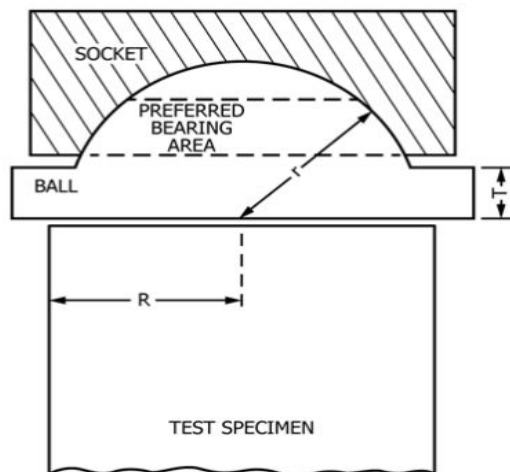
3.3.3 CURADO DEL HORMIGÓN

Una vez transcurridas las 24 horas, se procede a desencofrar las probetas cilíndricas y colocarlas en una piscina de curado, misma que debe contar con una temperatura de 23 ± 2 °C. Las probetas deberán permanecer en la piscina de curado hasta su ensayo, al menos 7 días para garantizar que alcance la resistencia requerida y una correcta hidratación (Luna, 2014).

3.4 ENSAYOS REALIZADOS

3.4.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

El presente ensayo tiene como objetivo la determinación de la resistencia a compresión de un cilindro de hormigón, para lo cual la probeta es sometida a una carga de compresión axial a una velocidad constante de 0.25 ± 0.05 MPa/s, hasta que se produce la falla, es importante especificar el tipo de falla que el espécimen presentó. “La resistencia se calcula dividiendo la carga máxima tolerada para el área de la sección transversal del cilindro”. (ASTM C39, 2018)



$$T \geq R - r$$

r = radius of spherical portion of upper bearing block

R = nominal radius of specimen

T = thickness of upper bearing block extending beyond the sphere

Figura 11 Esquema de ensayo de compresión

Fuente: (ASTM C39, 2018)



Figura 12 Ensayo de compresión
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

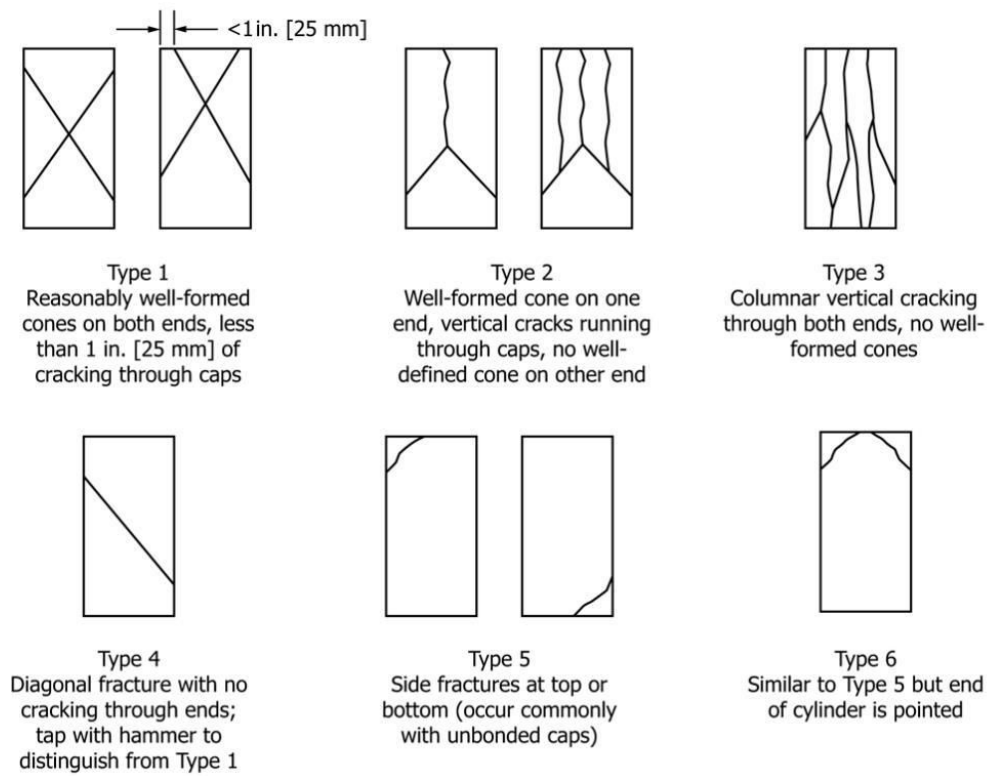


Figura 13 Modos de falla ensayo a compresión
Fuente: (ASTM C39, 2018)

El informe con los resultados del ensayo de compresión se muestran el Anexo 8.

3.4.2 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Este método se realiza suministrando una fuerza de compresión diametral a lo largo de un espécimen de hormigón cilíndrico, la velocidad de aplicación de la fuerza permanecerá constante de 0.7 a 1.4 MPa/min hasta que se suscite la falla del espécimen. La carga antes mencionada provoca tensiones de tracción en la zona de aplicación de la carga y adicional, tensiones de compresión en las zonas alrededor de la aplicación. La falla ocurrirá por tensión, mas no por compresión, debido que el área de aplicación de carga se encuentra en un estado de compresión triaxial, lo que deriva en la posibilidad de soportar tensiones de compresión mucho mayores a un ensayo de compresión uniaxial. (ASTM C496, 2017)

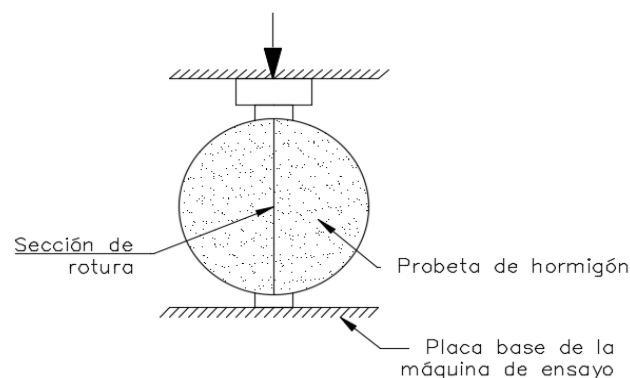


Figura 14 Esquema de ensayo de Tracción indirecta
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)



Figura 15 Modo de falla de Tracción indirecta
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

El informe con los resultados del ensayo de tracción indirecta se muestran el Anexo 9.

3.4.3 ENSAYO DE PERMEABILIDAD

Mediante este ensayo se pretende obtener la profundidad máxima de penetración de agua en un cilindro. Se procede al ensayo cuando los cilindros tengan una edad mínima de 28 días, se aplica un flujo de agua a una presión constante de 500 ± 50 kPa sobre una cara del espécimen por una duración de 72 ± 2 horas, deberá tomarse en cuenta que el flujo de agua no presente fugas en el sistema. Caso contrario se detendrá el ensayo. (UNE_EN_12390-8, 2004)



Figura 16 Armado del ensayo de permeabilidad
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

El informe con los resultados del ensayo de permeabilidad se muestran el Anexo 10

3.4.4 MÓDULO DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad simboliza una de las propiedades mecánicas más importantes respecto a un correcto y eficiente diseño estructural. Esta se define como la capacidad que posee un material de no presentar deformaciones permanentes luego de sufrir cambios en su estructura.

Esta capacidad de deformación está determinada por el límite elástico, mismo que representa el límite en el cual el material se puede deformar sin dañarse, una vez cruzada esta frontera, el material no recupera su forma original.

El ensayo se realiza mediante el uso de extensómetros colocados de manera equidistante en el diámetro del cilindro, y con el uso de la máquina, la cual aplicará ciclos de carga y descarga hasta llegar al 40 % de la resistencia de la probeta, esta resistencia se calcula cuando el endurecimiento del espécimen ya no es representativo (ASTM C469/C469M, 2014).

Cuando se dispongan de los valores de esfuerzos y deformaciones se procede a utilizar la ecuación para definir el módulo de elasticidad.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.000050}$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad [MPa]

S_2 = 40% del esfuerzo de compresión [MPa]

S_1 = Esfuerzo de compresión correspondiente a la deformación de 0.000050 [MPa]

ε_2 = Deformación unitaria producida por S_2

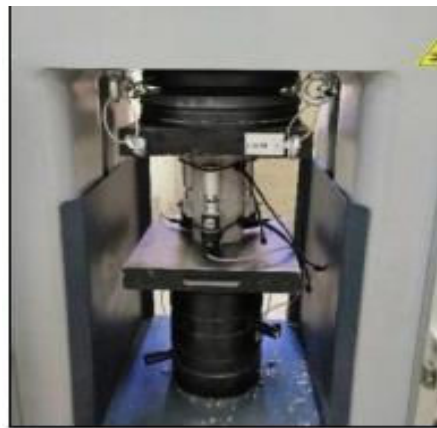


Figura 17 Ensayo de Módulo de elasticidad
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

El análisis de resultados para los diferentes ensayos realizados, permitirán validar la metodología, además de analizar el comportamiento mecánico que los especímenes presentan, en su dosificación base como en la inclusión de polvo de aluminio.

4.1 DOSIFICACIÓN

La dosificación fue realizada por el método detallado en el ACI, tomando en cuenta los resultados de cada uno de los ensayos para árido fino como para árido grueso. En las tablas posteriores se muestra la dosificación en peso de cada elemento, tanto para la muestra base como para los especímenes que poseen algún porcentaje de aluminio.

4.1.1 DOSIFICACIÓN BASE

Tabla 20 *Dosificación del hormigón base (10 cilindros)*

DOSIFICACIÓN BASE	
Agua [kg]	4.64
Cemento [kg]	7.52
Arena [kg]	16.11
Ripio [kg]	17.82

Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

4.1.2 DOSIFICACIÓN CON INCLUSIÓN DE POLVO FINO DE ALUMINIO

Tabla 21 *Dosificaciones con polvo de Aluminio (10 cilindros)*

ELEMENTOS	PORCENTAJE DE REEMPLAZO DE CEMENTO CON ALUMINIO				
	0.10%	0.15%	0.20%	0.30%	0.40%
Agua [kg]	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64
Cemento [kg]	7.51	7.51	7.50	7.50	7.49
Arena [kg]	16.11	16.11	16.11	16.11	16.11
Ripio [kg]	17.82	17.82	17.82	17.82	17.82
Aluminio [gr]	7.52	11.28	15.04	22.56	30.08

Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

4.2 COMPRESIÓN

Para el estudio de resultados del ensayo a compresión, se obtuvieron los datos de resistencia para cada porcentaje de aluminio y en cada edad, se calculó el promedio para trabajar con los datos y mostrar la curva de compresión vs la edad de los especímenes con distinto contenido de aluminio.

Tabla 22 *Resistencia a compresión de las probetas*

EDAD [días]	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN [MPa]					
	Base	0.10%	0.15%	0.20%	0.30%	0.40%
7	15.9	9.7	8.8	9.2	7.3	7.4
28	25.1	15.7	13.6	15.4	12.5	11.3
56	29.7	17.4	16.1	17.7	15.7	14.4

Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

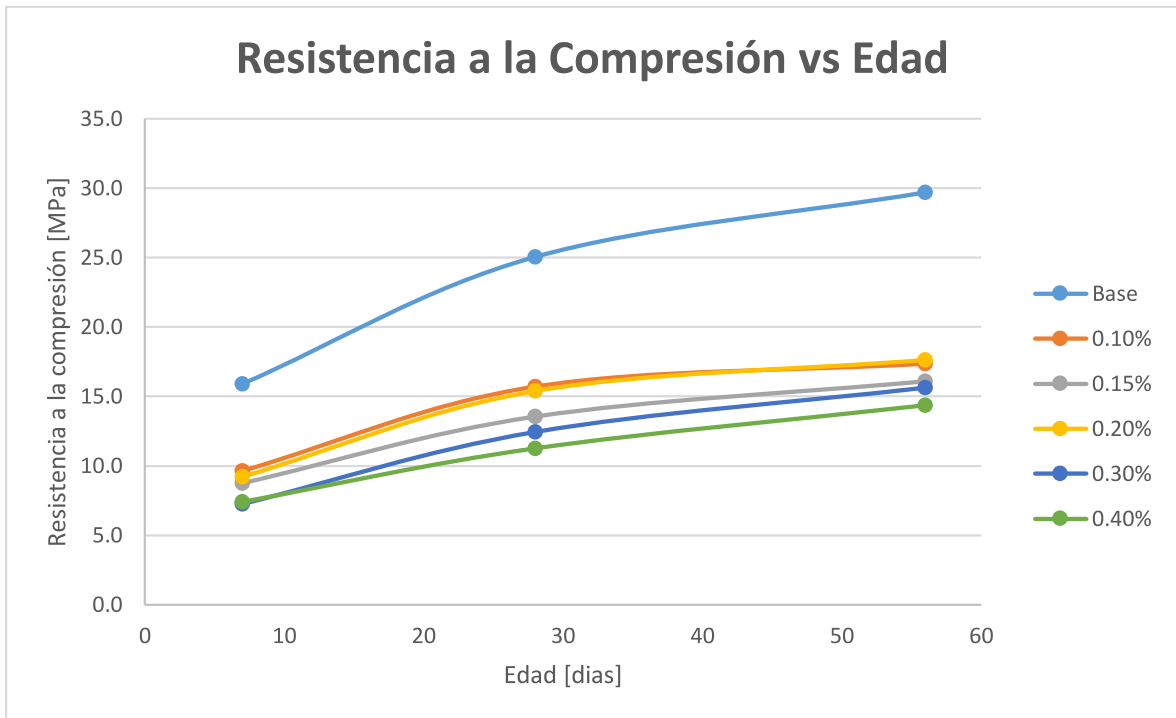


Figura 18 Curva de endurecimiento de las probetas
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

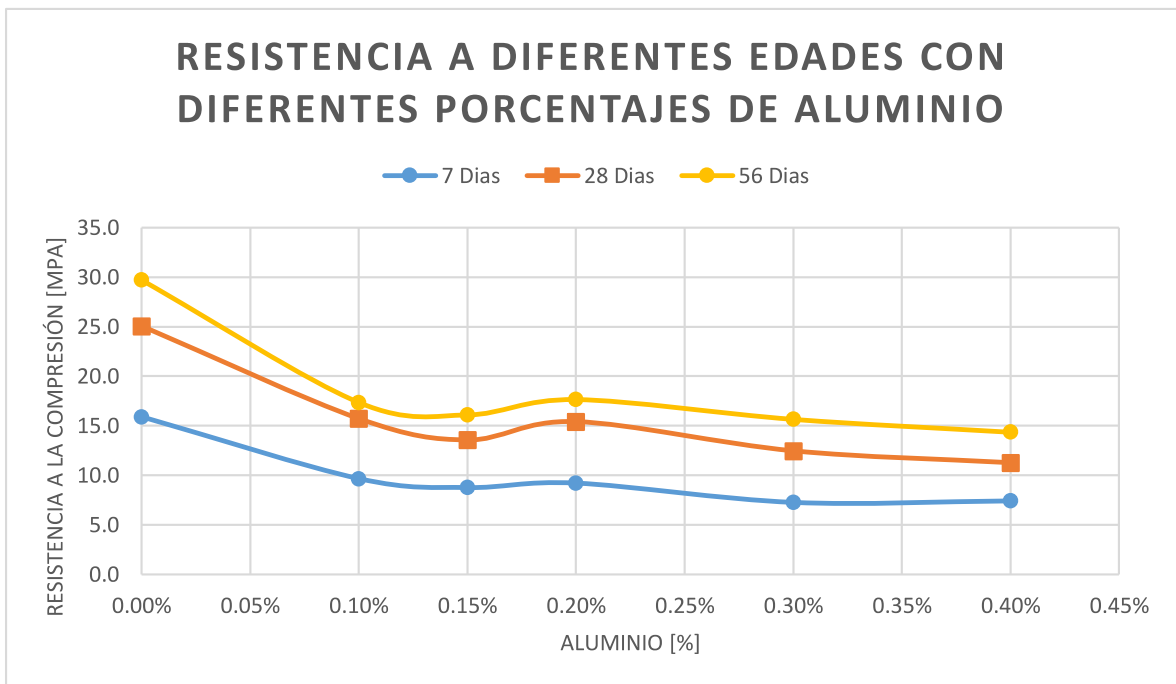


Figura 19 Resistencia a Compresión diferentes edades y porcentajes
Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

4.3 TRACCIÓN INDIRECTA

Tabla 23 Resistencias a tracción indirecta de cilindros

Porcentaje de Aluminio	Resistencia [MPa]
Base 0%	2.48
0.10%	1.67
0.15%	1.38
0.20%	1.45
0.30%	1.20
0.40%	1.19

Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

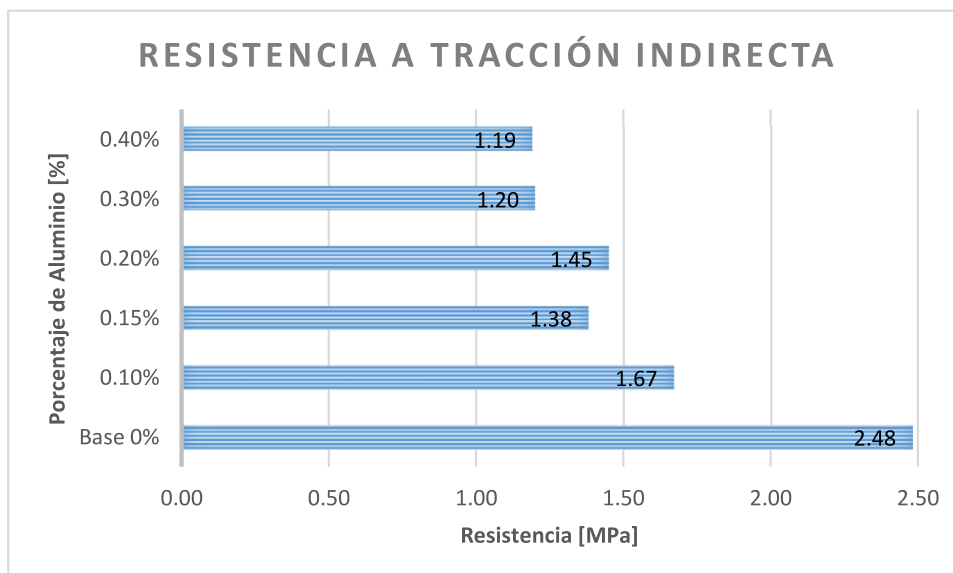


Figura 20 Comparación de las Resistencias a Tracción

Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

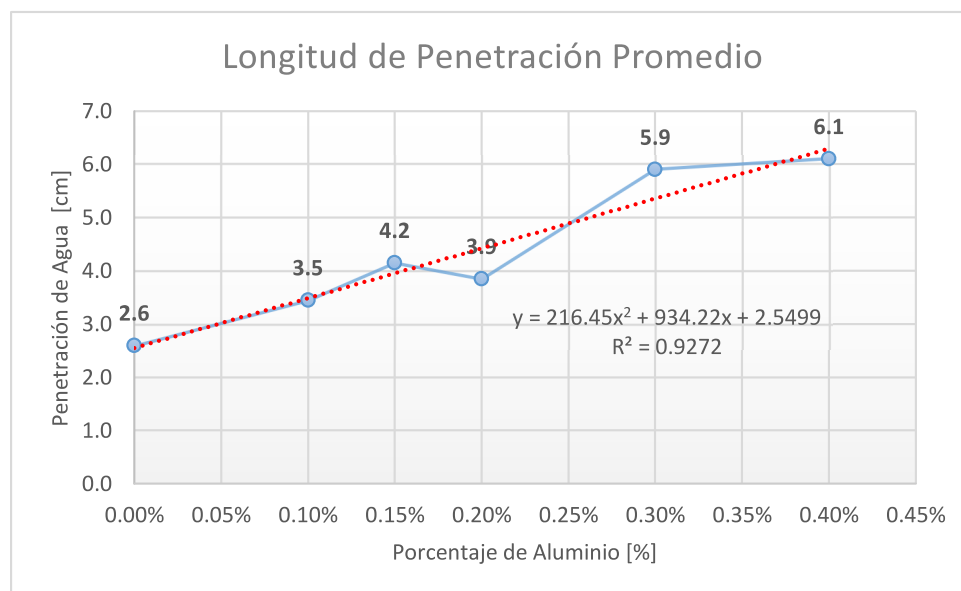
4.4 PERMEABILIDAD

La permeabilidad resulta un ensayo de gran importancia en el presente tema de investigación, puesto que el hormigón con inclusión de aluminio presenta poros, lo cual lo hace susceptible a la penetración del agua. Los resultados demuestran la hipótesis inicial, en la cual, la penetración máxima se da en los cilindros que poseen más cantidad de aluminio, por otro lado, la penetración mínima ocurre en los cilindros de la muestra patrón, la cual no posee aluminio.

Tabla 24 Penetración de agua en las muestras

MUESTRA	PENETRACIÓN DE AGUA [cm]		PROMEDIO [cm]
Base 0%	2.5	2.7	2.6
0.10%	3.2	3.7	3.5
0.15%	4.3	4.0	4.2
0.20%	3.6	4.1	3.9
0.30%	6.1	5.7	5.9
0.40%	5.9	6.3	6.1

Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

**Figura 21** Penetración promedio

Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

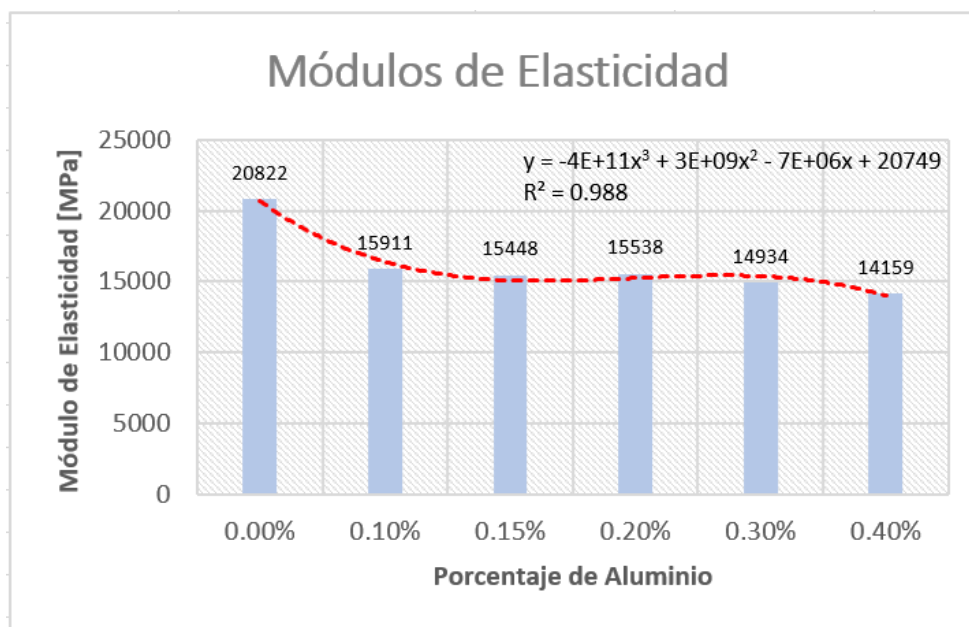
4.5 MÓDULO DE ELASTICIDAD

Los análisis de los módulos de elasticidad de las probetas con diferentes dosificaciones fueron comparados con la dosificación patrón, esta última presentó un módulo más grande que el resto de cilindros.

Tabla 25 Módulos de Elasticidad de distintas dosificaciones

Porcentaje de Aluminio	Módulo de Elasticidad [MPa]
Base 0%	20822
0.10%	15911
0.15%	15448
0.20%	15538
0.30%	14934
0.40%	14159

Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

**Figura 22 Resultado de los módulos de elasticidad**

Elaborado por: (Patricio Ramos, 2020)

El informe con los resultados de los módulos de elasticidad se muestran el Anexo

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se realizó la caracterización de los materiales, la cual fue utilizada para los 6 tipos de dosificaciones de hormigón, diferenciadas entre sí por los distintos porcentajes de polvo de aluminio en reemplazo del cemento, siguiendo las normativas con el fin de obtener resultados fiables.
- Se aplicó la metodología dictada en el ACI 211.1 para el cálculo de la dosificación patrón del hormigón, misma que alcanzó la resistencia de diseño en los diferentes ensayos realizados.
- Se evidenció que los cilindros que cuentan con polvo de aluminio, presentan una resistencia a la compresión mucho menor, respecto a los cilindros de la dosificación patrón, los cuales no poseen aluminio.
- A los 56 días, los cilindros con polvo de aluminio en diferentes porcentajes, presentan una resistencia a la compresión similar entre sí, con una variación entre ellas de 8% aproximadamente. Por otro lado, los cilindros de la muestra base, presentan una resistencia a la compresión 70% mayor a los especímenes que cuentan con aluminio.
- Todos los cilindros, con y sin inclusión de aluminio, alcanzaron a los 7 días, aproximadamente la mitad (55%) de la resistencia a la compresión que presentaron a los 56 días.
- En el ensayo de tracción indirecta, los cilindros con distintos porcentajes de aluminio, presentaron resistencias semejantes entre sí, con diferencias menores al 15%. Sin embargo, los cilindros que no poseen aluminio, presentaron resistencias altas, de al menos 50% más que los especímenes con aluminio.

- El ensayo de permeabilidad permitió observar que la penetración del agua aumenta a medida que aumenta la cantidad de polvo de aluminio en los cilindros. Por esta razón, la dosificación base, sin aluminio, tiene la menor longitud de penetración, mientras que la muestra con 0.40% de aluminio, posee la mayor longitud de penetración de agua.
- Los ensayos realizados a las probetas permitieron observar una disminución del módulo de elasticidad a medida que se aumenta el porcentaje de aluminio en los especímenes. La diferencia entre las muestras con aluminio no es mayor a un 5%, mientras que la muestra base presenta un módulo de al menos 15% superior a las muestras con porcentajes de aluminio.
- El hormigón celular presentó no ser muy resistente en ensayos como compresión simple y tracción indirecta, siendo ampliamente superado por el hormigón tradicional, por lo que no se recomienda su uso en elementos estructurales (columnas, vigas, losas, cimientos).
- El hormigón celular con porcentajes de aluminio de 0.30% y 0.40% puede resultar muy útil como revestimiento de mampostería por su aislamiento acústico y térmico.
- El hormigón celular con 0.10%, 0.15% y 0.20% de concentración de aluminio en su dosificación, puede resultar útil en la construcción de mampostería, divisiones, entrepisos y bloques RETAK (bloques hechos con hormigón celular). Así también, se lo puede aprovechar en la construcción de suelo rígido para casos como canchas de tenis y jardines.
- El beneficio que aporta el hormigón celular en la construcción aparte de su aislamiento térmico y acústico. Es la disminución del peso de la estructura.

5.2 RECOMENDACIONES

- Realizar tanto la caracterización de los materiales, así como los ensayos de compresión simple, tracción indirecta, módulo de elasticidad y permeabilidad siguiendo las normas que describen su procedimiento, análisis e interpretación de los resultados.
- Tomar en cuenta un pequeño margen de desperdicio al momento de realizar los cálculos para obtener el volumen de la dosificación.
- Se recomienda hidratar la concretera antes de realizar la mezcla de los elementos, esto para evitar que la superficie seca absorba agua y no permita una correcta hidratación de las partículas.
- Se recomienda que el primer material a colocar en la mezcladora sea el agua, posteriormente el agregado grueso, el fino, el cemento y finalmente el polvo de aluminio, esto para evitar que la arena y el cemento generen polvo y se peguen en las paredes de la concretera.
- Lavar adecuadamente la concretera luego del hormigonado de cada dosificación, con el fin de no alterar ninguna de las dosificaciones y evitar así posibles resultados erróneos y poco confiables.
- Es necesario cortar los cilindros antes de realizar los ensayos, debido que se genera un aumento de volumen cuando reacciona el cemento con el aluminio, lo cual produce una forma convexa en la base libre del cilindro. Esta forma convexa puede provocar una concentración de esfuerzos por su irregularidad y posteriormente la obtención de datos pocos fiables.
- Para el ensayo de permeabilidad es necesario que las bases del cilindro estén lo más regulares e impolutas posibles, por lo que se recomienda cortarlo, de no hacerlo, por las irregularidades es posible que el agua se filtre muy rápido o la presión de agua se escape, invalidando de esta manera en ensayo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 211.1. (2009). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. 0–15.
- ASTM. (2012). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. In *Astm C496/C496M*. <https://doi.org/10.1520/C0496>
- ASTM C127. (2015). *Standard Test Method for Relative Density and Absorption of Coarse*. 1–5. <https://doi.org/10.1520/C0127-15.2>
- ASTM C128. (2015). *Standast Test for Relative Density and Absorption of Fine Aggregate. i*, 1–6. <https://doi.org/10.1520/C0128-15.2>
- ASTM C131. (2014). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large -Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. *American Society for Testing and Materials, i*, 1–5. <https://doi.org/10.1520/C0131>
- ASTM C136. (2007). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates 1. i(200)*, 1–5. <https://doi.org/10.1520/C0136>
- ASTM C192. (2007). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. 1–8. <https://doi.org/10.1520/C0192>
- ASTM C29. (2014). Standart Test Method for Bulk Density and Void in Aggregate. *ASTM International, 04(Reapproved)*, 1–5. <https://doi.org/10.1520/C0029>
- ASTM C33. (2003). Standard Specification for Concrete Aggregates. *ASTM International, i(C)*, 11. <https://doi.org/10.1520/C0033>
- ASTM C39. (2018). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- ASTM C40. (2014). *Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete*. 5–6. <https://doi.org/10.1520/C0040>

- ASTM C469/C469M. (2014). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *Astm C469/C469M*, (C), 1–5. <https://doi.org/10.1520/C0469>
- ASTM C496. (2017). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens 1*. https://doi.org/10.1520/C0496_C0496M-17
- Cervantes Abarca, A. (2008). Nuevas Tecnologías en Concretos: Concreto Celular - Concreto Reforzado con Fibra - Concreto Ligero Estructural. In *Congreso Nacional de Administración y Tecnología para la Arquitectura, Ingeniería y Diseño*.
- INECYC, & APRHOPEC. (2007). *El Manual de Pepe Hormigón*.
- Jimenez, P. (2000). *Hormigón Armado*.
- Luna, G. V. (2014). *Estudio del Hormigón*. Quito-Ecuador: Editorial Edicumbre.
- Mairongo, Y. (2018). *ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL HORMIGÓN CELULAR COMO BASE O SUBBASE EN LA CONSTRUCCIÓN DE CALLES URBANAS*.
- Maiza, P., & Marfil, S. (2010). *Las rocas como materiales para hormigón*. 1–11.
- Peña, C., & Zambrano, F. (1992). *Hormigon celular con materiales locales*. (2), 2854629.
- Pinilla, J. (2013). *DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL CELULAR DE ALTA POROSIDAD CON BASE CEMENTICIA ACTIVADA MEDIANTE AGENTES INORGÁNICOS TESIS DOCTORAL*.
- Rengifo, M., & Yupangui, R. (2013). *Estudio del Hormigón Celular*.
- Tipos de Hormigón y sus propiedades*. (2007).
- UNE_EN_12390-8. (2004). *Profundidad de penetración de agua a presión en Hormigón endurecido*.

Valdez, L., Suarez, G., & Proaño, G. (2010). Hormigones livianos. *Escuela Superior Politécnica Del Litoral*.

Vera, S. (2013). "DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DEL HORMIGÓN CELULAR MEDIANTE EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA."

Villarroel, A., & Ortiz, J. (2011). LA CALIDAD DE LOS AGREGADOS DE TRES CANTERAS DE LA CIUDAD DE AMBATO Y SU INFLUENCIA EN LA RESISTENCIA DEL HORMIGON EMPLEADO EN LA CONSTRUCCION DE OBRAS CIVILES. *Repo.Uta.Edu.Ec*, 593(03), 130. Retrieved from <http://repo.uta.edu.ec/bitstream/handle/123456789/5301/Mg.DCEv.Ed.1859.pdf?sequence=3>