

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I

Introducción y Antecedentes

1.1. El Problema

1.1.1. Planteamiento

Desde el descubrimiento de la radiactividad por Henri Becquerel en 1897, el hombre ha revelado su aprovechamiento como así también, el peligro de exponerse a la misma, en específico a la radiación ionizante.

En nuestro medio, el material más utilizado como blindaje ante radiación ionizante es el plomo, un metal tóxico cuyo uso generalizado ha dado lugar en muchas partes del mundo a una importante contaminación del medio ambiente, un nivel considerable de exposición humana y graves problemas de salud pública.

En la ciudad de Tarija, obras del siglo del siglo XX, como el Hospital Regional San Juan de Dios, y obras relativamente nuevas, como el Hospital Materno Infantil Dr. Juan Manuel Jijena Duran, cuentan con un común denominador: un blindaje de plomo en sus salas de radiodiagnóstico.

Asimismo, obras aún no concluidas, como el Hospital Oncológico de Tarija, además de plomo, requiere de paredes robustas de hormigón convencional que, generalmente, se traduce en altos costos de ejecución.

El Hormigón de alta densidad, constituye una solución en varios países del mundo, sin embargo, el parvo conocimiento y experiencia en el uso de materiales alternativos de los proyectistas, no permite disminuir la demanda de plomo en el país sin sacrificar la esbeltez de las estructuras.

1.1.2. Formulación

Por ello, surge la inquietud, ¿Cuánto más atenuante es un hormigón de alta densidad elaborado con materiales nacionales que un hormigón convencional? ¿Cómo elaborar un hormigón de alta densidad utilizando bancos de materiales nacionales para la atenuación de radiación ionizante?.

1.1.3. Sistematización

Los hormigones de alta densidad se consiguen esencialmente con el uso de agregados pesados, naturales o manufacturados, por ello, se fija la atención en la piedra baritina, una roca inerte, no tóxica, de alta densidad, con yacimientos en distintas partes del mundo,

incluida Bolivia, donde se comercializa como agregado grueso y molido, más no como agregado fino. Entonces: ¿Qué porcentaje de baritina molida es idóneo en la mezcla de hormigón? ¿Qué relación agua/cemento es apropiada en la elaboración de hormigón con agregado de piedra baritina? ¿El hormigón con agregado de piedra baritina, requiere de aditivos? ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de usar al hormigón con agregado de piedra baritina como blindaje ante radiación ionizante en contraste al hormigón convencional?.

1.2. Objetivos

1.2.1. *Objetivo general*

Elaborar un hormigón con agregado de piedra baritina, con densidad superior a los 3 g/cm³, utilizando bancos de materiales nacionales para contrastar el porcentaje de atenuación respecto al hormigón convencional ante radiación ionizante.

1.2.2. *Objetivos específicos*

- Determinar el porcentaje de baritina molida idóneo en la mezcla, en reemplazo del agregado fino convencional.
- Determinar la relación agua/cemento apropiada, que garantice trabajabilidad de la mezcla sin comprometer la resistencia a compresión simple.
- Determinar el porcentaje de aditivo súper plastificante inocuo que potencie propiedades mecánicas buscadas en el hormigón con agregado de piedra baritina.
- Describir el asentamiento, contenido de aire y densidad del hormigón con agregado de piedra baritina en estado fresco ante la variación del porcentaje de barita molida, la relación agua cemento y el porcentaje de aditivo presentes en la mezcla.
- Analizar la resistencia a compresión simple del hormigón convencional en contraste a la del hormigón con agregado de piedra baritina.
- Evaluar el grado de transmisión ante radiación ionizante del hormigón con agregado de piedra baritina y del hormigón convencional.
- Proponer una metodología para el cálculo de espesores de blindaje de hormigón con agregado de piedra baritina, hormigón convencional y los materiales del Reporte N°147 del National Council On Radiation Protection (NCRP).
- Plantear equivalencias de espesores entre el hormigón con agregado de piedra baritina, el hormigón convencional y los materiales del Reporte N°147 del NCRP.

- Realizar un análisis de costos entre el hormigón con agregado de piedra baritina y los materiales utilizados como blindaje ante radiación ionizante en nuestro medio.

1.3. Justificación

1.3.1. Social

Dar a conocer las ventajas del uso de la piedra baritina en hormigones de alta densidad que atenúen los rayos ionizantes como una alternativa a los métodos convencionales de blindaje, se traduce en reducir la demanda de plomo como un material de construcción civil en nuestro país, que pregona los derechos de la madre tierra y el desarrollo integral.

Asimismo, describir los beneficios de minerales no metálicos como la barita en la industria de materiales de construcción, podría impulsar la exploración y posterior explotación de yacimientos nacionales, fomentando a la economía, generando empresas, y con ello generando empleos sin poner en riesgo la salud de las personas.

1.3.2. Académica

El estudio de hormigones de alta densidad y su elaboración en Bolivia, generarán nuevos conocimientos e información para toda la comunidad de la construcción y diseño de obras civiles, específicamente para aquellas que requieran las propiedades de un hormigón denso.

1.3.3. Técnica

Bolivia cuenta con los materiales necesarios para la elaboración de un hormigón de alta densidad, es así que empresas como CALCO Bolivia en la ciudad de Cochabamba y Minerales Industriales S.R.L. de la ciudad de La Paz, comercializan alrededor de 2500 toneladas/mes de baritina en territorio nacional, ya sea como agregado grueso o molido.

Elaborar un hormigón de alta densidad con materiales disponibles en nuestro país, Bolivia, supone establecer una metodología acorde a normas ACI Y ASTM, que sirva de referencia para elaborar hormigones con mejores propiedades atenuantes, reduciendo espesores de muros y losas sin comprometer la seguridad de las personas y a su vez reduciendo el costo de la ejecución en comparación al plomo y al hormigón convencional.

1.4. Alcance del Estudio

1.4.1. Alcance

Elaborar un Hormigón de alta densidad utilizando agregado grueso de piedra baritina y baritina molida en reemplazo del agregado fino, análogamente, elaborar un hormigón con

características convencionales, para la fabricación de probetas cilíndricas y placas que servirán en la comparación entre el hormigón convencional y el hormigón baritado, para su posterior análisis respecto a los materiales más utilizados en nuestro medio del Reporte N°147 del National Council On Radiation Protection (NCRP) y sus respectivos precios de mercado.

1.4.2. Hipótesis

El Hormigón con agregado de piedra baritina, con densidad mayor a 3 g/cm^3 , es más atenuante que el hormigón convencional en un porcentaje mayor al 4 %.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II

Marco Teórico

2.1. Baritina

La baritina es un mineral no metálico cuya fórmula química es BaSO_4 (sulfato de bario) y se encuentra en la naturaleza como masas cristalinas de colores blanquecinos, verdosos, grisáceos o rojizos.

Es conocida también como barita o espato pesado, siendo unas de sus principales características el ser un material inerte, no tóxico y que tiene un alto peso específico, llegando a ser de hasta $4,5 \text{ g/cm}^3$, siendo esta última característica de donde proviene su nombre que es de la palabra griega baros que significa pesado. (Secretaría de Economía de México, 2018).

2.1.1. Características Físicas de la Baritina

Cristales comúnmente tabulares, también en forma globular, fibrosa o laminar, penachuda; burdamente laminada, parecida al mármol blanco y terrosa, colores esporádicamente en bandas.

Su dureza varía de 2,5 a 3,5 en la escala de Mohs; peso específico de 4,0 a $4,5 \text{ g/cm}^3$; lustre vítreo, tirando a resinoso, algunas veces perlina. Su raya es blanca, su color es muy variado: blanco, blanco amarillento, gris, azul, rojo o café, café oscuro; de transparente a translúcido, y de translúcido a opaco. Al ser frotado puede emitir un olor fétido. (Secretaría de Economía de México, 2018).

2.1.2. Características Químicas de la Baritina

Los compuestos de bario muestran estrechas relaciones con los compuestos de los otros metales alcalinotérreos.

Todas las sales se hacen más solubles en mayor o menor grado a medida que disminuye el pH. Exceptuando al sulfato de bario, se disuelven parcialmente en ácido carbónico y por completo en ácido clorhídrico o nítrico. El sulfato es sumamente insoluble y sirve para la determinación del ion bario. La diferencia en solubilidad entre el sulfato de bario y el carbonato de bario es la base para el considerable uso que tiene este último en la industria cerámica. Los compuestos de bario más utilizados son el sulfato (barita) y el carbonato (witherita), porque de ellos parte toda la metalurgia del bario. (Secretaría de Economía de México, 2018).

Tabla 1*Composición química promedio de piedra barita.*

Composición química promedio	
CaO	0.26%
SiO ₂	5.03%
Al ₂ O ₃	1.26%
Fe ₂ O ₃	0.63%
SO ₃	31.26%
MgO	0.07%
K ₂ O	0.29%
Na ₂ O	0.17%
Mn ₂ O ₃	0.05%
BaO	59.89%
BaSO ₄	91.15%

Extraído de *Comparación entre el Concreto Convencional y el Concreto con Barita en polvo como sustituyente del Agregado Fino*.

2.1.3. Recursos, reservas y comercio de la Baritina

La barita es un mineral relativamente común, de bajo precio y producido en más de 40 países. A continuación, se presentan los países con mayores reservas y producción de barita en el mundo:

Tabla 2*Reservas de Barita (en miles de toneladas) en el periodo 1996-2016.*

País	1996	2001	2006	2011	2016
Estados Unidos	28 000	6000	25 000	15 000	
Argelia		9000	9000	29 000	
Brasil			2100		
Bulgaria		10 000			
Canadá	11 000				
China	35 000	30 000	62 000	100 000	30 000
Francia	2000	2000	2000		
Alemania	1000	1000	1000	1000	
India	28 000	53 000	53 000	32 000	32 000
Irán					24 000
Irlanda	1000				
Kazajistán					85 000
Corea del Norte					
México	7000	7000	7000	7000	
Marruecos	10 000	10 000	10 000	10 000	
Paquistán				1000	14 000
Rumania					
Rusia		2000	2000	12 000	12 000
Tailandia	9000	9000	9000		18 000
Turquía	4000	4000	4000	4000	35 000
Vietnam					
Reino Unido	100	100	100		
Otros	20 000	12 000	14 000	24 000	29 000
Total	156 100	155 100	200 200	235 000	279 000

Extraído de *Barita. En: Recursos minerales de Colombia, vol. 1*.

Tabla 3*Producción de Barita (en miles de toneladas) en el periodo 1996-2016.*

País	1996	2001	2006	2011	2016
Estados Unidos	650	400	540	640	316
Argelia		50	50	60	
Brasil			60		
Bulgaria		120	95		
Canadá	60				
China	1500	3800	4300	4000	2800
Francia	70	75	75		
Alemania	145	120	89	50	
India	550	650	1000	1100	1000
Irán	150	190	280	200	400
Irlanda	60				
Kazajistán	150		120	200	300
Corea del Norte		70			
México	230	120	250	154	250
Marruecos	270	320	420	600	700
Paquistán				50	120
Rumania	100				
Rusia		60	65	60	210
Tailandia	50	50	120		170
Turquía	155	120	200	250	250
Vietnam			110	85	100
Reino Unido	80	70	60	50	
Otros	195	250	250	300	520
Total	4415	6465	8084	7799	7136

Extraído de Barita. En: *Recursos minerales de Colombia*, vol. 1.

En Bolivia, todavía no se han realizado exploraciones regionales para evaluar con precisión la existencia y/o determinar las reservas de minerales no metálicos. Una de las causas seguramente ha sido el bajo valor de comercialización de este rubro, en comparación a los minerales metálicos ampliamente explorados y explotados en todo el territorio.

Se puede identificar la explotación de barita en Huspa Huspa, Cochabamba, en relación con yacimientos de hierro. También en la hacienda Chiapaca, cerca de Huarina, La Paz, Mosamar en Oruro y San Onofre en Cochabamba. (Montes de Oca, 2005).

Según el ingeniero en geología, Daniel Centeno, en Tarija, existen reservas de piedra baritina por las cercanías de la comunidad de Mecoya, más esta información es extraoficial y no cuenta con pruebas suficientes.

2.1.4. Consideraciones ambientales

La industria de la barita no causa mayores perjuicios ecológicos, fuera de las normales originadas por la minería y el beneficio del mineral. Las plantas de flotación y lavado de barita requieren estanques para almacenar los desechos, por lo general inertes.

Casi ninguna mina de barita se recicla. El residuo de lodos de perforaciones generalmente se abandona en estanques después de haber terminado la perforación. La barita

o los compuestos de bario utilizados en varios procesos y productos manufacturados se pierde para usos posteriores. (Zambrano Ortiz, 2019).

2.1.5. Usos de la Baritina

La baritina se le usa sobre todo en la perforación de pozos, ya que por su mayor peso desciende al fondo de la perforación, y obliga a los lodos más ligeros a subir donde puedan ser extraídos. Encuentra aplicación en la industria del vidrio, ya que imparte homogeneidad a éste, y en la industria química para fabricar diversos compuestos químicos que, a la vez, se emplean en pinturas, hules y tintas.

La industria petrolera consume un 85 % de la producción mundial de baritina, y dentro del restante 15 %, también encontramos su uso como un material para la protección radiológica y la elaboración de hormigón de alta densidad. (Secretaría de Economía de México, 2018).

2.2. Hormigón de Alta Densidad

El hormigón de alta densidad o densidad pesada representa una sección relativamente pequeña de la producción de hormigón dentro de la industria de la construcción con aplicaciones especializadas tradicionalmente dentro la industria nuclear. (Newman & Choo, 2003).

2.2.1. Definición

Un hormigón de alta densidad se puede definir de manera práctica, como aquel que posea densidades superiores a 3 g/cm^3 , y, por tanto, utilizar áridos que no se utilizan normalmente para hormigón estructural estándar. (Newman & Choo, 2003).

2.2.2. Diseño de mezcla

En hormigones de alta densidad, el diseño de la mezcla debe asegurar valores mínimos de resistencia a compresión, densidad y una trabajabilidad acorde al proyecto.

La metodología disponible para dosificar concreto de densidad estándar se puede utilizar con cuidado para hormigones de alta densidad elaborados con materiales de origen natural como magnetita y barita, haciendo ajustes adecuados a las densidades relativas. Sin embargo, las graduaciones algo no estándar de estos agregados, junto con algunas de las graduaciones irregulares de los materiales sintéticos o artificiales, hace que los materiales a menudo requerirán varios intentos de prueba. Una buena experiencia en tecnología del

hormigón junto con pruebas y errores ocasionales puede ser necesario para lograr resultados satisfactorios. (Álvarez Paz, 2006).

2.2.2.1. Marco normativo

El comité 304 del Instituto Americano del Concreto (ACI) elaboró en el año 1996 un reporte de métodos y procedimientos recomendados para medir, mezclar, transportar y colocar hormigones de alta densidad o densidad pesada que se utilizan principalmente para blindaje radiológico en la construcción nuclear, mismo documento fue re aprobado el año 2004 (R04). En la siguiente tabla, extraída de ACI 304.3R-96 (R04), se pueden distinguir dosificaciones típicas para diferentes hormigones de alta densidad. Como se puede apreciar en la tabla 4 y 5, esta propiedad varía en función de los áridos utilizados:

Tabla 4

Dosificaciones típicas para Hormigones de Alta Densidad colocado convencionalmente.

Conventionally placed concrete								
Density (unit weight) kg/m ³	Compressive strength Mpa	Cement kg/m ³	Heavy aggregate (kg/m ³)			Mix water kg/m ³	Water content kg/m ³	
			Fine	Coarse			Min	Max
4810	34,5	376	Iron Shot	3120	0	192	56	192
			Magnetite	1120				
4810	33,6	386	Ferrophosphorous	1470	Ferrophosphorous 2740	203	58	203
4200	36,9	380	Ferrophosphorous	1120	Ferrophosphorous 1120	205	58	205
			Barite	560	Barite 800			
3720	44,8	389	Magnetite	1380	Magnetite 1760	184	91	216
3560	41,4	309	Barite	1380	Barite 1680	186	46	186
3510	44,8	399	Hydrous iron	1310	Hydrous iron 1600	192	147	280
3040	39,6	335	Serpentine	800	Magnetite 1700	208	146	304

Extraído de ACI 304.3R-96 (R04) *Heavyweight Concrete: Measuring, Mixing, Transporting, and Placing.*

Tabla 5

Dosificaciones típicas para Hormigones de Alta Densidad con agregado pre-colocado.

Preplaced aggregate method									
5540	207	320	Magnetite	700	Punchings	4330	181	56	189
4810	34,5	317	Magnetite	670	Magnetite	1070	175	66	192
					Punchings	2560			
4210	41,4	356	Limonite	450	Limonite	960	195	208	351
					Punchings	2240			
4200	33,1	317	Magnetite	670	Magnetite	1950	175	75	202
					Punchings	1070			
3920	No	312	Serpentine	370	Serpentine	796	157	No	No
					Punchings	2320			
3910	34,5	280	Magnetite	590	Magnetite	2880	155	77	191
3440	34,5	364	Limonite	460	Limonite	450	200	175	320
					Magnetite	1950			

Extraído de ACI 304.3R-96 (R04) *Heavyweight Concrete: Measuring, Mixing, Transporting, and Placing.*

2.2.2.2. Materiales

2.2.2.2.1. Cemento

El cemento a utilizarse en hormigones de alta densidad debe ser definido acorde a los requerimientos de resistencia a compresión solicitados en el proyecto, ACI 304.3R-96 (R04) establece que los cementos que cumplen con ASTM C150, utilizados para concreto convencional, son aptos también para su uso en hormigón de alta densidad.

Se debe considerar el uso de cementos con bajo contenido de álcali cuando se utiliza agregados reactivos.

En el caso especial de hormigones macizos, para evitar el calor alto y rápido de hidratación y resultante agrietamiento, es aconsejable no utilizar cemento tipo III ni aceleradores, a menos que la temperatura del hormigón esté controlada por sistemas de refrigeración.

Los cementos que cumplen con los requisitos de ASTM C 595 también pueden utilizarse en lugar de cementos Portland. Sin embargo, deben usarse solo si su uso no reduce la densidad del hormigón por debajo del límite especificado.

En cuanto a proporciones, es recomendable el uso de elevados contenidos de cemento para obtener un hormigón cohesivo con una buena trabajabilidad.

2.2.2.2.2. Agua

El agua utilizada en el amasado de hormigones de alta densidad debe seguir las recomendaciones de la ACI 301 o ASTM C94. Como regla general, el agua de mezclado debe ser potable. No debe contener impurezas que puedan afectar la calidad del hormigón. El agua debe estar limpia y libre de aceite, ácido, álcali, materia orgánica u otras sustancias dañinas.

2.2.2.2.3. Agregado

Los hormigones de alta densidad se consiguen esencialmente con el uso de agregados pesados naturales o manufacturados, como ser la magnetita, limonita, la barita, virutas de acero y subproductos del hierro como el chilcon. Parece lógico pensar que los áridos de alta densidad son más caros y requieren tratamientos especiales en lo que se refiere a la dosificación en el hormigón y su puesta en obra.

Las especificaciones y requerimientos para los agregados de hormigones de alta densidad los establece ASTM C637 y ASTM C638:

Composición Química y Densidad

Tabla 6

Requerimientos de composición y densidad en agregados.

Predominant Constituent	Class of Material	Chemical Composition of Principal Constituent ^A	Relative Density (Specific Gravity) of Available Aggregates
Serpentine ^B	crushed stone, hydrous siliente	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$	2.4 to 2.65
Limonite ^C	crushed stone, hydrous iron ore	$(HFeO_2)_x(H_2O)_y$	3.4 to 3.8
Goethite ^C	crushed stone, hydrous iron ore	$HFeO_2$	3.5 to 4.5
Barite	gravel or crushed stone	$BaSO_4$	4.0 to 4.4
Ilmenite	crushed stone, iron ore	$FeTiO_3$	4.2 to 4.8
Hematite	crushed stone, iron ore	Fe_2O_3	4.6 to 5.2
Magnetite	crushed stone, iron ore	$FeFe_2O_4$	4.6 to 5.2
Iron	manufactured from iron/steel	Fe	6.5 to 7.5
Ferrophosphorous ^D	synthetic	Fe_nP	5.8 to 6.3
Boron Frit ^E	synthetic	$B_2O_3, Al_2O_3, SiO_2, CaO$	2.6 to 2.8
Boron Carbide	synthetic	B_4C, B_2O_3, C	2.5
Calcium Boride	synthetic	C_6B_6, C	2.5

Extraído de ASTM C637 Standard Specification for Aggregates for Radiation-Shielding Concrete.

Granulometría

La normativa ASTM C637 establece que para hormigones colocados convencionalmente, la graduación granulométrica debe cumplir con los límites establecidos en ASTM C33, con una modificación para agregado fino, donde se permite un rango de 0 a 20 % de material que pasa el tamiz N°100 y de 0 a 10 % de material que pasa el tamiz N°200, esto se debe a que

los áridos de alta densidad tienden a segregarse en el seno de la pasta de cemento, por lo que se necesita un tamaño de grano más fino que el usual, además de reducir la incorporación de aire.

Tabla 7

Límites granulométricos para el Agregado Grueso para un tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ ".

Tamíz	Tamaño (mm)	Límite Inferior	Límite Superior
		% que pasa	% que pasa
2"	50,80	100	100
1 1/2"	38,10	100	100
1"	25,40	100	100
3/4"	19,05	90	100
3/8"	9,52	20	55
Nº4	4,75	0	10
Nº8	2,36	0	5

Extraído de ASTM C33 Especificación Normalizada para Agregados para Concreto.

Tabla 8

Límites granulométricos para el Agregado Fino.

Tamíz	Tamaño (mm)	Límite Inferior	Límite Superior
		% que pasa	% que pasa
Nº4	4,75	95	100
Nº8	2,36	80	100
Nº16	1,18	50	85
Nº30	0,60	25	60
Nº50	0,30	5	30
Nº100	0,15	0	20
Nº200	0,08	0	10

Extraído de ASTM C637 Standard Specification for Aggregates for Radiation-Shielding Concrete.

Resistencia a la Abrasión del agregado grueso

Se recomienda que el agregado grueso tenga una pérdida por abrasión máxima de 50 % utilizando los métodos de ASTM C131 o ASTM C535. Sin embargo, pueden utilizarse agregados con mayor porcentaje de abrasión, siempre y cuando el hormigón obtenido cumpla con los requerimientos solicitados por el proyecto.

Consideraciones generales para evaluar agregados de alta densidad

Las clasificaciones de agregados pueden no ser ideales ni cumplir siempre con los requisitos para agregados de densidad normal.

Esto no debe considerarse perjudicial para la producción de hormigón de alta densidad. Los usuarios potenciales, incluidos los prescriptores y contratistas, deben aceptar que estos materiales, en general, no se fabrican para la producción de hormigón.

Un tipo de agregado específico produce una densidad de concreto acorde con su inherente densidad. Sin embargo, con una evaluación técnica y una planificación adecuada, es posible combinar diferentes tipos de agregados, preferiblemente en la fábrica del proveedor, para producir un agregado y, a su vez, concreto con una densidad especificada prevista. (Newman & Choo, 2003).

2.2.2.2.4. Aditivo

El concreto pesado colocado convencionalmente puede contener un aditivo químico que cumpla con los requisitos de ASTM C 494 para los tipos A o D. Los tipos F o G también se pueden utilizar para mejorar la colocabilidad y reducir la tendencia a la segregación. Los aditivos incorporadores de aire no se utilizan generalmente en hormigón de alta densidad ya que su uso tendería a disminuir la densidad del hormigón.

2.2.2.3. Relación agua/cemento

La experiencia recomienda una baja relación agua/cemento (a/c) para minimizar la segregación de partículas y el sangrado, que pueden ser perjudiciales especialmente en calidades estructurales, esto naturalmente mejora la resistencia a compresión.

Para no comprometer la trabajabilidad de la mezcla, se recomienda el uso de súper plastificantes que, además, pueden aumentar marginalmente la densidad del hormigón. (Álvarez Paz, 2006).

La normativa ACI 304.3R-96 (R04) establece valores de relación a/c de 0,15 a 0,6, donde los valores típicos circulan los 0,5 según varios autores, este valor siempre va acompañado con la incorporación de un aditivo súper plastificante.

2.2.3. Comparación entre hormigón convencional y hormigón de alta densidad

Durante el “boom” de construcción de centrales nucleares en España, hacia los años 70, se hicieron unos importantes estudios en el Laboratorio de Materiales y Estructuras de la Universidad de California Berkeley. El objeto de estas investigaciones era el de proporcionar datos pertinentes de las constantes de los hormigones (resistencia a la compresión, módulos de elasticidad y Poisson) y para ello de confeccionaron de cada hormigón las suficientes probetas cilíndricas de 15x30 cm.

Se ensayaron dos hormigones convencionales y dos de alta densidad. Las conclusiones que se extrajeron fueron muy interesantes:

- Bajo condiciones dinámicas la resistencia a la compresión se incrementa alrededor de un 20-25 % al pasar de hormigones convencionales a hormigones de alta densidad. El módulo de elasticidad y de Poisson también crecen un orden de 5-8 % y 10-15 % respectivamente.
- El módulo de elasticidad se asemeja al módulo calculado con la ecuación del ACI.
- El uso de Puzzolana como aditivo en agregados de peso normal tiende a retardar la hidratación y a un substancial aumento de la resistencia a la compresión entre los 28 y 90 días después de elaborado.
- Los hormigones de alta densidad estudiados (en este caso uno con magnetita y el otro con perdigones de acero), presentan valores elevados de la resistencia a la compresión y del módulo de elasticidad.

(Álvarez Paz, 2006).

Tabla 9

Resumen de las Propiedades típicas en Hormigones de Alta Densidad.

Concrete type	Barytes	Magnetite	Chilcon coarse natural sand	Chilcon coarse & fines	Fergran coarse feriron fines	Iron shot	Lead shot	Typical standard concrete comparison
Property								
Typical cement content (kg/m ³)	330+	200-400	360	350	300	400	500	330
Typical free w/c (+ s/plasticizer)	0.50	0.7-0.45	0.45	0.45	0.45	0.43	0.34	0.50
Typical density (kg/m ³)	3500	4000	4400	5200	5300	5900	8600	2300-2400
28-day compressive strength (100 mm cube) (MPa)	20-35	20-40	70.0+	80.0+	45-55	30-45	20.0 (NB: Non-structural)	30-40
Indirect tensile strength (200 x 100 mm cylinders) (MPa)	2.7	4.0	5.0	5.2	6.0 (est.)	4.5	N/A	3.5
Shear characteristics (compared with standard aggs)	Lower	Similar	Better	Better	Better	Slightly lower	N/A	
Young's modulus (GPa)	20	20-35	40	50	50-60 (est.)	70 (est.)	N/A	20-30
Flexural strength (MPa)	3.7	6.0	6.0+	8.5	N/A	6.5	N/A	5.5
Dry shrinkage (%)	0.04	0.04	Similar	Similar	0.03 (est.)	0.02	N/A	0.04
Thermal conductivity (W/mk)	1.1	Similar	2.5 (est.)	2.5 (est.)	25-30 (est.)	33	N/A	1.9
Coefficient of linear expansion (x10 ⁻⁶ µm/°C 30-90°C)	22 (high)	10.0	N/A	N/A	12 (est.)	12.5	N/A	8-15

Extraído de *Advanced Concrete Technology*.

2.2.4. Usos del Hormigón de Alta Densidad

El uso de hormigones de alta densidad en la construcción es un campo especializado y es aconsejable que el trabajo sea realizado por personal calificado.

El hormigón de alta densidad se utiliza generalmente en contrapesos de puentes basculantes y en estructuras de blindaje ante radiación, por su mayor densidad y

composiciones especiales que mejoran sus propiedades de atenuación. De esta forma, con un hormigón más denso conseguimos reducir los espesores necesarios. Es lógico pensar que una reducción de secciones requiere un hormigón que desarrolle una alta resistencia a la compresión.

2.3. Protección Radiológica

2.3.1. Definición

La protección radiológica es la disciplina encargada del estudio de las propiedades de la radiación ionizante y los efectos que produce, así como proteger a las personas de los efectos biológicos de la radiación. Dado que se obtiene un beneficio social derivado del uso de las radiaciones ionizantes, también es necesario proteger a los trabajadores que laboren con radiación para llegar así a un equilibrio entre el riesgo que implica su uso y los beneficios obtenidos, esta es la función esencial de la protección radiológica. (Hernández, 2015).

El organismo internacional encargado de dictar la filosofía general de protección radiológica es la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP).

2.3.2. Radiación Ionizante

La radiación ionizante consiste en partículas, incluidos los fotones, que causan la separación de electrones de átomos y moléculas. Pero algunos tipos de radiación de energía relativamente baja, como la luz ultravioleta, sólo puede originar ionización en determinadas circunstancias. Para distinguir estos tipos de radiación de la radiación que siempre causa ionización, se establece un límite energético inferior arbitrario para la radiación ionizante, que se suele situar en torno a 10 kiloelectronvoltios (keV). (Cherry, Upton, Lodde, & Porter, 2012).

2.3.3. Principios de la Protección Radiológica

2.3.3.1. Justificación

Toda práctica con radiaciones ionizantes deberá ser justificada, esto es, deberá suponer un beneficio suficiente en relación con el detrimento que supone. (Consejo de Seguridad Nuclear & Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, 2006).

2.3.3.2. Optimización o ALARA

Las dosis individuales, el número de personas y las probabilidades de que se produzcan exposiciones potenciales, deberán mantenerse en el valor más bajo que sea razonablemente posible, teniendo en cuenta factores económicos y sociales, principio conocido como

concepto optimización o ALARA (As Low As Reasonably Achievable). (Consejo de Seguridad Nuclear & Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, 2006).

2.3.3.3. Limitación de Dosis y de los Riesgos

La suma de las dosis recibidas por los individuos procedentes de todas las prácticas pertinentes no debe exceder los límites establecidos para cada circunstancia. (Consejo de Seguridad Nuclear & Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, 2006).

Tabla 10

Límite de Dosis para exposiciones planificadas.

Tipo de límite	Ocupacional	Público
Dosis efectiva	20 mSv por año promediada en periodos definidos de 5 años ^a	1 mSv en un año ^f
Dosis equivalente anual en:		
Cristalino ^b	150 mSv	15 mSv
Piel ^{c,d}	500 mSv	50 mSv
Manos y pies	500 mSv	---

^a Los límites de dosis efectivas son para la suma de las dosis efectivas de relevancia procedentes de exposiciones externas en el periodo de tiempo especificado y la dosis efectiva comprometida de la incorporación de radionucleidos en el mismo periodo. Para adultos, la dosis efectiva comprometida se calcula para un periodo de 50 años tras la incorporación, mientras que para niños se calcula para el periodo de hasta 70 años de edad.

^b Este límite está actualmente siendo revisado por un Grupo de Trabajo de la ICRP.

^c La limitación de dosis efectiva proporciona una protección suficiente para la piel frente a efectos estocásticos.

^d Promediado en un área de 1 cm² de piel, independientemente del área expuesta.

^e Con la condición adicional de que la dosis efectiva no debe exceder los 50 mSv en ninguno de los años individuales. En el caso de la exposición ocupacional de mujeres embarazadas se aplican restricciones adicionales.

^f En circunstancias especiales, se puede permitir un nivel superior de dosis efectiva en un único año, a condición de que la media durante 5 años no exceda 1 mSv por año.

Extraído de *Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica* (Publicación 103).

2.3.4. Medidas Básicas de Protección Radiológica

2.3.4.1. Distancia

Aumentando la distancia entre el operador y la fuente de radiaciones ionizantes, la exposición disminuye en la misma proporción en que aumenta el cuadrado de la distancia. En muchos casos bastará con alejarse suficientemente de la fuente de radiación para que las condiciones de trabajo sean aceptables. (Consejo de Seguridad Nuclear & Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, 2006).

2.3.4.2. Tiempo

Disminuyendo el tiempo de operación todo lo posible, se reducirán las dosis. Es importante que las personas que vayan a realizar operaciones con fuentes de radiación estén bien adiestradas, con objeto de invertir el menor tiempo posible en ellas. (Consejo de Seguridad Nuclear & Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, 2006).

2.3.4.3. Blindaje

En los casos en que los dos factores anteriores no sean suficientes, será necesario interponer un espesor de material absorbente, blindaje, entre el operador y la fuente de radiación. Según sea la energía y tipo de la radiación, será conveniente utilizar distintos materiales y espesores de blindaje. (Consejo de Seguridad Nuclear & Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, 2006).

Instituciones internacionales han generado protocolos para cálculo de blindaje contra radiaciones ionizantes:

2.3.4.3.1. Guía de Seguridad N° 5.11 (Aspectos técnicos de seguridad y protección radiológica de instalaciones médicas de rayos X para diagnóstico)

Esta guía es elaborada por Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), el único organismo competente en materia de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica en España.

Esta guía posee como objetivo el recomendar requisitos técnicos generales aplicables a las fases de edificación, diseño, pruebas de aceptación y funcionamiento de las instalaciones médicas de rayos X para diagnóstico, orientados a que en cada una de las fases se añadan los criterios de seguridad nuclear, garantía de calidad y de protección radiológica necesaria para otorgar un beneficio a la sociedad, disminuyendo el detrimento radiológico. (Barrionuevo, 2015).

Parámetros y ecuaciones para cálculo de blindaje (CSN: Guía de Seguridad N° 5.11)

Carga de Trabajo

Medida que determina la cantidad de radiación emitida por el tubo de rayos X, en una semana. Está definida como: la intensidad de corriente en (mA) multiplicada por el tiempo de exposición (min) y dividido para el periodo de tiempo en que se considera la emisión radiación (1 semana) se expresa:

$$W = \frac{mA \cdot t_1}{t} \quad \frac{mA \text{ min}}{sem}$$

En el caso que la carga de trabajo no puede ser calculada, se establece utilizar la tabla 80 del Anexo A en función de la tensión en (kVp) del equipo. (Consejo de Seguridad Nuclear , 2011).

Factor de Uso

Fracción de la carga de trabajo durante el cual el haz útil de radiación está dirigido hacia una barrera a proteger que puede ser primaria o secundaria. Generalmente para barreras secundarias el factor de uso utilizado es 1. (Consejo de Seguridad Nuclear , 2011).

Tabla 11

Factor de Uso.

Factores de uso para barrera Primaria	
Suelo	1
Paredes	1/4
Techo	1

Extraído de *Aspectos técnicos de seguridad y protección radilógica de instalaciones médicas de rayos X para diagnóstico* (Guía de Seguridad N° 5.11)

Factor de Ocupación

Es el factor que toma en consideración el tiempo que permanecen en las zonas a proteger el personal ocupacionalmente expuesto o el público. (Consejo de Seguridad Nuclear , 2011).

Tabla 12

Factor de Ocupación.

Ocupación total	T = 1
Áreas de trabajo, laboratorios, oficinas, despachos, talleres, tiendas, consejerías, zonas de recepción y pasillos anchos que permitan colocar mesas y mostradores, cuartos oscuros, viviendas, zonas infantiles, etc.	
Ocupación parcial	T = 1/4
Pasillos estrechos, salas de espera, aparcamientos, ascensores con operador, etc.	
Ocupación ocasional	T = 1/16
Exteriores, aseos, escalera, ascensores automáticos, etc.	

Extraído de *Aspectos técnicos de seguridad y protección radilógica de instalaciones médicas de rayos X para diagnóstico* (Guía de Seguridad N° 5.11).

Rendimiento

En la Guía de seguridad N° 5.11 el rendimiento hace referencia a la dosis equivalente (mSv) que produce un haz a 1 m de distancia sobre un área de 1 metro cuadrado, por cada (mA x

min) de carga; este depende directamente de la forma de onda y este valor se puede tomar del gráfico 34 del Anexo A. (Consejo de Seguridad Nuclear , 2011).

Se expresa:

$$\frac{mSv \cdot m^2}{mA \cdot min}$$

Cálculo de Barrera Primaria

Para determinar el factor de atenuación (A) se define como:

$$A = \frac{\Gamma \cdot W \cdot U \cdot T}{d^2 \cdot H_W}$$

Donde:

Γ: Rendimiento (mSv.m²/mA.min)

W: Carga de trabajo (mA.min/sem)

U: Factor de uso

T: Factor de ocupación

d: Distancia foco – barrera primaria (m)

H_w: Límite de dosis semanal (mSv), para la zona.

Conocido el factor de atenuación A se puede deducir el espesor de plomo utilizando las curvas del gráfico 35 del Anexo A, por consiguiente, se puede determinar el equivalente del espesor de plomo en otros materiales utilizando la Tabla 81 del Anexo A. (Consejo de Seguridad Nuclear , 2011).

2.3.4.3.2. Reporte NCRP N° 147 (2004)

Este reporte está elaborado por National Council On Radiation Protection & Measurements (NCRP), organismo creado desde 1964 por el Congreso de Estados Unidos, el cual se encuentra enmarcado en recolectar, examinar y desarrollar textos que proporcionen medidas de aplicación para la protección radiológica tanto para radiación ionizante como no ionizante. El Reporte N°147 es uno de los más utilizados ya que genera un direccionamiento hacia una correcta manipulación del equipo, así como del uso que a la radiación se le dará, ya que posee las normas y estatutos actualizados en relación con la protección contra las radiaciones. (Barrionuevo, 2015).

Parámetros y ecuaciones para cálculo de blindaje (reporte NCRP N° 147)

Carga de Trabajo

La carga de trabajo total por semana (W_{tot}), se expresa con el producto de la carga de trabajo normalizado (W_{norm}) por el número promedio de pacientes a la semana.

$$W_{tot} = N * W_{norm}$$

En el caso de no conocer uno de los datos, en las tablas 82 y 83 en el Anexo A, se proporciona distribuciones de la carga de trabajo en función del kVp y según el tipo de instalaciones de imágenes médicas con rayos x respectivamente. (National Council on Radiation Protection and Measurements, 2004).

Factor de Uso

El valor de U se dependerá del tipo de instalación y la barrera de interés.

Tabla 13

Factor de Uso.

Barrera	Factor de Uso (U)	Tipo de Sala
Piso	0,89	Sala de Radiología (Suelo u otras barreras)
Pared de tablas cruzadas	0,09	Sala de Radiología (Suelo u otras barreras)
Pared	0,02	Sala de Radiología (Suelo u otras barreras)
Receptor bucky vertical	1,00	Sala de Radiología (Bucky vertical)

Extraído de *Structural shielding design for medical X-ray imaging facilities* (Report N° 147).

Factor de Ocupación

Se define como el promedio del tiempo máximo que el individuo se encuentra expuesto al haz de rayos X.

Tabla 14*Factor de Ocupación.*

Ubicación	Factor de ocupación (T)
Las oficinas administrativas, laboratorios, farmacias, recepción, salas de espera, los niños en zonas de juegos interiores, salas de comando, salas adyacentes, áreas de lectura, estaciones de enfermería, y otras áreas de trabajo totalmente ocupados por un individuo.	1
Habitaciones utilizadas para exámenes y tratamientos de pacientes.	1/2
Pasillos, habitaciones de pacientes, salas de estar, salas de descanso para empleados.	1/5
Puertas corredor	1/8
Baños públicos, áreas de venta, áreas desatendidas, zonas al aire libre con asientos, salas de espera sin atención, áreas de espera de pacientes.	1/20
Áreas exteriores de acceso peatonal o vehicular transitorio, estacionamientos desatendidos, ático, escaleras, ascensores sin vigilancia, armarios o porteros.	1/40

Extraído de *Structural shielding design for medical X-ray imaging facilities* (Report N° 147).

Cálculo de Barrera Primaria

Si el haz principal se dirige a la zona a proteger donde:

$$K_p(0) = \frac{K_p^1 \cdot U \cdot N}{d_p^2} \quad \frac{mGy}{semana}$$

Donde:

Kp(0): Kerma en aire semanal primario.

Kp1: Kerma primario en aire por paciente a 1 m, calculada para una distribución de la carga de trabajo en función de la carga total, tomar de tabla 84 la cual se encuentra en Anexo A.

U: Factor de uso de la barrera.

N: Número de pacientes por semana sometidos a pruebas de rayos X.

dp2: Distancia foco-paciente.

Para determinar el espesor de la barrera primaria (Xbarrier) se utiliza los parámetros de ajuste de transmisión α , β , γ que depende del material y la barrera a calcular para lo cual se toma los valores de las Tablas 85 y 86 del Anexo A.

$$X_{barrier} = \frac{1}{\alpha \gamma} \ln \left[\frac{\left(\frac{K_p^1 * U * T * N}{P * dp^2} \right)^\gamma + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right]$$

Donde:

Kp1: Kerma primario en aire por paciente.

U: Factor de uso de la barrera.

T: Factor de ocupación.

N: Número de pacientes por semana sometidos a pruebas de rayos X.

dp2: Distancia foco-paciente.

α, β, γ: Parámetros de ajuste de transmisión.

(National Council on Radiation Protection and Measurements, 2004).

2.3.4.3.3. Metodología para la comparación de espesores con materiales del Reporte N° 147 del NCRP

La transmisión del haz de rayos X [B (x)] a través de un blindaje-barrera de espesor x de un material dado se define como el cociente del kerma en el aire de un haz de rayos X en un área determinada, cuando está blindado [K (x)] respecto a aquel en una condición sin blindaje [K (0)].

$$B(x) = \frac{K(x)}{K(0)}$$

El valor de la transmisión, nos permite determinar el espesor requerido de blindaje.

$$x = \frac{1}{\alpha \gamma} * \ln \left(\frac{B^{-\gamma} + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right)$$

Donde:

x: Espesor del blindaje.

B(x): La transmisión del haz de rayos X.

α, β, γ: Parámetros de ajuste de transmisión de cada material.

Para realizar una comparación con los datos obtenidos experimentalmente en el presente proyecto, se debe calcular el valor de la transmisión en función del espesor de blindaje.

$$B(x) = \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{\beta}{\alpha}\right) e^{x\alpha\gamma} - \frac{\beta}{\alpha}} \right]^{\frac{1}{\gamma}}$$

Donde:

x: Espesor del blindaje.

B(x): La transmisión del haz de rayos X.

α , β , γ : Parámetros de ajuste de transmisión de cada material.

Tabla 15

Parámetros de ajuste de transmisión de cada material (α , β , γ) para 100kV de Tensión.

Material	Parámetros de Transmisión NCRP (1/mm)		
	α	β	γ
Hº Convencional	0,03925	0,08567	0,4273
Plomo	2,5	15,28	0,7557

Extraído de Anexo A.

Teniendo el valor de la transmisión [B (x)] y el valor del kerma en aire sin blindaje [K (0)], podemos determinar el valor del kerma en una condición con blindaje para espesor específico dado [K (x)].

$$K(x) = B(x)K(0)$$

2.3.4.3.4. Metodología para la aplicación del presente proyecto

Determinar la transmisión en función de K(x) y K(0), implicaría tener datos experimentales para cada tipo de material y en diferentes situaciones de exposición, por ello se dispone de una manera más práctica del cálculo de la transmisión.

$$B(x) = \frac{Pdp^2}{K_p^1 UTN}$$

Donde:

P: Límite de dosis semanal.

T: Factor de ocupación.

K_p^1 : Promedio del kerma en aire sin atenuación del blindaje por paciente a 1 m de la fuente de radiación.

dp: Distancia de la fuente de radiación al punto de interés.

N: Número esperado de pacientes examinados en la sala por semana.

B(x): La transmisión del haz de rayos X.

Tomando en cuenta que, en el presente proyecto, la distancia entre la fuente de Rayos X y el dosímetro será de 1 m, convenientemente, se puede decir que:

$$K(0) = K_p^1$$

Entonces:

$$B(x) = \frac{K(x)}{K(0)} = \frac{Pdp^2}{K_p^1 UNTN}$$

Luego:

$$\frac{UNT}{Pdp^2} = \frac{1}{K(x)}$$

Donde:

P: Límite de dosis semanal.

T: Factor de ocupación.

dp: Distancia de la fuente de radiación al punto de interés.

N: Número esperado de pacientes examinados en la sala por semana.

K(x): Valor de kerma en el aire con presencia de blindaje de espesor determinado.

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III

Diseño de la Investigación

3.1. Método de Investigación

El método a usarse en la presente investigación será empírico, ya que se pondrá a prueba la hipótesis planteada, mediante una meticulosa contrastación.

3.2. Tipo de Investigación

La presente investigación es del tipo experimental, cuantitativa y correlacional.

Experimental porque se van a realizar diferentes ensayos (pruebas experimentales) para llegar al objetivo principal que es diseñar un concreto de alta densidad para la atenuación de los rayos ionizantes.

Cuantitativa porque se realizará la cuantización de los datos recolectados, como así también, del análisis de resultados.

Correlacional, por que se determinará la relación entre dos variables con aparente dependencia.

3.3. Variables

3.3.1. Variable Dependiente

Las variables dependientes son: el grado de atenuación ante la radiación ionizante, la densidad en estado fresco del hormigón y la resistencia a compresión a los 28 días.

3.3.2. Variable Independiente

Las variables independientes son: el porcentaje de barita molida en la mezcla, la relación agua / cemento, el porcentaje de aditivo súper plastificante y el espesor de las placas.

3.3.2.1. Dominio de la Variable Independiente

3.3.2.1.1. Porcentaje de Barita Molida

Esta variable será representada con la letra “x” y se define como el porcentaje de barita molida en reemplazo de agregado fino. El dominio de esta variable está definido por juicio fundamentado en un análisis granulométrico (ASTM C637).

$$\begin{array}{rcl} x_1 & & 0 \% \\ x_2 & & 8 \% \\ x_3 & = & 20 \% \\ x_4 & & 50 \% \end{array}$$

La reducción del dominio de esta variable está en función de la densidad obtenida, como se verá en el apartado 4.3.1.4.

3.3.2.1.2. *Relación Agua / Cemento*

La presente variable está representada por la letra “y”, el dominio de la misma está definido por juicio basado en bibliografía.

y_1	0,3
y_2	0,4
y_3	0,5
y_4	0,6
y_5	0,7
y_6	0,8
y_7	0,9
y_8	1

La reducción del dominio de la presente variable está sujeta a la trabajabilidad de la mezcla, como así también a la resistencia a compresión simple obtenida, como se verá en el apartado 4.3.1.3 y 4.3.1.5.

Porcentaje de Aditivo súper plastificante

Esta variable está representada por la letra “z”. su dominio está definido por los parámetros recomendados en la ficha técnica del producto, como así también por juicios adoptados experimentalmente.

z_1	0 %
z_2	0.8 %
z_3	1,5 %
z_4	3 %
z_5	4 %
z_6	5 %

La reducción del dominio de la presente variable, será evaluado de acuerdo a la densidad obtenida, el tiempo de fraguado y las recomendaciones del fabricante, ver apartado 4.3.1.6.

Espesor de placas

Esta variable es representada por la letra “e”, su dominio está fundamentado en las guías y recomendaciones para blindajes de organismos internacionales.

e_1	2 cm
e_2	3 cm
e_3	4 cm
e_4	5 cm
e_5	6 cm
e_6	7 cm
e_7	8 cm

3.3.2.2. Operacionalización de Variables

Tabla 16

Operacionalización de variables.

Variable	Tipo de Variable	Indicadores	Técnica	Instrumento
Densidad del hormigón en estado fresco.	Dependiente	-Peso de la mezcla de Hº.	Observación	Ensayo para determinar la densidad aparente. (ASTM C138)
Resistencia a la Compresión.		-Volumen de la mezcla de Hº.	Observación	Ensayo a la compresión de probetas cilíndricas. (ASTM C39)
Grado de atenuación de radiación ionizante.		-Magnitud de la carga axial aplicada en el límite de ruptura.	Observación	Experimental.
Porcentaje de barita molida en la mezcla	Independiente	-Magnitud del kerma.	Observación	Experimental.
Relación agua cemento		-Contenido de barita molida en la mezcla de Hº.	Observación	Experimental.
Porcentaje de aditivo super plastificante en relación a la masa de cemento.		-Contenido de cemento en la mezcla. -Contenido de agua en la mezcla.	Observación	Recomendaciones ACI 304.3R-96 (R04).
Espesor de placas		-Contenido de aditivo en la mezcla de Hormigón.	Observación	Experimental.
		-Espesor en medida de longitud.	Observación	Experimental.

Elaboración Propia.

3.4. Población y Muestra

La población de la presente investigación es infinita y se realiza un muestreo por juicio y de conveniencia.

3.4.1. Dosificaciones

Las variables independientes y su dominio, condicionan el número de dosificaciones posibles. Esta muestra determinará aquella dosificación adecuada para la elaboración de hormigón baritado.

Las variables dependientes se representan con la “O” de observación porque estas se miden, que en este caso presentan a las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. Los grupos se representan con la G:

G1 x ₁ y ₁ z ₁ O ₁	G23 x ₃ y ₇ z ₁ O ₂₃	G45 x ₂ y ₅ z ₂ O ₄₅	G67 x ₁ y ₃ z ₃ O ₆₇
G2 x ₁ y ₂ z ₁ O ₂	G24 x ₃ y ₈ z ₁ O ₂₄	G46 x ₂ y ₆ z ₂ O ₄₆	G68 x ₁ y ₄ z ₃ O ₆₈
G3 x ₁ y ₃ z ₁ O ₃	G25 x ₄ y ₁ z ₁ O ₂₅	G47 x ₂ y ₇ z ₂ O ₄₇	G69 x ₁ y ₅ z ₃ O ₆₉
G4 x ₁ y ₄ z ₁ O ₄	G26 x ₄ y ₂ z ₁ O ₂₆	G48 x ₂ y ₈ z ₂ O ₄₈	G70 x ₁ y ₆ z ₃ O ₇₀
G5 x ₁ y ₅ z ₁ O ₅	G27 x ₄ y ₃ z ₁ O ₂₇	G49 x ₃ y ₁ z ₂ O ₄₉	G71 x ₁ y ₇ z ₃ O ₇₁
G6 x ₁ y ₆ z ₁ O ₆	G28 x ₄ y ₄ z ₁ O ₂₈	G50 x ₃ y ₂ z ₂ O ₅₀	G72 x ₁ y ₈ z ₃ O ₇₂
G7 x ₁ y ₇ z ₁ O ₇	G29 x ₄ y ₅ z ₁ O ₂₉	G51 x ₃ y ₃ z ₂ O ₅₁	G73 x ₂ y ₁ z ₃ O ₇₃
G8 x ₁ y ₈ z ₁ O ₈	G30 x ₄ y ₆ z ₁ O ₃₀	G52 x ₃ y ₄ z ₂ O ₅₂	G74 x ₂ y ₂ z ₃ O ₇₄
G9 x ₂ y ₁ z ₁ O ₉	G31 x ₄ y ₇ z ₁ O ₃₁	G53 x ₃ y ₅ z ₂ O ₅₃	G75 x ₂ y ₃ z ₃ O ₇₅
G10 x ₂ y ₂ z ₁ O ₁₀	G32 x ₄ y ₈ z ₁ O ₃₂	G54 x ₃ y ₆ z ₂ O ₅₄	G76 x ₂ y ₄ z ₃ O ₇₆
G11 x ₂ y ₃ z ₁ O ₁₁	G33 x ₁ y ₁ z ₂ O ₃₃	G55 x ₃ y ₇ z ₂ O ₅₅	G77 x ₂ y ₅ z ₃ O ₇₇
G12 x ₂ y ₄ z ₁ O ₁₂	G34 x ₁ y ₂ z ₂ O ₃₄	G56 x ₃ y ₈ z ₂ O ₅₆	G78 x ₂ y ₆ z ₃ O ₇₈
G13 x ₂ y ₅ z ₁ O ₁₃	G35 x ₁ y ₃ z ₂ O ₃₅	G57 x ₄ y ₁ z ₂ O ₅₇	G79 x ₂ y ₇ z ₃ O ₇₉
G14 x ₂ y ₆ z ₁ O ₁₄	G36 x ₁ y ₄ z ₂ O ₃₆	G58 x ₄ y ₂ z ₂ O ₅₈	G80 x ₂ y ₈ z ₃ O ₈₀
G15 x ₂ y ₇ z ₁ O ₁₅	G37 x ₁ y ₅ z ₂ O ₃₇	G59 x ₄ y ₃ z ₂ O ₅₉	G81 x ₃ y ₁ z ₃ O ₈₁
G16 x ₂ y ₈ z ₁ O ₁₆	G38 x ₁ y ₆ z ₂ O ₃₈	G60 x ₄ y ₄ z ₂ O ₆₀	G82 x ₃ y ₂ z ₃ O ₈₂
G17 x ₃ y ₁ z ₁ O ₁₇	G39 x ₁ y ₇ z ₂ O ₃₉	G61 x ₄ y ₅ z ₂ O ₆₁	G83 x ₃ y ₃ z ₃ O ₈₃
G18 x ₃ y ₂ z ₁ O ₁₈	G40 x ₁ y ₈ z ₂ O ₄₀	G62 x ₄ y ₆ z ₂ O ₆₂	G84 x ₃ y ₄ z ₃ O ₈₄
G19 x ₃ y ₃ z ₁ O ₁₉	G41 x ₂ y ₁ z ₂ O ₄₁	G63 x ₄ y ₇ z ₂ O ₆₃	G85 x ₃ y ₅ z ₃ O ₈₅
G20 x ₃ y ₄ z ₁ O ₂₀	G42 x ₂ y ₂ z ₂ O ₄₂	G64 x ₄ y ₈ z ₂ O ₆₄	G86 x ₃ y ₆ z ₃ O ₈₆
G21 x ₃ y ₅ z ₁ O ₂₁	G43 x ₂ y ₃ z ₂ O ₄₃	G65 x ₁ y ₁ z ₃ O ₆₅	G87 x ₃ y ₇ z ₃ O ₈₇
G22 x ₃ y ₆ z ₁ O ₂₂	G44 x ₂ y ₄ z ₂ O ₄₄	G66 x ₁ y ₂ z ₃ O ₆₆	G88 x ₃ y ₈ z ₃ O ₈₈

G89 $x_4 y_1 z_3 O_{89}$	G123 $x_4 y_3 z_4 O_{123}$	G157 $x_4 y_5 z_5 O_{157}$	G191 $x_4 y_7 z_6 O_{191}$
G90 $x_4 y_2 z_3 O_{90}$	G124 $x_4 y_4 z_4 O_{124}$	G158 $x_4 y_6 z_5 O_{158}$	G192 $x_4 y_8 z_6 O_{192}$
G91 $x_4 y_3 z_3 O_{91}$	G125 $x_4 y_5 z_4 O_{125}$	G159 $x_4 y_7 z_5 O_{159}$	G193 - - - O_{193}
G92 $x_4 y_4 z_3 O_{92}$	G126 $x_4 y_6 z_4 O_{126}$	G160 $x_4 y_8 z_5 O_{160}$	Ver Anexo B.
G93 $x_4 y_5 z_3 O_{93}$	G127 $x_4 y_7 z_4 O_{127}$	G161 $x_1 y_1 z_6 O_{161}$	
G94 $x_4 y_6 z_3 O_{94}$	G128 $x_4 y_8 z_4 O_{128}$	G162 $x_1 y_2 z_6 O_{162}$	
G95 $x_4 y_7 z_3 O_{95}$	G129 $x_1 y_1 z_4 O_{129}$	G163 $x_1 y_3 z_6 O_{163}$	
G96 $x_4 y_8 z_3 O_{96}$	G130 $x_1 y_2 z_5 O_{130}$	G164 $x_1 y_4 z_6 O_{164}$	
G97 $x_1 y_1 z_4 O_{97}$	G131 $x_1 y_3 z_5 O_{131}$	G165 $x_1 y_5 z_6 O_{165}$	
G98 $x_1 y_2 z_4 O_{98}$	G132 $x_1 y_4 z_5 O_{132}$	G166 $x_1 y_6 z_6 O_{166}$	
G99 $x_1 y_3 z_4 O_{99}$	G133 $x_1 y_5 z_5 O_{133}$	G167 $x_1 y_7 z_6 O_{167}$	
G100 $x_1 y_4 z_4 O_{100}$	G134 $x_1 y_6 z_5 O_{134}$	G168 $x_1 y_8 z_6 O_{168}$	
G101 $x_1 y_5 z_4 O_{101}$	G135 $x_1 y_7 z_5 O_{135}$	G169 $x_2 y_1 z_6 O_{169}$	
G102 $x_1 y_6 z_4 O_{102}$	G136 $x_1 y_8 z_5 O_{136}$	G170 $x_2 y_2 z_6 O_{170}$	
G103 $x_1 y_7 z_4 O_{103}$	G137 $x_2 y_1 z_5 O_{137}$	G171 $x_2 y_3 z_6 O_{171}$	
G104 $x_1 y_8 z_4 O_{104}$	G138 $x_2 y_2 z_5 O_{138}$	G172 $x_2 y_4 z_6 O_{172}$	
G105 $x_2 y_1 z_4 O_{105}$	G139 $x_2 y_3 z_5 O_{139}$	G173 $x_2 y_5 z_6 O_{173}$	
G106 $x_2 y_2 z_4 O_{106}$	G140 $x_2 y_4 z_5 O_{140}$	G174 $x_2 y_6 z_6 O_{174}$	
G107 $x_2 y_3 z_4 O_{107}$	G141 $x_2 y_5 z_5 O_{141}$	G175 $x_2 y_7 z_6 O_{175}$	
G108 $x_2 y_4 z_4 O_{108}$	G142 $x_2 y_6 z_5 O_{142}$	G176 $x_2 y_8 z_6 O_{176}$	
G109 $x_2 y_5 z_4 O_{109}$	G143 $x_2 y_7 z_5 O_{143}$	G177 $x_3 y_1 z_6 O_{177}$	
G110 $x_2 y_6 z_4 O_{110}$	G144 $x_2 y_8 z_5 O_{144}$	G178 $x_3 y_2 z_6 O_{178}$	
G111 $x_2 y_7 z_4 O_{111}$	G145 $x_3 y_1 z_5 O_{145}$	G179 $x_3 y_3 z_6 O_{179}$	
G112 $x_2 y_8 z_4 O_{112}$	G146 $x_3 y_2 z_5 O_{146}$	G180 $x_3 y_4 z_6 O_{180}$	
G113 $x_3 y_1 z_4 O_{113}$	G147 $x_3 y_3 z_5 O_{147}$	G181 $x_3 y_5 z_6 O_{181}$	
G114 $x_3 y_2 z_4 O_{114}$	G148 $x_3 y_4 z_5 O_{148}$	G182 $x_3 y_6 z_6 O_{182}$	
G115 $x_3 y_3 z_4 O_{115}$	G149 $x_3 y_5 z_5 O_{149}$	G183 $x_3 y_7 z_6 O_{183}$	
G116 $x_3 y_4 z_4 O_{116}$	G150 $x_3 y_6 z_5 O_{150}$	G184 $x_3 y_8 z_6 O_{184}$	
G117 $x_3 y_5 z_4 O_{117}$	G151 $x_3 y_7 z_5 O_{151}$	G185 $x_4 y_1 z_6 O_{185}$	
G118 $x_3 y_6 z_4 O_{118}$	G152 $x_3 y_8 z_5 O_{152}$	G186 $x_4 y_2 z_6 O_{186}$	
G119 $x_3 y_7 z_4 O_{119}$	G153 $x_4 y_1 z_5 O_{153}$	G187 $x_4 y_3 z_6 O_{187}$	
G120 $x_3 y_8 z_4 O_{120}$	G154 $x_4 y_2 z_5 O_{154}$	G188 $x_4 y_4 z_6 O_{188}$	
G121 $x_4 y_1 z_4 O_{121}$	G155 $x_4 y_3 z_5 O_{155}$	G189 $x_4 y_5 z_6 O_{189}$	
G122 $x_4 y_2 z_4 O_{122}$	G156 $x_4 y_4 z_5 O_{156}$	G190 $x_4 y_6 z_6 O_{190}$	

3.4.2. *Probetas Cilíndricas*

El número de muestras para determinar la resistencia característica a compresión está fundamentada en dos consideraciones:

- El número mínimo de ensayos a compresión consecutivos aceptables para determinar la desviación estándar requerida para el cálculo de la resistencia característica, según normativa ACI 318S en su párrafo 5.3.1.2.
- La disponibilidad del material, tomando en cuenta que, en nuestro país (Bolivia), la venta del mismo está limitado a las obras de gran envergadura, además de solo estar disponible a menor escala en los departamentos de Cochabamba, Oruro y La Paz.

El número de probetas cilíndricas para Hormigón baritado de alta densidad y Hormigón convencional es de 15 para cada uno.

3.4.3. *Tamaño muestral de Disparos con Rayos Ionizantes*

El tamaño muestral de este parámetro determinará el grado de atenuación que tienen los distintos espesores de Hormigón convencional y baritado.

El tamaño de la muestra se ve delimitado por dos factores importantes:

1. El riesgo de envenenamiento por radiación.
2. El número limitado de disparos de vida útil de los instrumentos de ensayo (equipo de rayos X).

El factor determinante para la elección del tamaño muestral será el primero de los vistos anteriormente.

Para estimar el tamaño muestral se debe tomar en cuenta el número de placas y sus espesores:

Tabla 17

Espesores de placas de Hormigón.

Nro de Placas	Espesor (cm)
2	2
2	3
2	4
2	5
2	6
2	7
2	8
Total de placas	14

Elaboración propia.

Se tomará las siguientes consideraciones para el análisis de acuerdo a la guía N°05 del CSN:

- El equipo de rayos X, contará con una tensión máxima de 150 kVp.
- La carga de trabajo semanal del equipo (sin radioscopia) para 150 kVp es de 40 mA.min/sem.
- Rendimiento del equipo de 35 mSv.m²/mA.min (para filtro de 0,5 mm Al).
- Factor de dispersión igual a 0,002.
- Superficie real del haz, igual a 400 cm² (área de las placas).
- Límite de dosis semanal, para el público de 0,02 mSv/sem.
- Distancia entre el punto focal y las placas de 1 m.

Determinamos el término fuente para radiación dispersa:

$$H = \frac{\Gamma \times W \times a \times S}{d_p^2 \times 400} \left(\frac{\text{mSv} \times \text{m}^2}{\text{sem}} \right)$$

$$H = \frac{35 * 40 * 0,002 * 0,04}{1^2 * 400} = 0,00028 \frac{\text{mSv}}{\text{sem}}$$

$$\text{Nro de disparos} = \frac{0,02}{0,00028} = 71,43 \approx 71$$

$$\text{Nro de disparos por placa} = \frac{71}{14} \approx 5$$

Se determina que el número máximo de disparos (tamaño de muestra) por placa es de 5, dadas las condiciones planteadas.

NOTA: Se debe prestar peculiar atención al filtro permanente, no debe ser de menor atenuación que el filtro 0,5 mm Al.

3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

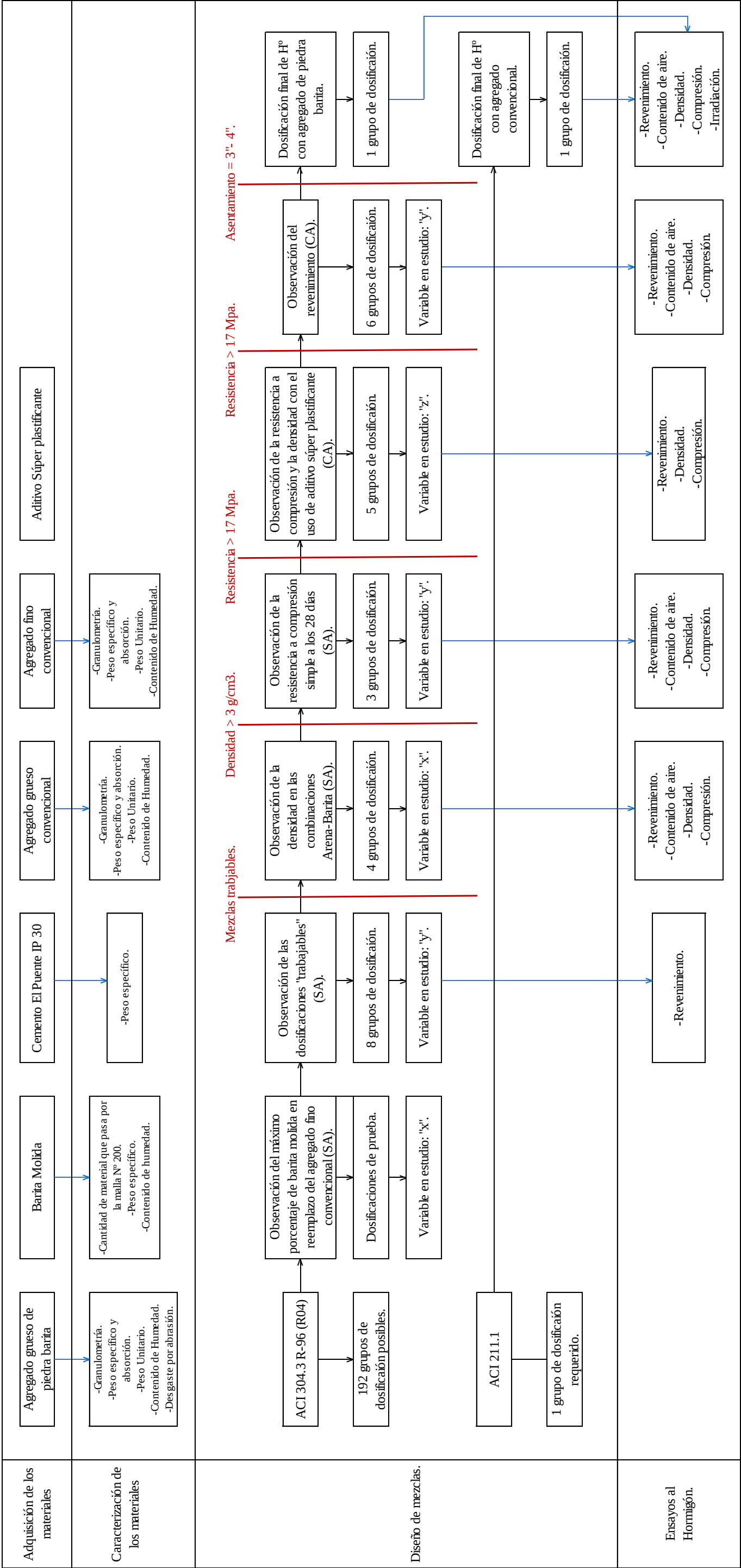
3.5.1. Técnicas de recolección de datos

La principal técnica para la recolección de los datos será la observación de las pruebas experimentales y su cuantización de las mismas.

3.5.2. Procedimiento y directrices para la recolección de datos

Diagrama 1

Diagrama de flujo para la recolección de datos en el desarrollo de la investigación.



Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV

Desarrollo de la Investigación

4.1. Adquisición de los Materiales

4.1.1. Agregados

4.1.1.1. Agregado Grueso de piedra Barita

El agregado grueso de piedra barita o baritina del presente proyecto proviene de la planta procesadora de minerales no metálicos en el Parque Industrial de Santiváñez, distante a 22 kilómetros al sur de Cochabamba, perteneciente a la empresa Calco Bolivia.

Fotografía 1

Piedra Barita o Baritina



Elaboración propia.

La adquisición del agregado grueso de piedra barita de tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ ", se da en la ciudad de Santa Cruz por una cantidad de 1,5 toneladas, de las 320 que se dispusieron para la ejecución de una obra particular del Centro Médico Foianini.

Ver Anexo C.

De las 1,5 ton adquiridas, solo se utilizaron 915 kg para la presente investigación. La preparación, embolsado, cargado y transporte de la barita a la ciudad de Tarija estuvo a responsabilidad del autor de la presente investigación.

Fotografía 2

Agregado Grueso de piedra Barita



Elaboración propia.

El destino final del material fue el Laboratorio de Hormigón y Resistencia de los Materiales de la UAJMS, donde el material será sometido a los siguientes ensayos:

- Granulometría (ASTM C136-01).
- Peso específico y absorción (ASTM C127-01).
- Peso Unitario (ASTM C29-97).
- Contenido de Humedad (ASTM C566-97).
- Resistencia a la degradación del agregado grueso (ASTM C131-03).

Ver Anexo C.

4.1.1.2. Barita Molida

La piedra barita o baritina molida del presente proyecto, al igual que el agregado grueso de piedra barita, proviene de la planta procesadora de minerales no metálicos en el Parque Industrial de Santiváñez, distante a 22 kilómetros al sur de Cochabamba, perteneciente a la empresa Calco Bolivia.

Fotografía 3

Barita molida.



Elaboración Propia.

La adquisición de la barita molida malla tyller #200, se da en la ciudad de Santa Cruz por una cantidad de 1 tonelada, de las 100 que se dispusieron para la ejecución de una obra particular del Centro Médico Foianini. Ver Anexo D.

De la tonelada adquirida, solo se utilizaron 316 kg para la presente investigación. La preparación, embolsado, cargado y transporte de la barita a la ciudad de Tarija estuvo a responsabilidad del autor de la presente investigación.

Fotografía 4

Transporte de la Barita molida a la ciudad de Tarija.



Elaboración propia.

La barita molida se traslada al laboratorio de Hormigón y Resistencia de los Materiales de la UAJMS, para que se le hagan los siguientes ensayos:

- Cantidad de material que pasa por la malla N° 200 (ASTM C117-03).
- Peso específico (ASTM C188-95).
- Contenido de humedad (ASTM C566-97).

Ver Anexo D.

4.1.1.3. Agregado Grueso convencional

El agregado grueso del presente proyecto proviene de la planta separadora de San Blas (Tarija), perteneciente a la empresa Áridos 16 de Enero, misma que extrae su materia prima de los ríos Tolomosa y Guadalquivir.

Se adquiere agregado grueso de tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ " para que coincida con el agregado grueso de piedra barita.

Fotografía 5

Agregado Grueso Convencional.



Elaboración propia.

Se utilizó una cantidad total de 1.084 kg para la elaboración de un hormigón convencional. En el laboratorio de Hormigón y Resistencia de los Materiales de la UAJMS, se somete al agregado a los siguientes ensayos:

- Granulometría (ASTM C136-01).
- Peso específico y absorción (ASTM C127-01).
- Peso Unitario (ASTM C29-97).
- Contenido de Humedad (ASTM C566-97).

Ver Anexo E.

4.1.1.4. Agregado Fino convencional

El agregado fino del presente proyecto proviene, también, de la planta separadora de San Blas (Tarija), perteneciente a la empresa Áridos 16 de Enero, misma que extrae su materia prima de los ríos Tolomosa y Guadalquivir.

Se utilizó una cantidad total de 588 kg para la elaboración de un hormigón convencional.

Fotografía 6

Agregado Fino Convencional.



Elaboración propia.

Este agregado es sometido a los siguientes en el laboratorio de Hormigón y Resistencia de los Materiales de la UAJMS:

- Granulometría (ASTM C136-01).
- Peso específico y absorción (ASTM C128-01).
- Peso Unitario (ASTM C29-97).
- Contenido de Humedad (ASTM C566-97).

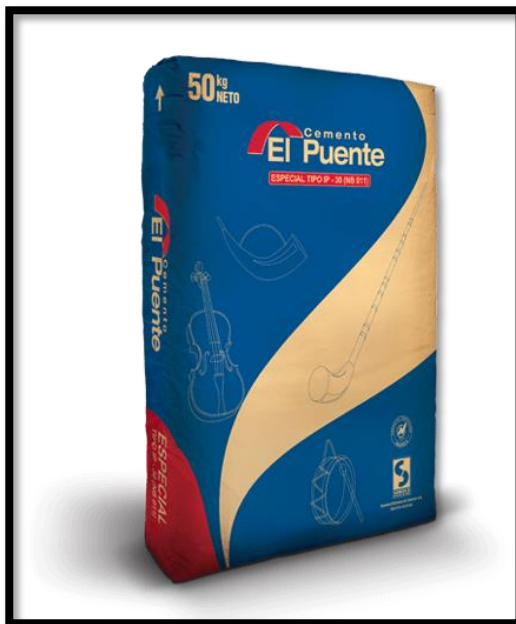
Ver Anexo E.

4.1.2. Cemento

El cemento a utilizarse en el presente proyecto es Cemento El Puente tipo 1 con adición de puzolana, para una resistencia de 30 Mpa de la empresa SOBOCE S.A. específicamente de la planta “El Puente” que está situada a 100 km de la ciudad de Tarija.

Fotografía 7

Bolsa de cemento "El puente".



Extraída de <https://soboce.com>.

La cantidad a usarse para hormigón con agregado de piedra barita es de 169 kg y la cantidad a utilizarse en hormigón convencional es de 39 kg, sumadas ambas cantidades hacen un total de 208 kg, lo que significa, que se adquirieron 5 bolsas de cemento para la realización del proyecto.

Se le realizaron los siguientes ensayos en el laboratorio de Hormigón y Resistencia de los Materiales de la UAJMS:

- Peso específico (ASTM C188-95).

Ver Anexo E.

4.1.3. Aditivo

El aditivo utilizado en el presente proyecto es un súper plastificante - retardante líquido, provisto por la empresa boliviana ULGETEC y su gerente general el ing. Juan Carlos Camacho Mercado, que desde el año 2015 producen aditivos para hormigón en Bolivia.

Fotografía 8

Aditivo líquido ULGEFLUID 3100R



Elaboración propia.

ULGEFLUID 3100R es un aditivo líquido de coloración marrón claro, con un pH de 7,4 a 9,4, y una densidad de 1,2 g/cm³ aproximadamente.

Ver Anexo F.

Está recomendado para reducir el agua de amasado, retardar el tiempo de fraguado, aumentar la viscosidad de la mezcla y aumentar la resistencia final de la mezcla, entre otros.

La elección del presente aditivo frente a la amplia gama del mercado se justifica en los siguientes criterios:

- Es un producto nacional, su uso en nuestro medio debe ser impulsado.
- Cumple con la normativa para aditivos (ASTM C494), clasificando como un aditivo tipo D, aditivo reconocido y recomendado por normativa ACI 304.3 R-96.
- Fuentes bibliográficas recomiendan el uso de aditivos súper plastificantes para los hormigones con agregado de piedra barita.
- En el departamento de Santa Cruz es usado en la elaboración de Hormigón baritado.

Ver Anexo F.

La cantidad de aditivo utilizado en el proyecto es de 1,9 litros. Cada envase, contiene 1 l, por consiguiente, se requirió de dos envases.

4.1.4. Agua

En relación con su empleo en el concreto y mortero, el agua tiene dos aplicaciones diferentes: como ingrediente en la elaboración de las mezclas de concreto y como medio de curado de las estructuras recién construidas.

El agua empleada deberá ser agua potable, de no ser así, el agua deberá cumplir con los requisitos establecidos en la norma ASTM C1602.

En el presente proyecto se utilizó el agua potable correspondiente a la red interna de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

4.2. Caracterización de los Materiales

4.2.1. Caracterización de los Agregados

4.2.1.1. Ensayos de caracterización de agregados

Granulometría (ASTM C136-01 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates)

Definición

Este ensayo se utiliza principalmente para determinar la clasificación de materiales propuestos para su uso como agregados. Los resultados se utilizan para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de partícula con los requisitos y proporcionar los datos necesarios para el control de la producción de diversos productos a base de agregados y mezclas que contiene agregados.

Materiales

- Horno.
- Balanza.
- Juego de tamices según ASTM C136.
- Agitador mecánico de tamiz.

Procedimiento

- Sacar una muestra representativa, la cual se mezcla y se cuarteo.
- Sacar el material de los extremos y pesar 500 g o más, para colocarlo en el tamiz superior.
- Tamizar ya sea con el agitador o manualmente.

- Pesar el material que es retenido en cada tamiz, removiendo cuidadosamente con un cepillo de cerdas plásticas el material que se queda en la base de cada tamiz.

Peso Específico y Absorción del agregado Grueso (ASTM C127-01 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate)

Definición

Este método de prueba cubre la determinación del promedio densidad de una cantidad de partículas de agregado grueso (sin incluir el volumen de vacíos entre las partículas), la gravedad específica, y la absorción del agregado.

La densidad relativa y la absorción se determinan después del remojo del agregado en agua durante un tiempo prescrito.

Materiales

- Balanza.
- Cesta con malla de alambre.
- Depósito de agua.
- Horno.

Procedimiento

- Sacar una muestra representativa, la cual se mezcla y se cuarteo.
- Sumergir una muestra de agregado en agua por 24 horas.
- Retirar y secar el material superficialmente con una franela y pesar 5 kg.
- Colocarlo dentro de la canastilla y pesar el material sumergido en agua.
- Secar la muestra en el horno para finalmente pesarlo.

Peso Específico y Absorción del agregado Fino (ASTM C128-01 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate)

Definición

Este ensayo cubre la determinación del promedio densidad de una cantidad de partículas finas de agregado (sin incluir el volumen de huecos entre las partículas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino.

Materiales

- Balanza.
- Fuentes.
- Cono y pisón.
- Secadora eléctrica.
- Matraz.
- Horno.

Procedimiento

- Sacar una muestra representativa, la cual se mezcla y se cuartea.
- Sacar el material de los extremos y remojarlo en un recipiente durante 24 horas.
- Al día siguiente extender el material sobre un plástico y dejarlo orear por un tiempo, para que el material pierda parte del agua que contiene.
- Colocar el material dentro del cono en una sola capa y compactarlo con golpes. Si al levantar el molde, el material tiene la forma del cono, esto quiere decir que todavía está húmedo y falta orear un poco más.
- El material debe de quedar como un cerro, luego de levantar el molde, esto indica que se encuentra saturado superficialmente seco.
- Pesar 500 g e introducirlo dentro del matraz.
- Agregar el agua dentro del matraz hasta que cubra el material, para dejarlo reposar y dejar que el agua cubra todos los espacios internos.
- Agregar el agua, poco a poco, dentro del matraz hasta que llegue a la marca de los 500 cm³ y pesarlo.
- Llevar al horno la muestra por 24 horas para calcular su peso seco.

Peso Unitario (ASTM C29-97 Standard Test Method for Bulk Density “Unit Weight” and Voids in Aggregate)

Definición

Este ensayo cubre la determinación del "peso unitario" del agregado en condición compactado o suelto y vacíos calculados entre partículas para agregados gruesos basados en la misma determinación.

Este método de prueba es aplicable a agregados que no excedan las 5 pulgadas en tamaño nominal máximo.

Materiales

- Balanza.
- Varilla de apisonamiento.
- Molde metálico.

Procedimiento

- Se seca una muestra representativa, se la cuartea y se la prepara en un recipiente.
- Se llena el molde metálico 1/3, 2/3 y 3/3 de su capacidad y se procede a apisonar con la varilla con 25 golpes, evitando el contacto con el fondo.
- Se pesa el molde lleno y vacío.
- Se llena el molde soltando el material sobre el mismo y se pesa.

Resistencia a la degradación del agregado grueso (ASTM C131-03 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine)

Definición

Esta prueba es una medida de degradación de agregados minerales con graduaciones estándar, mediante una combinación de acciones que incluyen abrasión, impacto y molienda en un tambor de acero giratorio que contiene un número específico de esferas de acero, el número depende de la calificación de la muestra puesta a prueba.

Materiales

- Máquina de desgaste de los ángeles.
- Juego de tamices según E11.
- Horno.
- Balanza.
- Carga o esferas de acero.

Procedimiento

- Se determina la gradación de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 18*Gradación y peso de la muestra para el ensayo de desgaste.*

Sieve Size (Square Openings)		Mass of Indicated Sizes, g			
Passing	Retained on	Grading			
		A	B	C	D
37.5 mm (1½ in.)	25.0 mm (1 in.)	1 250 ± 25	...	...	...
25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	1 250 ± 25	...	...	...
19.0 mm (¾ in.)	12.5 mm (½ in.)	1 250 ± 10	2 500 ± 10	...	...
12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (¾ in.)	1 250 ± 10	2 500 ± 10	...	...
9.5 mm (¾ in.)	6.3 mm (¼ in.)	...	...	2 500 ± 10	...
6.3 mm (¼ in.)	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

Extraído de *ASTM C131-03 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.*

- Se determina la carga a usarse, mediante la siguiente tabla:

Tabla 19*Número de esferas a usarse en el ensayo de desgaste.*

Grading	Number of Spheres	Mass of Charge, g
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Extraído de *ASTM C131-03 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.*

- Se coloca la muestra de ensayo en el tambor junto con las esferas de acero, se ajusta la velocidad de la máquina a 30 – 33 revoluciones por minuto. Para las gradaciones A, B, C la máquina debe dar 500 revoluciones, y para gradaciones E, F y G debe dar 1.000 revoluciones.
- Se debe tamizar por un tamiz N° 12, se lava y se seca en horno el material, para pesarlo posteriormente.

Contenido de Humedad (ASTM C566-97 Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying)

Definición

Este ensayo cubre la determinación del porcentaje de humedad evaporable en una muestra de agregado, humedad superficial y humedad en los poros del agregado. Algunos agregados pueden contener agua químicamente combinado con los minerales en el agregado. Tal agua no es evaporable y no está incluido en el porcentaje determinado por este método de prueba.

Materiales

- Balanza.
- Horno.
- Fuentes.

Procedimiento

- Se extrae una muestra representativa del material, se la cuarteo y se pesa 5 kg en las fuentes que considere necesarias.
- Se pone las muestras en el horno por 24 horas.
- Se pesa las muestras sacadas del horno.

Cantidad de material que pasa por la malla N° 200 (ASTM C117-03 Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing)

Definición

Este ensayo cubre la determinación de la cantidad de material más fino que un tamiz de 75 μ m (No. 200) en el agregado por método de lavado. Las partículas de arcilla y otras partículas presentes que son dispersadas por el agua de lavado, así como materiales solubles en agua, serán eliminadas del agregado durante la prueba.

Materiales

- Balanza.
- Tamiz: el tamiz normalizado de 75 μ m (N° 200).
- Recipiente: Un recipiente de suficiente tamaño para contener la muestra cubierta con agua y permitir una agitación vigorosa.
- Horno.

Procedimiento

- Sacar una muestra representativa, mezclar y cuartear.
- Sacar el material de los extremos y colocar 3 kg de material en el horno por 24 horas a 110 °C.
- Sacar el material del horno y pesar 800 g para cada muestra (tres muestras).
- Lavar el material y el agua turbia hacer pasar por la malla N° 200, esto se realiza hasta observar que el agua se encuentre clara.

- El material que queda en la malla se devuelve al recipiente.
- Luego se lleva al horno por 24 horas, para finalmente pesarlo.

Peso específico de barita molida (ASTM C188-95 Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement)

Definición

Este ensayo cubre la determinación de la densidad del cemento hidráulico. Su particular utilidad está en conexión con el diseño y control de mezclas de hormigón.

La barita molida presenta una graduación de partículas muy similares al cemento, por ello se utiliza excepcionalmente este método de ensayo para determinar su peso específico.

Materiales

- Matraz Le Chatelier.
- Kerosene o gasolina.
- Balanza sensible al 0,001 g.

Procedimiento

- Se llena el matraz con cualquiera de los líquidos antes especificados hasta que el nivel del líquido coincida con la graduación de 300 ml.
- Se coloca el matraz en un baño maría de temperatura constante, manteniéndola a la temperatura ambiente, se vuelve a leer que el nivel este a 300 ml.
- Se toma 64 g de la muestra y se introduce en el matraz.
- Se hace rodar el matraz de forma inclinada para eliminar el aire.
- Se lectura el nivel desplazado en el matraz.

4.2.1.2. Resultados de la Caracterización de los Agregados

4.2.1.2.1. Agregado grueso de piedra Barita

Granulometría (ASTM C136-01)

Tabla 20

Distribución granulométrica del agregado grueso de piedra barita.

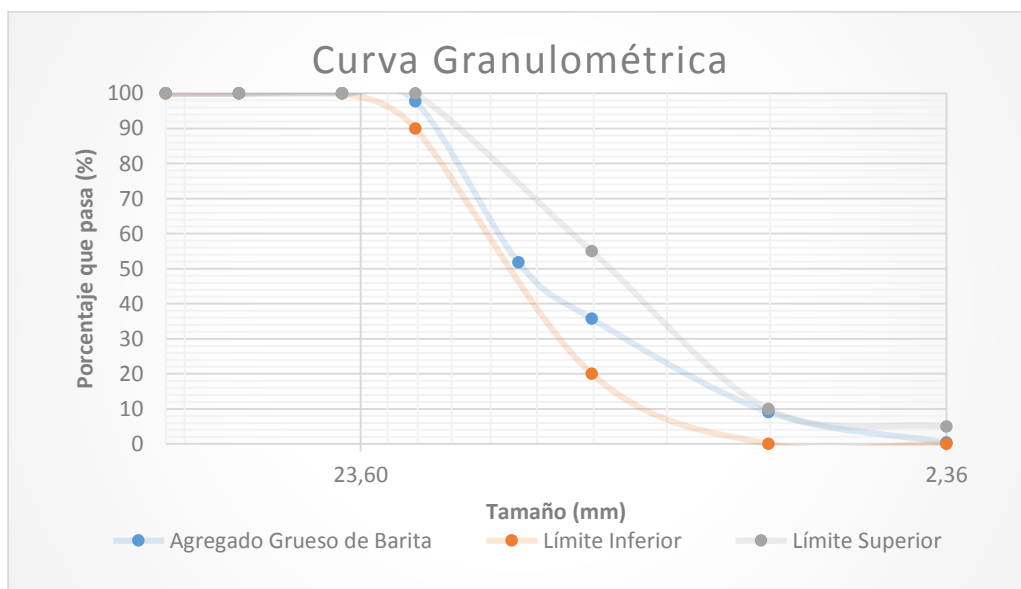
Peso Total (g) 10.000							
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum. (g)	% Retenido	% que pasa del total	% que pasa del total ASTM C-33	
2"	50,80	0	0	0	100	100	100
1 1/2 "	38,10	0	0	0	100	100	100
1"	25,40	0	0	0	100	100	100
3/4"	19,05	220,58	220,58	2,21	97,79	90	100
1/2"	12,70	4.588,55	4.809,13	48,19	51,81		
3/8"	9,52	1.600,15	6.409,28	64,22	35,78	20	55
Nº 4	4,75	2.663,64	9.072,92	90,91	9,09	0	10
Nº 8	2,36	870,94	9.943,87	99,64	0,36	0	5
base		36,13	9.980,00	100	0		
TOTAL		9.980					

MF	6,57	T.M.	1"
Pérdidas %	0,20	T.M.N.	3/4"

Elaboración propia.

Gráfico 1

Análisis granulométrico del agregado grueso de piedra barita.



Elaboración propia.

Peso específico y absorción (ASTM C127-01)

Tabla 21

Peso específico del agregado grueso de piedra barita.

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A"	PESO MUESTRA SATURADA SUP. SECA "B"	PESO MUESTRA SUMERGIDA	PESO ESPECÍFICO A GRANEL	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA	PESO ESPECÍFICO APARENTE	% DE ABSORCION
	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(g/cm3)	(g/cm3)	(g/cm3)	%
1	4,95	5	3,73	3,91	3,95	4,06	0,95
2	4,96	5	3,73	3,91	3,95	4,06	0,90
3	4,94	5	3,70	3,82	3,86	3,99	1,12
PROMEDIO				3,88	3,92	4,04	0,99

Elaboración propia.

Peso Unitario (ASTM C29-97)

Tabla 22

Peso unitario suelto del agregado grueso de piedra barita.

MUESTRA N°	PESO MOLDE (g)	VOLUMEN MOLDE (cm3)	PESO MOLDE + MUESTRA SUELTA (g)	PESO MUESTRA SUELTA (g)	PESO UNITARIO SUELTO (g/cm3)
1	5.845	9.883,70	29.140	23.295	2,36
2	5.845	9.883,70	29.110	23.265	2,35
3	5.845	9.883,70	29.215	23.370	2,36
PROMEDIO					2,36

Elaboración propia.

Tabla 23

Peso unitario compactado del agregado grueso de piedra barita.

MUESTRA N°	PESO MOLDE (g)	VOLUMEN MOLDE (cm3)	PESO MOLDE + MUESTRA COMPACT. (g)	PESO MUESTRA COMPACT. (g)	PESO UNITARIO COMPACT. (g/cm3)
1	5.840	9.883,70	30.340	24.500	2,48
2	5.840	9.883,70	30.445	24.605	2,49
3	5.840	9.883,70	30.185	24.345	2,46
PROMEDIO					2,48

Elaboración propia.

Porcentaje de Desgaste por medio de Máquina de los Ángeles (ASTM C131-03)

Tabla 24

Porcentaje de desgaste del agregado grueso de piedra barita.

Peso Total (g)		4.993,90	
Tamices	Tamaño	Peso Retenido (g)	Ret. Acumulado (g)
	(mm)		
1/2"	12,70	2.497,50	2.497,50
3/8"	9,52	2.496,40	4.993,90
TOTAL		4.993,90	
Tipo de Gradación		"B"	
Nº de Esferas		"11"	
Peso de Carga (g)		"4.584±25"	
Tamiz	Tamaño	Peso Retenido (g)	Porcentaje de Desgaste
	(mm)		
Nº12	1,70	1.593,90	68,08%

Elaboración propia.

Contenido de Humedad (ASTM C566-97)

Tabla 25

Contenido de humedad del agregado grueso de piedra barita.

Peso Muestra Húmeda (g)	5.000
Peso Muestra seca (g)	4.990
Peso Agua (g)	10
% de Humedad	0,20

Elaboración propia.

Resumen

Tabla 26

Propiedades del agregado grueso de piedra barita.

Descripción	Unidad	
Tamaño máximo	pulg.	1
Tamaño máximo nominal	pulg.	3/4
Peso Unitario Suelto (PUS)	g/cm3	2,36
Peso Unitario Compactado (PUC)	g/cm3	2,48
Peso específico a granel	g/cm3	3,88
Peso específico SSS	g/cm3	3,92
Peso específico aparente	g/cm3	4,04
Absorción	%	0,99
Porcentaje de Desgaste	%	68,08
Contenido de Humedad (CH)	%	0,20

Elaboración propia.

4.2.1.2.2. Barita molida

Peso específico (ASTM C188-95)

Tabla 27

Peso específico de la barita molida.

Tamaño de muestra (g)	64
Volumen sin muestra (ml)	300
Volumen con muestra (ml)	315,63
Volumen desplazado (ml)	15,63
Peso específico (g/cm3)	4,10

Elaboración propia.

Cantidad de material que pasa por la malla N° 200 (ASTM C117-03)

Tabla 28

Porcentaje de Barita Molida que pasa el Tamiz #200.

Peso Total (g)			3.000		
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% que pasa del total
#200	0,08	92,60	92,60	3,09	96,91
base		2.820,30	2912,90	97,10	-

Pérdidas %	2,90
-------------------	-------------

Elaboración propia.

Contenido de humedad (ASTM C566-97)

Tabla 29

Contenido de Humedad de la barita molida.

Peso Muestra Húmeda (g)	5000
Peso Muestra seca (g)	4864,60
Peso Agua (g)	135,40
% de Humedad	2,78

Elaboración propia.

4.2.1.2.3. Agregado Grueso convencional

Granulometría (ASTM C136-01)

Tabla 30

Distribución granulométrica del agregado grueso convencional.

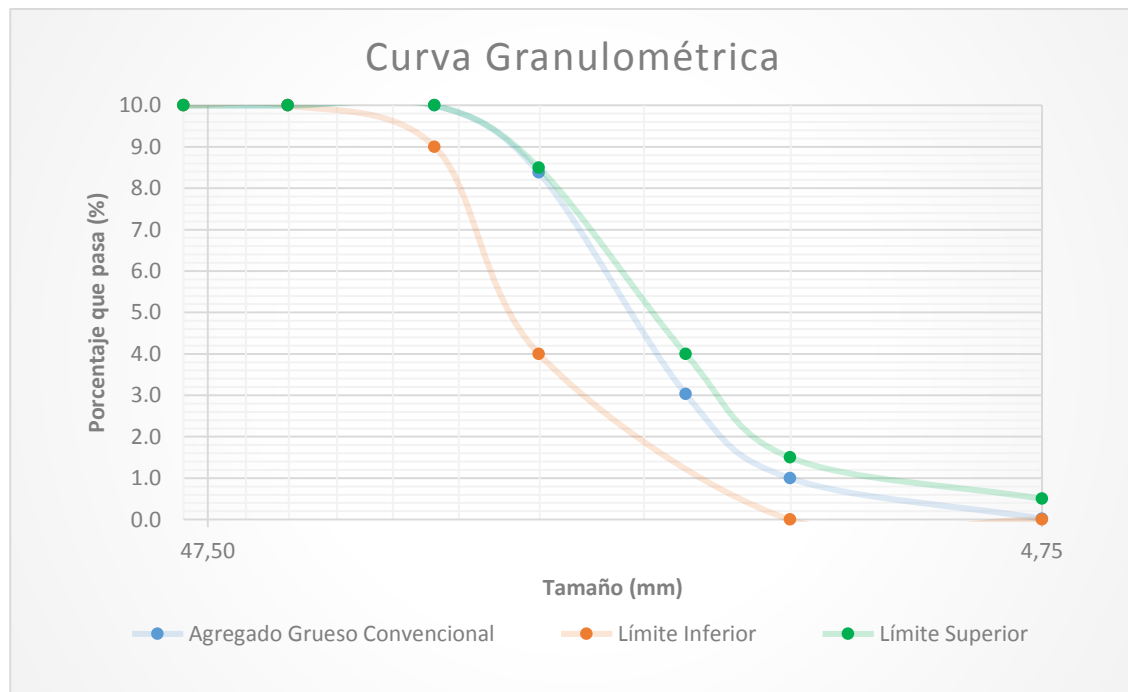
Peso Total (g)		5.000					
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum. (g)	% Retenido	% que pasa del total	% que pasa del total ASTM C-33	
2"	50,80	0	0	0	100	100	100
1 1/2 "	38,10	0	0	0	100	100	100
1"	25,40	0	0	0	100	90	100
3/4"	19,05	810,50	810,50	16,21	83,79	40	85
1/2"	12,70	2.673,60	3.484,10	69,68	30,32	10	40
3/8"	9,52	1.017,40	4.501,50	90,03	9,97	0	15
Nº 4	4,75	488,90	4.990,40	99,81	0,19	0	5
base		9,50	4.999,90	100	0		
TOTAL		4.999,90					

MF	7,06	T.M.	1"
Pérdidas %	0,0020	T.M.N.	3/4"

Elaboración propia.

Gráfico 2

Análisis granulométrico del agregado grueso convencional.



Elaboración propia.

Peso específico y absorción (ASTM C127-01)

Tabla 31

Peso específico del agregado grueso convencional.

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A"	PESO MUESTRA SATURADA SUP. SECA "B"	PESO MUESTRA SUMERGIDA	PESO ESPECÍFICO A GRANEL	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA	PESO ESPECÍFICO APARENTE	% DE ABSORCION
	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(g/cm3)	(g/cm3)	(g/cm3)	%
1	4,79	5	3,01	2,40	2,51	2,68	4,34
2	3,81	4	2,39	2,36	2,48	2,68	5,02
3	4,79	5	3,09	2,51	2,62	2,82	4,47
PROMEDIO				2,42	2,54	2,73	4,61

Elaboración propia.

Peso Unitario (ASTM C29-97)

Tabla 32

Peso unitario suelto del agregado grueso convencional.

MUESTRA N°	PESO MOLDE (g)	VOLUMEN MOLDE (cm3)	PESO MOLDE + MUESTRA SUELTA (g)	PESO MUESTRA SUELTA (g)	PESO UNITARIO SUELTO (g/cm3)
1	5.840	9.883,70	20.790	14.950	1,51
2	5.840	9.883,70	20.910	15.070	1,52
3	5.840	9.883,70	20.840	15.000	1,52
PROMEDIO					1,52

Elaboración propia.

Tabla 33

Peso unitario compactado del agregado grueso convencional.

MUESTRA N°	PESO MOLDE (g)	VOLUMEN MOLDE (cm3)	PESO MOLDE + MUESTRA COMPACT. (g)	PESO MUESTRA COMPACT. (g)	PESO UNITARIO COMPACT. (g/cm3)
1	5.840	9.883,70	21.860	16.020	1,62
2	5.840	9.883,70	21.995	16.155	1,63
3	5.840	9.883,70	21.875	16.035	1,62
PROMEDIO					1,63

Elaboración propia.

Contenido de Humedad (ASTM C566-97)

Tabla 34

Contenido de humedad del agregado grueso convencional.

Peso Muestra Húmeda (g)	5.000
Peso Muestra seca (g)	4.803,50
Peso Agua (g)	196,50
% de Humedad	4,09

Elaboración propia.

Resumen

Tabla 35

Propiedades del agregado grueso convencional.

Descripción	Unidad	
Tamaño máximo	pulg.	1
Tamaño máximo nominal	pulg.	3/4
Peso Unitario Suelto (PUS)	g/cm ³	1,52
Peso Unitario Compactado (PUC)	g/cm ³	1,63
Peso específico a granel	g/cm ³	2,42
Peso específico SSS	g/cm ³	2,54
Peso específico aparente	g/cm ³	2,73
Absorción	%	4,61
Contenido de Humedad (CH)	%	4,09

Elaboración propia.

4.2.1.2.4. Agregado fino convencional

Granulometría (ASTM C136-01)

Tabla 36

Distribución granulométrica del agregado fino convencional.

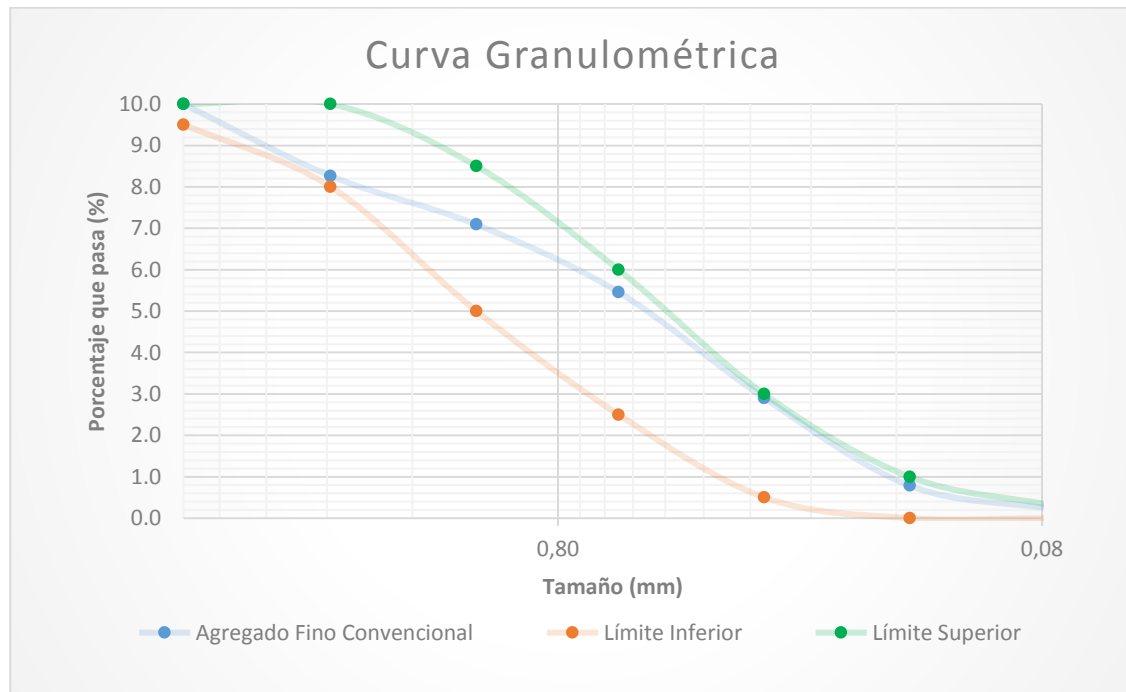
Peso Total (g)		3.000					
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum. (g)	% Retenido	% que pasa del total	% que pasa del total ASTM C-33	
N°4	4,75	187,20	187,20	0	100	95	100
N°8	2,36	332,60	519,80	17,35	82,65	80	100
N°16	1,18	350,90	870,70	29,06	70,94	50	85
N°30	0,60	489,80	1.360,50	45,40	54,60	25	60
N°50	0,30	766,60	2.127,10	70,99	29,01	5	30
N°100	0,15	634,20	2.761,30	92,15	7,85	0	10
N°200	0,08	171,40	2.932,70	97,87	2,13	0	3
base		63,70	2.996,40	100	0		
TOTAL		2.996,40					

MF	2,55
Pérdidas %	0,12

Elaboración propia.

Gráfico 3

Análisis granulométrico del agregado fino convencional.



Elaboración propia.

Peso específico y absorción (ASTM C128-01)

Tabla 37

Datos para la determinación del peso específico del agregado fino convencional.

N°	PESO MUESTRA	PESO MATRAZ	MUESTRA + MATRAZ + AGUA	AGUA AGR. AL MATRAZ "W"	PESO MUESTRA SECADA "A"	VOLUMEN DEL MATRAZ "V"
	(g)	(g)	(g)	(ml) ó (g)	(g)	(ml)
1	500	235,50	1.025,60	290,10	482,1	500
2	500	236,90	1.021,80	284,90	481,80	500
3	500	196	982,40	286,40	482,60	500

Elaboración propia.

Tabla 38

Peso específico del agregado fino convencional.

N°	PESO ESPECÍFICO A GRANEL	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA	PESO ESPECÍFICO APARENTE	% DE ABSORCION
	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	%
1	2,30	2,38	2,51	3,71
2	2,24	2,32	2,45	3,78
3	2,26	2,34	2,46	3,61
PROMEDIO	2,27	2,35	2,47	3,70

Elaboración propia.

Peso Unitario (ASTM C29-97)

Tabla 39

Peso unitario suelto del agregado fino convencional.

MUESTRA N°	PESO MOLDE (g)	VOLUMEN MOLDE (cm ³)	PESO MOLDE + MUESTRA SUELTA (g)	PESO MUESTRA SUELTA (g)	PESO UNITARIO SUELTO (g/cm ³)
1	2.610	2.954,80	6.725	4.115	1,39
2	2.610	2.954,80	6.775	4.165	1,41
3	2.610	2.954,80	6.770	4.160	1,41
PROMEDIO					1,40

Elaboración propia.

Tabla 40*Peso unitario compactado del agregado fino convencional.*

MUESTRA N°	PESO MOLDE (g)	VOLUMEN MOLDE (cm ³)	PESO MOLDE + MUESTRA COMPACT. (g)	PESO MUESTRA COMPACT. (g)	PESO UNITARIO COMPACT. (g/cm ³)
1	2.610	2.954,80	7.235	4.625	1,57
2	2.610	2.954,80	7.200	4.590	1,55
3	2.610	2.954,80	7.220	4.610	1,56
PROMEDIO					1,56

Elaboración propia.

Contenido de Humedad (ASTM C566-97)**Tabla 41***Contenido de humedad del agregado fino convencional.*

Peso Muestra Húmeda (g)	2000
Peso Muestra seca (g)	1826,20
Peso Agua (g)	173,80
% de Humedad	9,52

Elaboración propia.

Resumen**Tabla 42***Propiedades del agregado fino convencional.*

Descripción	Unidad	
Módulo de finura	adim.	2.55
Peso Unitario Suelto (PUS)	g/cm ³	1,40
Peso Unitario Compactado (PUC)	g/cm ³	1,56
Peso específico a granel	g/cm ³	2,27
Peso específico SSS	g/cm ³	2,35
Peso específico aparente	g/cm ³	2,47
Absorción	%	3,70
Contenido de Humedad (CH)	%	9,52

Elaboración propia.

4.2.2. Caracterización del Cemento

4.2.2.1. Ensayos de Caracterización del Cemento.

Peso específico del Cemento (ASTM C188-95 Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement)

Definición

Este ensayo cubre la determinación de la densidad del cemento hidráulico. Su particular utilidad está en conexión con el diseño y control de mezclas de hormigón.

Materiales

- Matraz Le Chatelier.
- Kerosene o gasolina.
- Balanza sensible al 0,001 g.

Procedimiento

- Se llena el matraz con cualquiera de los líquidos antes especificados hasta que el nivel del líquido coincida con la graduación de 300 ml.
- Se coloca el matraz en un baño maría de temperatura constante, manteniéndola a la temperatura ambiente, se vuelve a leer que el nivel este a 300 ml.
- Se toma 64 g de la muestra y se introduce en el matraz.
- Se hace rodar el matraz de forma inclinada para eliminar el aire.
- Se lectura el nivel desplazado en el matraz.

4.2.2.2. Resultados de la Caracterización del Cemento

Peso específico (ASTM C188-95)

Tabla 43

Peso específico de la barita molida.

Tamaño de muestra (g)	64
Volumen sin muestra (ml)	300
Volumen con muestra (ml)	318,75
Volumen desplazado (ml)	18,75
Peso específico (g/cm ³)	3,41

Elaboración propia.

4.3. Diseño de las Mezclas de Hormigón

4.3.1. Hormigón Baritado

Dícese hormigón baritado al hormigón con agregado de piedra barita, misma que se caracteriza por su alta densidad, es por ello que, el hormigón baritado es considerado un hormigón de alta densidad, siempre y cuando cumpla con la definición del mismo.

El diseño de la mezcla del hormigón baritado, como se vio en el apartado 3.5.2, está sujeto a un proceso de reducción de variables y estudio de las dosificaciones más convenientes para el presente proyecto.

4.3.1.1. Marco Normativo para el diseño de la mezcla

ACI 304.3R-96 (R04) establece que las proporciones de la mezcla pueden determinarse mediante la normativa ACI 211.1, sin embargo, el uso de materiales no convencionales, como ser la barita molida, imposibilitan el uso de la metodología de ACI 211.1 por dos motivos:

- El módulo de finura de las combinaciones arena-barita molida es mucho menor que el establecido por la normativa.
- No se puede determinar el peso específico y la absorción de las combinaciones arena-barita molida por el método estándar de ASTM C128.

Por consiguiente, la mezcla de Hormigón baritado del presente proyecto está basada en la dosificación típica recomendada en la normativa ACI 304.3R-96 (R04) para Hormigón de Alta Densidad con agregado de piedra barita.

Tabla 44

Dosificación típica de Hormigón Baritado según ACI 304.3R-96 (R04).

ACI 304.3R-96 (R04) Heavyweight Concrete: Measuring, Mixing, Transporting, and Placing. Para hormigón colocado convencionalmente Para densidad máxima de 3560 kg/m ³ Para resistencia a los 3 meses de edad igual o menor a 41 Mpa				
Cemento	Agua		Agregado Grueso	Agregado fino
	Max	Min		
kg/m ³	kg/m ³		kg/m ³	kg/m ³
309	46	186	1680	1380

Elaboración propia.

El desarrollo de elaboración de mezclas de Hormigón baritado está sujeto a pruebas y errores, hasta alcanzar un producto final acorde a valores mínimos de densidad, resistencia y trabajabilidad. Estos valores, en orden de importancia para el proyecto, son:

- **La densidad debe ser mayor que 3 g/cm³**

Como definición, un hormigón se considera de alta densidad al superar los 3 g/cm³, la normativa ACI 304.3 R-96 (R04) está elaborada específicamente para hormigones de alta densidad.

- **La resistencia a compresión simple debe ser mayor que 17 MPa**

Si bien los valores mínimos de resistencia no se expresan en los objetivos, se trata de un valor mínimo establecido por las normas: ACI 318S y NB 1225001.

- **El asentamiento debe ser entre 3” y 4”**

Un asentamiento entre 3” y 4” supone una trabajabilidad adecuada para muros armados, una aplicación directa del presente proyecto.

4.3.1.2. Determinación del máximo porcentaje de barita molida en reemplazo del agregado fino convencional (SA)

- Se elabora una mezcla extra a las 193 dosificaciones mencionadas en el apartado 3.4.1., ésta consta de las siguientes características:

$$x = 100 \% \quad y = 0,8 - 1 \quad z = 0 \%$$

- Variable en estudio: “Porcentaje de barita molida en reemplazo del agregado fino”.
- No se realizan ensayos a la mezcla.

Fotografía 9

Dosificación de prueba con 100 % de Barita Molida en reemplazo de arena.



Elaboración propia.

La mezcla presentó una exudación excesiva, además de una consistencia totalmente pastosa cual barro, coloración marrón, sin presencia visible del cemento.

Por los aspectos mencionados anteriormente, la mezcla es rechazada, y se disminuye el contenido de barita molida a un 50 % como valor máximo.

4.3.1.3. Observación de las dosificaciones "trabajables" (SA)

- Se dosifica los siguientes grupos:

G25 $x_4 y_1 z_1$ O25

G26 $x_4 y_2 z_1$ O26

G27 $x_4 y_3 z_1$ O27

G28 $x_4 y_4 z_1$ O28

G29 $x_4 y_5 z_1$ O29

G30 $x_4 y_6 z_1$ O30

G31 $x_4 y_7 z_1$ O31

G32 $x_4 y_8 z_1$ O32

- Variable en estudio: “Relación agua/cemento”.
- Se realiza un solo ensayo a cada grupo: Revenimiento.

Fotografía 10

Mezcla de hormigón baritado con relación a/c igual a 0,4 hasta 0,7



Elaboración propia.

Fotografía 11

Mezcla de hormigón baritado con relación a/c igual a 0,8 hasta 1.



Elaboración propia.

Se observa que los grupos trabajables solo son los últimos 3, es decir, para las relaciones agua cemento 0,8 0,9 y 1.

Estas relaciones superan considerablemente los valores de la normativa, pero igual son puestas a estudio.

Ver Anexo G.

4.3.1.4. Observación de la densidad en las combinaciones Arena-Barita (SA)

Mediante de un análisis granulométrico del agregado fino convencional y el porcentaje que pasa el tamiz N°200 de la barita molida, se establecen las siguientes combinaciones Arena-Barita:

- Combinación 1: 100 % Arena y 0 % Barita.
- Combinación 2: 92 % Arena y 8 % Barita.
- Combinación 3: 80 % Arena y 20 % Barita.
- Combinación 4: 50 % Arena y 50 % Barita.

Tabla 45

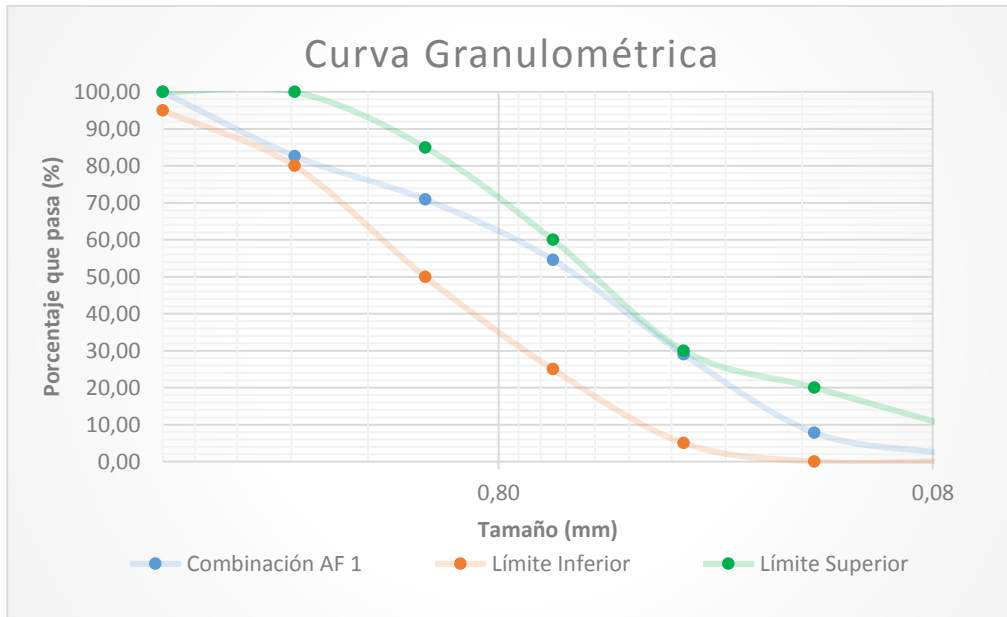
Granulometría para la Combinación 1.

Combinación 1				
Tamíz	Tamaño (mm)	Arena	Barita	Combinación teórica
		100%	0%	
		% que pasa	% que pasa	
N°4	4,75	100	0	100
N°8	2,36	82,65	0	82,65
N°16	1,18	70,94	0	70,94
N°30	0,60	54,60	0	54,60
N°50	0,30	29,01	0	29,01
N°100	0,15	7,85	0	7,85
N°200	0,08	2,13	0	2,13
Módulo de finura			2,55	

Elaboración propia.

Gráfico 4

Curva Granulométrica teórica de la Combinación 1.



Elaboración propia.

Tabla 46

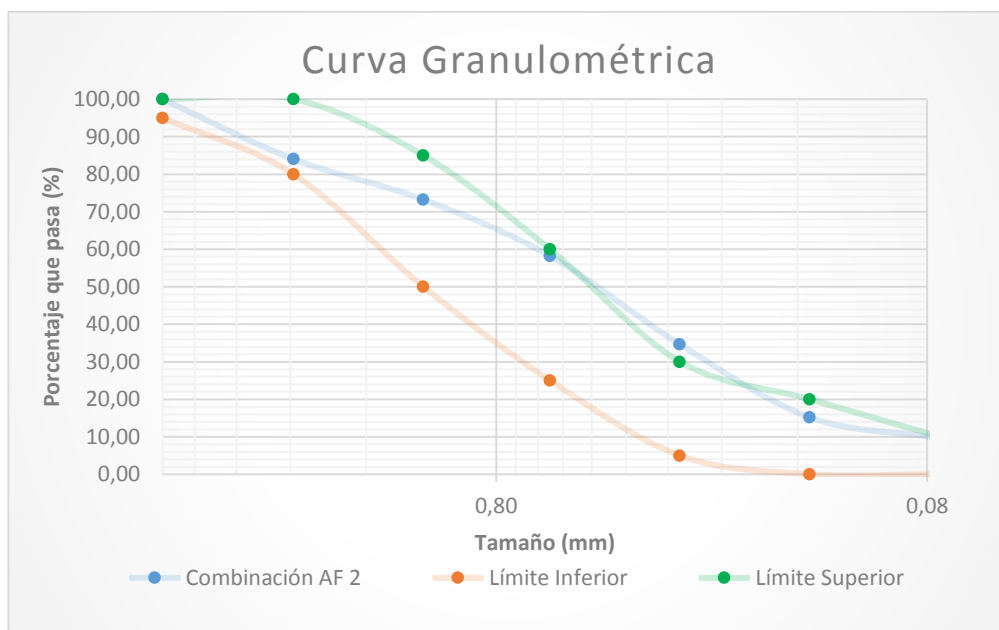
Granulometría para la Combinación 2.

Combinación 2				
Tamíz	Tamaño (mm)	Arena	Barita	Combinación teórica
		92%	8%	
		% que pasa	% que pasa	
N°4	4,75	92	8	100
N°8	2,36	76,04	8	84,04
N°16	1,18	65,27	8	73,27
N°30	0,60	50,23	8	58,23
N°50	0,30	26,69	8	34,69
N°100	0,15	7,22	8	15,22
N°200	0,08	1,96	7,76	9,72
Módulo de finura			2,35	

Elaboración propia.

Gráfico 5

Curva Granulométrica teórica de la Combinación 2.



Elaboración propia.

Tabla 47

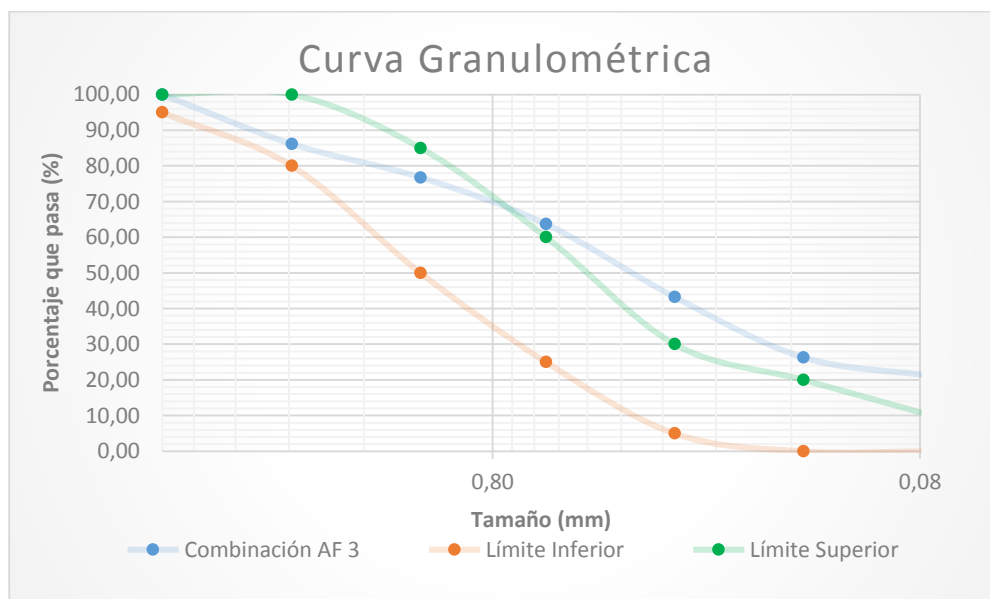
Granulometría para la Combinación 3.

Combinación 3				
Tamíz	Tamaño (mm)	Arena	Barita	Combinación teórica
		80%	20%	
		% que pasa	% que pasa	% que pasa
N°4	4,75	80	20	100,0
N°8	2,36	66,12	20	86,12
N°16	1,18	56,75	20	76,75
N°30	0,60	43,68	20	63,68
N°50	0,30	23,21	20	43,21
N°100	0,15	6,28	20	26,28
N°200	0,08	1,70	19,40	21,10
Módulo de finura			2,04	

Elaboración propia.

Gráfico 6

Curva Granulométrica teórica de la Combinación 3.



Elaboración propia.

Tabla 48

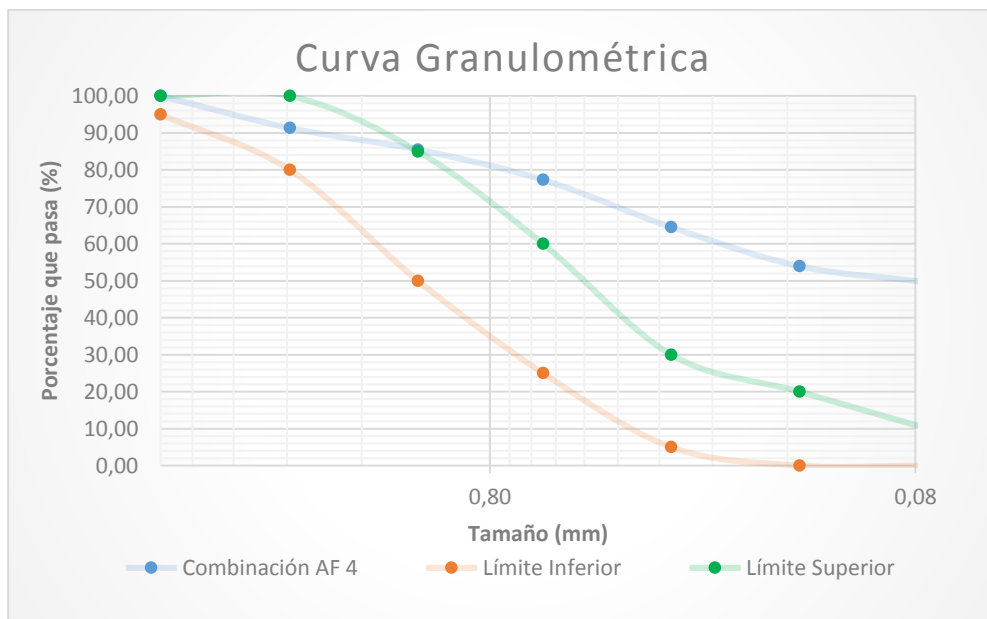
Granulometría para la Combinación 4.

Combinación 4				
Tamíz	Tamaño (mm)	Arena	Barita	Combinación teórica
		50%	50%	
		% que pasa	% que pasa	% que pasa
N°4	4,75	50	50	100
N°8	2,36	41,33	50	91,33
N°16	1,18	35,47	50	85,47
N°30	0,60	27,30	50	77,30
N°50	0,30	14,51	50	64,51
N°100	0,15	3,92	50	53,92
N°200	0,08	1,06	48,50	49,56
Módulo de finura			1,27	

Elaboración propia.

Gráfico 7

Curva Granulométrica teórica de la Combinación 4.



Elaboración propia.

- Se realiza la dosificación para las 4 combinaciones:

G6 x₁ y₆ z₁ O6

G14 x₂ y₆ z₁ O14

G22 x₃ y₆ z₁ O22

G30 x₄ y₆ z₁ O30

- Variable en estudio: “Porcentaje de barita molida en reemplazo del agregado fino”.
- Se realizan 4 ensayos para cada grupo: Revenimiento, densidad, contenido de aire y resistencia a compresión simple a los 28 días.

La observación Nro. 30 nos indicó, como se verá en el próximo capítulo, que el grupo 30 fue el único en superar los 3 g/cm^3 de densidad (cantidad que define a los hormigones de alta densidad). La variable independiente “x”, tomara el cuarto valor, de aquí en adelante.

4.3.1.5. Observación de la resistencia a compresión simple a los 28 días (SA)

- Establecidos las relaciones trabajables, se realiza la dosificación de los siguientes grupos:

G30 x₄ y₆ z₁ O30

G31 x₄ y₇ z₁ O31

G32 x₄ y₈ z₁ O32

- Variable en estudio: “Relación agua/cemento”.
- Se realizan 4 ensayos para cada grupo: Revenimiento, densidad, contenido de aire y resistencia a compresión simple a los 28 días.

Los resultados se observan con detalle en el siguiente capítulo, preliminarmente, con relaciones de agua/cemento superiores a 0,6 es casi un hecho que la resistencia está comprometida a disminuir, por ello se sugiere el uso de un aditivo súper plastificante.

4.3.1.6. Observación de la resistencia a compresión y la densidad con el uso de aditivo súper plastificante (CA)

- Se dosifican los grupos:

G59 x₄ y₃ z₂ O59

G91 x₄ y₃ z₃ O91

G123 x₄ y₃ z₄ O123

G155 x₄ y₃ z₅ O155

G187 x₄ y₃ z₆ O187

- Variable en estudio: “Porcentaje de aditivo súper plastificante”.
- Se realizan 3 ensayos para cada grupo: Revenimiento, densidad y resistencia a compresión simple a los 28 días.

Se observó que la presencia del súper plastificante en la mezcla reduce la relación agua cemento de 0,8 a 0,4 manteniendo la trabajabilidad, aumentando la densidad y la resistencia a compresión.

También se observa que el grupo 155 (con 4 % de aditivo) es aquel con mayor densidad, por ello, es elegido preliminarmente para los siguientes ensayos.

4.3.1.7. Observación del revenimiento (CA)

- Se dosifican los grupos:

G154 x₄ y₂ z₅ O154

G154.5 x₄ y_{2.5} z₅ O154.5

G155 x₄ y₃ z₅ O155

- Variable en estudio: “Relación agua/cemento”.
- Se realizan 4 ensayos para cada grupo: Revenimiento, densidad, contenido de aire y resistencia a compresión simple a los 28 días.

Se descarta a todos los grupos, por dos razones fundamentales:

- El tiempo de fraguado inicial es mayor a 4 días.
- La recomendación del fabricante del aditivo establece valores de 0,5 % al 1,5 %.

Fotografía 12

Desintegración de probetas cilíndricas en piscina de curado.



Elaboración propia

- Se dosifican nuevos grupos:

G90 x₄ y₂ z₃ O90

G91 x₄ y₃ z₃ O91

G92 x₄ y₄ z₃ O92

- Variable en estudio: “Relación agua/cemento”.
- Se realizan 4 ensayos para cada grupo: Revenimiento, densidad, contenido de aire y resistencia a compresión simple a los 28 días.

La mezcla que obtiene una mejor trabajabilidad es la del grupo 92.

4.3.1.8. Dosificación final de Hormigón con agregado de piedra barita

Una vez observados los 28 grupos dispuestos a pruebas y ensayos, se elige la dosificación del grupo 92:

$$\text{Porcentaje de Barita molida} = 50 \%$$

$$\text{Porcentaje de A. fino convencional} = 50 \%$$

$$\text{Relación agua/cemento} = 0,6$$

$$\text{Porcentaje de aditivo} = 1,5 \%$$

La dosificación para 1 m³ de hormigón baritado es la siguiente:

Cemento	Agua	Agregado Grueso	Agregado Fino	Barita	Aditivo
kg	kg	kg	kg	kg	g
309,000	185,400	1680,000	690,000	690,000	4635,000

4.3.2. Hormigón Convencional

El diseño de la presente mezcla, sera catalogada como: Dosificación 193, para constrar con las dosificaciones anteriormente vistas en el diseño del Hormigón Baritado.

4.3.2.1. Marco Normativo para el diseño de la mezcla

La mezcla de hormigón convencional fue realizada de acuerdo a la metodología ACI Comité 211.

El diseño mediante el método ACI 211 requiere de los siguientes datos:

- Peso unitario suelto del agregado grueso y fino.
- Peso unitario compacto del agregado grueso y fino.
- Peso específico del agregado grueso y fino.
- Porcentaje de absorción del agregado grueso y fino.
- Módulo de finura del agregado fino.
- Tamaño máximo nominal del agregado grueso.
- Peso específico del cemento.

Los ensayos de caracterización del material, son esenciales para obtener los datos mencionados anteriormente.

4.3.2.2. Procedimiento de diseño de mezcla según metodología ACI 211

PASO 1

Se define la resistencia y el revenimiento esperado:

Se diseñará una mezcla de $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días de edad, con un revenimiento de 3" a 4".

PASO 2

Se debe determinar la resistencia promedio " R_m ", de acuerdo a nuestro requerimiento:

Tabla 49

Resistencia promedio

R_m = Resistencia prom.	
F'_c	F'_{cr}
< 210	$F'_c + 70$
210 a 350	$F'_c + 84$
> 350	$F'_c + 98$

Extraído de ACI 211.

Para una resistencia requerida de 250 kg/cm^2 , tendremos una resistencia promedio de 334 kg/cm^2 .

PASO 3

De acuerdo al tamaño máximo nominal de nuestro agregado grueso y el asentamiento elegido, determinaremos la cantidad de agua en l/m^3 :

Tabla 50

Cantidad de agua en la mezcla.

Asentamiento	Agua en Lts/m^3 , para los tamaños máximos nominales de agregado y consistencia indicados							
	3/8 "	1/2 "	3/4 "	1 "	1 1/2 "	2 "	3 "	6 "
Concretos sin aire incorporado								
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	---
Concretos con aire incorporado								
1" a 2"	181	175	168	160	150	142	122	107
3" a 4"	202	193	184	175	165	157	133	119
6" a 7"	216	205	197	184	174	166	154	---

Extraído de ACI 211.

Para un agregado de 3/4" y un asentamiento de 3" a 4", se tiene 205 l/m^3 de agua.

PASO 4

De acuerdo al tamaño máximo nominal de nuestro agregado grueso, se determina el contenido de aire:

Tabla 51

Aire atrapado en la mezcla.

Tamaño Máximo Nominal	Aire Atrapado
3/8 "	3,00 %
1/2 "	2,50 %
3/4 "	2,00 %
1 "	1,50 %
1 1/2 "	1,00 %
2 "	0,50 %
3 "	0,30 %
6 "	0,20 %

Extraído de ACI 211.

Para un agregado de $\frac{3}{4}$ ", el contenido de aire es de 2 %.

PASO 5

De acuerdo a nuestra resistencia requerida, elegimos una relación agua cemento adecuada:

Tabla 52

Influencia de la relación a/c en la resistencia a compresión

f' cr (28 días)	Relacion agua-cemento de diseño en peso	
	Concretos sin aire	Concretos con aire
150	0,80	0,71
200	0,70	0,61
250	0,62	0,53
300	0,55	0,46
350	0,48	0,40
400	0,43	---
450	0,38	---

Extraído de ACI 211.

En nuestro caso en particular se elige una relación $a/c = 0,6$

PASO 6

Con el tamaño máximo de nuestro agregado grueso y el módulo de finura del agregado fino, se define el volumen de agregado grueso en nuestra mezcla:

Tabla 53*Volumen de agregado grueso.*

Tamaño máximo nominal del agregado grueso	Volúmen de agregado grueso, seco y compactado por unidad de volúmen de concreto, para diferentes			
	MODULO DE FINEZA DEL AGREGADO FINO			
	2,40	2,60	2,80	3,00
3/8 "	0,50	0,48	0,46	0,44
1/2 "	0,59	0,57	0,55	0,53
3/4 "	0,66	0,64	0,62	0,60
1 "	0,71	0,69	0,67	0,65
1 1/2 "	0,76	0,74	0,72	0,70
2 "	0,78	0,76	0,74	0,72
3 "	0,81	0,79	0,77	0,75
6 "	0,87	0,85	0,84	0,81

Extraído de ACI 211.

Para nuestros agregados corresponde 0,64 m³ de agregado grueso por cada m³ de hormigón.

PASO 7

Con la cantidad de agua en la mezcla determinada en el paso 3, y la relación agua cemento establecida en el paso 5 y el peso específico del cemento, determinamos la cantidad de cemento en la mezcla:

$$Cemento = \frac{205}{0,6 * 3,15 * 1.000} = 0,109 m^3$$

Se sobreentiende que la densidad del agua es de 1 g/cm³.

PASO 8

Con la cantidad de agregado grueso por cada m³ de hormigón estimado en el paso 6, el peso unitario suelto del agregado grueso y su peso específico, determinamos la cantidad de agregado grueso:

$$A. grueso = \frac{0,64 * 1.626}{2,42 * 1.000} = 0,43 m^3$$

PASO 9

Tomando en cuenta la cantidad de aire estimada en el paso 4 y la cantidad de agua en la mezcla determinada en el paso 3, se calcula la cantidad de agregado fino en la mezcla:

$$A. fino = 1 - 0,109 - 0,43 - 0,205 - 0,02 = 0,236 m^3$$

PASO 10

Se debe realizar una corrección por humedad para el agregado fino y grueso, para ello, primero debemos determinar la magnitud en peso de los materiales por cada m³ de hormigón, esto se logra multiplicando el volumen absoluto por el peso específico según corresponda:

Tabla 54*Proporciones de los materiales.*

Material	Vol.Abs.Materiales	Pesos secos del agregado	Correccion por Humedad
Cemento	0,109 m ³	341,67 kg/m ³	341,667 kg/m ³
A. Fino	0,237 m ³	536,855 kg/m ³	587,964 kg/m ³
A. Grueso	0,430 m ³	1040,60 kg/m ³	1083,161 kg/m ³
Agua	0,205 m ³	205,00 l/m ³	179,166 l/m ³
Aire	0,020 m ³		

Extraído de ACI 211.

Para una humedad del 9,52 % en el agregado fino y 4,09 % en el agregado grueso, se tienen los valores observados anteriormente.

También se debe realizar una corrección por absorción en el agua, se debe sumar el porcentaje de absorción de cada agregado y restar su contenido de humedad.

Para 3,70 % de absorción en agregado grueso y 4,61 % de absorción en agregado fino, se tiene el valor mostrado en la tabla.

4.3.2.3. Dosificación final de Hormigón con agregado convencional

Después de seguir el procedimiento de la metodología nuestra dosificación, para 1 m³ de hormigón convencional, es la siguiente:

Cemento	Agua	Agregado Grueso	Agregado Fino
kg	kg	kg	kg
341,667	179,166	1083,161	587,964

4.3.3. Ensayos realizados al Hormigón

4.3.3.1. Ensayos al hormigón fresco

Revenimiento (ASTM C143-00 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete)

Definición

Este ensayo cubre la determinación del asentamiento del hormigón en estado fresco, en el laboratorio como también en obra.

Este método de ensayo es aplicable para agregados con tamaño máximo de 50 mm y asentamientos comprendidos entre 2 y 18 cm.

Materiales

- Cono de Abrams.
- Varilla pisón.

- Plancha de apoyo.
- Flexómetro.

Procedimiento

- Mojar el molde y colocarlo sobre una superficie plana no absorbente, mantenerlo inmóvil pisando firmemente las aletas. Seguidamente llenar el concreto en tres capas, de modo que cada capa ocupe la tercera parte del volumen del molde.
- Cada capa se compacta dando 25 golpes con la varilla compactadora distribuidos y aplicados uniformemente en toda la sección. En la capa inferior es necesario inclinar un poco la varilla y dar la mitad de los golpes cerca del perímetro, acercándose progresivamente en espiral hacia el centro de la sección. La capa inferior se compacta en todo su espesor.
- Las capas siguientes se compactan de igual modo procurando que la varilla penetre ligeramente en la capa inmediata inferior.
- Llenar el molde por exceso antes de compactar la última capa. Si después de compactar hubiera una deficiencia de material, se añadirá la cantidad necesaria para mantener un exceso por encima del molde.
- Enrasar utilizando una plancha de albañilería o la varilla compactadora.
- Una vez terminada la operación anterior, levantar el molde cuidadosamente en dirección vertical. Inmediatamente después se mide el asentamiento determinado por la diferencia entre la altura del molde y la del centro de la cara superior del cono deformado.

Contenido de aire (ASTM C231-03 Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method)

Definición

Este método de prueba cubre la determinación del contenido de aire de hormigón recién mezclado a partir de la observación del cambio en volumen de hormigón con un cambio de presión.

Este método de prueba está diseñado para usarse con hormigones y morteros fabricados con áridos relativamente densos para los que el factor de corrección agregado se puede determinar satisfactoriamente.

No está recomendado para hormigones hechos con áridos ligeros, hormigón con escoria de alto horno, o agregados de alta porosidad. En estos casos, debe utilizarse el método C173.

Materiales

- Medidor de aire (Medidor tipo B).
- Varilla pisón.
- Plancha o regla de enrase.
- Mazo de goma.

Procedimiento

- Limpie completamente los bordes del recipiente y de la cubierta para que cuando esta se una al recipiente cierre herméticamente, ensamble el aparato. Cierre la válvula de aire entre la cámara de aire y el recipiente de medición y abra ambas llaves de desagüe que se encuentran en los hoyos de la cubierta. Usando una jeringa plástica inyecte agua a través de uno de las llaves de desagüe hasta que el agua salga por el otro desagüe. Mueva suavemente el medidor hasta que salga todo el aire por la misma llave de desagüe.
- Cierre la válvula de escape de la cámara y bombee aire en la cámara hasta que el indicador de presión llegue a la línea de presión inicial. Deje pasar unos segundos para que el aire comprimido se enfríe a temperatura normal. Estabilice el indicador a la presión inicial bombeando o sacando aire conforme sea necesario y golpeándolo ligeramente. Cierre las dos llaves de desagüe en los hoyos de la cubierta. Abra la válvula de aire entre la cámara y el recipiente de medición. Golpee firmemente los lados del recipiente para equilibrar la presión interna. Golpee suavemente el indicador de presión para estabilizar la aguja y leer el porcentaje de aire. Si no se cierra la válvula de aire principal antes de liberar la presión del recipiente o de la cámara de aire, el agua será succionada a la cámara de aire causando errores en las mediciones subsecuentes. En el caso de que entre agua en la cámara de aire deberá ser sacada por la válvula de escape de agua y se deberá bombear más aire para expulsar residuos de agua. Libere la presión abriendo las dos llaves de desagüe antes de quitar la cubierta.

Densidad (ASTM C138-01 Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete)

Definición

Este método de ensayo cubre la determinación de la densidad, el volumen producido, contenido de cemento y contenido de aire en mezclas de concreto fresco.

Materiales

- Balanza.
- Varilla de apisonado.
- Mazo de goma o vibrador.
- Recipiente.
- Plancha o regla de enrase.

Procedimiento

- Coloque el concreto en el recipiente en tres capas de aproximadamente igual volumen. Apisone cada capa con 25 golpes de varilla cuando son usados recipientes de 0,5 pie³ (14 l) o menores, y con 50 golpes cuando se usen recipientes de 1 pie³ (28 l), y un golpe por cada 3 pulg² (20 cm²) de superficie para recipientes más grandes. Apisone la capa del fondo en su profundidad total sin golpear con fuerza el fondo del recipiente. Distribuya los golpes uniformemente sobre la superficie de cada capa. Para las dos capas superiores penetre aproximadamente 1" (25 mm) en la capa inferior.
- Después de apisonar cada capa, golpee suavemente los lados del recipiente de 10 a 15 veces con el mazo adecuado para cerrar huecos que haya dejado la varilla de apisonamiento y liberar burbujas de aire atrapadas. Añada la última capa evitando sobrellenar el recipiente.
- Después de la compactación remueva el excedente de concreto de la superficie y termínela suavemente con la placa de perfilado teniendo cuidado de dejar el recipiente adecuadamente lleno y nivelado. La remoción y aplanado se logra mejor presionando la placa de perfilado sobre la superficie del recipiente cubriendo aproximadamente dos terceras partes de esta y retirando la placa con movimiento a manera de serrucho sobre el área cubierta. Luego coloque la placa en el borde superior del recipiente, cubriendo los dos tercios originales y avance con presión vertical y movimiento de aserrado sobre

toda la superficie. Varias pasadas con el borde de la placa inclinado producirán un acabado liso

- Después del enrazamiento limpie todo el concreto del exterior del recipiente y determine la masa del concreto y recipiente en la balanza.

Elaboración de muestras y curado (ASTM C192-02 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory)

Definición

Esta práctica cubre el procedimiento para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio bajo controles precisos de materiales y condiciones de ensayo, usando concreto que puede ser consolidado por varillado o vibrado como se describe aquí.

Materiales

- Moldes cilíndricos para especímenes colocados verticalmente.
- Varilla apisonadora.
- Mazo de goma.
- Herramientas menores.

Procedimiento

- Mezcle el concreto en un adecuado mezclador o manualmente en bachadas de tal tamaño como para que después de moldeados, los especímenes de ensayo queden alrededor del 10 % en exceso.
- Colocar el concreto en el molde, en el número de capas requeridas de aproximadamente igual volumen. Varillar cada capa con el extremo redondeado de la barra usando el número de golpes y tamaño de la barra especificados en la tabla 2. Varillar la capa del fondo en toda su profundidad. Distribuir los golpes uniformemente a través de toda la sección transversal del molde y para cada capa superior permitir que la barra penetre toda la capa que está siendo compactada y la capa inferior aproximadamente 1 pulg (25 mm). Después que cada capa es varillada, golpear ligeramente los lados exteriores del molde 10 a 15 veces con el mazo para cerrar cualquier orificio dejado por la barra y liberar cualquier burbuja grande de aire que pudiera haber sido atrapada.

Tabla 55*Número de golpes según diámetro de molde y diámetro de varilla*

TABLE 2 Diameter of Rod and Number of Roddings to be Used in Molding Test Specimens		
Cylinders		
Diameter of Cylinder, in. [mm]	Diameter of Rod in. [mm]	Number of Strokes/Layer
2 [50] to <6 [150]	3/8 [10]	25
6 [150]	1/2 [16]	25
8 [200]	1/2 [16]	50
10 [250]	1/2 [16]	75
Beams and Prisms		
Top Surface Area of Specimen, in. ² [cm ²]	Diameter of Rod in. [mm]	Number of Roddings/Layer
25 [160] or less	3/8 [10]	25
26 to 49 [165 to 310]	3/8 [10]	one for each 1 in. ² [7 cm ²] of surface
50 [320] or more	1/2 [16]	one for each 2 in. ² [14 cm ²] of surface
Horizontal Creep Cylinders		
Diameter of Cylinder in. [mm]	Diameter of Rod in. [mm]	Number of Roddings/Layer
6 [150]	3/8 [16]	50 total, 25 along both sides of axis

Extraído de ASTM C192

- Después de la consolidación, el acabado de la superficie del borde superior mediante alisado con la varilla donde la consistencia del concreto lo permita, o con una plancha o llana de madera. Si se desea, cabecear el borde superior del cilindro fresco con una delgada capa de pasta de cemento portland lo cual es permitido para endurecer y curar con el espécimen.
- Remueva los especímenes de los moldes después de 24 ± 8 h de elaborados. Para concreto con tiempo de fraguado prolongado, los moldes no deberán ser removidos antes de 20 ± 4 h después del fraguado final.

4.3.3.2. Ensayos al hormigón endurecido

Compresión (ASTM C39-01 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens)

Definición

Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto tales como cilindros moldeados y núcleos taladrados. Está limitado al concreto que tenga un peso unitario mayor de 50 lb/pie³ (800 Kg/m³).

Materiales

- Máquina de ensayo a compresión (prensa hidráulica).
- Especímenes.

Procedimiento

- Los ensayos de compresión en especímenes curados húmedos, serán hechos tan pronto como sea practicable, después de removerlos del almacenamiento húmedo.

- Los especímenes deberán ser mantenidos húmedos por algún método conveniente durante el período entre la remoción del lugar de curado y el ensayo. Serán ensayados en condición húmeda.
- Coloque la placa inferior, con su cara endurecida hacia arriba, sobre la mesa o bloque de la máquina de ensayo, directamente debajo del bloque de carga con asiento esférico. Limpie las superficies de carga de los bloques superior e inferior y del espécimen de ensayo y coloque este en el bloque de carga inferior. Cuidadosamente alinee el eje del espécimen con el centro de carga del bloque con asiento esférico.
- Aplique la carga hasta que el espécimen falle y anote la carga máxima soportada por el espécimen durante el ensayo. Note el tipo de falla y apariencia del concreto.

4.4. Irradiación de Muestras

4.4.1. Elaboración de Placas de Hormigón Baritado y Hormigón Convencional

Se elaboraron placas de Hormigón Baritado mediante la dosificación 92 y placas de Hormigón Convencional con la dosificación 193.

Tabla 56

Dimensiones y cantidades de las Placas de Hormigón Baritado y Hormigón Convencional.

Placa	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)	Cantidad	
				Hº Baritado	Hº Convencional
I	200	200	20	1	1
II	200	200	30	1	1
III	200	200	40	1	1
IV	200	200	50	1	1
V	200	200	60	1	1
VI	200	200	70	1	1
VII	200	200	80	1	1
Total				7	7

Elaboración propia.

Fotografía 13

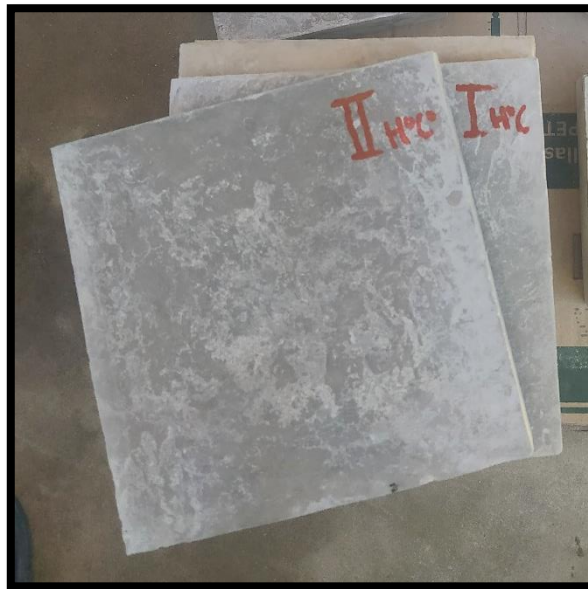
Elaboración de placas de Hormigón Baritado y Convencional en moldes metálicos.



Elaboración propia.

Fotografía 14

Placas en estado endurecido.



Elaboración propia.

4.4.2. Calibración del Dosímetro

El dosímetro que se usó en la presente investigación se trata de un Contador Geiger Müller, con las características que se ven a continuación.

Tabla 57

Datos del Dosímetro usado para medir la radiación en el proyecto.

Cantidad	1
Marca	GQ-Electronics
Modelo	GMC-600 Plus
Nº de Serie	31083338353104
Componentes	▪ Dosímetro Geiger Counter GMC 600+ (1) ▪ USB flash memory con drivers, software y guía de usuario (1) ▪ Cargador y cable USB para conexión a computadora (1) ▪ Estuche para dosímetro (1) ▪ Guía de inicio rápido de usuario (1)

Elaboración propia.

Fotografía 15

Dosímetro GMC-600 Plus.



Elaboración propia.

El proceso de calibración fue realizado por la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) en fecha 4 de diciembre de 2020, con un periodo de validez hasta el 4 de diciembre de 2021. Los datos de la calibración se ven a continuación.

Ilustración 1

Calibración del Dosímetro.

	Example	#1	#2	#3
CPM:	60	350	3500	35000
uSv:	0.05	0.79	7.86	78.59

Buttons: Read From Unit, Write To Unit, Exit

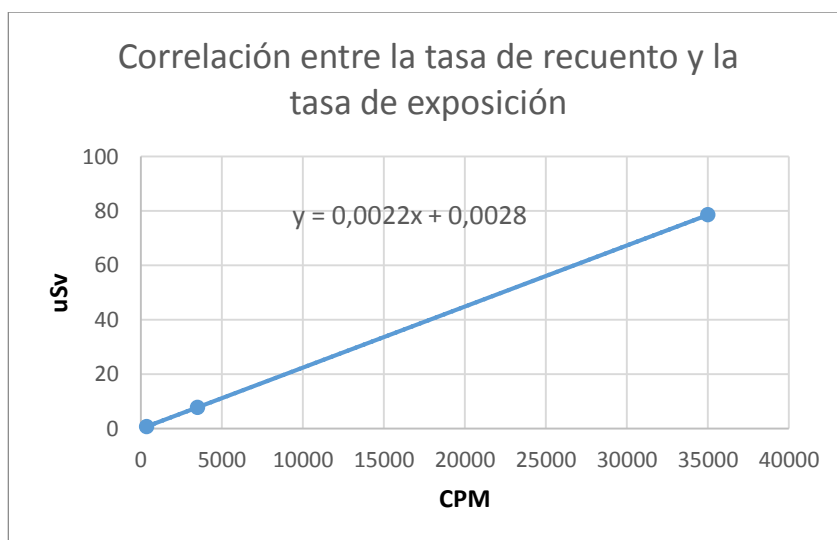
Max. 65534 CPM

Elaboración propia.

La presente calibración nos permite convertir los Conteos Por Minuto y Conteos Por Segundo (CPM y CPS) a unidades de micro Sievert (uSv).

Gráfico 8

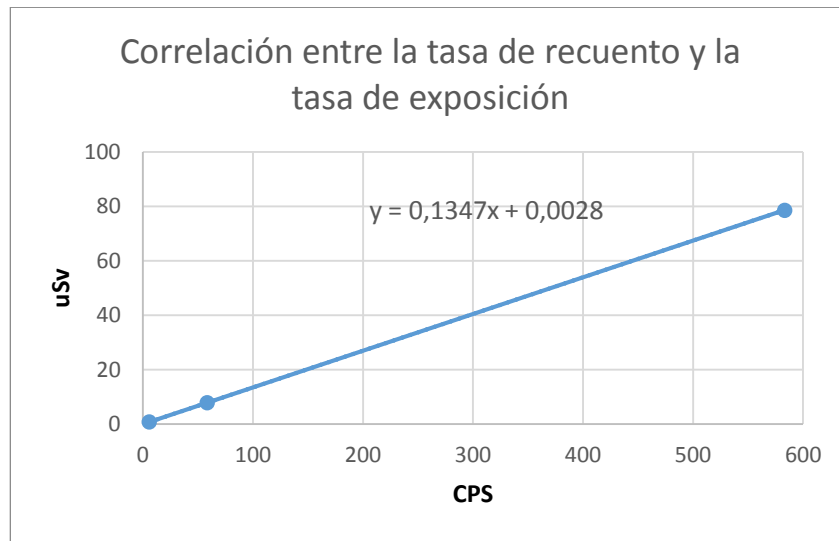
Correlación entre el Conteo Por Minuto y los micro Sievert.



Elaboración propia.

Gráfico 9

Correlación entre el Conteo Por Segundo y los micro Sievert.



Elaboración propia.

Ver Anexo I.

4.4.3. Ensayo de Irradiación de muestras

Este método propuesto por el autor del presente proyecto, determinará el grado de atenuación aproximado del hormigón ante radiación ionizante

Materiales

- Dosímetro (Contador Geiger Müller).
- Equipo de rayos X.
- Estructura metálica para colocados de placas.
- Flexómetro o calibrador.
- Placas de hormigón.

Ver Anexo G

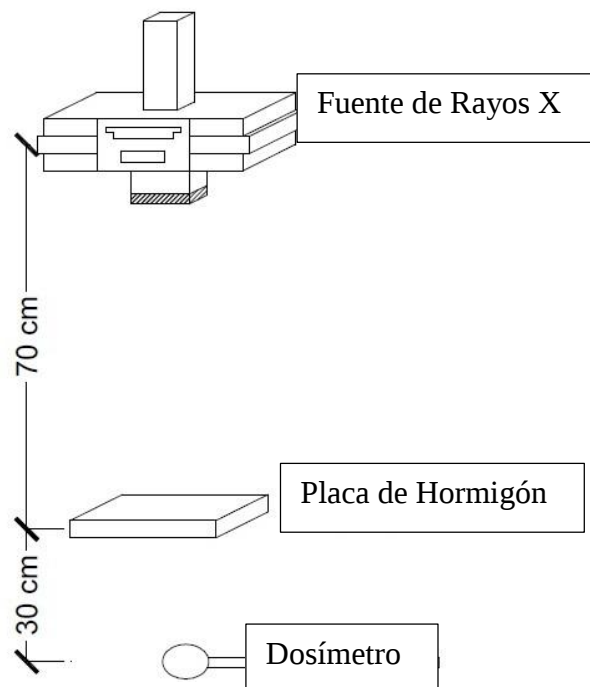
Procedimiento

- Se toma las dimensiones de la placa con la máxima precisión posible.
- Colocar el dosímetro y la estructura metálica en una ubicación cercana a la fuente de rayos X.
- Realizar una medición con el dosímetro por 1 min o más, para determinar el kerma existente en el ambiente.

- Alinear la fuente de rayos X con la estructura metálica y con el dosímetro, y medir la distancia entre ambos.
- Realizar el disparo, sin colocar la muestra.
- Registrar la tensión, intensidad de corriente y el tiempo de disparo.
- Registrar los datos almacenados por el dosímetro.
- Colocar la placa en la estructura metálica y alinearla igualmente con la fuente de rayos X y el dosímetro, medir la distancia entre la placa y la fuente de rayos X.
- Realizar el disparo.
- Registrar la tensión, intensidad de corriente y el tiempo de disparo.
- Registrar los datos almacenados por el dosímetro.

Ilustración 2

Disposición referencial del sistema.



Elaboración propia.

Fotografía 16

Disposición de los materiales para el ensayo de irradiación.



Elaboración propia.

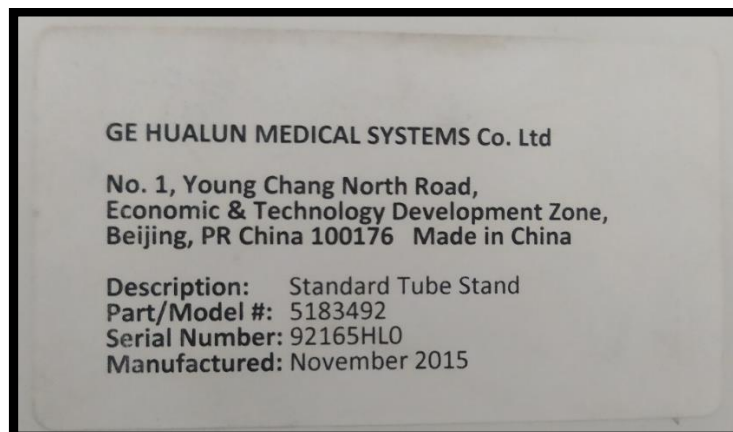
4.4.4. Parametrización de la Irradiación

4.4.4.1. Equipo de Rayos X

El equipo utilizado en el presente proyecto cuenta con las siguientes características.

Fotografía 17

Datos del equipo de Rayos X utilizado en el proyecto.



Elaboración propia.

Tabla 58

Datos del Tubo de Rayos X inserto en el equipo de Rayos X utilizado en el proyecto.

Marca	TOSHIBA
Modelo	E7843
Número de Serie	15B1354
Filtro	1.3 Al
kV máximo	150

Elaboración propia.

4.4.4.2. Parámetros utilizados en los Disparos de Rayos X

Tabla 59

Parámetros utilizados en la irradiación de Rayos X.

Tensión (kV)	100
Tiempo (s)	1,51
Intensidad (mA)	133
Intensidad (mAs)	200
Filtro	1.3 Al
Distancia entre la Fuente de Rayos X y la Muestra (m)	0,70
Distancia entre la Muestra y el Dosímetro (m)	0,30
Distancia entre la Fuente de Rayos X y el Dosímetro (m)	1

Elaboración propia.

Los valores de Intensidad (mA) y Tiempo de exposición (s) pueden llegar a ser variables codependientes de la Intensidad (mAs) cuyo valor es constante.

Fotografía 18

Parámetros utilizados en la irradiación de Rayos X, mostrados en el tablero del equipo de Rayos X



Elaboración propia.

CAPÍTULO V

CAPÍTULO V

Análisis de Resultados

5.1. Propiedades físicas y mecánicas del Hormigón Baritado y el Hormigón Convencional

Tabla 60

Resultados del Hormigón Baritado y el Hormigón Convencional.

Grupo	Dosificación (x, y, z)	Asentamiento (mm)	Densidad (g/cm3)				Contenido de aire	Resistencia a Comp. (Mpa)
			1	2	3	Prom.		
Observación de las dosificaciones trabajables (SA).								
25	411	No trabajable						-
26	421	No trabajable						-
27	431	No trabajable						-
28	441	No trabajable						-
29	451	No trabajable						-
30	461	0	-	-	-	-	-	-
31	471	52	-	-	-	-	-	-
32	481	115	-	-	-	-	-	-
Observación de la densidad en las combinaciones Arena-Barita (SA).								
6	161	5	2,78	2,64	2,71	2,71	3,40	8,02
14	261	7	2,80	2,80	2,75	2,78	3,30	8,25
22	361	7	2,88	2,79	2,86	2,84	2,40	8,73
30	461	5	2,99	2,93	3,07	3,00	2,40	9,37
Observación de la resistencia a compresión simple a los 28 días (SA).								
30	461	5	3,05	2,95	2,99	3,00	2,40	9,37
31	471	50	2,98	3,02	2,97	2,99	2,10	7,18
32	481	80	3,02	3,00	2,98	3,00	1,70	6,91
Observación de la resistencia a compresión y la densidad con el uso de aditivo súper plastificante (CA).								
59	432	0	3,02	3,01	3,02	3,02	-	17,16
91	433	25	3,02	3,02	3,03	3,04	-	17,99
126	434	52	3,04	3,06	3,06	3,05	-	18,09
155	435	85	3,09	3,07	3,07	3,07	-	21,53
187	436	115	3,06	3,07	3,07	3,07	-	22,65
Observación del revenimiento (CA=4%)								
154	425	25	3,02	3,01	3,01	3,01	2,70	22,80
-	425,5	135	3,10	3,09	3,10	3,10	2,40	-
155	435	215	3,10	3,10	3,10	3,10	2,00	-
Observación del revenimiento (CA=1,5%)								
90	423	23	3,09	3,08	3,08	3,08	2,40	25,35
91	433	38	3,04	3,04	3,04	3,04	2,20	25,02
92	443	62	3,04	3,03	3,04	3,03	1,90	21,43
Dosificación final de Hormigón con agregado de piedra barita.								
92	443	85	3,05	3,05	3,05	3,05	2,10	22.86 ± 2.50
Dosificación final de Hormigón con agregado convencional.								
193	---	80	2,31	2,29	2,30	2,30	1,40	21.66 ± 1.16

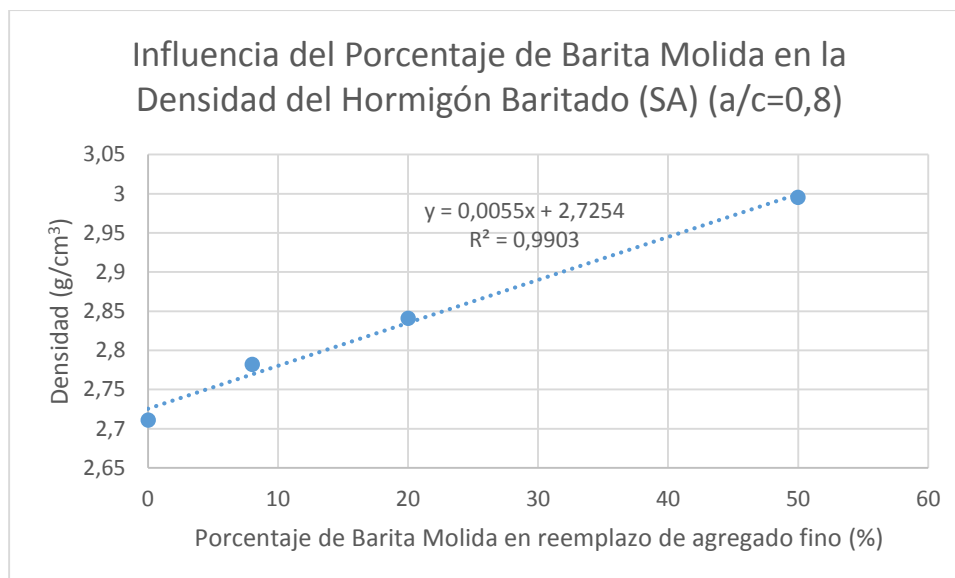
Elaboración propia.

Ver Anexo H.

5.1.1. Densidad (ASTM C138-01)

Gráfico 10

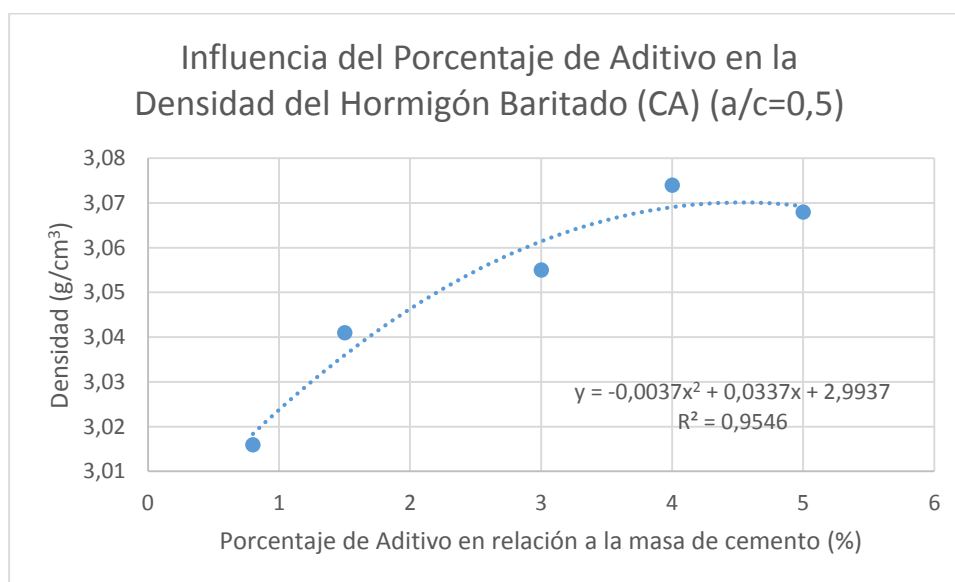
Influencia del Porcentaje de Barita Molida en reemplazo de agregado fino convencional sobre la Densidad del Hormigón Baritado en estado fresco, sin aditivo y con relación agua/cemento igual a 0,8.



Elaboración propia.

Gráfico 11

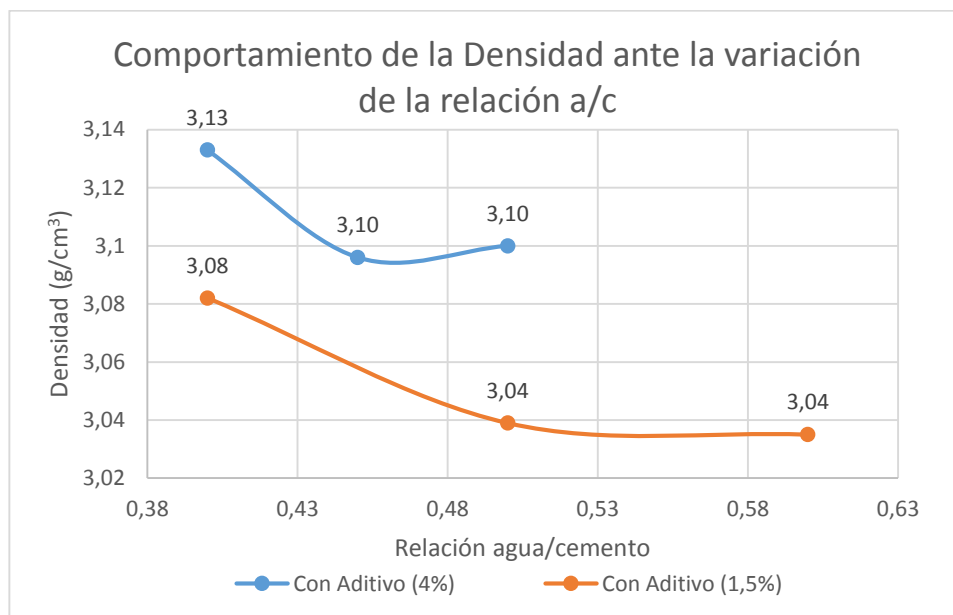
Influencia del Porcentaje de Aditivo sobre la Densidad del Hormigón Baritado en estado fresco, con relación agua/cemento igual a 0,5.



Elaboración propia.

Gráfico 12

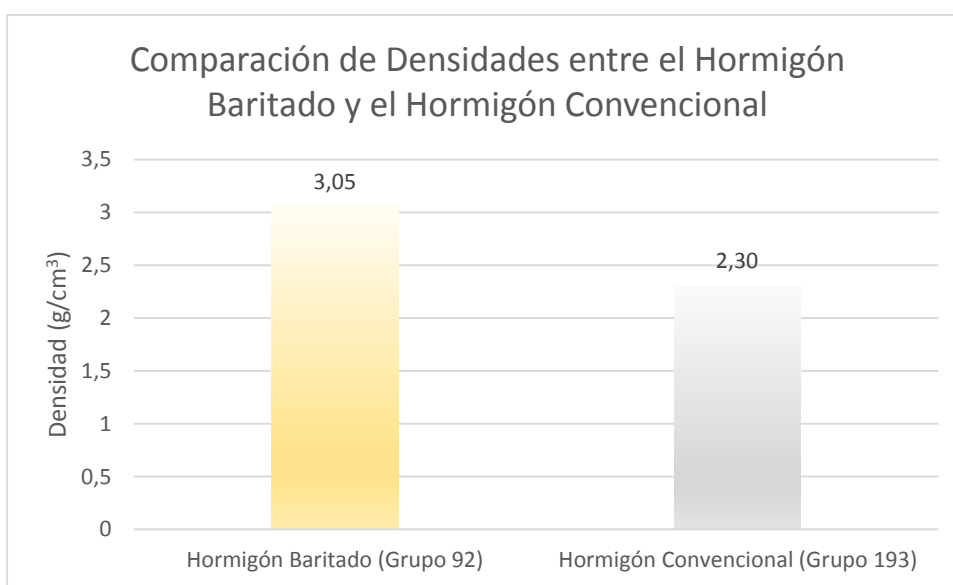
Comportamiento aparente de la Densidad ante la variación de la relación agua/cemento, con aditivo y sin aditivo.



Elaboración propia.

Gráfico 13

Comparación de Densidades entre el Hormigón Baritado con 50 % de Barita Molida y 50 % de Arena, con 1,5 % de aditivo y relación agua/cemento igual a 0,6 sobre el Hormigón Convencional, con relación agua cemento igual a 0,6.



Elaboración propia.

5.1.2. Compresión (ASTM C39-01)

Tabla 61

Resistencia a Compresión simple de la dosificación final del Hormigón Baritado a los 28 días de edad.

Grupo	Dosificación (x, y, z)	% de Arena	% de Barita	a/c	% de Aditivo	Resistencia (MPa)
Hormigonado: Dosificación Final						
92	442	50	50	0,6	1,5	21,08
92	442	50	50	0,6	1,5	23,30
92	442	50	50	0,6	1,5	21,95
92	442	50	50	0,6	1,5	15,83
92	442	50	50	0,6	1,5	23,12
92	442	50	50	0,6	1,5	23,99
92	442	50	50	0,6	1,5	25,14
92	442	50	50	0,6	1,5	24,20
92	442	50	50	0,6	1,5	23,45
92	442	50	50	0,6	1,5	23,33
92	442	50	50	0,6	1,5	23,91
92	442	50	50	0,6	1,5	23,07
92	442	50	50	0,6	1,5	23,08
92	442	50	50	0,6	1,5	23,45
92	442	50	50	0,6	1,5	23,95

Promedio	22,86
Desviación estándar	2,50

Elaboración propia.

Tabla 62

Resistencia a Compresión simple del Hormigón Convencional a los 28 días de edad.

Grupo	Dosificación (x, y, z)	% de Arena	% de Barita	a/c	% de Aditivo	Resistencia (MPa)
Hormigonado: Dosificación Hormigón Convencional						
193	---	100	0	0,6	0	23,41
193	---	100	0	0,6	0	21,55
193	---	100	0	0,6	0	21,98
193	---	100	0	0,6	0	21,46
193	---	100	0	0,6	0	21,94
193	---	100	0	0,6	0	21,02
193	---	100	0	0,6	0	20,45

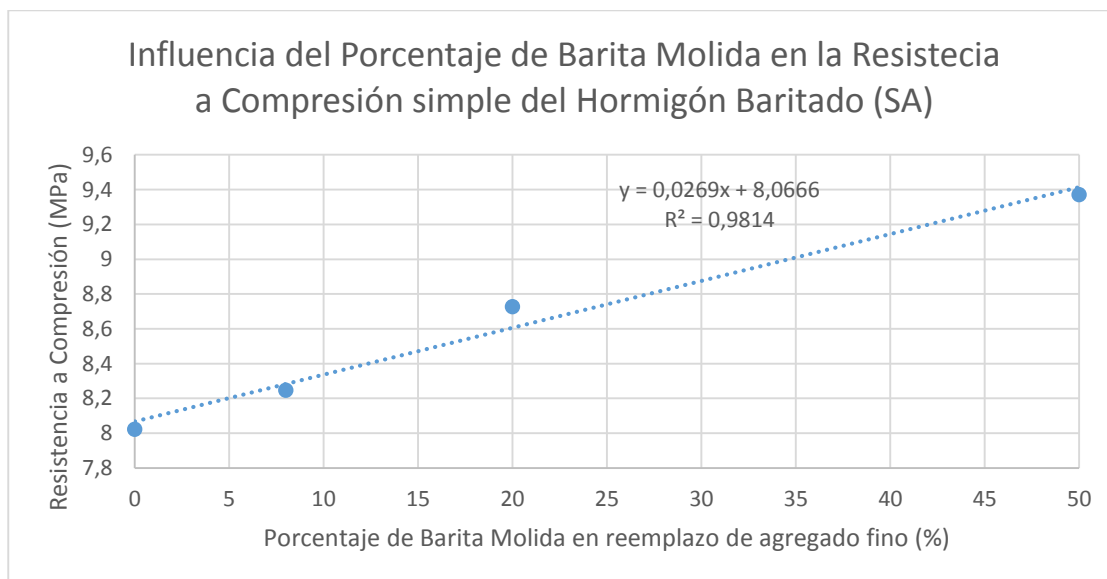
193	---	100	0	0,6	0	21,37
193	---	100	0	0,6	0	20,04
193	---	100	0	0,6	0	22,77
193	---	100	0	0,6	0	22,17
193	---	100	0	0,6	0	22,01
193	---	100	0	0,6	0	23,19
193	---	100	0	0,6	0	21,26
193	---	100	0	0,6	0	20,23

Promedio	21.66
Desviación estándar	1.16

Elaboración propia.

Gráfico 14

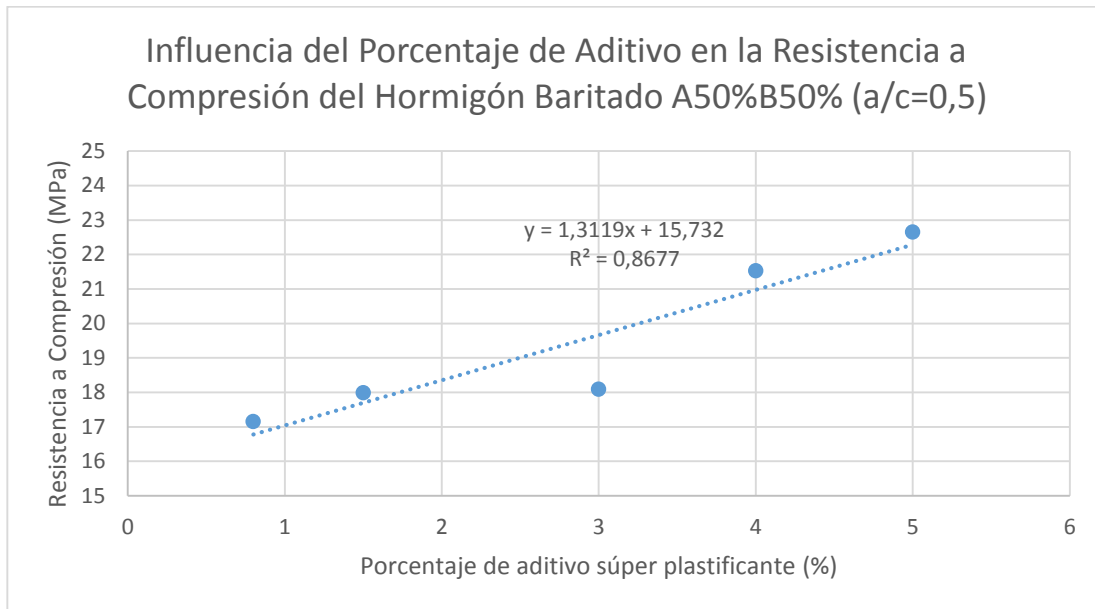
Influencia del Porcentaje de Barita Molida en reemplazo de agregado fino convencional sobre la Resistencia a Compresión Simple del Hormigón Baritado de 28 días de edad, sin aditivo y con relación agua/cemento igual a 0,8.



Elaboración propia.

Gráfico 15

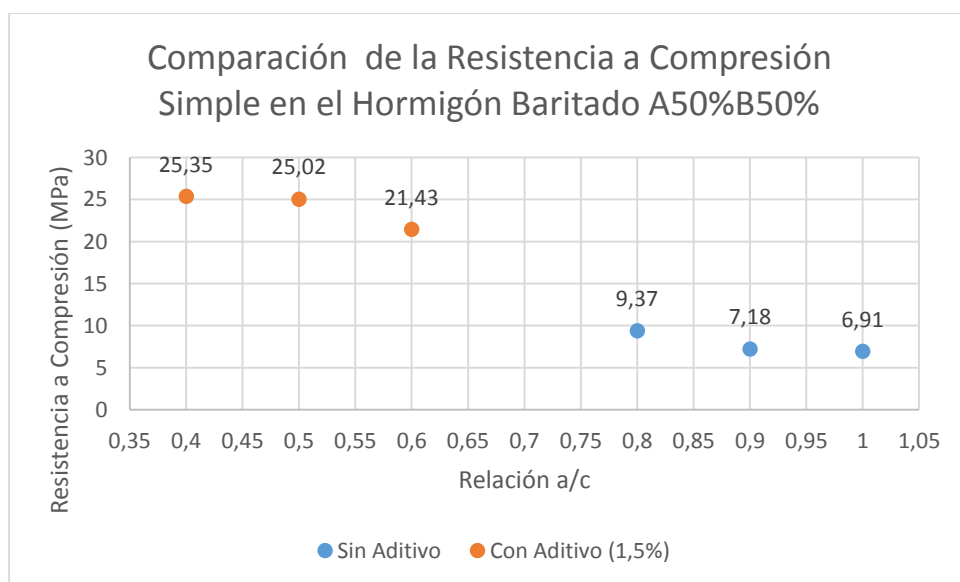
Influencia del Porcentaje de Aditivo sobre la Resistencia a Compresión Simple del Hormigón Baritado de 28 días de edad y con relación agua/cemento igual a 0,5.



Elaboración propia.

Gráfico 16

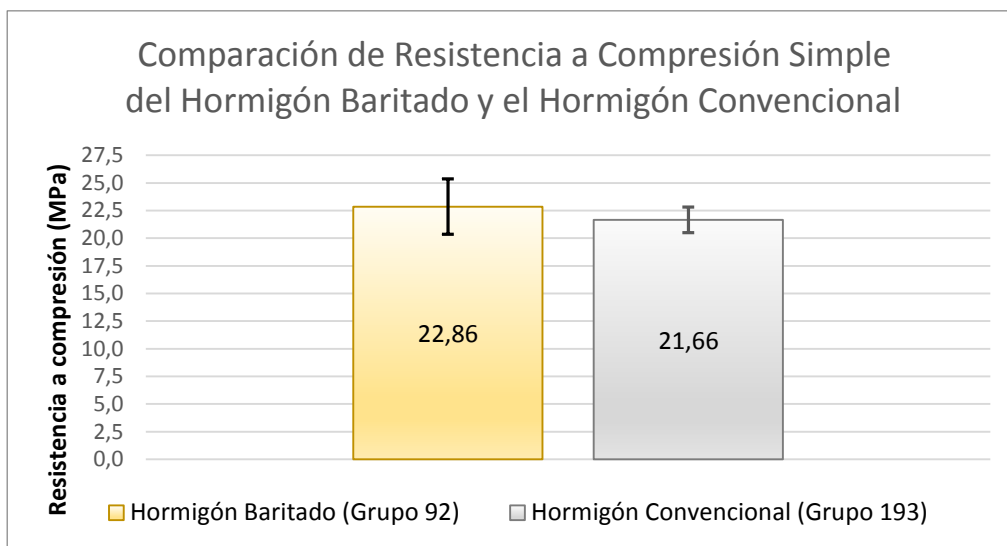
Comparación de la Resistencia a Compresión Simple en el Hormigón Baritado con 50 % de Barita Molida y 50 % de Arena, con aditivo y sin aditivo, para diferentes relaciones agua/cemento y 28 días de edad.



Elaboración propia.

Gráfico 17

Comparación de la Resistencia a Compresión Simple a los 28 días de edad. entre el Hormigón Baritado con 50 % de Barita Molida y 50 % de Arena, con 1,5 % de aditivo y relación agua/cemento igual a 0,6 sobre el Hormigón Convencional, con relación agua cemento igual a 0,6.

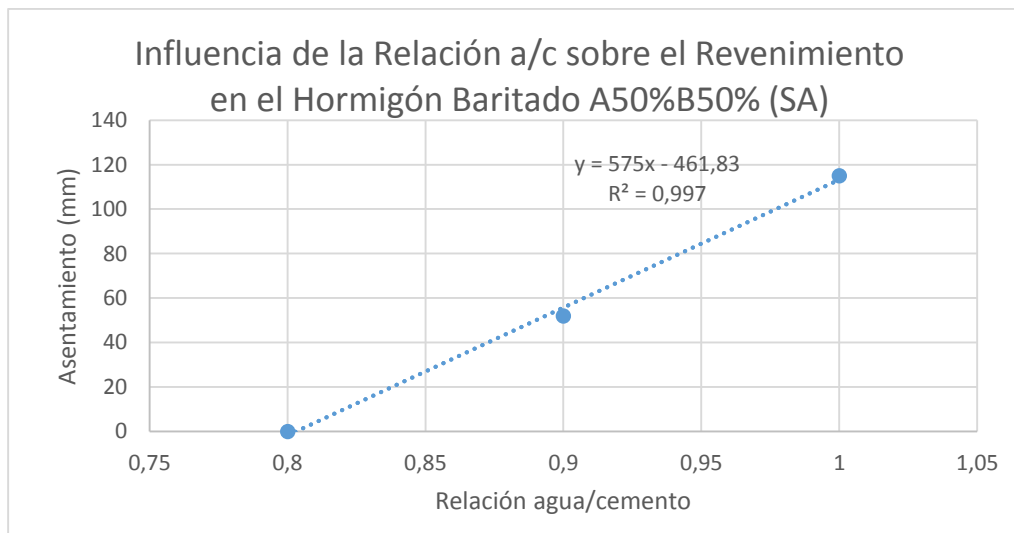


Elaboración propia.

5.1.3. Revenimiento (ASTM C143-00)

Gráfico 18

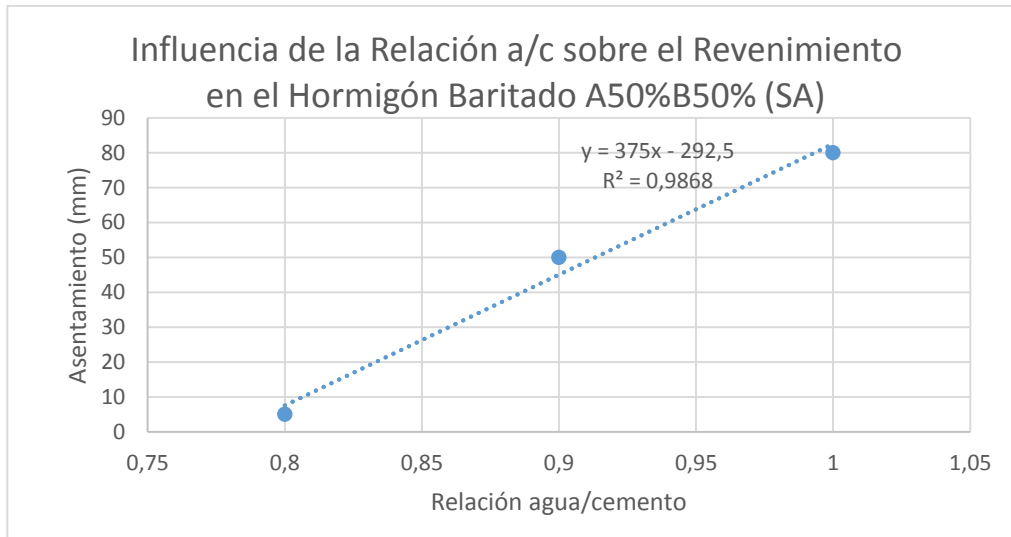
Influencia de la relación agua/cemento sobre el Revenimiento del Hormigón Baritado con 50 % de Barita Molida y 50 % de agregado fino, sin aditivo, determinado en “Observación de las dosificaciones trabajables (SA)”.



Elaboración propia.

Gráfico 19

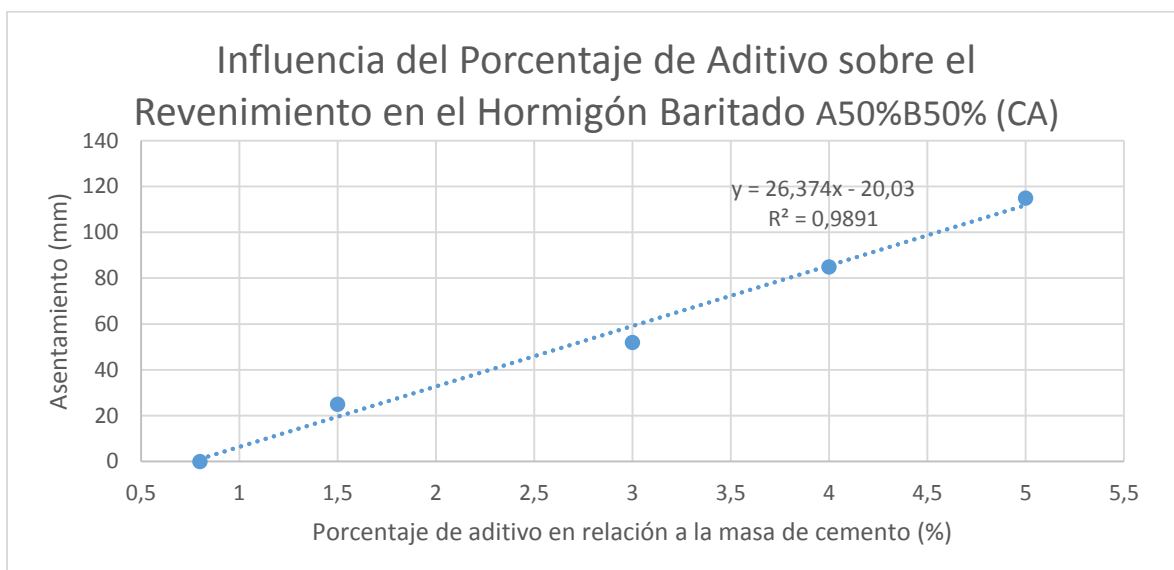
Influencia de la relación agua/cemento sobre el Revenimiento del Hormigón Baritado con 50 % de Barita Molida y 50 % de agregado fino, sin aditivo, determinado en “Observación de la resistencia a compresión simple a los 28 días (SA).”



Elaboración propia.

Gráfico 20

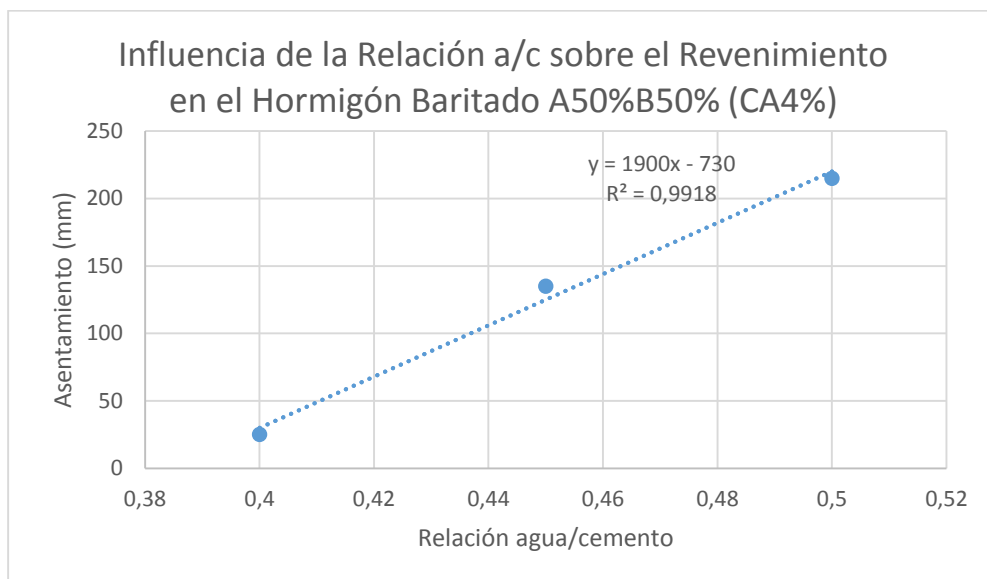
Influencia del Porcentaje de Aditivo en la mezcla sobre el Revenimiento del Hormigón Baritado con 50% de Barita Molida y 50% de agregado fino.



Elaboración propia.

Gráfico 21

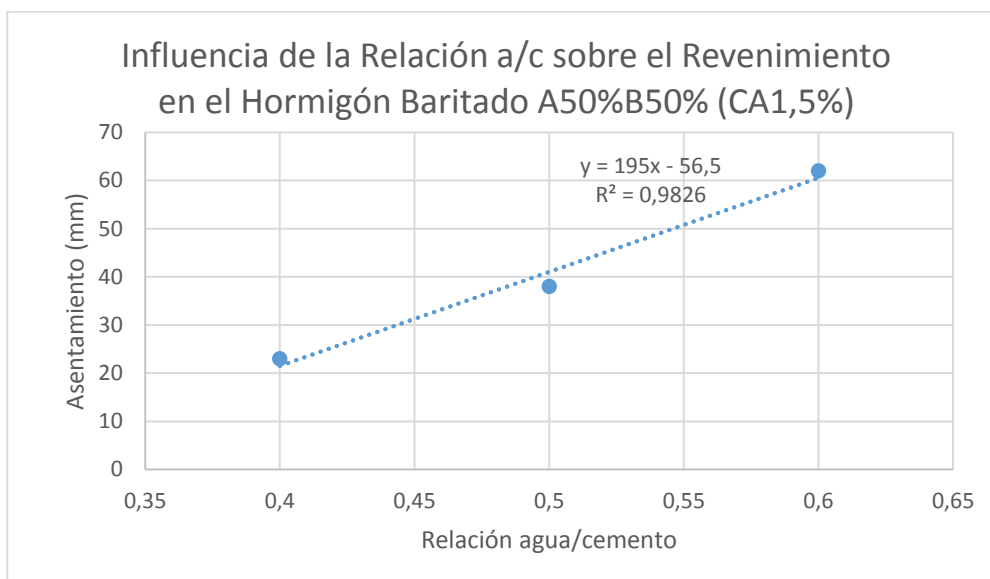
Influencia de la relación agua/cemento sobre el Revenimiento del Hormigón Baritado con 50 % de Barita Molida y 50 % de agregado fino, con 4 % de aditivo.



Elaboración propia.

Gráfico 22

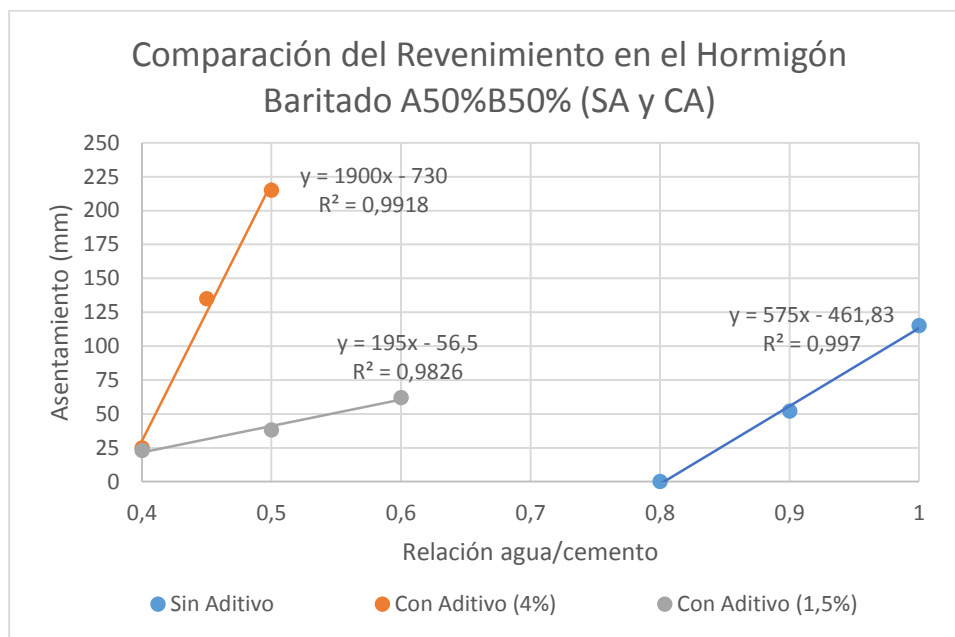
Influencia de la relación agua/cemento sobre el Revenimiento del Hormigón Baritado con 50 % de Barita Molida y 50 % de agregado fino, con 1,5 % de aditivo.



Elaboración propia.

Gráfico 23

Comparación de Revenimientos en el Hormigón Baritado con 50 % de Barita Molida y 50 % de Arena, con aditivo y sin aditivo, para diferentes relaciones agua/cemento.

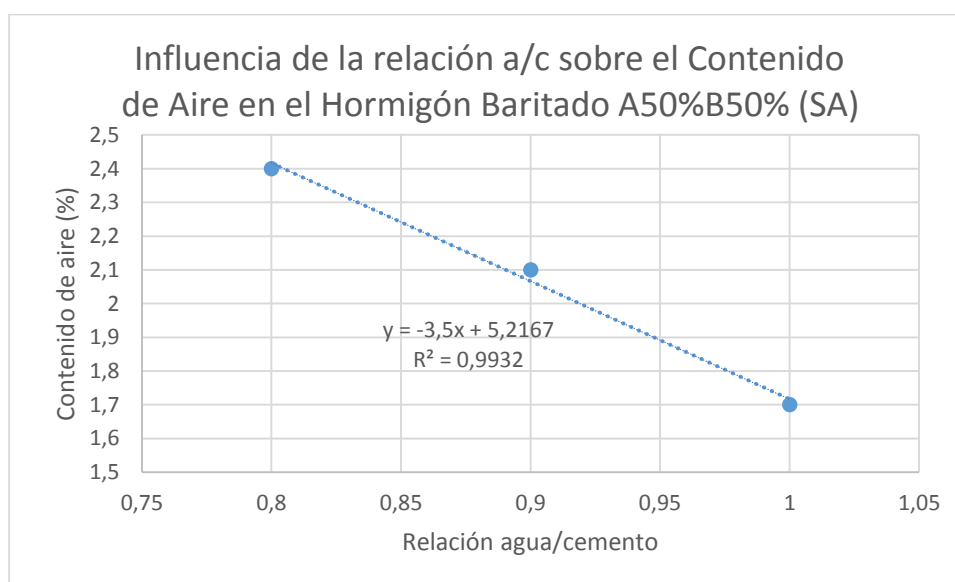


Elaboración propia.

5.1.4. Contenido de aire (ASTM C231-03).

Gráfico 24

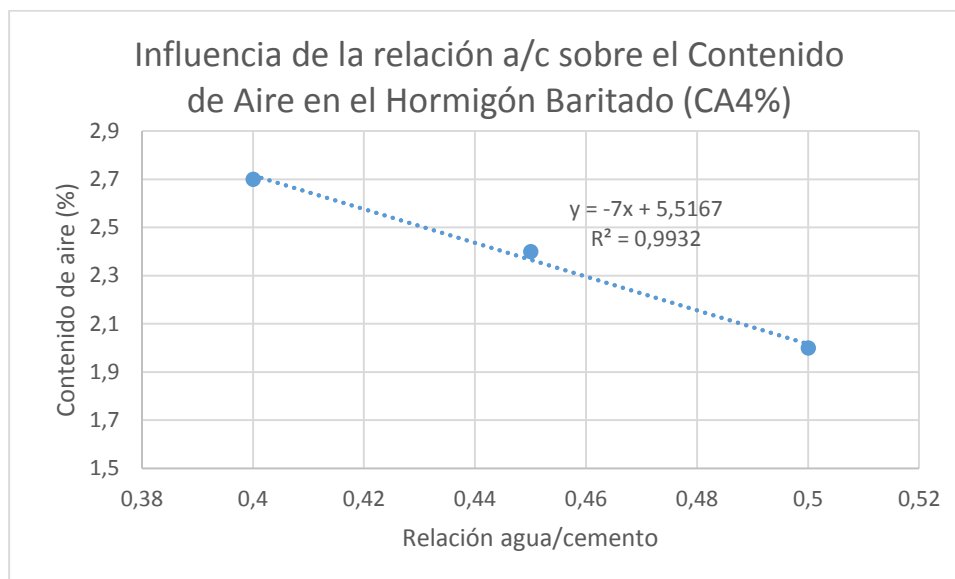
Influencia de la relación agua/cemento sobre el Contenido de aire en el Hormigón Baritado con 50 % de Barita Molida y 50 % de Arena, sin aditivo.



Elaboración propia.

Gráfico 25

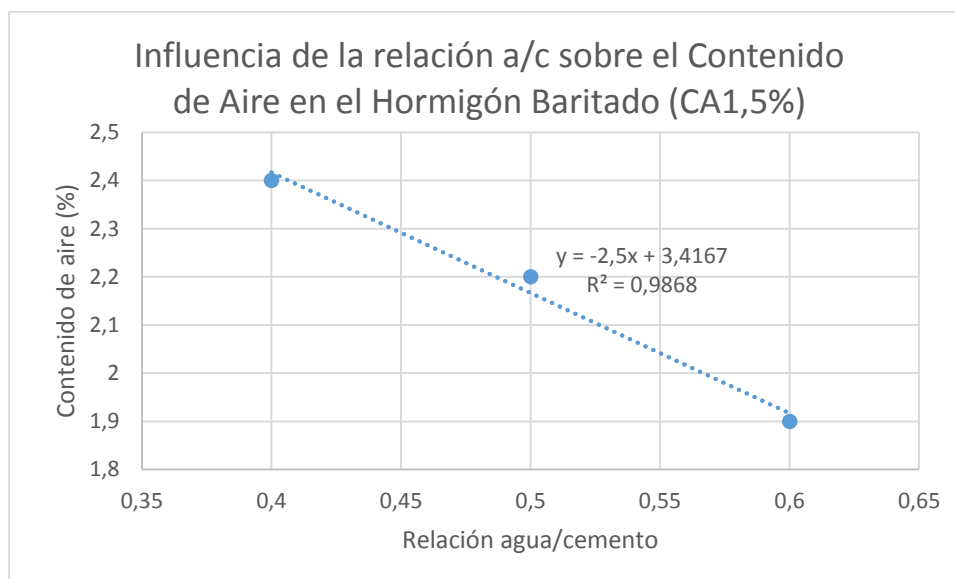
Influencia de la relación agua/cemento sobre el Contenido de aire en el Hormigón Baritado con 50 % de Barita Molida y 50 % de Arena, con 4 % de aditivo.



Elaboración propia.

Gráfico 26

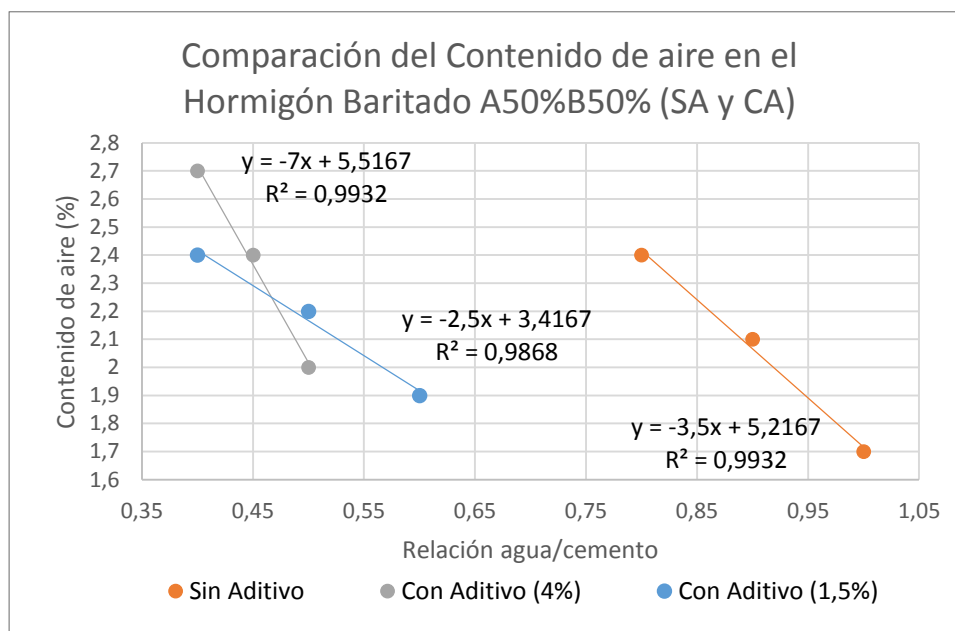
Influencia de la relación agua/cemento sobre el Contenido de aire en el Hormigón Baritado con 50 % de Barita Molida y 50 % de Arena, con 1,5 % de aditivo.



Elaboración propia.

Gráfico 27

Comparación de Contenido de Aire en el Hormigón Baritado con 50 % de Barita Molida y 50 % de Arena, con aditivo y sin aditivo, para diferentes relaciones agua/cemento.



5.2. Atenuación de Rayos Ionizantes (Rayos X)

5.2.1. Contrastación de Hipótesis

Se realiza una contrastación unilateral, para muestras independientes, utilizando la “Prueba t de Student” para un nivel de confianza del 99 % y una significancia del 1 % ($\alpha = 0,01$).

Tabla 63

Valor de Kerma y porcentaje de atenuación para muestras de Hormigón Baritado.

Placa	CPS	Kerma (Gy)	Atenuación (%)
I H°B°	2.991	402,89	94,60
	3.995	538,13	92,79
	2.159	290,82	96,10
	4.802	646,83	91,33
	4.025	542,17	92,74
II H°B°	1.049	141,30	98,11
	1.852	249,47	96,66
	1.582	213,10	97,14
	1.587	213,77	97,14
	2.024	272,64	96,35
III H°B°	548	73,82	99,01
	490	66,01	99,12
	404	54,42	99,27
	480	64,66	99,13
	480	64,66	99,13
IV H°B°	392	52,81	99,29
	483	65,06	99,13
	395	53,21	99,29
	357	48,09	99,36
	373	50,25	99,33
V H°B°	48	6,47	99,91
	66	8,89	99,88
	88	11,86	99,84
	73	9,84	99,87
	85	11,45	99,85
VI H°B°	36	4,85	99,93
	32	4,31	99,94
	28	3,77	99,95
	47	6,33	99,92
	34	4,58	99,94
VII H°B°	21	2,83	99,96
	11	1,48	99,98
	23	3,10	99,96
	17	2,29	99,97
	14	1,89	99,97

Elaboración Propia

Tabla 64

Valor de Kerma y porcentaje de atenuación para muestras de Hormigón Convencional.

Placa	CPS	Kerma (Gy)	Atenuación (%)
I H°C°	15.713	2116,54	71,64
	11.657	1570,20	78,96
	30.787	4147,01	44,44
	26.266	3538,03	52,60
	10.724	1444,53	80,65
II H°C°	7.740	1042,58	86,03
	8.635	1163,14	84,42
	6.941	934,96	87,47
	8.042	1083,26	85,49
	8.300	1118,01	85,02
III H°C°	5.188	698,83	90,64
	5.738	772,91	89,64
	4.438	597,80	91,99
	8.954	1206,11	83,84
	6.231	839,32	88,75
IV H°C°	3.375	454,62	93,91
	3.194	430,23	94,24
	4.234	570,32	92,36
	3.444	463,91	93,78
	2.846	383,36	94,86
V H°C°	2.364	318,43	95,73
	1.475	198,69	97,34
	1.636	220,37	97,05
	2.251	303,21	95,94
	2.390	321,94	95,69
VI H°C°	2.186	294,46	96,05
	2.168	292,03	96,09
	2.026	272,91	96,34
	1.266	170,53	97,72
	1.502	202,32	97,29
VII H°C°	1.580	212,83	97,15
	1.688	227,38	96,95
	1.695	228,32	96,94
	630	84,86	98,86
	1.468	197,74	97,35

Elaboración propia.

5.2.1.1. Hipótesis Nula e Hipótesis Estadística

Hipótesis Nula

Ho: El Hormigón con agregado de piedra baritina es más atenuante que el hormigón convencional en un porcentaje menor o igual al 4 %.

Hipótesis Estadística

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 \leq 4 \%$$

Tabla 65

Prueba t para muestras independientes.

Espesor (mm)	Hormigón Baritado	Hormigón Convencional
	Xi (%)	Yi (%)
20	94,60	71,64
20	92,79	78,96
20	96,10	44,44
20	91,33	52,60
20	92,74	80,65
30	98,11	86,03
30	96,66	84,42
30	97,14	87,47
30	97,14	85,49
30	96,35	85,02
40	99,01	90,64
40	99,12	89,64
40	99,27	91,99
40	99,13	83,84
40	99,13	88,75
50	99,29	93,91
50	99,13	94,24
50	99,29	92,36
50	99,36	93,78
50	99,33	94,86
60	99,91	95,73
60	99,88	97,34
60	99,84	97,05
60	99,87	95,94
60	99,85	95,69

70	99,93	96,05
70	99,94	96,09
70	99,95	96,34
70	99,92	97,72
70	99,94	97,29
80	99,96	97,15
80	99,98	96,95
80	99,96	96,94
80	99,97	98,86
80	99,97	97,35
Media μ	98,40	89,24
Desviación Estándar	2,33	12,04
Error de la Desviación Estándar	0,39	2,00
Valor de t	2,49	
Grados de Libertad	36	
Probabilidad p	0,009	

Elaboración Propia.

La probabilidad p es menor que el grado de significancia $\alpha = 0,01$ por tanto, se rechaza la hipótesis nula (H_0) se acepta la hipótesis investigativa como verdadera.

5.2.2. Resultados de la Irradiación a las muestras

Tabla 66

Valores de Kerma en el aire sin presencia de blindaje.

CPS	K(0) (μSv)	X	K(0)-X	[K(0)-X] ²	$\Sigma[K(0)-X]^2$	S	Coef. Variación	Atenuación (%)
		MEDIA						
56.538	7615,6714	7463,46	152,21	23.168,19	64.934,76	147,12	1,97	0
14.071	1895,3665		-5.568,09	31.003.669,68				
55.755	7510,2013		46,74	2.184,71				
40.213	5416,6939		-2.046,77	4.189.253,11				
53.931	7264,5085		-198,95	39.581,86				

Elaboración propia.

Nota: Mediante una validación de datos, se excluye de cálculo a valores atípicos.

Tabla 67

Valor de Kerma en el aire con presencia de blindaje (muestras de Hormigón Baritado).

CPS	K(x) (uSv)	X MEDIA	K(x)-X	[K(x)-X]^2	$\Sigma[K(x)-X]^2$	S	Coef. Variación	Atenuación (%)
2.991	402,89	532,505575	-129,62	16.800,07	29.995,68	86,60	16,26	92,87
3.995	538,13		5,62	31,63				
2.159	290,82		-241,69	58.411,87				
4.802	646,83		114,33	13.070,58				
4.025	542,17		9,66	93,41				
1.049	141,30	225,45	-84,14	7.079,98	865,78	16,99	7,54	96,98
1.852	249,47		24,02	577,03				
1.582	213,10		-12,35	152,46				
1.587	213,77		-11,67	136,28				
2.024	272,64		47,19	2.226,89				
548	73,82	65,11	8,71	75,87	1,21	0,63	0,98	99,13
490	66,01		0,90	0,81				
404	54,42		-10,69	114,19				
480	64,66		-0,45	0,20				
480	64,66		-0,45	0,20				
392	52,81	51,09	1,72	2,95	17,14	2,07	4,05	99,32
483	65,06		13,98	195,30				
395	53,21		2,12	4,50				
357	48,09		-3,00	8,98				
373	50,25		-0,84	0,71				
48	6,47	10,51	-4,04	16,33	5,77	1,20	11,43	99,86
66	8,89		-1,62	2,61				
88	11,86		1,35	1,81				
73	9,84		-0,67	0,45				
85	11,45		0,94	0,89				
36	4,85	4,38055	0,47	0,22	0,64	0,40	9,10	99,94
32	4,31		-0,07	0				
28	3,77		-0,61	0,37				
47	6,33		1,95	3,81				
34	4,58		0,20	0,04				
21	2,83	2,3376	0,49	0,24	0,45	0,39	16,52	99,97
11	1,48		-0,85	0,73				
23	3,10		0,76	0,58				
17	2,29		-0,04	0				
14	1,89		-0,45	0,20				

Elaboración propia.

Nota: Mediante una validación de datos, se excluye de cálculo a valores atípicos.

Tabla 68

Valor de Kerma en el aire con presencia de blindaje (muestras de Hormigón Convencional).

Placa	CPS	K(x) (uSv)	X	K(x)-X	[K(x)-X]^2	$\Sigma[K(x)-X]^2$	S	Coef. Variación	Atenuación (%)
			MEDIA						
I H°C°	15.713	2.116,54	1.710,42	406,12	164.933,86	255.297,91	291,72	17,06	77,08
	11.657	1.570,20		-140,22	19.662,41				
	30.787	4.147,01		2.436,59	5.936.962,54				
	26.266	3.538,03		1.827,61	3.340.156,85				
	10.724	1.444,53		-265,90	70.701,64				
II H°C°	7.740	1.042,58	1.101,75	-59,17	3.500,73	7.875,75	44,37	4,03	85,24
	8.635	1.163,14		61,39	3.768,67				
	6.941	934,96		-166,79	27.819,66				
	8.042	1.083,26		-18,49	341,79				
	8.300	1.118,01		16,27	264,55				
III H°C°	5.188	698,83	727,21	-28,39	805,88	32.209,15	89,73	12,34	90,26
	5.738	772,91		45,70	2.088,21				
	4.438	597,80		-129,41	16.747,73				
	8.954	1.206,11		478,89	229.337,72				
	6.231	839,32		112,10	12.567,32				
IV H°C°	3.375	454,62	433,03	21,59	465,94	3.894,50	31,20	7,21	94,20
	3.194	430,23		-2,80	7,81				
	4.234	570,32		137,29	18.849,36				
	3.444	463,91		30,88	953,57				
	2.846	383,36		-49,67	2.467,17				
V H°C°	2.364	318,43	314,53	3,91	15,26	198,17	8,13	2,58	95,79
	1.475	198,69		-115,84	13.419,37				
	1.636	220,37		-94,16	8.865,22				
	2.251	303,21		-11,31	128,02				
	2.390	321,94		7,41	54,89				
VI H°C°	2.186	294,46	286,46	7,99	63,88	278,74	9,64	3,36	96,16
	2.168	292,03		5,57	31,00				
	2.026	272,91		-13,56	183,87				
	1.266	170,53		-115,93	13.440,18				
	1.502	202,32		-84,14	7.079,98				
VII H°C°	1.580	212,83	216,57	-3,74	13,97	623,30	12,48	5,76	97,10
	1.688	227,38		10,81	116,85				
	1.695	228,32		11,75	138,12				
	630	84,86		-131,70	17.345,66				
	1.468	197,74		-18,82	354,36				

Elaboración propia.

Nota: Mediante una validación de datos, se excluye de cálculo a valores atípicos.

Tabla 69

Valores medios de UNT/Pd² obtenidos para el Hormigón Baritado (dosificación 92).

Espesor (mm)	K(x) (uSv)	Transmisión (%)	Atenuación (%)	UNT/Pd² (1/mGy m²)
20	532,51	7,13	92,87	0,0019
30	225,45	3,02	96,98	0,0044
40	65,11	0,87	99,13	0,015
50	51,09	0,68	99,32	0,020
60	10,51	0,14	99,86	0,095
70	4,38	0,06	99,94	0,23
80	2,34	0,03	99,97	0,43

Elaboración propia.

Tabla 70

Valores medios de UNT/Pd² obtenidos para el Hormigón Convencional (dosificación 193).

Espesor (mm)	K(x) (uSv)	Transmisión (%)	Atenuación (%)	UNT/Pd² (1/mGy m²)
20	1710,42	22,92	77,08	0,00058
30	1101,75	14,76	85,24	0,00091
40	727,21	9,74	90,26	0,0014
50	433,03	5,80	94,20	0,0023
60	314,53	4,21	95,79	0,0032
70	286,46	3,84	96,16	0,0035
80	216,57	2,90	97,10	0,0046

Elaboración propia.

Tabla 71

Valores de UNT/Pd^2 calculados a partir de datos del Reporte N°147 del NCRP para Hormigón con densidad convencional, bajo exposición de haz primario igual a $K(0)$ utilizado en el proyecto y espesores coincidentes con los ensayados.

Espesor (mm)	B(x)	K(x) (uSv)	Transmisión (%)	Atenuación (%)	UNT/Pd^2 (1/mGy m²)
20	0,15	1097,60	14,71	85,29	0,00091
30	0,072	536,04	7,18	92,82	0,0019
40	0,038	283,95	3,80	96,20	0,0035
50	0,021	159,00	2,13	97,87	0,0063
60	0,012	92,65	1,24	98,76	0,011
70	0,0075	55,62	0,75	99,25	0,018
80	0,0046	34,15	0,46	99,54	0,029

Elaboración propia.

Tabla 72

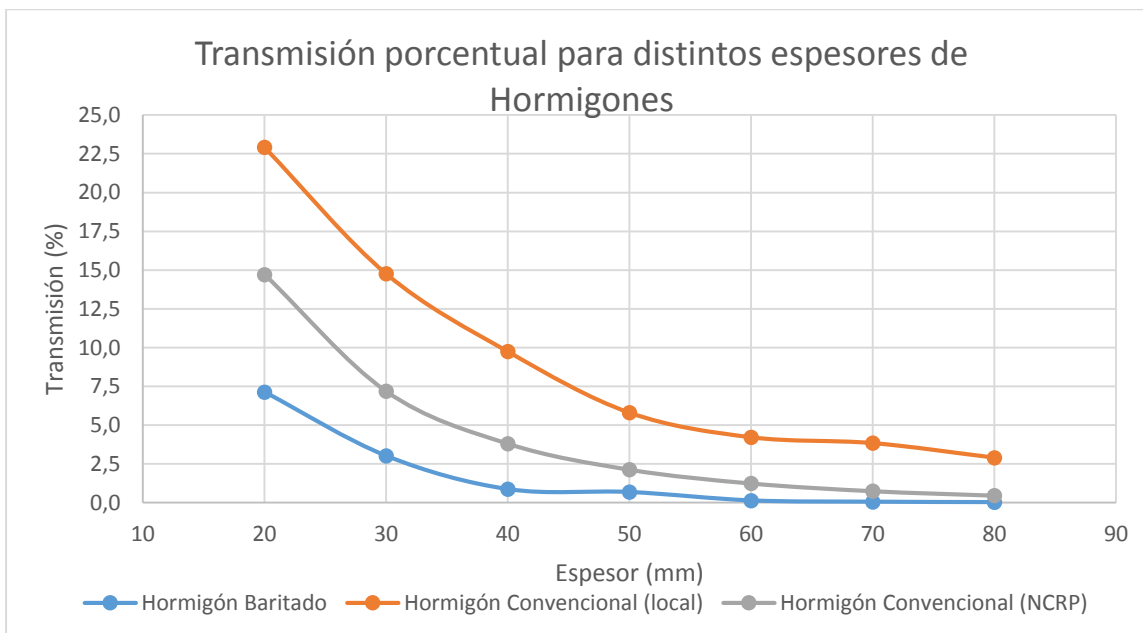
Valores de UNT/Pd^2 calculados a partir de datos del Reporte N°147 del NCRP para el Plomo, bajo exposición de haz primario igual a $K(0)$ utilizado en el proyecto y con porcentajes de atenuación iguales a los del Hormigón Convencional.

Espesor (mm)	B(x)	K(x) (uSv)	Transmisión (%)	Atenuación (%)	UNT/Pd^2 (1/mGy m²)
0,20	0,15	1097,60	14,71	85,29	0,00091
0,34	0,072	536,04	7,18	92,82	0,0019
0,49	0,038	283,95	3,80	96,20	0,0035
0,65	0,021	159,00	2,13	97,87	0,0063
0,82	0,012	92,65	1,24	98,76	0,011
1,00	0,0075	55,62	0,75	99,25	0,018
1,17	0,0046	34,15	0,46	99,54	0,029

Elaboración propia.

Gráfico 28

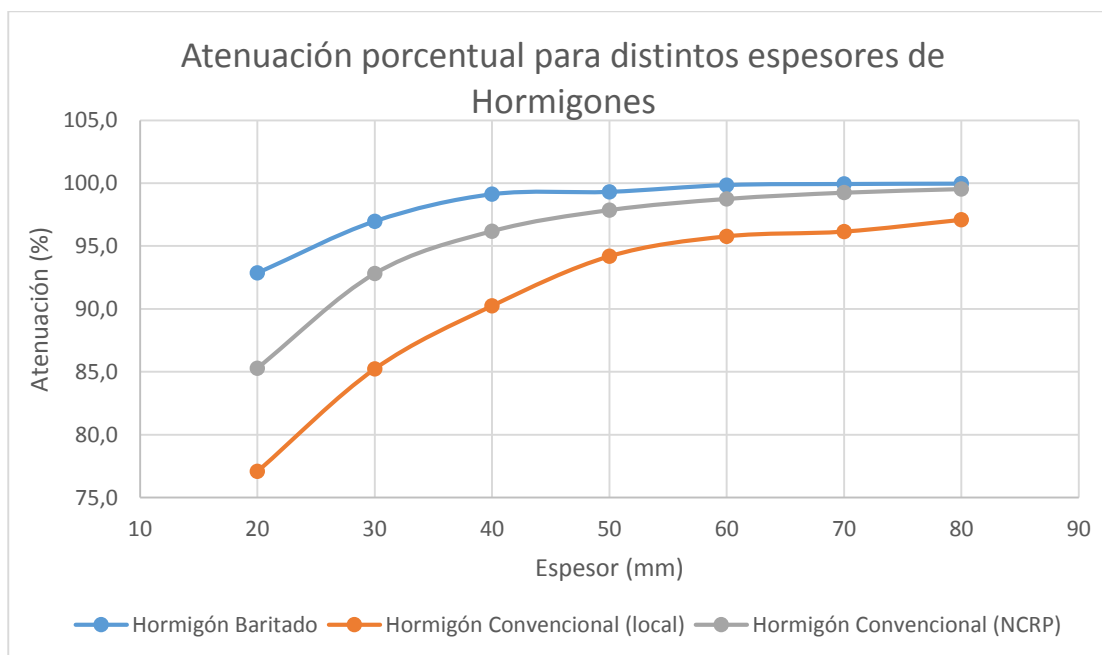
Transmisión porcentual de radiación para distintos espesores de Hormigón.



Elaboración propia.

Gráfico 29

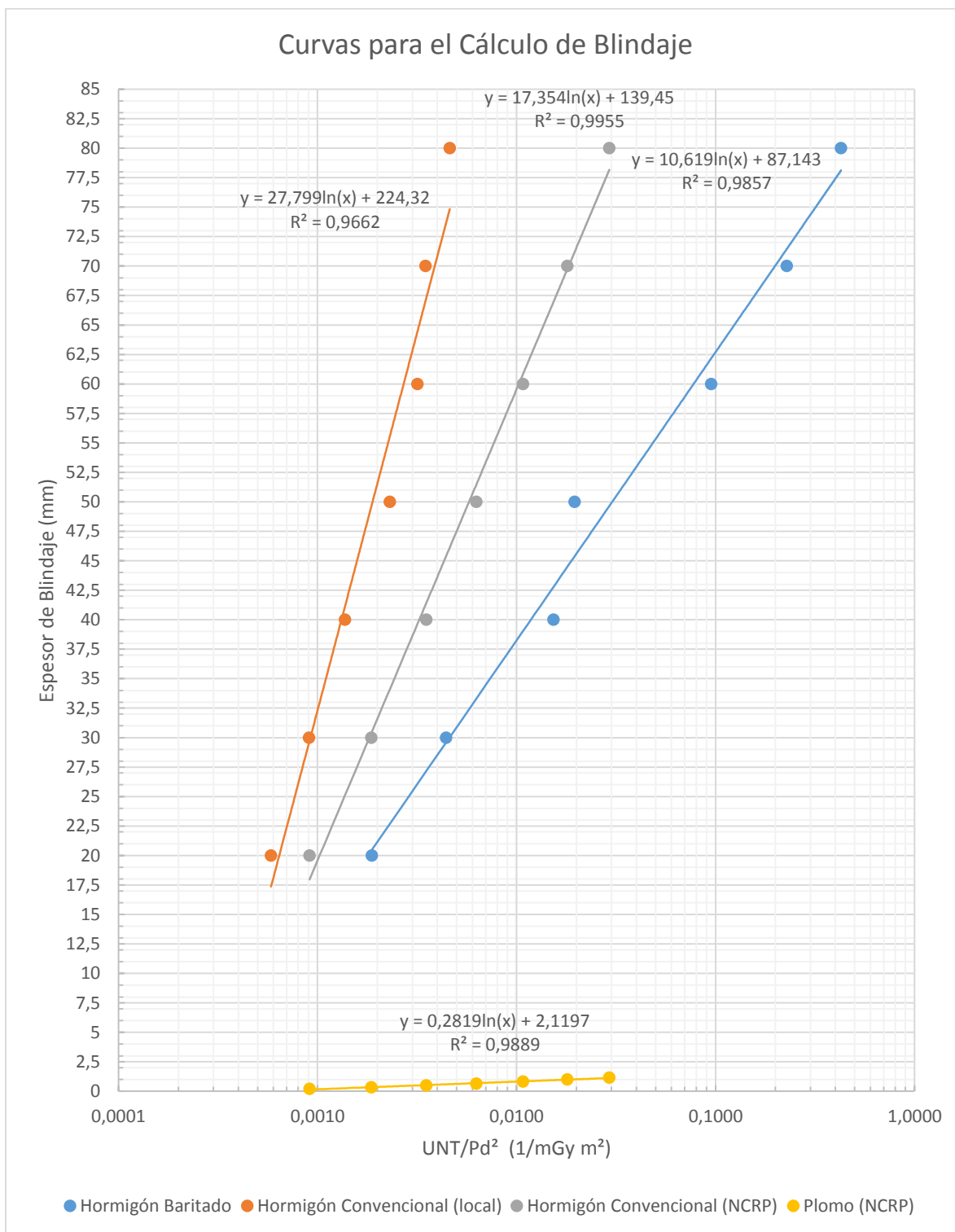
Atenuación porcentual de radiación para distintos espesores de Hormigón



Elaboración propia.

Gráfico 30

Curvas obtenidas para el cálculo de Blindajes ante Rayos X de 100 kV de tensión y 200 mAs de intensidad máxima.



Elaboración propia.

Tabla 73*Equivalencias de Espesores utilizando el Gráfico 30.*

UNT/Pd ² (1/mGy m ²)	Espesor de Hormigón Convencional (NCRP) (mm)	Espesor de Plomo (mm)	Espesor de Hormigón Convencional (local) (mm)	Espesor de Hormigón Baritado (mm)
0,001	19,57	0,17	32,29	13,79
0,01	59,53	0,82	96,30	38,24
0,1	99,49	1,47	160,31	62,69
1	139,45	2,12	224,32	87,14
10	179,41	2,77	288,33	111,59
100	219,37	3,42	352,34	136,05
1000	259,33	4,07	416,35	160,50

Elaboración propia.

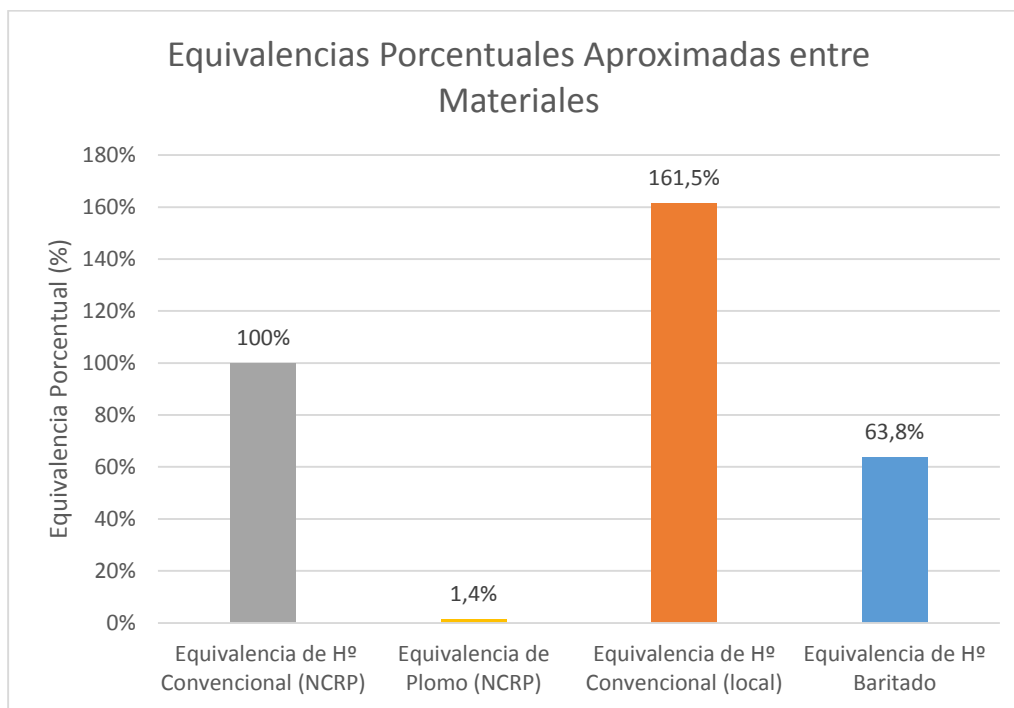
Tabla 74*Equivalencias Porcentuales de Espesores respecto al Hormigón Convencional del
Reporte N° 147 del NCRP.*

Equivalencia de H° Convencional (NCRP) (%)	Equivalencia de Plomo (%)	Equivalencia de H° Convencional (local) (%)	Equivalencia de H° Baritado (%)
100	0,88	164,98	70,45
100	1,38	161,76	64,24
100	1,48	161,13	63,01
100	1,52	160,86	62,49
100	1,54	160,71	62,20
100	1,56	160,62	62,02
100	1,57	160,55	61,89
PROMEDIO	1,42	161,52	63,76

Elaboración propia.

Gráfico 31

Equivalencias Porcentuales de Espesores en relación a los valores del Hormigón Convencional del Reporte N°147 del NCRP.



Elaboración propia.

Tabla 75

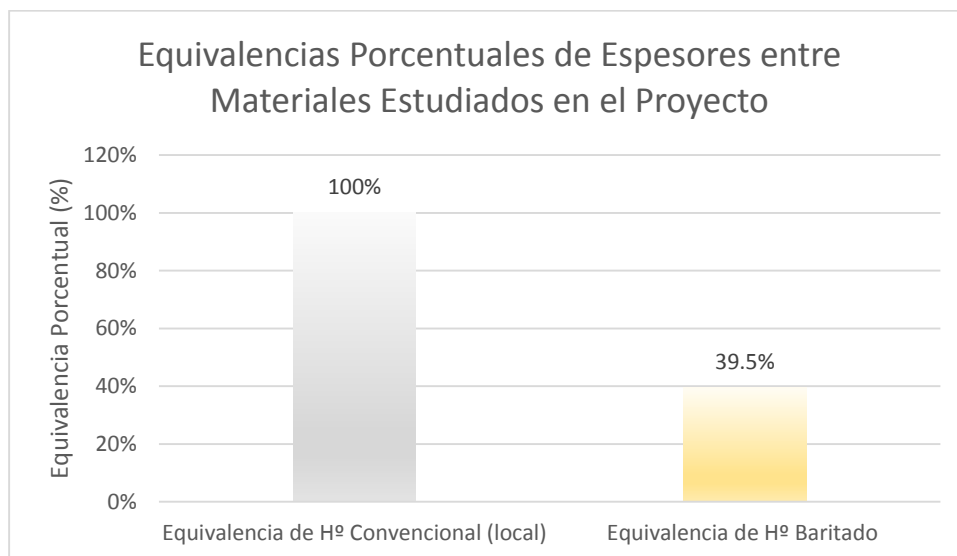
Equivalencias Porcentuales de los Espesores respecto a los valores del Hormigón Convencional del presente proyecto (dosificación 193).

Equivalencia de Hº Convencional (local) (%)	Equivalencia de Hº Baritado (%)
100	42,70
100	39,71
100	39,11
100	38,85
100	38,70
100	38,61
100	38,55
PROMEDIO	39,46

Elaboración propia.

Gráfico 32

Equivalencias Porcentuales de los Espesores respecto a los valores del Hormigón Convencional del presente proyecto (dosificación 193).



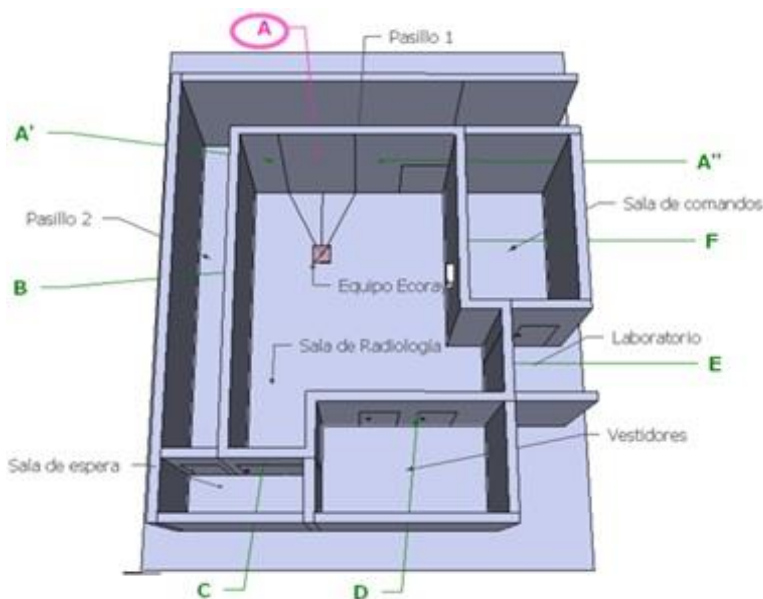
Elaboración propia.

5.2.3. Ejemplo de Aplicación en el Cálculo de Blindajes

Cálculo de Blindaje de Pared “Barrera A”

Ilustración 3

Croquis de la “Barrera A”



Ejemplo extraído de *Cálculo de blindaje para la sala de rayos X del equipo de Radiología Digital EcoRay del Hospital IESS RIOBAMBA*

Datos

Tipo de Personal: Público.

Factor de Ocupación (T): 1/5.

Factor de uso: 1.

Carga de Trabajo semanal: 160 paciente/semana.

Tensión: 100 kV.

Límite de dosis semanal: 0,02 mGy/semana.

Distancia fuente-barrera: 1.74 m.

Kerma primario en el aire a 1 m: 2,3 mGy⁻¹ paciente⁻¹

$$\frac{UNT}{Pdp^2} = \frac{1 * 160 * \frac{1}{5}}{0,02 * 1,74^2} = 528,47 \text{ mSv}^{-1} \text{ m}^{-2}$$
$$x = \frac{1}{0,03925 * 0,4273} * \ln \left(\frac{\left(\frac{2,3 * 1 * 160 * \frac{1}{5}}{0,02 * 1,74^2} \right)^{0,4273} + \frac{0,08567}{0,03925}}{1 + \frac{0,08567}{0,03925}} \right) = 175,14 \text{ mm}$$

Resultados Utilizando las Equivalencias Porcentuales Calculadas del Gráfico 31 o la Tabla 74.

Espesor de Hormigón Convencional (NCRP)	Espesor de Plomo (NCRP)	Espesor de Hormigón Convencional (local)	Espesor de Hormigón Baritado
180 mm	3 mm	285 mm	115 mm

Resultados Utilizando las Curvas del Gráfico 30.

Espesor de Hormigón Convencional (NCRP)	Espesor de Plomo (NCRP)	Espesor de Hormigón Convencional (local)	Espesor de Hormigón Baritado
250 mm	4 mm	400 mm	155 mm

5.2.4. Análisis de Costos

5.2.4.1. Precio Unitario para Plomo

Tabla 76

Análisis de precio Unitario para 1 m² de Muro Blindado de Plomo.

DATOS GENERALES					
Proyecto: Elaboración de Hormigón con agregado de piedra baritina para la atenuación de rayos ionizantes. Actividad: Muro Blindado de Plomo. Cantidad: 1,00 Unidad: m2 Moneda: Bs.					
1. MATERIALES					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Laminas de plomo 2mm (2m x 0.3m)	pza	2,00	400,00	800,00
2	Estructura metálica	m2	2,00	150,00	300,00
3	Melamina 12mm (2.85m x 1.83m)	pza	0,20	282,00	56,40
4	Estuco fino	kg	2,00	0,3	0,6
TOTAL MATERIALES					1.156,40
2. MANO DE OBRA					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Especialista	hr	3,00	20,50	61,50
2	Ayudante	hr	3,00	15,00	45,00
SUBTOTAL MANO DE OBRA					106,50
CARGAS SOCIALES=(% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71.18%)				55,00	58,58
IMPUESTOS IVA M.O.=(% DE SUMA DE SUBTOTAL DE M.O. + CARGAS SOCIALES)				14,94	24,66
TOTAL MANO DE OBRA					189,74
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
HERRAMIENTAS (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)					5,00
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					9,49
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
					COSTO
GASTOS GENERALES = (% DE 1 + 2 + 3)				10,00	135,56
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					135,56
5. UTILIDAD					
					COSTO
UTILIDAD = (% DE 1 + 2 + 3 + 4)				10,00	149,12
TOTAL UTILIDAD					149,12
6. IMPUESTOS					
					COSTO
IMPUESTOS IT (% DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5)				3,09	50,69
TOTAL IMPUESTOS					50,69
TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)					1.690,99
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO					1.691

Elaboración Propia.

5.2.4.2. Precio Unitario para Hormigón Baritado

Tabla 77

Análisis de precio Unitario para 1 m³ de Muro blindado de hormigón baritado (Dosificación 92).

DATOS GENERALES					
Proyecto: Elaboración de Hormigón con agregado de piedra baritina para la atenuación de rayos ionizantes. Actividad: Muro Blindado de Hormigón Baritado. Cantidad: 1,00 Unidad: m3 Moneda: Bs.					
1. MATERIALES					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Cemento El Puente IP 30	kg	309,00	1,00	309,00
2	Agregado Grueso de Barita 3/4"	tn	1,68	786,48	1.321,29
3	Arena	m3	0,49	120,00	59,04
4	Barita Molida	tn	0,69	814,32	561,88
5	Aditivo ULGEFLUID 3100R	kg	4,635	13	60,26
6	Encofrado metálico	m2	1,28	603,64	772,66
TOTAL MATERIALES					3.084,12
2. MANO DE OBRA					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Albañil	hr	14,00	20,50	287,00
2	Ayudante	hr	25,00	15,00	375,00
SUBTOTAL MANO DE OBRA					662,00
CARGAS SOCIALES=(% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71.18%)				55,00	364,10
IMPUESTOS IVA M.O.=(% DE SUMA DE SUBTOTAL DE M.O. + CARGAS SOCIALES)				14,94	153,30
TOTAL MANO DE OBRA					1.179,40
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Vibradora aguja d=36mm	hr	1,00	25,00	25,00
2	Mezcladora	hr	1,50	15,00	22,50
HERRAMIENTAS (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)				5,00	58,97
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					106,47
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
					COSTO
GASTOS GENERALES = (% DE 1 + 2 + 3)				10,00	437,00
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					437,00
5. UTILIDAD					
					COSTO
UTILIDAD = (% DE 1 + 2 + 3 + 4)				10,00	480,70
TOTAL UTILIDAD					480,70
6. IMPUESTOS					
					COSTO
IMPUESTOS IT (% DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5)				3,09	163,39
TOTAL IMPUESTOS					163,39
TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)					5.451,08
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO					5.451

Elaboración propia.

5.2.4.3. Precio Unitario para Hormigón Convencional

Tabla 78

Análisis de precio Unitario para 1 m³ de Muro blindado de hormigón convencional (Dosificación 193).

DATOS GENERALES					
Proyecto: Elaboración de Hormigón con agregado de piedra baritina para la atenuación de rayos ionizantes. Actividad: Muro Blindado de Hormigón Convencional. Cantidad: 1,00 Unidad: m3 Moneda: Bs.					
1. MATERIALES					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Cemento El Puente IP 30	kg	341,70	1,00	341,70
2	Grava 3/4"	m3	0,71	120,00	85,68
3	Arena	m3	0,49	120,00	59,04
4	Madera de contrucción	pie2	80,00	8,00	640,00
5	Clavos	kg	2,00	12,50	25,00
6	Alambre de amarre	kg	2,00	12,50	25,00
TOTAL MATERIALES					1.176,42
2. MANO DE OBRA					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Albañil	hr	10,00	20,50	205,00
2	Ayudante	hr	20,00	15,00	300,00
SUBTOTAL MANO DE OBRA					505,00
CARGAS SOCIALES=(% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA) (55% al 71.18%)				55,00	277,75
IMPUESTOS IVA M.O.=(% DE SUMA DE SUBTOTAL DE M.O. + CARGAS SOCIALES)				14,94	116,94
TOTAL MANO DE OBRA					899,69
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	Vibradora aguja d=36mm	hr	1,00	25,00	25,00
2	Mezcladora	hr	1,00	15,00	15,00
HERRAMIENTAS (% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)				5,00	44,98
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					84,98
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
				COSTO	
GASTOS GENERALES = (% DE 1 + 2 + 3)				10,00	216,11
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					216,11
5. UTILIDAD					
				COSTO	
UTILIDAD = (% DE 1 + 2 + 3 + 4)				10,00	237,72
TOTAL UTILIDAD					237,72
6. IMPUESTOS					
				COSTO	
IMPUESTOS IT (% DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5)				3,09	80,80
TOTAL IMPUESTOS					80,80
TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)					2.695,73
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO					2.696

Elaboración propia.

5.2.4.4. Comparación de precios unitarios

Se realiza una comparación para 1 m² de muro utilizando la tabla N° 74 del presente proyecto.

Tabla 79

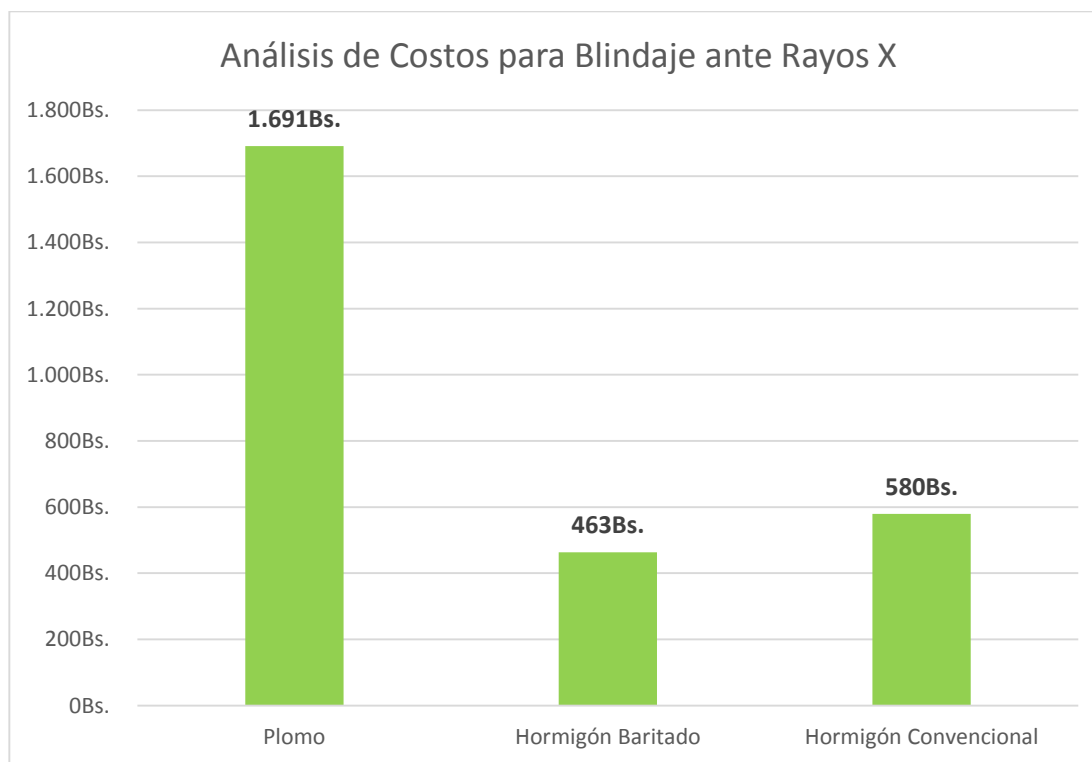
Equivalencia de espesores y costos para 1 m² de muro blindado y un espesor de plomo de 2 mm.

	Plomo	Hormigón Baritado	Hormigón Convencional
Espesor (mm)	2	82,57	212,34
Espesor asumido (mm)	2	85	215
Precio (Bs/m2)	1.691	463	580

Elaboración propia.

Gráfico 33

Análisis de costos entre los materiales utilizados como blindaje ante radiación ionizante en nuestro medio para 1 m² de blindaje.



Elaboración propia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

- Con una confiabilidad del 99 %, se valida que: “El porcentaje de atenuación ante radiación ionizante (rayos X) del hormigón con agregado de piedra baritina, con densidad de $3,05 \text{ g/cm}^3$, en contraste al hormigón convencional, es mayor al 4 %.
- El porcentaje de barita molida en reemplazo de agregado fino convencional que se requiere para obtener un hormigón baritado con densidad superior a 3 g/cm^3 es igual al 50 %.
- Para una mezcla de hormigón baritado sin aditivo súper plastificante, no existe una relación agua/cemento que garantice trabajabilidad de la mezcla sin comprometer la resistencia a compresión simple.
- El porcentaje de aditivo súper plastificante (ULGEFLUID 3100R) que garantiza una baja relación agua/cemento sin comprometer el tiempo de fraguado, la trabajabilidad y la resistencia a compresión es de 1,5 %.
- En el hormigón con agregado de piedra baritina, a mayor porcentaje de barita molida, se presenta mayor densidad en la mezcla.
- En el hormigón con agregado de piedra baritina, al igual que en el hormigón convencional, a mayor relación agua/cemento, se presenta mayor asentamiento y menor porcentaje de aire en la mezcla.
- La resistencia a compresión simple del hormigón con agregado de piedra barita es 5,5 % superior a la del hormigón convencional, para las condiciones particulares del proyecto.
- Los parámetros α , β , γ del Reporte N°147 del NCRP, no representan al hormigón convencional de nuestro medio.
- El espesor del hormigón baritado para las condiciones dadas en el proyecto, equivale a 63,8 % del hormigón convencional del NCRP y al 39,5 % del hormigón convencional local.
- Un muro blindado de hormigón con agregado de piedra barita es 3,7 veces más barato que un muro blindado de plomo y 1,3 veces más barato que un muro blindado de hormigón convencional.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda el uso de Hormigón Baritado para la atenuación de Rayos X y radiación ionizante en general.
- Se recomienda utilizar las equivalencias del presente proyecto para los espesores de Hormigón Convencional, ya que, como se vio, los parámetros del NCRP no representan al hormigón convencional de nuestro medio.
- Para la elaboración de Hormigón Baritado se recomienda los ensayos periódicos de Contenido de humedad de los agregados, ya que tiene un papel fundamental a la hora de dosificar.
- Se recomienda mantener seca la Barita Molida, la aglomeración de la misma antes de la mezcla ocasiona una disminución de la resistencia a compresión en su estado endurecido.
- Se recomienda la elaboración de más de 15 muestras cilíndricas para los ensayos de compresión simple, para tener valores más precisos de resistencia característica, especialmente cuando se va a utilizar el Hormigón Baritado como un hormigón sometido a cargas estructurales importantes, como ser vigas, columnas, losas, etc.
- Se recomienda utilizar aditivo plastificante o súper plastificante para el Hormigón Baritado, mas no se recomienda el uso de porcentajes elevados del mismo, especialmente cuando estos incluyen retardantes de fraguado.
- Se recomienda el lavado de agregado grueso de piedra barita antes de realizar las mezclas, debido a que suelen contener partículas muy finas resultantes del chancado.
- Se recomienda evitar la excesiva manipulación del agregado grueso de piedra baritina, ya que esto debilita significativamente el mineral.
- Se recomienda el especial cuidado en los equipos de mezclado, deben ser de potencia considerable y de tamaño apto, ya que el hormigón baritado supone un aumento en el esfuerzo de los equipos, debido a su densidad.
- Se debe tener peculiar cuidado en los encofrados, estos deben ser aptos y lo suficientemente reforzados para sostener la mezcla hasta su fraguado, ya que al igual que en el caso anterior, la densidad supone mayor esfuerzo en las cimbras.

- Para el cálculo de blindajes con los Hormigones estudiados en el presente proyecto, se recomienda el uso de las equivalencias de espesores porcentuales, para valores de UNT/Pdp^2 superiores a $0,42 \text{ mSv}^{-1} \text{ m}^{-2}$, y se recomienda el uso del Gráfico 30 para valores inferiores.
- Se debe prestar peculiar atención a los contadores Geiger, puesto que realizan mediciones en CPS y CPM, para conveniencia de la medición en el presente proyecto se realizó mediciones en CPS, esto puede influir en un error sistemático, ya que el tiempo de exposición (T) es variable y puede sobrepasar el valor de un segundo por disparo de Rayos X.