

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

**Optimización de los diseños de hormigón para la empresa HORMI CENTER
mediante las curvas relación agua-cemento vs. resistencia a compresión
para los agregados de Santa Isabel y Paute**

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Civil

Autores:

Damián Santiago Chuchuca Guazhco
Jorge Luis Duchi Calderón

Director:

Diana Bernardita Mora Abril

ORCID:  0009-0008-4309-9422

Cuenca, Ecuador

2023-07-25

Resumen

El presente trabajo de titulación tiene como finalidad determinar relaciones agua/cemento (A/C) óptimas para elaborar y fabricar diseños de hormigón que cumplan con las resistencias a la compresión más comerciales para la empresa Hormi Center, obteniéndose diseños para dos tipos de cementos Atenas HE y el Atenas GU, además, de dos tipos de combinaciones de agregados de diferente procedencia, la primera está compuesta por el agregado fino de Santa Isabel y agregado grueso de Santa Isabel, en cuanto a la segunda combinación consiste en agregado fino de Santa Isabel y agregado grueso de Paute. Los diseños deben contar con el asentamiento inicial requerido por la planta, y las resistencias a la compresión se determinan a los 7 y 28 días. El trabajo está compuesto por varios procesos como: caracterización de los agregados, combinación óptima de los mismos realizada según el método Fuller Thompson, obtención de proporciones utilizando el método de diseño de la mezcla siguiendo la metodología del ACI 211.1. Los diseños obtenidos son comprobados mediante ensayos de laboratorio normados según NTE INEN para verificar el cumplimiento de los requisitos. Luego, se identifica la relación agua/cemento óptimo para las resistencias a compresión establecidas. Finalmente se obtiene la diferencia entre costos de los diseños propuestos vs los que emplea la empresa actualmente.

Palabras clave: grava, arena, resistencia hormigón, ensayos, curvas A/C, costos hormigón

Abstract

The purpose of this degree project is to determine optimal water/cement (W/C) ratios for the production of concrete designs that meet the most common compressive strength requirements for Hormi Center, a company. The designs are developed for two types of cement: Atenas HE and Atenas GU, as well as two types of aggregate combinations from different sources. The first combination consists of fine aggregate from Santa Isabel and coarse aggregate from Santa Isabel, while the second combination involves fine aggregate from Santa Isabel and coarse aggregate from Paute. The designs must have the required initial slump specified by the plant, and the compressive strengths are determined at 7 and 28 days. The work consists of several processes, such as aggregate characterization, optimal combination of aggregates using the Fuller Thompson method, obtaining proportions using the mix design method following the ACI 211.1 methodology. The designs obtained are tested in accordance with standardized laboratory tests according to NTE INEN to verify compliance with the requirements. Subsequently, the optimal water/cement ratio is identified for the established compressive strengths. Finally, the cost difference between the proposed designs and the ones currently used by the company is calculated.

Keywords: gravel, sand, concrete resistance, tests, A/C curves, concrete costs

ÍNDICE

1.	Introducción	10
1.1.	Antecedentes	11
1.2.	Objetivos.....	12
1.2.1.	Objetivo General.....	12
1.2.2.	Objetivos específicos.....	12
1.3.	Estado del Arte.....	12
2.	Marco teórico	14
2.1.	Cemento.....	14
2.1.1.	Definición	14
2.1.2.	Composición química	15
2.1.3.	Densidad	15
2.1.4.	Resistencia a la Compresión.....	15
2.1.5.	Tipos de Cementos.....	16
2.1.6.	Cemento Tipo GU	16
2.1.7.	Cemento Tipo HE	17
2.2.	Áridos	18
2.2.1.	Árido fino	18
2.2.2.	Árido grueso.....	19
2.2.3.	Propiedades de los áridos	19
2.3.	Agua	20
2.3.1.	Agua de mezclado	20
2.3.2.	Agua de curado.....	21
2.4.	Propiedades del hormigón	21
2.4.1.	Estado fresco	22
2.4.2.	Estado endurecido	25
3.	Características de los materiales empleados	29
3.1.	Cemento	29
3.1.1.	Requisitos Químicos	29
3.1.2.	Requisitos Físicos.....	30
3.1.3.	Requisitos Mecánicos.....	30
3.1.4.	Almacenamiento	31
3.2.	Áridos.....	31
3.2.1.	Muestreo	32

3.2.2.	Contenido de humedad natural de los áridos	33
3.2.3.	Granulometría	33
3.2.4.	Absorción y Gravedad Específica	39
3.2.5.	Peso Volumétrico.....	45
4.	Metodología	50
4.1.	Diseño del Hormigón.....	50
4.1.1.	METODO ACI 211	50
4.2.	Ensayos en el hormigón.....	65
4.2.1.	Elaboración de la mezcla.....	65
4.2.2.	Toma de Muestras	67
4.2.3.	Ensayo de Asentamiento.....	68
4.2.4.	Ensayo de Contenido de Aire	75
4.2.5.	Elaboración de Especímenes (Cilindros para Ensayo de Resistencia)	79
4.2.6.	Curado.....	79
4.2.7.	Ensayo de Rotura	80
5.	Resultados	82
5.1.	Caracterización de los materiales.....	83
5.2.	Obtención de las proporciones óptimas por el método gráfico de Fuller.....	83
5.3.	Densidad, rendimiento y porcentaje de aire del hormigón.....	84
5.4.	Resistencia a la compresión	86
5.5.	Curvas relación A/C vs Resistencia a la compresión.....	87
5.5.1.	Curva A/C vs resistencia para el cemento tipo HE	88
5.5.2.	Curva A/C vs resistencia para el cemento tipo GU.....	91
5.6.	Relaciones A/C para el diseño de las resistencias específicas	95
5.7.	Costos	96
6.	Conclusiones	103
7.	Referencias.....	106
8.	Anexos	108

Índice de Figuras

Figura 1: Resistencia a compresión del cemento GU. Fuente: (Atenas, Cemento Atenas Tipo GU Ficha Técnica, 2021).....	17
Figura 2: Resistencia a compresión del cemento HE. Fuente: (Atenas, Ficha Técnica Cemento HE, 2021)	18
Figura 3: Muestreo del árido grueso.	32
Figura 4: Proceso de tamizado para el agregado fino.	34
Figura 5: Curva Granulométrica árido fino. Material procedente de Santa Isabel	35
Figura 6: Proceso de tamizado del árido grueso.	37
Figura 7: Curva Granulométrica árido grueso. Material procedente de Santa Isabel	38
Figura 8: Curva Granulométrica árido grueso. Material procedente de Paute.....	39
Figura 9: Balanza.....	40
Figura 10: Compactación del árido fino para el estado SSS	41
Figura 11: Calibración del molde.....	46
Figura 12: Procedimiento por varillado. (Masa Unitaria compactada)	47
Figura 13: Procedimiento por paladas. (Masa Unitaria Suelta)	47
Figura 14. Curva relación A/C vs resistencia. Fuente: Tecnología del Hormigón.....	54
Figura 15. Ajuste de la mezcla de agregados para la combinación 1, Santa Isabel - Santa Isabel.....	60
Figura 16. Ajuste de la mezcla de agregados para la combinación 2 (Santa Isabel - Paute).....	61
Figura 17: Concretera.....	66
Figura 18: Ensayo de asentamiento.....	70
Figura 19: Cuenco de medición y sistema de tapa (Ensayo contenido de aire)	77
Figura 20: Cilindros elaborados.....	79
Figura 21: Curado de los especímenes.	80
Figura 22: Ensayo rotura de Cilindros. (Resistencia a la compresión)	81
Figura 23. Curva Relación A/C vs Resistencia de la combinación 1 y el cemento HE.....	89
Figura 24. Curva Relación A/C vs Resistencia de la combinación 2 y el cemento HE.....	91
Figura 25. Curva Relación A/C vs Resistencia de la combinación 1 y el cemento GU	92
Figura 26. Curva Relación A/C vs Resistencia de la combinación 2 y el cemento GU	94
Figura 27. Costos de producción para la resistencia de 210 kg/cm ²	100
Figura 28. Costos de producción para la resistencia de 240 kg/cm ²	100
Figura 29. Costos de producción para la resistencia de 280 kg/cm ²	101
Figura 30. Costos de producción para la resistencia de 300 kg/cm ²	101
Figura 31. Costos de producción para la resistencia de 320 kg/cm ²	102

Índice de tablas

Tabla 1:Composición química del cemento GU. (Atenas, Cemento Atenas Tipo GU Ficha Técnica, 2021)	16
Tabla 2: Composición química del cemento HE (Atenas, Ficha Técnica Cemento HE, 2021)	17
Tabla 3: Requisitos Físicos para el Cemento Atenas tipo HE y Cemento Atenas tipo GU y para Fuente: (Atenas, Ficha Técnica Cemento HE, 2021) (Atenas, 2021).....	30
Tabla 4: Requisitos Mecánicos para el Cemento Atenas tipo HE. Fuente: (Atenas, 2021) ..	31
Tabla 5: Requisitos Mecánicos para el Cemento Atenas tipo GU. Fuente: (Atenas, 2021)..	31
Tabla 6: Límites granulométricos árido fino, (INEN, ÁRIDOS PARA HORMIGÓN. REQUISITOS, 2011).....	34
Tabla 7:Análisis granulométrico del árido fino y límites obtenidos por la norma NTE INEN 872	35
Tabla 8: Límites granulométricos árido grueso, (INEN, ÁRIDOS PARA HORMIGÓN. REQUISITOS, 2011).....	36
Tabla 9: Tamaño mínimo de la muestra para árido grueso. (INEN, ÁRIDOS. ÁNALISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS, FINO y GRUESO, 2011)	36
Tabla 10: Análisis granulométrico del árido grueso de Santa Isabel y límites obtenidos por la norma	37
Tabla 11: Análisis granulométrico del árido grueso de Paute y límites obtenidos por la norma	38
Tabla 12: Densidad, gravedad específica y absorción del árido fino procedente de Santa Isabel.....	43
Tabla 13: Densidad, gravedad específica y absorción del árido grueso procedente de Santa Isabel.....	45
Tabla 14: Densidad, gravedad específica y absorción del árido grueso procedente de Paute.	45
Tabla 15: Capacidad del molde según el tamaño máximo nominal del árido (INEN, 2010) .	46
Tabla 16. Masa unitaria suelta y compactada del árido fino proveniente de Santa Isabel....	49
Tabla 17. Masa unitaria suelta y compactada del árido grueso proveniente de Santa Isabel	49
Tabla 18. Masa unitaria suelta y compactada del árido grueso proveniente de Paute	49
Tabla 19. Valores de asentamiento recomendados por el ACI	51
Tabla 20. Cantidad de agua en kg/m ³ de concreto recomendado por el ACI 211	52
Tabla 21. Relaciones agua/cemento por condiciones de exposición.....	53
Tabla 22. Valores de la relación agua/cemento recomendadas	54
Tabla 23. Coeficientes en función del módulo de finura y el TMN recomendado por el ACI	56
Tabla 24. Peso del agregado grueso de Santa Isabel.....	56
Tabla 25. Peso del agregado grueso de Paute.....	57
Tabla 26. Parábola de Fuller	58
Tabla 27. Porcentajes de agregados para la combinación 1, Santa Isabel - Santa Isabel ...	59
Tabla 28. Granulometría de la combinación 1 (Santa Isabel - Santa Isabel).....	59
Tabla 29. Porcentajes de agregados para la combinación Paute-Santa Isabel	60
Tabla 30. Granulometría de la combinación Santa Isabel-Paute	61
Tabla 31. Datos de la materia prima	65
Tabla 32. Ejemplo de dosificación de la mezcla para una relación A/C de 0.62	65

Tabla 33: Asentamientos. Combinación Santa Isabel-Santa Isabel para la muestra 1 diseñado por el Método ACI	70
Tabla 34: Ensayo de Asentamiento, Método ACI, Combinación Santa Isabel-Santa Isabel.71	
Tabla 35: Ensayo de Asentamiento, Método ACI-Fuller, Combinación Santa Isabel-Santa Isabel. Cemento tipo HE.....	72
Tabla 36: Ensayo de Asentamiento, Método ACI-Fuller, Combinación Paute-Santa Isabel. Cemento tipo HE.....	73
Tabla 37: Ensayo de Asentamiento, Método ACI-Fuller, Combinación Santa Isabel-Santa Isabel. Cemento tipo GU.	74
Tabla 38: Ensayo de Asentamiento, Método ACI-Fuller, Combinación Paute-Santa Isabel. Cemento tipo GU.	75
Tabla 39: Contenido de aire. Método ACI. Combinación Santa Isabel. Cemento Atenas Tipo HE.	77
Tabla 40: Contenido de aire. Método ACI-Fuller. Combinación santa Isabel-Santa Isabel. Cemento Atenas Tipo HE.....	77
Tabla 41: Contenido de aire. Método ACI-Fuller. Combinación Paute-Santa Isabel. Cemento Atenas Tipo HE.....	78
Tabla 42: Contenido de aire. Método ACI-Fuller. Combinación Santa Isabel-Santa Isabel. Cemento Atenas Tipo GU.....	78
Tabla 43:Contenido de aire. Método ACI-Fuller. Combinación Paute-Santa Isabel. Cemento Atenas Tipo GU.	78
Tabla 44: Modo de consolidación, numero de capas y golpes, según las dimensiones de los moldes cilíndricos. Fuente: (INEN, 2017).....	79
Tabla 45: Tolerancia de tiempo admisible para el ensayo de rotura Fuente: (INEN, 2010) ..81	
Tabla 46. Resultado de la caracterización de los áridos	83
Tabla 47. Porcentajes finales de los áridos para la mezcla de hormigón	84
Tabla 48. Rendimiento y contenido de aire de los ensayos con el cemento HE y la combinación 1	84
Tabla 49. Rendimiento y contenido de aire de los ensayos con el cemento HE y la combinación 2	85
Tabla 50. Rendimiento y contenido de aire de los ensayos con el cemento GU y la combinación 1	85
Tabla 51. Rendimiento y contenido de aire de los ensayos con el cemento GU y la combinación 2	86
Tabla 52. Resultados de resistencia a la compresión con el cemento HE y la combinación 1	87
Tabla 53. Resistencias obtenidas con el cemento tipo HE y la combinación 1	88
Tabla 54. Resistencias obtenidas con el cemento tipo HE y la combinación 2	90
Tabla 55. Resistencias obtenidas con el cemento tipo GU y la combinación 1	92
Tabla 56. Resistencias obtenidas con el cemento tipo GU y la combinación 2	93
Tabla 57. Relaciones A/C de las resistencias más comerciales con el cemento tipo HE	95
Tabla 58. Relaciones A/C de las resistencias más comerciales con el cemento tipo GU	95
Tabla 59. Precios unitarios de los materiales que componen la mezcla.....	97
Tabla 60. Costos de producción de los diseños actuales de la empresa	97
Tabla 61. Costos de producción de los diseños propuestos con el cemento tipo HE y la combinación 1	98

Tabla 62. Costos de producción de los diseños propuestos con el cemento tipo HE y la combinación 2	98
Tabla 63. Costos de producción de los diseños propuestos con el cemento tipo GU y la combinación 1	99
Tabla 64. Costos de producción de los diseños propuestos con el cemento tipo GU y la combinación 2	99

1. Introducción

El objetivo de este trabajo de titulación es desarrollar diseños de hormigón con diferentes resistencias a la compresión: 210 kg/cm², 240 kg/cm², 280 kg/cm², 300 kg/cm² y 320 kg/cm². Se utilizarán dos tipos de cemento, Atenas HE y Atenas GU, y se combinarán agregados de diferentes fuentes. La primera combinación consta de agregado fino y agregado grueso de Santa Isabel, mientras que la segunda combinación utiliza agregado fino de Santa Isabel y agregado grueso de Paute. Estos diseños están destinados a la empresa Hormi Center Cia. Ltda. y establecen requisitos específicos en términos de propiedades físico-mecánicas del hormigón, como asentamiento y resistencia. El trabajo implica varios procesos, como primer punto, se llevará a cabo la caracterización de los agregados. Con base en las propiedades de los materiales, se realizará el diseño de la mezcla siguiendo las metodologías del ACI 211.1 y Fuller Thompson. A continuación, se llevarán a cabo ensayos de asentamiento y resistencia en el hormigón fresco y endurecido, respectivamente, de este modo verificar que cumplan con los requisitos de la empresa. Una vez obtenidos los resultados de resistencia, se determinará la relación agua/cemento óptimo para las resistencias a la compresión mencionadas anteriormente. Además, se compararán los costos de producción de los diseños propuestos con los que actualmente emplea la empresa.

El control de calidad es un objetivo primordial a cumplir para la empresa Hormi Center, ya que provee hormigón a gran parte de las provincias del Azuay y Cañar, por tal motivo, tienen la necesidad de contar con una guía gráfica (relación agua/cemento vs resistencia a la compresión) especialmente para los agregados que ocupan con mayor frecuencia (agregados gruesos provenientes de Santa Isabel y Paute), así como, la posibilidad de obtener una alternativa que favorezca la producción y minimice los costos.

Un aspecto fundamental a tener en cuenta es la relación de agua/cemento vs resistencia a la compresión que presenta el hormigón a los 7 y 28 días, teniendo en cuenta que solo se dispone de guías generales (ACI), el proyecto a realizar contemplaría la influencia de los agregados usados. Por lo que, la empresa Hormi Center requiere estas curvas específicas para los agregados utilizados en su producción.

Con este estudio se entregará información relevante para la empresa Hormi Center para sus próximos ejemplares de hormigón, proporcionando nuevos diseños con un costo de producción menor, y a su vez la generación de curvas relación agua/cemento (A/C) vs resistencia, que tendrán su funcionalidad como guías de elaboración del concreto.

1.1. Antecedentes

La creciente demanda de hormigón premezclado en el sector de la construcción ha llevado a la aparición de empresas especializadas en su fabricación, lo que proporciona a los encargados de las obras un ahorro significativo de tiempo y recursos. Estas empresas se comprometen a garantizar el cumplimiento de los requisitos técnicos y las especificaciones establecidas por los clientes. Con el objetivo de mejorar tanto la calidad como el precio de su producto, estas compañías implementan rigurosos controles de calidad tanto en laboratorio como en el lugar de trabajo, al tiempo que buscan minimizar los costos asociados con la materia prima utilizada.

El 17 de marzo de 2012 la empresa Hormi Center Cia. Ltda. fue legalmente constituida bajo el control de la Superintendencia de Compañías, ha brindado sus servicios a parte del austro ecuatoriano, específicamente a las provincias de Azuay y Cañar. Ofreciendo hormigón premezclado de varias resistencias a la compresión, siendo las más comerciales de 210 kg/cm², 240 kg/m², 280 kg/cm², 300 kg/cm² y 320 kg/cm². Además, la empresa garantiza la calidad del producto desde la utilización de agregados idóneos hasta la realización de ensayos en laboratorio con el fin de supervisar y avalar el cumplimiento de los requisitos y exigencias establecidos por los clientes.

Hormi Center es una empresa especializada en la producción de hormigón premezclado, que utiliza agregados provenientes de Santa Isabel y Paute. Estos agregados cumplen con los estándares establecidos por la normativa NTE INEN, al igual que el cemento Atenas tipo He utilizado en sus mezclas. La compañía sigue los métodos de diseño de Fuller y ACI 211.1 para garantizar la calidad de sus productos.

Con el fin de cumplir tanto con los requisitos establecidos por la normativa, como con las exigencias individuales de sus clientes, Hormi Center realiza ensayos tanto en el campo como en el laboratorio, siguiendo estrictamente los procedimientos establecidos por la norma NTE INEN y el ASTM, esto asegura que sus productos cumplan con los estándares de calidad necesarios y brinden la garantía requerida en el ámbito de la construcción.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Optimizar los diseños de hormigón de la empresa Hormi Center mediante la elaboración de una guía gráfica para el diseño, el mismo que consiste en obtener curvas de relación agua/cemento vs resistencia a la compresión.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los agregados según la normativa INEN.
- Determinar relaciones agua/cemento para las resistencias más comerciales de la empresa: 210, 240, 280, 300, 320 Kg/cm²
- Obtención de curvas relación agua/cemento vs resistencia, para elaboración del hormigón de la empresa, con combinaciones de agregados de las canteras de Santa Isabel y Paute, (Combinación 1: arena de Santa Isabel y grava de Santa Isabel, Combinación 2: arena de Santa Isabel y grava de Paute).
- Proponer una alternativa a los diseños actuales de la empresa con referencia al costo-resistencia, mediante el uso de dos tipos de cementos (Atenas tipo GU y Atenas tipo HE).
- Identificar la influencia en la resistencia de cada combinación de agregados y de los diferentes tipos de cementos mediante curvas de relación agua/cemento vs resistencia a compresión.
- Comparar los diferentes diseños entorno al costo-resistencia con lo propuesto vs los diseños actuales.

1.3. Estado del Arte

En el siglo XVIII, se creó un cemento de manera accidental al quemar piedras calizas. Fue bautizado como cemento romano, debido a que se pensó que fue el mismo que utilizaron los romanos en su época. Este material se empezó a utilizar en diversas obras del Reino Unido. La primera patente del Cemento Portland se dio el 21 de octubre de 1824, el mismo que estaba compuesto por caliza arcillosa y carbón. El nombre Portland surgió a partir del color grisáceo muy similar a una piedra de isla Portland del canal inglés. (Vidaud, 2013)

El Clinker es producto de calçinar mezclas de calizas y arcillas preparadas a una temperatura aproximada de 1500 °C, a este producto se le añade piedra yeso natural que es un regulador de fraguado. (Vidaud, 2013)

La invención del horno rotatorio, además, del molino tubular, fueron de gran importancia ya que debido a esto se pudo producir en grandes cantidades el Clinker. Los experimentos realizados por los químicos Vicat, Le Chatelier y Michaélis ayudaron a producir un cemento uniforme, de tal forma que pudo ser usado en la construcción. (Sánchez de Guzmán, 2002)

En Bélgica, Francia y Alemania empezó la producción masiva del cemento en la mitad del siglo XIX. A partir del 1871 en Pensilvania E.E.U.U. se produjo el primer cemento Portland. En Latinoamérica la producción empezó a finales del XIX y a inicios del siglo XX: 1909 en Colombia, 1916 en Perú y en Ecuador en el año 1926. (Cáder & Oliva, 2012)

Desde 1960, el hormigón es el material más empleado en la industria de la construcción, su producción está basada en el cemento Portland. (Rodríguez de Densale, Sabalsagaray, Romay, & Benavídez, 2008)

El deseo de reducir costos de producción sin afectar la calidad del hormigón es un objetivo de suma importancia para las empresas dedicadas a la fabricación del hormigón premezclado. (Orbe & Zúñiga, 2013), por tal motivo se realizan investigaciones como la caracterización de agregados, además, se realizan diferentes ensayos en el concreto y diseños de hormigón para optimizar de mejor manera la mezcla.

En la relación agua/cemento, el agua es un factor muy importante debido a que está ligado directamente con el hormigón en su estado fresco y endurecido. La cantidad de agua colocada influye en la fluidez de la mezcla, es decir en parámetros como la trabajabilidad y plasticidad del hormigón en estado fresco, esto tiene grandes beneficios en la construcción pues facilita la colocación y terminación, no obstante, también disminuye la resistencia a la compresión, debido a que es mayor volumen de espacios creados por el agua libre. (Guevara, y otros, 2012)

2. Marco teórico

El hormigón es un material de construcción compuesto por la mezcla entre cemento, agua, agregados (arena, grava o piedra triturada) y opcionalmente aditivos químicos que influyen en sus propiedades. Tiene varios usos en la industria de la construcción debido a la resistencia que alcanza, además, de su durabilidad y versatilidad. El concreto u hormigón se utiliza comúnmente en obras civiles, como la fabricación de estructuras de edificaciones, puentes, carreteras, pavimentos, muros de contención, entre otras. Lo que lo convierte en un producto de mayor uso, es su resistencia a la compresión y capacidad para soportar cargas pesadas, popularizando su producción.

La resistencia a la compresión del concreto es el principal parámetro utilizado para medir la calidad de este. Por lo que, para garantizar la efectividad del hormigón se debe tener en cuenta los factores que influyen en su producción, como la selección de la correcta relación agua/cemento, combinación optima entre los agregados gruesos y finos, y el banco de origen de los agregados (Sólis-Carcaño, Moreno, & Arcudia-Abad, 2008).

2.1. Cemento

El cemento es el material de mayor impacto en la construcción, debido a su capacidad de reaccionar con el agua para unir y endurecer otros materiales como la grava y la arena, de este modo formar una masa sólida, uniforme y resistente con durabilidad adecuada.

Las materias primas que componen el cemento son una mezcla de materiales triturados, como las calizas, arcillas y yeso, las cuales se someten a altas temperaturas en un horno rotatorio. Luego de enfriarse se pulverizan hasta conseguir la finura adecuada, y obtener el conocido cemento Portland.

Existen varios cementos hidráulicos que se han desarrollado a lo largo de la historia, el más común es el cemento Portland, el cual está compuesto principalmente de silicatos de calcio y aluminio.

Para cumplir con una óptima calidad, el cemento debe cumplir con los requisitos de la normativa más moderna de la industria cementera, como lo es la NTE INEN 2380 y NTE INEN 152.

2.1.1. Definición

Cemento hidráulico es aquel que fragua y se endurece mediante una reacción química con el agua, y es capaz de hacerlo aún bajo el agua (INEN, 2010).

2.1.2. Composición química

Según la norma NTE INEN 152 el cemento no debe contener ningún ingrediente, excepto estos:

- Clincker de cemento portland (calizas que proporcionan el CaO, y arcillas o pizarras que proporcionan el SiO₂ y Al₂O₃).
- Agua o sulfato de calcio, en cantidades tales que no excedan los límites.
- Caliza que debe estar presente en forma natural y tener por lo menos el 70% en masa de una o más formas minerales del carbonato de calcio.
- Adiciones de proceso, estas cantidades deben cumplir con los requisitos NTE INEN 1504.
- Adiciones incorporadas de aire, deben cumplir con los requisitos de la norma ASTM C 226.

2.1.3. Densidad

La densidad del cemento se refiere a la masa de cemento por unidad de volumen, la cual permite determinar el volumen de cemento necesario en la mezcla de hormigón y una posible estimación de la cantidad de cemento requerida en una obra civil.

La densidad del cemento influye en la resistencia del hormigón, ya que un cemento con una densidad alta producirá un hormigón más denso y, por lo tanto, de mayor resistencia. La densidad del cemento oscila entre 1.9 y 3.2 kg/m³, aunque existe cemento Portland de alta resistencia que pueden tener una densidad ligeramente mayor.

2.1.4. Resistencia a la Compresión

La resistencia del cemento es una característica física que mide la capacidad de soportar cargas o fuerzas aplicadas, sin romperse o sufrir una deformación significativa. La resistencia se mide mediante pruebas de compresión, las muestras de ensayo deben ser preparadas como morteros (cemento, arena y agua), que luego de su endurecimiento son sometidas a cargas axiales hasta que se produzca su fallo.

Esta es una propiedad fundamental en el cemento, ya que permite evaluar su calidad y desempeño en obras civiles.

2.1.5. Tipos de Cementos

Los tipos de cemento hidráulicos están clasificados por sus características específicas, según la norma NTE INEN 2380 son:

- Tipo GU. Para construcción en general, cuando no se requieran tipos especiales.
- Tipo HE. Alta resistencia inicial.
- Tipo MS. Moderada resistencia a los sulfatos.
- Tipo HS. Alta resistencia a los sulfatos.
- Tipo MH. Moderado calor de hidratación.
- Tipo LH. Bajo calor de hidratación.

2.1.6. Cemento Tipo GU

El cemento hidráulico tipo GU es aquel que puede ser utilizado en todo tipo de construcciones civiles donde las propiedades especiales de los otros cementos no sean necesarias. Dichas construcciones pueden ser: cimentaciones, columnas, vigas, losas, morteros, tanques, canales de agua no residual, además de elementos prefabricados livianos como bloques, adoquines, tuberías y postes.

2.1.6.1. Composición química

La composición química del cemento tipo GU de la empresa Atenas viene dado por:

Requisitos Químicos	
Óxido (Método)	Resultado
SiO ₂	22.03
Al ₂ O ₃	5.02
Fe ₂ O ₃	2.21
CaO (NTE 160)	48.11
MgO	1.00
SO ₃	2.99
Pérdida por calcinación	7.64

Tabla 1:Composición química del cemento GU. (Atenas, Cemento Atenas Tipo GU Ficha Técnica, 2021)

2.1.6.2. Resistencia a la compresión

La resistencia del cemento Atenas tipo GU es:

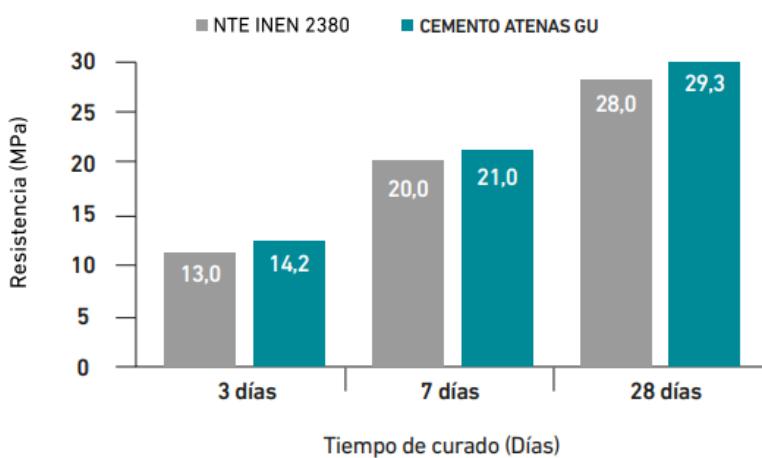


Figura 1: Resistencia a compresión del cemento GU. Fuente: (Atenas, Cemento Atenas Tipo GU Ficha Técnica, 2021)

2.1.7. Cemento Tipo HE

El cemento tipo HE es ideal cuando se requieren resistencias altas a edades tempranas, esto debido a que se desea aumentar la velocidad de construcción, por lo general, es usado por empresas que elaboran hormigón para garantizar su calidad y las resistencias adecuadas para su comercialización.

2.1.7.1. Composición química

La composición química del cemento tipo HE de alta resistencia a edades tempranas de la empresa Atenas es:

Requisitos Químicos	
Óxido (Método)	Resultado
SiO_2	24.10
Al_2O_3	5.20
Fe_2O_3	3.00
CaO (NTE 160)	58.50
MgO	1.10
SO_3	2.40
Pérdida por calcinación	2.10

Tabla 2: Composición química del cemento HE (Atenas, Ficha Técnica Cemento HE, 2021)

2.1.7.2. Resistencia a la compresión

La resistencia del cemento Atenas tipo HE al ser un tipo especial tiene una resistencia mayor, lo que se evidencia en la siguiente gráfica.

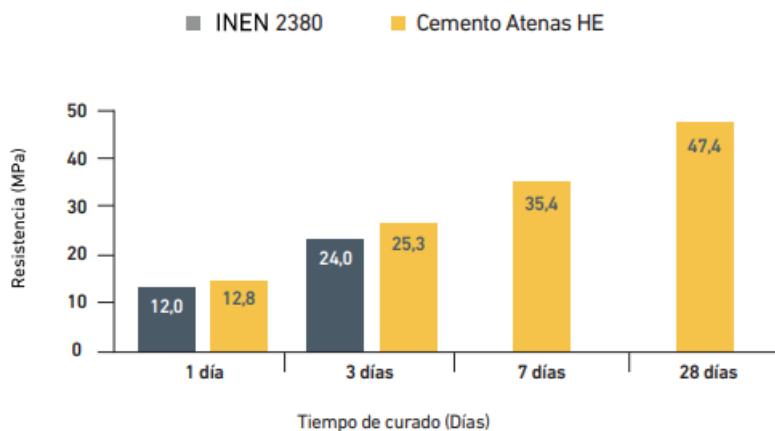


Figura 2: Resistencia a compresión del cemento HE. Fuente: (Atenas, Ficha Técnica Cemento HE, 2021)

2.2. Áridos

Se conoce como árido al material granular formado por fragmentos de roca o arenas que, por lo general, son utilizados como componentes de la mezcla de concreto y en el área de la construcción. Comúnmente los tipos de áridos son: grava, arena, gravilla, y estos son los encargados de proporcionar resistencia, estabilidad y volumen a las edificaciones y demás obras civiles.

Para garantizar la calidad del hormigón se debe considerar la resistencia, granulometría y durabilidad de los áridos empleados, además, de la ausencia de impurezas, como barro, limo y materia orgánica.

Los áridos de origen natural generalmente se clasifican en finos y gruesos. Teniendo en cuenta que los agregados ocupan entre 70-80% del volumen del hormigón y, por tanto, tiene una influencia importante en las características del hormigón fresco y endurecido, es importante una adecuada caracterización de los áridos que forman parte de la mezcla de hormigón (González-Díaz, Jaizme-Vega, & Jubera-Perez, 2018).

2.2.1. Árido fino

Los áridos finos o arenas son todos los materiales que pasan por un tamiz número 4, es decir, un tamiz con cuatro hilos por pulgada lineal (25.4 mm) (Winter & Nilson, 2002).

El agregado fino debe cumplir con los requisitos de la norma NTE INEN 872.

2.2.2. Árido grueso

El agregado grueso debe consistir en grava, grava triturada, piedras trituradas o una combinación de ellos (INEN, 2011).

Este agregado debe cumplir con la norma NTE INEN 872.

2.2.3. Propiedades de los áridos

Para una correcta dosificación de la mezcla de hormigón se debe conocer las propiedades físicas de los agregados, pues las características de los áridos influyen en el diseño y proporción de los mismos para optimizar la calidad del concreto.

2.2.3.1. Humedad de los agregados

Es la cantidad de agua que contiene un árido respecto a su masa seca y es expresada en porcentaje. Se debe tener en cuenta al momento de realizar el diseño de hormigón, puesto que se realizan correcciones de agua en la mezcla, de este modo, se obtiene una buena trabajabilidad y se garantiza el cumplimiento de la dosificación obtenida en el diseño.

Para determinación de la humedad del árido se rige en la norma NTE INEN 682.

2.2.3.2. Granulometría

Este ensayo se refiere al análisis de la composición granular de un árido, se somete una muestra significativa del árido a una gradación por diferentes tamaños de tamices, expresado generalmente en términos de porcentaje acumulativo de masa.

En este ensayo se debe considerar la norma NTE INEN 696.

2.2.3.3. Gravedad Específica y Absorción

El ensayo determina la densidad en que se considera el volumen total de las partículas sólidas del árido, además, el volumen de los poros accesibles e inaccesibles de las partículas. La gravedad específica de los áridos influye en las propiedades del hormigón, pues, valores más altos afectan factores como la resistencia, durabilidad y trabajabilidad.

La absorción se refiere a la cantidad de agua que un árido puede absorber, esta depende de la porosidad, textura y forma de las partículas. Este ensayo es útil para el diseño del hormigón,

al momento de realizar el ajuste de agua en la mezcla de concreto. De tal forma, si el valor de absorción es más alto que el contenido de humedad de los áridos, el agua de mezclado debe ser incrementado y de lo contrario se disminuye la cantidad.

Para agregados finos se utiliza la norma NTE INEN 856, mientras que, para agregados gruesos se recomienda la norma NTE INEN 857.

2.2.3.4. Masa unitaria (Peso Volumétrico)

La masa unitaria hace referencia a la masa del agregado por unidad de volumen, considerado en la determinación del volumen que es ocupado por la parte sólida, poros accesibles e inaccesibles y espacios libres entre partículas e inclusive el espacio libre entre las partículas y el recipiente que contiene el agregado. Esta medida es importante en la mezcla del concreto porque afecta la proporción y la densidad del hormigón.

Se debe conocer esta propiedad para cuantificar la proporción en que los áridos deben estar presentes dentro del diseño de hormigón, de este modo, optimizar la producción de este.

La masa unitaria de los áridos se puede determinar de dos formas: masa unitaria suelta y masa unitaria compacta, y se rigen a la norma NTE INEN 858.

2.3. Agua

En la elaboración de hormigón el agua es un elemento de vital importancia, ya que influye en la dosificación de la mezcla, lo que causa alteraciones en la resistencia, plasticidad, trabajabilidad y permeabilidad del concreto.

La importancia del agua en la fabricación del hormigón se considera en varias etapas de su elaboración. Según su utilización se tiene: agua de mezclado, agua de curado, agua de lavado y agua de contacto. Se recomienda que toda el agua utilizada sea potable y que cumpla con la norma NTE INEN 1108.

2.3.1. Agua de mezclado

El agua de mezclado debe contemplar el agua necesaria para que se consiga fluir la mezcla de hormigón más la proveniente de la humedad natural de los agregados. Tiene como principales funciones las siguientes:

- Producir una reacción química con el cemento, produciendo su hidratación.
- Mejorar la trabajabilidad de la mezcla, sin alterar la resistencia.

- Conseguir una pasta adecuada para la mezcla con los agregados.

Para realizar mezclas de hormigón el agua debe cumplir con los requisitos de la norma NTE INEN 2617. De no tener accesibilidad a una red de abastecimiento de agua potable la NTE INEN 1855 indica:

- El agua de la mezcla debe ser clara y de apariencia limpia, libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, álcalis, sales, materiales orgánicos y otras sustancias que pueden ser dañinas para el hormigón o para el acero de refuerzo.
- El agua proveniente de las operaciones de lavado de las mezcladoras podrá ser utilizada para el mezclado del hormigón siempre que cumpla con los límites respectivos.

Las mezclas de hormigón que son afectadas por la utilización de aguas que no cumplen con los requisitos de la norma suelen estar afectados por: carbonatos alcalino, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, sales de hierro, impurezas orgánicas, sales inorgánicas, azúcar, aceites, entre otros, los mismo que producen efectos en las propiedades del hormigón como: alteración del tiempo de fraguado y la resistencia, , reacciones expansivas, corrosión del acero de refuerzo, eflorescencias y humedad en las superficies.

2.3.2. Agua de curado

Esta agua se utiliza durante el proceso de curado del hormigón fresco, ya que, hidrata al hormigón y compensa la perdida de agua por la exudación, reduce la perdida de humedad, minimiza la contracción por secado, mejora la durabilidad y controla la temperatura del concreto.

El agua de curado debe cumplir con las mismas exigencias de la norma NTE INEN 1108 que se aplican para el agua de mezclado. Debido a que en edades tempranas el hormigón es mucho más permeable, el agua de curado no debe contener sustancias agresivas para el concreto endurecido o para las armaduras de acero.

2.4. Propiedades del hormigón

El hormigón es un material ampliamente utilizado en la construcción debido a sus diversas propiedades y características.

Estas propiedades permiten evaluar la calidad del hormigón ya sea en su etapa de elaboración, así como, en su proceso de fraguado y endurecimiento. Algunas de sus propiedades son las siguientes:

2.4.1. Estado fresco

El hormigón en estado fresco es considerado al tiempo que transcurre cuando el cemento entra en contacto con el agua y el resto de los componentes del concreto (agregado grueso, agregado fino, aditivos), hasta que el hormigón se endurece.

Las características del hormigón fresco a obtenerse dependen de la obra a construirse, además de los métodos de colocación y compactación. Muchas de las estructuras en malas condiciones sufren problemas de segregación, compactación, desprendimiento de material, esto es debido a su mala manipulación y colocación del hormigón en estado fresco.

2.4.1.1. Principales características del estado fresco

2.4.1.1.1. Uniformidad

La uniformidad es la característica que indica si los componentes del hormigón se encuentran en la misma proporción en cualquier punto de su colocación. Se debe tener en cuenta esta característica al momento de distribuir el hormigón de manera que las propiedades mecánicas del concreto se mantengan homogéneas.

2.4.1.1.2. Segregación

La segregación se da cuando los componentes del hormigón forman una mezcla heterogénea, es decir, que la distribución de tamaño de los agregados no es uniforme. Para evitar esto, se debe tener en cuenta una granulometría adecuada, de manera que la densidad y los tamaños de áridos no provoquen esta segregación.

Otra forma de evitar la segregación es un adecuado método de mezclado, transporte y colocación del hormigón, de igual manera, no aplicar un vibrado prolongado. Es muy importante prevenir la segregación, ya que, esta provoca puntos de baja resistencia y zonas sin pasta que permiten el paso de ataques de fluidos agresivos al hormigón y al acero.

2.4.1.1.3. Exudación

La exudación consiste en que parte del agua de mezclado tiende a elevarse a la superficie del concreto recién colocado o durante el proceso del fraguado. Por tal razón, se dice que es una forma especial de segregación o de sedimentación de las partículas, las cuales no pueden retener toda el agua cuando se asienta (Sanchez De Guzmán, 2001).

Esta condición provoca que la relación agua-cemento aumenta en la superficie, lo que causa disminución de la resistencia del hormigón, por otra parte, se van creando caminos capilares que originan una mayor permeabilidad en el concreto.

2.4.1.1.4. Trabajabilidad

Se define a la trabajabilidad como la facilidad con la que el hormigón se puede mezclar, colocar, compactar y dar forma durante la construcción. Un nivel adecuado de trabajabilidad es necesario para garantizar un acabado de calidad de una estructura.

Factores que afectan la trabajabilidad:

- Cantidad de agua

El principal factor que afecta la trabajabilidad es la cantidad de agua de mezclado, ya que esta influye en la relación agua – cemento, en la consistencia del hormigón, segregación y exudación, facilidad de colocación y compactación.

Es importante encontrar una cantidad óptima de agua de mezclado para lograr la trabajabilidad deseada sin alterar la calidad, ni las propiedades mecánicas del hormigón.

- Fluidez de la pasta

Una pasta con poca agua y mucho cemento será muy rígida por falta de agua evaporable, lo cual hace inmanejable la mezcla al no poder lubricar los agregados. Por lo contrario, si el contenido de agua es alto y el cemento es bajo, la pasta puede llegar a ser tan fluida, por el exceso de agua evaporable, que no es capaz de impedir la segregación de los agregados (Sanchez De Guzmán, 2001).

- Contenido de aire

Se refiere a la cantidad de aire atrapado en forma de burbujas dispersas dentro de la masa del hormigón antes de la etapa de fraguado. La presencia de aire atrapado ayuda a mejorar la trabajabilidad del hormigón fresco en espacios reducidos, ya que, facilita su colocación, vibración y compactación en la construcción.

En muchos casos que se requiere una mejor trabajabilidad en obra, se colocan aditivos inclusores de aire en la mezcla de hormigón.

- Gradación de los áridos

El tamaño de los agregados afecta la trabajabilidad ya que los agregados más gruesos pueden requerir más agua para su hidratación, mientras que los agregados más finos pueden requerir menos agua, lo que puede aumentar el riesgo de segregación.

Un agregado mal gradado presenta exceso de vacíos que deben ser llenados con pasta en el caso de la arena y con mortero en el caso del agregado grueso, para que la mezcla sea manejable y no quede porosa (Sanchez De Guzmán, 2001).

- Forma y textura de los áridos

Se debe tener en cuenta la forma de los áridos, pues los agregados gruesos que provienen de rocas trituradas tienen partículas alargadas, aplanadas o de forma cúbica que requieren una mayor cantidad de arena, agua y pasta en la mezcla. Mientras que las partículas redondeadas y lisas son más adecuados desde el punto de vista de la trabajabilidad, debido a la fricción generada.

- Relación pasta – áridos

Lo que se busca para mejorar la trabajabilidad del hormigón, es tener una relación de pasta alta de este modo los agregados pueden moverse libremente, acomodándose de manera adecuada y no dejando espacios libres en la masa de concreto. Sin embargo, si la pasta es insuficiente la mezcla tiende a segregarse en especial los agregados gruesos no suelen incluirse en la masa total, volviéndola granulosa y áspera.

- Relación arena – grava

Esta relación influye en la trabajabilidad dependiendo de la proporción entre agregados que se ocupa en la mezcla, por ejemplo, si el agregado fino está en exceso las partículas finas tienden a acomodarse y llenar espacios entre el árido grueso, mejorando la colocación y compactación del hormigón; sin embargo, al tener mayor cantidad de arena, se requiere más cantidad de agua, lo que puede ocasionar segregación de los agregados y exudación. Por otra parte, si el exceso es de agregado grueso se producen espacios sin pasta, lo que aumenta la permeabilidad del concreto, exponiéndolo a sustancias agresivas para el acero.

Por lo tanto, se debe considerar una relación correcta entre agregados para evitar problemas en la mezcla y colocación del hormigón.

2.4.2. Estado endurecido

Luego de la etapa de fraguado se obtiene el estado endurecido del hormigón, el cual presenta varias propiedades ideales para la construcción, entre las principales se encuentra la durabilidad y la resistencia, factores indispensables para la evaluación y diseño de proyectos civiles. Estas son algunas de las propiedades del concreto:

2.4.2.1. Densidad y porosidad

La densidad del concreto endurecido se refiere a la masa por unidad de volumen. Comúnmente el hormigón más denso se considera más fuerte y duradero. El rango de valores en los que se encuentra dicho valor está entre 2200 – 2500 kg/cm³.

La porosidad hace referencia a la cantidad de poros o vacíos en el concreto, por lo general, un porcentaje bajo de porosidad se asocia a un hormigón con mayor resistencia a la penetración de agentes nocivos para el acero.

2.4.2.2. Permeabilidad

La permeabilidad del hormigón se refiere a la capacidad para permitir el paso de líquidos, gases, o sustancias a través de su estructura. Es un factor determinante en la vulnerabilidad del concreto contra agentes externos, o productos nocivos para el hormigón o el acero de refuerzo, por ello, para que un hormigón sea duradero debe ser impermeable.

Esta propiedad afecta directamente a la durabilidad del hormigón, resistencia a la corrosión y resistencia a la penetración de agentes dañinos. Algunos de los factores que afectan la permeabilidad son:

- Relación agua – cemento
- Tipo de cemento
- Granulometría
- Compactación
- Curado adecuado

2.4.2.3. Durabilidad

El hormigón endurecido debe ser capaz de soportar los efectos negativos de agentes agresivos del medio ambiente y mantener sus propiedades mecánicas a lo largo de su vida útil. Esta propiedad está relacionada directamente a las características de la materia prima

utilizada en la fabricación del hormigón, así como, en la colocación, vibración y compactación del concreto.

2.4.2.4. Resistencia

La resistencia a compresión es uno de los requisitos principales del diseño estructural, pues, es el que garantiza que la estructura sea capaz de soportar las cargas de la obra.

La resistencia a compresión aumenta a medida que se reduce la relación agua – materiales cementosos. Puesto que esta última relación está directamente relacionada con la calidad del hormigón, la resistencia a la compresión también se emplea como medida de calidad, para estimar la durabilidad y la resistencia a la meteorización (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

El ensayo para medir la resistencia a compresión del hormigón consiste en someter una muestra endurecida a una fuerza axial por medio de una prensa y obtener una cantidad expresada en Megapascales o kilogramos por centímetro cuadrado. Este ensayo debe cumplir con los requisitos de la norma NTE INEN 2648.

Factores que afectan a la resistencia

- Diseño y aplicaciones

El diseño de hormigón depende de las especificaciones y requisitos de la estructura a construir. Se establece la resistencia a la compresión requerida, el ambiente de exposición, los tiempos de fraguado y endurecimiento. Por ejemplo, para construir un pavimento rígido se requiere una resistencia mayor, que para construir elementos prefabricados como bloques.

- Contenido de cemento

La cantidad de cemento está relacionada directamente con la resistencia del hormigón, si se ocupa una cantidad mayor de cemento la resistencia aumenta, sin embargo, si el aumento es excesivo ocasionará una alteración en el comportamiento durante la etapa de fraguado, provocando agrietamientos en la pasta excesiva y poca adherencia con los agregados.

- Relación agua/ cemento

La relación agua – cemento está definida como la cantidad de agua que se ocupa en una cantidad determinada de cemento, para realizar una mezcla de hormigón.

Existe una relación inversamente proporcional entre la relación agua – cemento y la resistencia a compresión, por lo que, si se desea un hormigón de mayor resistencia se tendrá que ocupar una relación agua – cemento menor.

Hay una regla que relaciona la resistencia del concreto con la proporción entre las cantidades de agua y de cemento. Lo anterior se fundamenta en que este parámetro es responsable, en gran medida, de la cantidad de productos de hidratación del cemento y, por tanto, de la porosidad de la pasta. Esta regla es válida, desde luego, si se dan las condiciones de curado que favorezcan que los óxidos del cemento se hidraten. (Sólis-Carcaño, Moreno, & Arcudia-Abad, 2008)

- Características de los áridos

Una correcta caracterización de los agregados permite obtener una dosificación con mayor precisión, lo que no causará inconvenientes con la resistencia. La calidad del concreto depende de la selección de agregados que se ocupen, como ya se mencionó anteriormente, el origen de los agregados influye en las propiedades de la mezcla de hormigón.

- Tamaño máximo del árido

En la resistencia del hormigón influye el tamaño máximo del agregado grueso, la textura superficial, el origen de los agregados y la proporción de cada uno de los áridos.

El tamaño máximo del árido puede reducir la cantidad de agua de mezclado que se ocupa, por lo que, para una trabajabilidad y resistencia deseada, se puede ocupar una relación agua – cemento menor. Por otra parte, se debe considerar un tamaño máximo nominal adecuado para una estructura determinada, de este modo su colocación no sea un problema y el hormigón se acomode a los encofrados.

- Fraguado del hormigón

El fraguado del hormigón es el proceso mediante el cual la mezcla pasa de estado líquido o plástico a estado sólido. La velocidad de este proceso afecta a la resistencia, ya que, a medida que la hidratación del cemento avanza, se forma una red de productos hidratados en el interior de la mezcla. Esta red proporciona resistencia y rigidez al hormigón, lo que resulta en un aumento gradual de su resistencia mecánica.

- Edad del hormigón

Una vez en el estado endurecido, el hormigón va aumentando su resistencia, comúnmente los ensayos son realizados a los 28 días después de su confección, ya que alcanza el 80%

de su resistencia durante el año. Existen tablas en el código ACI 211 que indican el crecimiento exponencial de la resistencia vs el tiempo.

- Curado del hormigón

La etapa de curado es esencial para obtener la resistencia deseada del diseño, su objetivo es mantener el hormigón hidratado y en condiciones óptimas de humedad y temperatura durante el período de tiempo después del fraguado inicial.

Los espacios que estaban llenos de agua se van evaporando por la temperatura del ambiente, lo que se busca es saturar estos espacios de pasta fresca de cemento. De este modo se evitaría la perdida de agua, ocasionando una disminución de la porosidad y aumentando la resistencia.

3. Características de los materiales empleados

Es muy importante conocer las propiedades de los componentes fundamentales para la elaboración del hormigón, con esto se puede seleccionar materiales que cumplan con las especificaciones necesarias, además, se puede ajustar las proporciones para la mezcla del concreto, logrando así la resistencia a compresión deseada.

La caracterización de los materiales se realizó en el laboratorio de materiales de la facultad de ingeniería de la Universidad de Cuenca, el ensayo de densidades de los áridos se efectuó en el laboratorio de control y calidad de la hormigonera Hormi Center.

3.1. Cemento

El cemento es un material esencial en la industria de la construcción y se utiliza en una variedad de proyectos. Es una sustancia en polvo que, cuando se mezcla con agua, áridos, y en algunos casos aditivos se convierte en una pasta, que luego se endurece y se convierte en un material resistente y duradero.

Para el trabajo de titulación se utilizaron dos tipos de cemento de la marca Atenas (Tipo HE, GU) los mismo que tienen diferentes características. El cemento HE es de uso exclusivo para hormigoneras, es decir no está a la venta para el público en general, en cambio el cemento tipo GU es de uso general.

El cemento Tipo HE de Atenas cumple con los requisitos de la Norma Ecuatoriana NTE INEN 2380, el cual tiene como fin dar altas resistencias iniciales. Se obtiene a base de la trituración del Clinker, yeso y adiciones de materiales de excelente calidad (Atenas, 2021).

El cemento Tipo GU de Atenas, también tiene como referencias seguir con los requisitos que presenta la Norma Ecuatoriana NTE INEN 2380, destaca por su resistencia, durabilidad y desempeño (Atenas, 2021).

3.1.1. Requisitos Químicos

La Norma Ecuatoriana NTE INEN 2380 no detalla los requisitos químicos que se deberían cumplir. Esto implica para los dos tipos de cementos utilizados en el trabajo de titulación.

3.1.2. Requisitos Físicos

En la siguiente tabla se puede observar los requisitos emitidos por la normativa NTE 2380, además de los valores obtenidos por la empresa Atenas entorno a los cementos tipo HE y GU.

Parámetro	INEN 2380	HE	GU
	Obtenido	Obtenido	Obtenido
Finura (Blaine) (cm ² /g)	A	4044.30	4364.40
Retenido, máx. (%)	A	1.20	3.90
Cambio de longitud en autoclave, máx. (%)	0.8	-0.07	-0.05
Fraguado Inicial, mín. (min)	45	219	251
Fraguado Final, máx. (min)	420	263	303
Contenido de aire en mortero, máx. (%)	A	7.70	7.50
Expansión en barra de mortero, máx. (%)	0.02	-0.022	0.011
Densidad (g/cm ²)	A	3.00	2.90

Tabla 3: Requisitos Físicos para el Cemento Atenas tipo HE y Cemento Atenas tipo GU y para Fuente: (Atenas, Ficha Técnica Cemento HE, 2021) (Atenas, 2021)

El valor que se marca de A tiene el significado que la Norma NTE 2380 no indica un requisito para el parámetro.

3.1.3. Requisitos Mecánicos

Este requisito es muy importante tomar en cuenta, debido a que brinda información valiosa para el trabajo de titulación, además, que los tiempos son periodos típicos para realizar pruebas de resistencia por parte de la empresa Hormi Center. La resistencia a la compresión a los 3 días es donde el hormigón ya ha fraguado y sirve como punta de partida para tener información sobre la resistencia que va a brindar el hormigón.

Las tablas que se presenta a continuación son los requisitos mínimos de resistencia a compresión que deben presentar cada tipo de cemento en el tiempo especificado.

Parámetro Resistencia	INEN 2380 (MPa, min)	Tipo HE	
		Resultado	
1 día	12.0	12.8	
3 días	24.0	25.3	
7 días	A	35.4	

28 días	A	47.4
---------	---	------

Tabla 4: Requisitos Mecánicos para el Cemento Atenas tipo HE. Fuente: (Atenas, 2021)

El valor que se marca de A tiene el significado que la Norma NTE 2380 no indica un requisito para el parámetro.

Parámetro Resistencia	INEN 2380 (MPa, min)	Tipo GU	
		Resultado	
3 días	13	14.2	
7 días	20	21.0	
28 días	28	29.3	

Tabla 5: Requisitos Mecánicos para el Cemento Atenas tipo GU. Fuente: (Atenas, 2021)

3.1.4. Almacenamiento

El cemento tipo HE solo puede permanecer en silos que garanticen un correcto aislamiento de cualquier tipo de humedad, además, se debe proporcionar una adecuada rotación para evitar la compactación del cemento (Atenas, 2021).

La ficha técnica para cemento Atenas tipo GU señala que los sacos de cemento deben permanecer en bodegas ventiladas para que permanezcan en estado seco. Además, aislar los sacos de cemento del suelo y de las paredes. Si se realiza este procedimiento de forma correcta pueden conservarse hasta para un periodo de 60 días (Atenas, 2021).

3.2. Áridos

En el presente trabajo se utilizaron tres tipos de áridos que provienen de las canteras de Paute (árido grueso), y de Santa Isabel (áridos fino y grueso). Materiales que son utilizados por la empresa Hormi Center para la elaboración del hormigón. El árido grueso tiene partículas de $\frac{3}{4}$ " como tamaño máximo nominal. Consecuentemente es el tamaño nominal utilizado para este trabajo de titulación.

Es esencial que los áridos utilizados en la fabricación del hormigón cumplan con requisitos de calidad para garantizar la resistencia y durabilidad del producto obtenido. La norma NTE INEN 872 establece los parámetros para los materiales utilizados en la fabricación del hormigón. Asegurándonos que estos presenten forma y textura adecuada, además, sean partículas duras y resistentes, y se debe evitar que existan factores que pueden afectar de manera negativa la calidad y resistencia del hormigón.

3.2.1. Muestreo

En la empresa se almacenan los áridos en pilas dentro de sus instalaciones, teniendo en cuenta esto la norma NTE INEN 695, nos indica cómo realizar el muestreo de los materiales. En el apéndice W, numeral 2.1 hace referencia a cómo realizar el muestreo en pila contando con equipos mecánicos (cargadora). Se realiza una pequeña pila separada, que es conformada por el árido extraído de diferentes niveles de la pila principal, para combinar y poder obtener una muestra in situ (INEN, 2010).

La norma NTE INEN 2566 indica el proceso que se debe realizar para poder obtener una reducción de la muestra a partir de la pila de almacenamiento. Tiene como fin tener la cantidad suficiente de material y que sea representativa de la provisión total. El material obtenido es para realizar la caracterización de los áridos.

La sección 6.2.11 método B de la norma ya mencionada nos dice: “Colocar la muestra original en una superficie firme, limpia y nivelada, donde no exista ni pérdida de material ni adición accidental de material extraño. Mezclar el material completamente volteando toda la muestra más de tres veces. Luego de la última vuelta, conformar con toda la muestra una pila cónica, depositando cada palada sobre la parte superior de la anterior. Con cuidado, aplanar la pila cónica hasta un espesor y un diámetro uniformes, presionando la punta con la pala para que cada cuarto resultante de la pila contenga la composición original del material. El diámetro puede ser de aproximadamente cuatro a ocho veces el espesor. Dividir la masa aplanada en cuatro cuartos iguales con una pala o una paleta y retirar dos cuartos diagonalmente opuestos, incluyendo todo el material fino y limpiar los espacios vacíos. Mezclar sucesivamente y cuartear el material restante hasta reducir la muestra al tamaño deseado” (INEN, 2010) a continuación, se presenta la metodología mencionada del muestreo en práctica.



Figura 3: Muestreo del árido grueso.

3.2.2. Contenido de humedad natural de los áridos

Encontrar la humedad natural de los áridos es un ensayo que se debe realizar todos los días y varias veces en el transcurso del día, debido a que varía conforme transcurre el tiempo, el clima y la temperatura actual. Se lo realiza en laboratorio y es un factor necesario para el diseño de hormigón. la norma NTE INEN 862 nos indica el procedimiento a llevar a cabo.

La norma se basa en obtener una muestra representativa del árido, el recipiente se puede colocaren el horno o en cocina. La muestra colocada en un horno normado estará en una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta que el material este completamente seco, según la norma “La muestra está completamente seca cuando un mayor tiempo de calor ocasiona, o puede ocasionar, una pérdida adicional de masa menor al 0.1%” (INEN, 2011). Posteriormente se espera a que la muestra se enfrié o este a una temperatura manejable. Se pesa la muestra para obtener la humedad del árido utilizando la siguiente ecuación:

$$P = \frac{100(W - D)}{D}$$

Donde:

P=contenido total de humedad evaporable de la muestra, porcentaje,

W=masa de la muestra original, gramos,

D=masa de la muestra seca, gramos, (INEN, 2011).

La humedad es de suma importancia para el diseño de hormigón ya que puede afectar de manera significativa la cantidad de agua que se necesita agregar a la mezcla. Si los áridos están con humedad baja estos pueden absorber gran cantidad de agua afectando así la mezcla y obteniendo una mezcla seca, caso contrario si están húmedos aumenta la cantidad de agua necesaria en la mezcla lo que debilita el hormigón y reduce su resistencia.

3.2.3. Granulometría

La granulometría es un ensayo que consiste en la medición del tamaño de partículas y determinar la distribución de cualquier material. Es un aspecto fundamental que se considera para el diseño del hormigón ya que influye directamente en la resistencia mecánica, trabajabilidad y durabilidad. El ensayo proporciona información que puede ayudar a mejorar la calidad y el comportamiento que puede influir en el hormigón. Para la distribución del tamaño se utilizan tamices que son establecidos por la norma NTE INEN 872, la misma que

establece los requisitos a cumplir y el procedimiento adecuado para realizar el ensayo, destinados para la granulometría de áridos utilizados en la elaboración del hormigón.

3.2.3.1. Análisis granulométrico del árido fino y módulo de finura

La norma NTE INEN 872 nos presenta los siguientes límites granulométricos para el árido fino:

Abertura del Tamiz		Porcentaje que pasa	
Número	(mm)	Límite mínimo	Límite máximo
3/8 "	9.5	100	100
#4	4.75	95	100
#8	2.36	80	100
#16	1.18	50	85
#30	600 μm	25	60
#50	300 μm	5	30
#100	150 μm	0	10

Tabla 6: Límites granulométricos árido fino, (INEN, ÁRIDOS PARA HORMIGÓN. REQUISITOS, 2011)

La sección 5.1.2.2 de la norma nos indica que el árido fino no debe tener más del 45% pasante en cualquier tamiz y retenido en el siguiente consecutivo, su módulo de finura no debe ser menor a 2.3 ni mayor que 3.1 (INEN, 2011).



Figura 4: Proceso de tamizado para el agregado fino.

Para este trabajo de titulación se siguió el procedimiento establecido por la norma NTE INEN 696. La cual consiste en el análisis granulométrico para árido fino y grueso. En la siguiente tabla se presentan los valores obtenidos por el ensayo, además, los límites granulométricos de la norma:

Tamiz (#)	3"	1 1/2"	3/4"	3/8"	4	8	16	30	50	100	200	TOTAL
Abertura (mm)	50.80	37.5	19.00	9.50	4.75	2.36	1.18	0.6	0.36	0.15	0.075	Fondo
Peso Ret. (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	1.03	23	58.48	117.16	187.21	71.03	35.62	6.96
Peso Ret Acum	0.00	0.00	0.00	0.00	1.03	24.03	82.51	199.67	386.88	457.91	493.53	500.49
% Retenido	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	4.60	11.68	23.41	37.41	14.19	7.12	1.39
% Ret Acum	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	4.80	16.49	39.89	77.30	91.49	98.61	100.00
P. Pasa Ac (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	499.46	476.46	417.98	300.82	113.61	42.58	6.96	0.00
% Pasa	100.00	100.00	100.00	100.00	99.79	95.20	83.51	60.11	22.70	8.51	1.39	0.00
Limite Superior	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	85.00	60.00	30.00	10.00	0.00	0.00
Límite Inferior	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	95.00	80.00	50.00	25.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 7: Análisis granulométrico del árido fino y límites obtenidos por la norma NTE INEN 872

La norma nos indica que para el árido fino, el tamaño de la muestra luego de su secado es como mínimo de 300 gr, por lo que se realizó este ensayo con una muestra de 500gr.

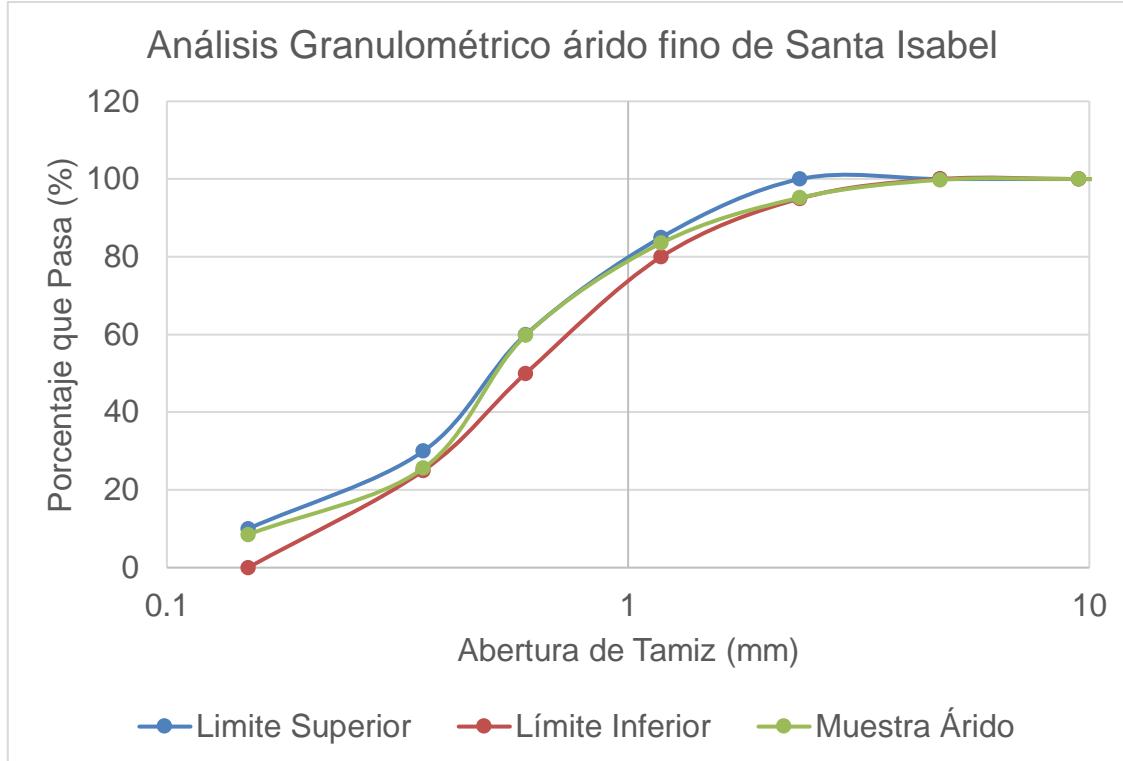


Figura 5: Curva Granulométrica árido fino. Material procedente de Santa Isabel

En la figura 5, se puede observar que la granulometría está dentro de los límites permitidos por la norma NTE INEN 872, con lo que se concluye que cumple con los requerimientos establecidos. El módulo de finura también se menciona también en la norma NTE INEN 872, la misma que nos indica que debe tener un valor entre 2.3 a 3.1, obteniendo en el ensayo un valor de 2.3 cumpliendo también con los requerimientos establecidos.

3.2.3.2. Análisis granulométrico del árido grueso y módulo de finura

Para este trabajo de titulación se utilizaron dos tipos de áridos gruesos de diferente procedencia (Santa Isabel y Paute), por lo que se tiene dos análisis granulométricos distintos.

Los requerimientos del árido grueso están en función del tamaño máximo nominal del árido. En la empresa se utiliza un tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ " que equivale a 19.0 mm, la norma NTE INEN 872, nos presenta los siguientes límites:

Abertura del Tamiz		Porcentaje que pasa	
Número	(mm)	Límite mínimo	Límite máximo
1"	25.4	100	100
$\frac{3}{4}$ "	19	95	90
$\frac{1}{2}$ "	12.5	-	-
$\frac{3}{8}$ "	9.5	55	20
#4	4.75	10	0
#8	2.36	5	0

Tabla 8: Límites granulométricos árido grueso, (INEN, ÁRIDOS PARA HORMIGÓN. REQUISITOS, 2011)

La norma NTE INEN 696, nos indica que el tamaño de la muestra está en función del tamaño máximo nominal del árido grueso, como se puede observar en la tabla que se presenta a continuación:

Tamaño Máximo Nominal (mm)	Tamaño mínimo de la muestra (kg)
9.5	1
12.5	2
19.0	5
25.0	10
37.5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300

Tabla 9: Tamaño mínimo de la muestra para árido grueso. (INEN, ÁRIDOS. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS, FINO y GRUESO, 2011)

Para el análisis correspondiente a este trabajo de titulación los tipos de áridos gruesos utilizados tienen un tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ " por lo que se necesita un mínimo de 5 kg, para encontrar su distribución granulométrica.



Figura 6: Proceso de tamizado del árido grueso.

3.2.3.2.1. Árido grueso de Santa Isabel

En la siguiente tabla se presenta el análisis granulométrico del árido grueso para el material proveniente de Santa Isabel, donde también se obtuvo el módulo de finura, se muestra los límites para el árido y la norma NTE INEN 872 no especifica requerimientos para el módulo de finura del árido grueso.

Tamaño tamiz (mm)	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	#4	#8	Fondo
Tamiz	37.50	25.00	19.00	12.50	9.50	4.75	2.36	
Peso Retenido (kg)	0.00	0.00	0.14	2.20	1.52	1.11	0.02	0.02
Peso Ret Acum	0.00	0.00	0.14	2.34	3.86	4.96	4.981	5.00
%Retenido	0.00	0.00	2.80	43.90	30.34	22.10	0.40	0.46
%Ret Acum	0.00	0.00	2.80	46.70	77.04	99.14	99.54	100.00
Peso que Pasa (kg)	5.00	5.00	4.86	2.67	1.15	0.04	0.02	0.00
% Pasa	100.00	100.00	97.20	53.30	22.96	0.86	0.46	0.00
Limite Superior	100.00	100.00	100.00	-	55.00	10.00	5.00	0.00
Límite Inferior	100.00	100.00	90.00	-	20.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 10: Análisis granulométrico del árido grueso de Santa Isabel y límites obtenidos por la norma

El módulo de finura obtenido durante el ensayo realizado es de 6.79, como la norma no indica ningún requisito para este factor se le considera correcto.

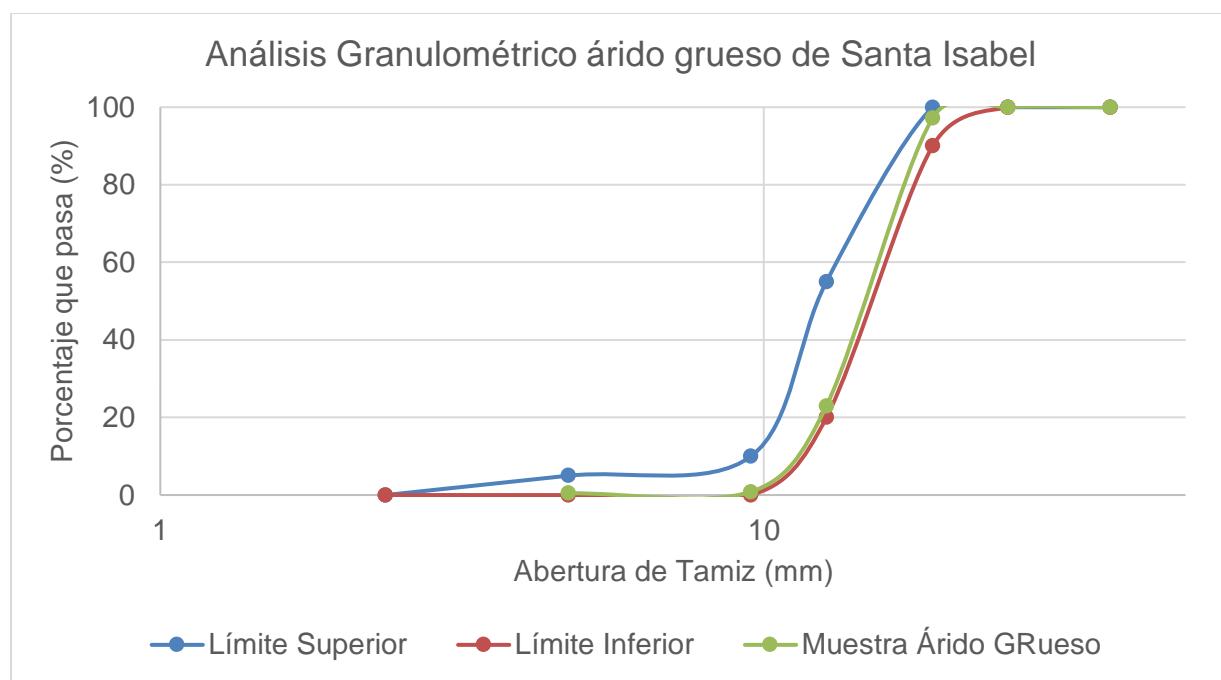


Figura 7: Curva Granulométrica árido grueso. Material procedente de Santa Isabel

Como se puede observar tanto en la tabla y figura mostradas anteriormente, la distribución granulométrica obtenida para el árido grueso proveniente de Santa Isabel se encuentra dentro de los requisitos establecidos por la norma INEN 872.

3.2.3.2.2. Árido grueso de Paute

Para el caso del árido grueso proveniente de Paute, el análisis granulométrico se presenta a continuación en la siguiente tabla, además también se incluye los requisitos establecidos por la norma INEN 872:

Tamaño Tamiz (mm)	1.5	1.00	0.75	0.50	0.38	#4	#8	Fondo
Tamiz	37.50	25.40	19.05	12.70	9.53	4.75	2.36	
Peso Retenido (kg)	0.00	0.00	0.18	2.14	1.45	1.20	0.01	0.03
Peso Ret Acum	0.00	0.00	0.18	2.32	3.77	4.97	4.98	5.00
%Retenido	0.00	0.00	3.60	42.83	29.00	23.89	0.14	0.54
%Ret Acum	0.00	0.00	3.60	46.43	75.43	99.32	99.46	100.00
Peso que Pasa (kg)	5.00	5.00	4.82	2.68	1.23	0.03	0.03	0.00
% Pasa	100.00	100.00	97.2	53.30	22.96	0.86	0.54	0.00
Límite Superior	100.00	100.00	100.00	-	55.00	10.00	5.00	0.00
Límite Inferior	100.00	100.00	90.00	-	20.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 11: Análisis granulométrico del árido grueso de Paute y límites obtenidos por la norma

El módulo de finura para el árido grueso proveniente de paute tiene un valor de 6.784, como ya se mencionó anteriormente la norma no indica requisitos para este.

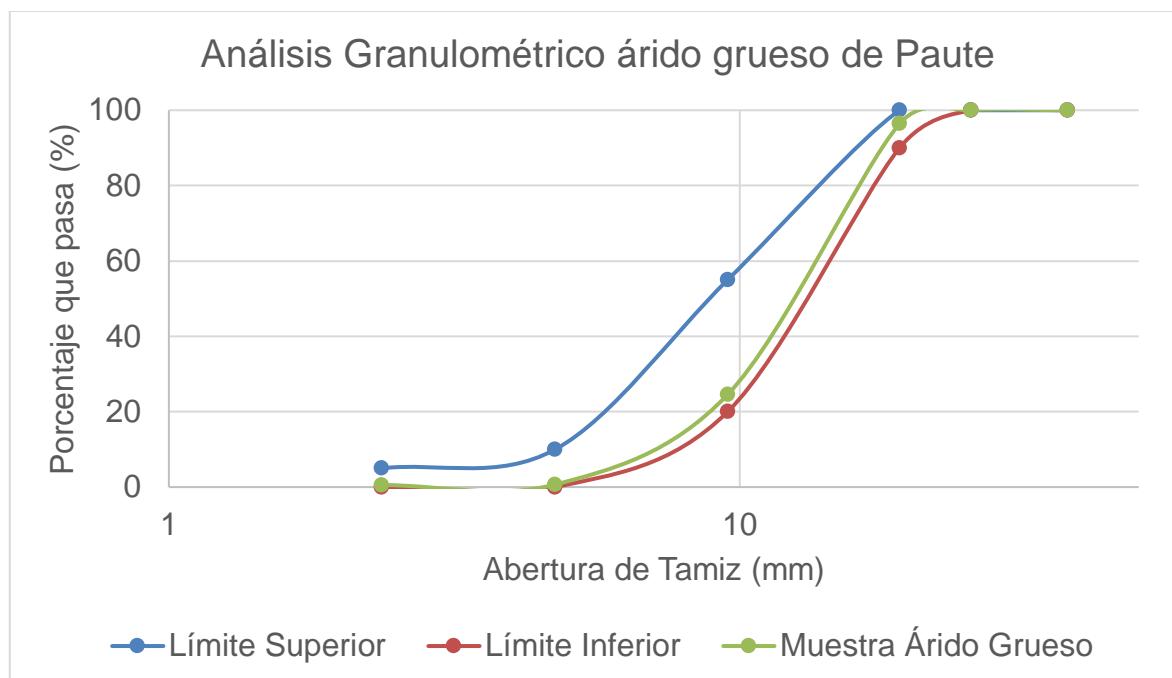


Figura 8: Curva Granulométrica árido grueso. Material procedente de Paute

En la figura 8, se puede concluir que la distribución del árido grueso proveniente de Paute cumple con los límites establecidos por la norma NTE INEN 872.

3.2.4. Absorción y Gravedad Específica

Un factor crítico para el diseño de hormigón es la absorción, ya que nos permite determinar la cantidad necesaria de agua para realizar la mezcla. Hace referencia a la cantidad de agua que el árido puede absorber durante la preparación del hormigón. La gravedad específica es una medida que relaciona la densidad del árido con la densidad del agua, esta medida puede afectar a la cantidad de cemento que se puede utilizar en la elaboración de la mezcla. Dependiendo de la gravedad específica se puede optimizar la cantidad correcta del cemento en el diseño del hormigón.

*Figura 9: Balanza*

3.2.4.1. Absorción y Gravedad Específica Árido fino

Para la obtención de la absorción y gravedad específica del árido fino se utilizó la norma NTE INEN 856, para dar inicio con el ensayo se debe obtener la muestra según la norma NTE INEN 2566 que consiste en la reducción de muestras a tamaño de ensayo. Se continua con la preparación de la muestra se basa en dejarle secar a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta que se obtenga masa constante y que el material se enfrie hasta que sea posible su manipulación, para luego sumergir la muestra en agua hasta obtener por lo menos una humedad del 6% y dejar reposar durante 24 horas. Una vez realizado este proceso se procede a eliminar el exceso de agua evitando perder material fino, para luego secar hasta un punto en el que solo se elimine el agua superficial de las partículas del árido fino (INEN, 2010).

Se necesita que la muestra preparada este en la condición saturada superficialmente seca, esto se puede lograr tendiendo el material sobre una superficie lisa que este expuesta a una corriente de aire caliente, se debe conseguir un secado homogéneo. Se debe comprobar que el material este en la condición deseada, para esto se procede de la siguiente manera “se coloca un molde metálico, con forma de cono truncado, sobre una superficie lisa con el diámetro mayor hacia abajo, se distribuye la muestra en forma suelta y se compacta con 25 golpes a una elevación aproximada de 5 mm sobre la superficie del árido, se deja caer libremente el compactador para que influya la atracción de la gravedad en cada golpe. Se levanta el molde y si el árido fino se desmorona ligeramente esto indica que se ha alcanzado la condición deseada, pero si la muestra conserva la forma del molde implica que la humedad superficial se encuentra presente en el material” (INEN, 2010).



Figura 10: Compactación del árido fino para el estado SSS

Cuando la muestra ya está en las condiciones deseadas se puede continuar con el proceso de la obtención de la absorción y la gravedad del árido fino. Para esto existen dos procesos para realizar estos ensayos, los que consisten en el procedimiento gravimétrico (picnómetro) y el procedimiento volumétrico (frasco de Le Chatelier). Para este trabajo de titulación se utilizó el método gravimétrico.

La norma INEN NTE 856 nos indica que se debe llenar parcialmente el picnómetro con agua e introducimos una muestra en estado superficialmente seco de 500 gramos ± 10 gr, luego se completamente con agua hasta tener un 90% de su capacidad. Para el siguiente paso existen dos maneras en las que se puede realizar la agitación del picnómetro con el fin de eliminar las burbujas visibles de aire. Primero es de forma manual que consiste en hacer rodar, invertir y agitar el picnómetro, el segundo es de forma mecánica que se utiliza una vibración externa, en este trabajo se lo realizó de forma manual. Seguidamente se debe ajustar la temperatura del picnómetro a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y se ajusta el nivel de agua hasta la marca de calibración del recipiente, se determina su masa. Se retira el árido fino del picnómetro, y se lo pone a secar a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener masa constante, se obtiene su masa. Para concluir con el proceso se debe determinar la masa del picnómetro lleno con agua a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ (INEN, 2010).

Según la norma INEN NTE 856, se utilizan las siguientes ecuaciones para la obtención de las densidades relativas y densidades, se emplean las ecuaciones del método gravimétrico, a continuación, se presenta la simbología manejada para los cálculos:

A: masa de la muestra seca al horno (gramos)

B: masa del picnómetro lleno con agua, hasta la marca de calibración (gramos)

C: masa del picnómetro lleno con la muestra y agua hasta la marca de calibración (gramos)

S: masa de muestra saturado superficialmente seca (gramos)

Densidad relativa (gravedad específica):

- Densidad relativa (SH): la densidad relativa de la muestra en condición seca al horno.

$$Densidad\ relativa\ (gravedad\ específica)\ (SH) = \frac{A}{(B + S - C)}$$

- Densidad relativa (SSS): obtención de la densidad del árido en condición saturada superficialmente seca.

$$Densidad\ relativa\ (gravedad\ específica)\ (SSS) = \frac{S}{(B + S - C)}$$

- Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente): cálculo de la gravedad específica aparente.

$$Densidad\ relativa\ aparente\ (gravedad\ específica\ aparente) = \frac{A}{(B + A - C)}$$

Densidad:

- Densidad (SH): densidad del árido en condición de seco al horno.

$$Densidad\ (SH)\ \left(\frac{kg}{m^3}\right) = \frac{997.5 * A}{(B + S - C)}$$

- Densidad (SSS): cálculo de la densidad en condición saturada superficialmente seca.

$$Densidad\ (SSS)\ \left(\frac{kg}{m^3}\right) = \frac{997.5 * S}{(B + S - C)}$$

- Densidad aparente: cálculo de la densidad aparente.

$$Densidad\ (SSS)\ \left(\frac{kg}{m^3}\right) = \frac{997.5 * S}{(B + A - C)}$$

Absorción: se calcula el porcentaje de absorción de la siguiente manera.

$$Absorción,\ % = \frac{(S - A)}{A} * 100$$

En la siguiente tabla se presentan las densidades y las gravedades específicas obtenidas durante la realización del ensayo:

Descripción	Valor
Densidad relativa (gravedad específica) (SH):	2.51
Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)	2.56
Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente):	2.64
Densidad (SH)(kg/m³):	2501.84
Densidad (SSS)(kg/m³):	2552.37
Densidad Aparente(kg/m³):	2635.34
Absorción (Abs) (%):	2.02

Tabla 12: Densidad, gravedad específica y absorción del árido fino procedente de Santa Isabel

3.2.4.2. Absorción y Gravedad Específica Árido Grueso

La norma NTE INEN 857 señala cómo efectuar el ensayo para obtener la absorción y la gravedad específica de los áridos gruesos, como primer paso se debe realizar la preparación de la mezcla, la norma indica que se debe rechazar todo el material que pase por el tamiz #4 mediante tamizado seco. También muestra que la cantidad mínima para el ensayo depende del tamaño máximo nominal, para este trabajo de titulación los dos tipos de áridos gruesos con los que se trabajan tienen el mismo tamaño máximo nominal, por lo que según la tabla 1 de la sección 5.3 que hace referencia al muestreo la masa mínima es de 3 kg. Consecuentemente se deja en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener masa constante, se deja enfriar para luego sumergir el árido en agua durante 24 horas aproximadamente (INEN, 2010).

Una vez finalizado el proceso de preparación se puede continuar con el ensayo, que consiste en eliminar toda la lámina visible de agua con la ayuda de un paño absorbente o toalla frotando hasta obtener la condición deseada. Se debe evitar la evaporación de agua desde los poros durante el proceso de secado superficial, determina su masa en esta condición. Inmediatamente se coloca la muestra en el recipiente para sumergir y determinar su masa aparente en agua a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Culminado esto se seca en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta conseguir una masa constante, se enfriá la muestra y se obtiene su masa (INEN, 2010).

La norma INEN NTE 857 nos presenta las siguientes ecuaciones, las mismas que son utilizadas para el cálculo de absorción y gravedad específica del árido grueso.

Las ecuaciones utilizan una misma simbología, a continuación, se muestra la utilizada:

A: masa en el aire de la muestra seca al horno (gramos)

B: masa en el aire de la muestra saturada superficialmente seca (gramos)

C: masa aparente en agua de la muestra saturada (gramos)

Densidad relativa (gravedad específica):

- Densidad relativa (SH): la densidad relativa en condición seca al horno.

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica)}(SH) = \frac{A}{(B - C)}$$

- Densidad relativa (SSS): la densidad relativa en condición saturada superficialmente seca.

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica)}(SSS) = \frac{B}{(B - C)}$$

- Densidad relativa aparente:

$$\text{Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)} = \frac{A}{(A - C)}$$

Densidad:

- Densidad (SH): densidad del árido en condición seca al horno.

$$\text{Densidad (SH)} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{997.5 * A}{(B - C)}$$

- Densidad (SSS): densidad del árido en condición saturada superficialmente seca.

$$\text{Densidad (SSS)} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{997.5 * B}{(B - C)}$$

- Densidad aparente:

$$\text{Densidad Aparente} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{997.5 * A}{(A - C)}$$

Consecuentemente, se presentan los datos obtenidos durante la realización del ensayo, tanto como para el árido grueso de Santa Isabel como para el de Paute.

En la siguiente tabla se presentan los valores del árido grueso proveniente de Santa Isabel:

Descripción	Valor
Densidad relativa (gravedad específica condiciones secas) (SH):	2.53
Densidad relativa (gravedad específica) (SSS):	2.60
Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente) (SSS):	2.71

Densidad (SH)(kg/m3):	2521.75
Densidad (SSS)(kg/m3):	2588.25
Densidad Aparente	2701.88
Absorción (%):	2.64

Tabla 13: Densidad, gravedad específica y absorción del árido grueso procedente de Santa Isabel.

En la siguiente tabla se presentan los valores del árido grueso proveniente de Paute:

Descripción	Valor
Densidad relativa (gravedad específica condiciones secas) (SH):	2.51
Densidad relativa (gravedad específica) (SSS):	2.56
Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente) (SSS):	2.64
Densidad (SH)(kg/m3):	2498.27
Densidad (SSS)(kg/m3):	2550.90
Densidad Aparente	2637.43
Absorción (%):	2.11

Tabla 14: Densidad, gravedad específica y absorción del árido grueso procedente de Paute.

3.2.5. Peso Volumétrico

Una propiedad importante que se considera para el diseño del hormigón es el peso volumétrico, que hace referencia a la masa de unidad de volumen. Es una característica que afecta en varios aspectos al hormigón como: la resistencia debido a que los áridos más densos y pesados contribuyen a una mayor resistencia a la compresión, también influye en la trabajabilidad los áridos livianos facilitan la fluidez, el manejo y colocación del hormigón. De igual manera influye en la proporción de la mezcla, al tener en cuenta esta característica de material se puede determinar la cantidad necesaria para un volumen específico, la densidad del hormigón endurecido una mezcla que se realiza con áridos de mayor peso volumétrico ofrece mayor resistencia.

Este ensayo para la obtención del peso volumétrico de áridos tanto fino como grueso esta descrito en la norma NTE INEN 858. Como paso inicial se realiza la preparación de la muestra, que consiste en secar el material en un horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener masa constante, el tamaño de la muestra se debe aproximar a un 125% a 200% respecto a la cantidad necesaria para llenar el molde. El tamaño del molde depende del tamaño máximo del árido como se puede apreciar en la siguiente tabla:

Capacidad de los Moldes

Tamaño máximo nominal del árido (mm)	Capacidad nominal del molde (m ³) (litros)
12.5	0.0028(2.8)
25	0.0093(9.3)
37.5	0.014(14)
75	0.028(28)
100	0.070(70)
125	0.100(100)

Tabla 15: Capacidad del molde según el tamaño máximo nominal del árido (INEN, 2010)

Se recomienda realizar la calibración del molde, para ajustar los cálculos en función de su volumen real.



Figura 11: Calibración del molde.

La norma NTE INEN 858 indica que existen tres maneras de realizar determinar la masa unitaria del árido, ya sea compactada (procedimiento de varillado para áridos con un tamaño máximo nominal de 37.5 mm o menor, o por el procedimiento de sacudidas para áridos con un tamaño máximo nominal superior a 37.5 mm y que no excedan los 125 mm) o suelta (procedimiento por paladas):

- Por varillado: se divide el molde en tres capas se llena cada capa y se nivela con los dedos, se compacta con 25 golpes distribuidos uniformemente sobre la superficie utilizando la varilla de compactación, se realiza este proceso para todas las capas. Para la primera capa no se debe permitir que la varilla golpee el fondo del molde, para las siguientes capas se debe evitar que la varilla penetre la capa anterior del árido. Una vez culminado el paso anterior, se procede con la nivelación de la superficie del

árido con la ayuda de un enrasador o con los dedos en caso de ser árido grueso. Para los áridos gruesos se debe nivelar de tal manera que se equilibren los vacíos de la superficie. Se determina la masa del molde con el material.



Figura 12: Procedimiento por varillado. (Masa Unitaria compactada)

- Por Sacudidas: se divide en tres capas el molde y se lo coloca sobre una base firme, después de llenar una capa se levante el molde a unos 50 mm y se deja caer de tal manera que el golpe sea seco y fuerte, se realiza este proceso 50 veces para cada capa. Luego se nivela la superficie con un enrasador o con la ayuda de los dedos. Para el árido grueso se equilibra los vacíos mayores sobre la superficie con los menores por debajo de la parte superior del molde. Determina la masa del molde con el material.
- Por paladas: se descarga el material a una altura de 50 mm por el encima de la parte superior del molde con la ayuda de un cucharón o pala, se debe evitar la segregación del material o compactación. Se realiza este proceso hasta llenar el molde. se nivela la superficie con un enrasador o con la ayuda de los dedos. Para el árido grueso se equilibra los vacíos mayores sobre la superficie con los menores por debajo de la parte superior del molde. Determina la masa del molde con el material.



Figura 13: Procedimiento por paladas. (Masa Unitaria Suelta)

La simbología utilizada para determinar el valor del peso volumétrico es la que se muestra a continuación:

M: masa unitaria (peso volumétrico) del árido (kg/m^3)

G: masa del árido más el molde (kg)

T: masa del molde (kg)

V: volumen del molde (m^3)

F: factor del molde ($1/\text{m}^3$)

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de la masa unitaria son dos y se presentan a continuación:

$$M = \frac{(G - T)}{V}$$

$$M = (G - T) * F$$

Cuando se realiza la calibración del molde se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$V = \frac{(W - M)}{D}$$

$$M = D/(W - M)$$

Donde:

V: volumen del molde (m^3)

W: masa del agua, placa de vidrio y molde (kg)

M: masa de la placa de vidrio y molde (kg)

D: densidad del agua para la temperatura de medición (kg/m^3)

F: factor del molde ($1/\text{m}^3$)

En la siguiente tabla se presenta la masa unitaria suelta y compactada del árido fino proveniente de Santa Isabel:

Descripción	Valor
Masa Unitaria (peso volumétrico) Suelta (kg/m^3)	1253.93

Masa Unitaria (peso volumétrico) Compactada (kg/m³)	1454.61
---	---------

Tabla 16. Masa unitaria suelta y compactada del árido fino proveniente de Santa Isabel

Los resultados obtenidos del ensayo de masa unitaria de los áridos gruesos se presentan a continuación:

Árido proveniente de Santa Isabel:

Descripción	Valor
Masa Unitaria (peso volumétrico) Suelta (kg/m³)	1276.04
Masa Unitaria (peso volumétrico) Compactada (kg/m³)	1436.11

Tabla 17. Masa unitaria suelta y compactada del árido grueso proveniente de Santa Isabel

Árido proveniente de Paute:

Descripción	Valor
Masa Unitaria (peso volumétrico) Suelta (kg/m³)	1290.83
Masa Unitaria (peso volumétrico) Compactada (kg/m³)	1451.36

Tabla 18. Masa unitaria suelta y compactada del árido grueso proveniente de Paute

4. Metodología

El diseño del hormigón es un proceso esencial en la construcción de infraestructuras, puentes, edificios, y demás estructuras, dicho proceso involucra crear y especificar la proporción adecuada de cemento, agregados, agua y aditivos para producir un material con una resistencia y durabilidad adecuada. Además, de conseguir la dosificación precisa de los componentes del concreto, es importante minimizar los costos de producción sin alterar las propiedades físicas que evalúan la calidad del hormigón.

El hormigón en estado fresco debe ser de consistencia plástica ($4 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ en asentamiento), esto es especificado por la empresa, dicho esto, con este asentamiento la mezcla no es entregada a la obra civil, sino después mediante aditivos se obtiene una consistencia fluida (14 cm a 17 cm), de esta manera se garantiza su correcta colocación y compactación en obra. Por otra parte, en estado endurecido se debe verificar su resistencia y durabilidad en las edades correspondientes. En este capítulo se especifican los pasos a seguir para realizar el diseño de la mezcla y obtener de manera correcta la dosificación del hormigón, los métodos utilizados son el método ACI 211.1 y la curva de Fuller, de este modo, obtener un diseño final para las resistencias de 210 kg/cm², 240 kg/cm², 280 kg/cm², 300 kg/cm² y 320 kg/cm².

4.1. Diseño del Hormigón

El proceso de diseño analiza las propiedades y el rendimiento de la materia prima, así como las condiciones de exposición y cargas a las que será sometida la mezcla. También se evalúan aspectos como la trabajabilidad, segregación, la resistencia a la compresión y durabilidad de largo plazo.

El diseño de hormigón se puede realizar por varios métodos, estos pueden ser: dosificación tradicional basado en experiencias empíricas, o por el método de diseño de mezcla que utiliza estándares más científicos y pruebas de laboratorio para lograr una mezcla óptima.

4.1.1. METODO ACI 211

La normativa ACI 211.1, proporciona pautas o pasos a seguir para diseñar una mezcla de hormigón adecuada para una aplicación específica. Esta norma determina la proporción de los materiales para la elaboración de la mezcla, tomando en cuenta factores como: los requisitos del proyecto (exposición ambiental, años de durabilidad, aplicación en obra, etc), determinación de la resistencia requerida, selección del tipo de cemento, cantidad de cemento a utilizar, establecer el tamaño máximo del agregado, cálculo de las proporciones de cada

tipo de agregado, ajuste de la relación agua/cemento, verificación de las proporciones y características de la mezcla y ajustes finales en base a sus especificaciones. Los pasos que se deben seguir se detallan a continuación:

4.1.1.1. Selección del asentamiento (paso 1)

El asentamiento está relacionado directamente con la trabajabilidad del hormigón. El valor elegido depende del tipo de estructura a construir, así como, de su colocación y compactación en obra. Se debe tener en cuenta un asentamiento inicial, ya que en la mayoría de los casos el hormigón requiere transporte durante un determinado tiempo, ocasionando un fraguado parcial del concreto y modificando su trabajabilidad en obra. Otro aspecto por considerar es el tipo de vertido del hormigón en la infraestructura (directo o bombeado), según la norma ACI 211 recomienda los siguientes valores:

Tipo de construcción	Revenimiento (cm)	
	Máximo	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas reforzadas	7.5	2.5
Muros de subestructuras, cajones y zapatas sin refuerzo	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados	10.0	2.5
Columnas de edificios	10.0	2.5
Losas y pavimentos	7.5	2.5
Concreto masivo	7.5	2.5

Tabla 19. Valores de asentamiento recomendados por el ACI

Sin embargo, por métodos de ensayo realizados por la empresa se ha obtenido un rango de valores de asentamiento de $4 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ para el diseño óptimo, ya que al usar una cantidad normalizada de aditivo plastificante se ha demostrado que el hormigón cumple con los requisitos de obra.

4.1.1.2. Selección del tamaño máximo de agregado (paso 2)

El tamaño máximo del agregado puede variar dependiendo de la aplicación y las especificaciones del proyecto, este no debe exceder de un quinto del espesor mínimo de la estructura de hormigón a construir, un tercio del espesor de las losas y tres cuartos del espacio libre mínimo entre varillas de refuerzo individuales.

Si el tamaño máximo de los agregados en una mezcla de concreto se aumenta (para un mismo asentamiento), los contenidos de cemento y agua disminuirán. Por lo tanto, el tamaño

máximo del agregado deberá ser el mayor económicamente disponible y compatible con las dimensiones de la estructura (Sanchez De Guzmán, 2001).

En el presente trabajo se utiliza como tamaño máximo nominal el valor de $\frac{3}{4}$ ", esto se debe a que la empresa Hormi Center tiene establecido dicho valor para todos sus diseños y obras de construcción.

4.1.1.3. Cálculo de agua de mezclado y contenido de aire (paso 3)

Durante el proceso de mezclado se produce aire natural atrapado en el concreto, en ciertos casos que el hormigón lo requiera se puede agregar aditivos que incrementan el contenido de aire, sin embargo, para la presente investigación la norma ACI y varios autores como Sánchez de Guzmán han determinado un porcentaje de aire del 2% del volumen total para mezclas que no utilizan aditivos.

De igual manera la normativa recomienda valores para la cantidad de agua de mezclado por metro cúbico de hormigón, estas cifras vienen dadas en función del tamaño máximo nominal del agregado y del asentamiento determinado en pasos anteriores. Cabe recalcar que estos valores son de referencia, ya que, la cantidad final de agua de mezclado debe ajustarse por humedad y absorción de los agregados, sin embargo, es un excelente punto de partida para el proyecto.

Revenimiento (cm)	Cantidad de agua en kg/m ³ de concreto para los tamaños máximos nominales de agregado
TMN: $\frac{3}{4}$ " (19 mm)	
2.5 a 5.0	190
7.5 a 10.0	205
15.0 a 17.5	216
Cantidad aproximada de aire atrapado en el concreto sin aire incluido, %	2

Tabla 20. Cantidad de agua en kg/m³ de concreto recomendado por el ACI 211

La tabla 20 indica la cantidad recomendada de agua en el concreto, considerando el tamaño máximo nominal del agregado y el asentamiento del hormigón en estado fresco, sin embargo, este valor de agua debe ser ajustado hasta obtener el asentamiento requerido mediante el método de prueba y error en las mezclas de concreto.

Para el tamaño del agregado de $\frac{3}{4}$ " y el asentamiento de 4 centímetros, la cantidad que se recomienda es de 205 kg de agua por m^3 de hormigón. Este valor es el punto inicial para la mezcla; dicho valor debe ser modificado para cada una de las combinaciones de áridos ocupados (Santa Isabel-Santa Isabel, Santa Isabel y Paute).

4.1.1.4. Selección de la relación agua – cemento “A/C” (paso 4)

La relación agua/cemento se refiere a la proporción entre la cantidad de agua utilizada y la cantidad de cemento en la mezcla. Un factor fundamental para evaluar la calidad del concreto es la resistencia a la compresión y se debe tener en cuenta que un menor contenido de agua puede aumentar la resistencia, pero disminuye la trabajabilidad, por ello, la selección de esta relación optimiza el rendimiento y la durabilidad de la estructura final.

En el presente trabajo de investigación, se realizó los ensayos variando la relación A/C, a fin de conseguir puntos significativos de resistencia a la compresión por cada A/C escogida. Sin embargo, esta la relación A/C debe estar en el rango de comercialización de la empresa, la cual no elabora hormigones para estructuras que están expuestas a erosión por agua. En la siguiente tabla se indican valores para este tipo de exposiciones, por lo tanto, los ensayos tendrán un mínimo valor de relación A/C de 0.45.

Tipo de estructura	Condiciones de exposición	
	Exposición a sulfatos o agua de mar	Exposición continua a humedad, sometida a hielo-deshielo
Secciones delgadas	0.45	0.40
Otras estructuras	0.50	0.45

Tabla 21. Relaciones agua/cemento por condiciones de exposición

Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm^2)	Relación Agua - Cemento	
	Sánchez de Guzmán	Tabla 6.3.4 ACI 211.1
140	0.72	0.82
175	0.65	-
210	0.58	0.68
245	0.53	-
280	0.48	0.57
315	0.44	-

350	0.40	0.48
420	-	0.41

Tabla 22. Valores de la relación agua/cemento recomendadas

La tabla 22 muestra valores que recomienda el ACI 211 y otro autor que realizó ensayos con cementos portland tipo I y materiales de origen colombiano, este método debe ser desarrollado para cada tipo de cemento y agregados con los que se trabaje. En el caso de la empresa Hormi Center, el objetivo es determinar una curva que facilite los diseños y acorte la desviación estándar de sus ensayos, obteniendo dosificaciones con una precisión mayor y minimización de costos.

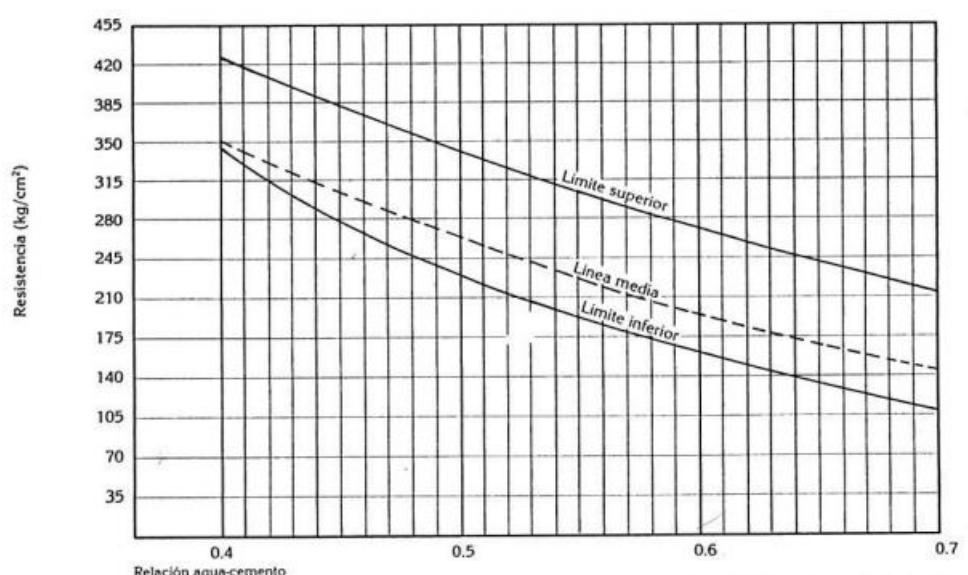


Figura 14. Curva relación A/C vs resistencia. Fuente: Tecnología del Hormigón

Como se muestra en la figura 14, esta es una curva de relación A/C vs resistencia, pero con agregados de diferente país, lo que se busca es conseguir una curva similar empleando materiales que utiliza la empresa Hormi Center, para las dos combinaciones posibles (combinación 1: arena de Santa Isabel y grava de Santa Isabel; combinación 2: arena de Santa Isabel y grava de Paute) y los tipos de cemento GU y HE de la marca ATENAS.

4.1.1.5. Cálculo del contenido de cemento (paso 5)

Para determinar la cantidad de cemento se utiliza la relación agua/cemento y la cantidad de agua, obtenido los pasos 3 y 4. Esta cantidad viene dada por metro cúbico de concreto, y se obtiene con la ecuación:

$$\text{Relación } \frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} = \frac{A}{C} = \frac{\text{Cantidad de agua (kg)}}{\text{Cantidad de cemento (kg)}}$$

$$\text{Cantidad de Cemento (kg)} = \frac{\text{Cantidad de agua (kg)}}{(A/C)}$$

Se consideran valores distintos para cada combinación de agregados, esto debido a las propiedades físicas de cada uno. Así como, relaciones diferentes para cada tipo de cemento. Estas dosificaciones iniciales son puntos representativos en la curva a obtenerse para cada relación agua/cemento, sin embargo, se debe tener en cuenta una cantidad de cemento mínimo para que dicha relación cumpla con los requisitos de resistencia y durabilidad.

4.1.1.6. Estimación de los porcentajes de agregados (paso 6)

La proporción de los agregados es fundamental en la dosificación del hormigón, estos influyen en la resistencia y el volumen final del concreto. En el diseño se considera la cantidad de cada agregado para que no provoque segregación u otra afección a la calidad del hormigón. Existen varios métodos para calcular el porcentaje de cada árido, entre los más comunes se encuentra el método ACI 211.1 que se basa en tablas definidas por los módulos de finura del agregado y otros métodos que consisten en conformar una granulometría conjunta del material, de manera que ajuste a una curva típica, ya sea Weymouth, Fuller o Thompson; se recomienda que sea ajustada a la curva de Fuller.

4.1.1.6.1. Método ACI 211.1

- Estimación del contenido de agregado grueso

El agregado grueso se utiliza en proporciones que van desde el 60% hasta el 75% del volumen total del hormigón. El método ACI propone un valor en función del módulo de finura de la arena y el tamaño máximo nominal de los agregados, para luego ser multiplicado por el peso unitario compactado del agregado grueso, de este modo se obtiene un porcentaje de árido grueso.

Las diferencias en la cantidad de mortero requerido para la trabajabilidad con diferentes agregados, debidas a distintas formas de la grava y diferencias en la granulometría, quedan compensadas por la diferencia en el contenido de vacíos, obtenido en la determinación del peso unitario compactado (Cáder & Oliva, 2012).

Tamaño máximo del agregado grueso	Módulo de finura de la arena (MF)			
	1	2	2.4	2.75

3/8"	0.63	0.54	0.5	0.45
------	------	------	-----	------

1/2"	0.69	0.61	0.57	0.53
3/4"	0.75	0.68	0.65	0.62
1"	0.78	0.72	0.69	0.66
1 1/2"	0.81	0.76	0.73	0.71
2"	0.83	0.79	0.76	0.74
3"	0.86	0.82	0.8	0.78
6"	0.91	0.87	0.86	0.84

Tabla 23. Coeficientes en función del módulo de finura y el TMN recomendado por el ACI

El módulo de finura del árido fino de procedencia de Santa Isabel es igual a 2.3 y para el tamaño máximo nominal de 3/4" se determina un coeficiente mediante interpolación dando como resultado el valor de 0.66.

Para determinar el peso del agregado grueso en kilogramos se utiliza la ecuación:

$$Mag = bo * Pag$$

Donde:

Mag: Masa del agregado grueso en kg por metro cúbico de hormigón

bo: Coeficiente obtenido de la tabla 22

Pag: Peso unitario seco compactado

Descripción	Valor
Módulo de finura del agregado fino	2.3
Peso unitario compactado del agregado grueso (kg/m³)	1436
Coeficiente bo	0.66
Peso del agregado grueso (kg) por metro m³ de concreto	944

Tabla 24. Peso del agregado grueso de Santa Isabel

Descripción	Valor
Módulo de finura del agregado fino	2.3
Peso unitario compactado del agregado grueso (kg/m³)	1451
Coeficiente bo	0.66

Peso del agregado grueso (kg) por metro m³ de concreto

954

Tabla 25. Peso del agregado grueso de Paute

Las tablas 24 y 25, son resultados de las proporciones de agregados que usan en la mezcla para cada combinación de Santa Isabel y Paute respectivamente, estos valores se obtuvieron mediante el método ACI 211.1, el cual considera el módulo de finura del agregado fino.

- Estimación del contenido de agregado fino

El agregado fino o arena se utiliza en proporciones que van desde el 25% hasta el 40% del volumen total de hormigón, el árido fino ayuda a llenar los vacíos entre las partículas más grandes, mejorando la trabajabilidad y la cohesión del hormigón.

El método para calcular la cantidad de agregado fino se basa en la siguiente ecuación:

$$Vaf = 1 - (Vw + Vag + Va + Vc)$$

Donde:

Vaf: Volumen de agregado fino por m³

Vw: Volumen de agua por m³

Vag: Volumen de agregado grueso por m³

Va: Volumen de aire atrapado (recomendado 2% del volumen total)

Vc: Volumen de cemento por m³

Con este valor de volumen se determina la masa que ocupa por metro cúbico de concreto en base al peso específico de cada material, mediante la ecuación:

$$Masa = Volumen * Densidad del material$$

4.1.1.6.2. Curva de Fuller

La curva de Fuller se realiza trazando un gráfico que muestra el tamaño de los agregados en el eje horizontal y el porcentaje acumulativo retenido en el tamiz en el eje vertical. Por lo general, se utilizan los tamices normalizados con diferentes aberturas para clasificar los agregados según su tamaño.

El objetivo principal de la parábola de Fuller es lograr una distribución óptima de tamaño de las partículas que propone una mezcla de hormigón densa y compacta. Lo que se busca es

obtener una curva que tenga una buena gradación de los agregados, evitando grandes brechas en la distribución de tamaño de las partículas.

La mezcla de los áridos busca adaptarse a la curva de Fuller que viene dada para el tamaño máximo nominal, en este caso D_{Fuller} es igual a 19 milímetros. Esta parábola se obtiene mediante la ecuación:

$$y = 100 * \sqrt{\frac{d}{D_{Fuller}}}$$

Donde:

y: % que pasa por cada tamiz

d: Tamaño de la abertura de los distintos tamices

D Fuller: Tamaño máximo Fuller del árido, siendo este el menor de los tamices que retiene menos del 15% en peso del total de árido

Para el caso analizado en este proyecto se tiene la curva de Fuller para un D Fuller igual a 19 milímetros.

Tamaño (mm)	Tamiz	Fuller
25.4	1"	100.00
19.05	3/4"	100.00
12.7	1/2"	81.65
9.525	3/8"	70.71
4.75	#4	49.93
2.36	#8	35.20
1.18	#16	24.89
0.6	#30	17.75
0.36	#50	13.75
0.15	#100	8.87
0.075	#200	6.27

Tabla 26. Parábola de Fuller

A continuación, se resuelve el siguiente sistema de ecuaciones para obtener los porcentajes de cada agregado:

$$a + G = 100$$

$$MGa * a + MGg * G = MG Fuller * (a + G)$$

Donde:

a: Porcentaje de agregado fino %

G: Porcentaje de agregado grueso %

MFa: Módulo de finura del agregado fino

MFg: Módulo de finura del agregado grueso

MF Fuller: Módulo de finura de la parábola de Fuller

Descripción	Valor
Módulo de finura del agregado fino (MFa)	2.3
Módulo de finura del agregado grueso (MFg)	6.79
Módulo de finura de la curva de Fuller para el tamaño de 3/4" (MF Fuller)	4.91
Porcentaje de árido fino (a) %	42
Porcentaje de árido grueso (G) %	58

Tabla 27. Porcentajes de agregados para la combinación 1, Santa Isabel - Santa Isabel

La granulometría de los áridos finos y gruesos, y su combinación se puede observar a continuación:

		Arena (a)	Grava (G)	
Tamaño	Tamiz	% Pasa	% Pasa	Mezcla
25.4	1	100.00	100.00	100.00
19.05	0.75	100.00	97.20	98.37
12.7	0.5	100.00	53.30	72.86
9.525	0.375	100.00	22.96	55.23
4.75	#4	99.79	0.86	42.30
2.36	#8	95.20	0.00	39.88
1.18	#16	83.51	0.00	34.98
0.6	#30	60.11	0.00	25.18
0.36	#50	22.70	0.00	9.51
0.15	#100	8.51	0.00	3.56
0.075	#200	1.39	0.00	0.58

Tabla 28. Granulometría de la combinación 1 (Santa Isabel - Santa Isabel)

En el siguiente grafico se puede observar la granulometría de los áridos finos y gruesos, de su combinación y de la curva de Fuller:

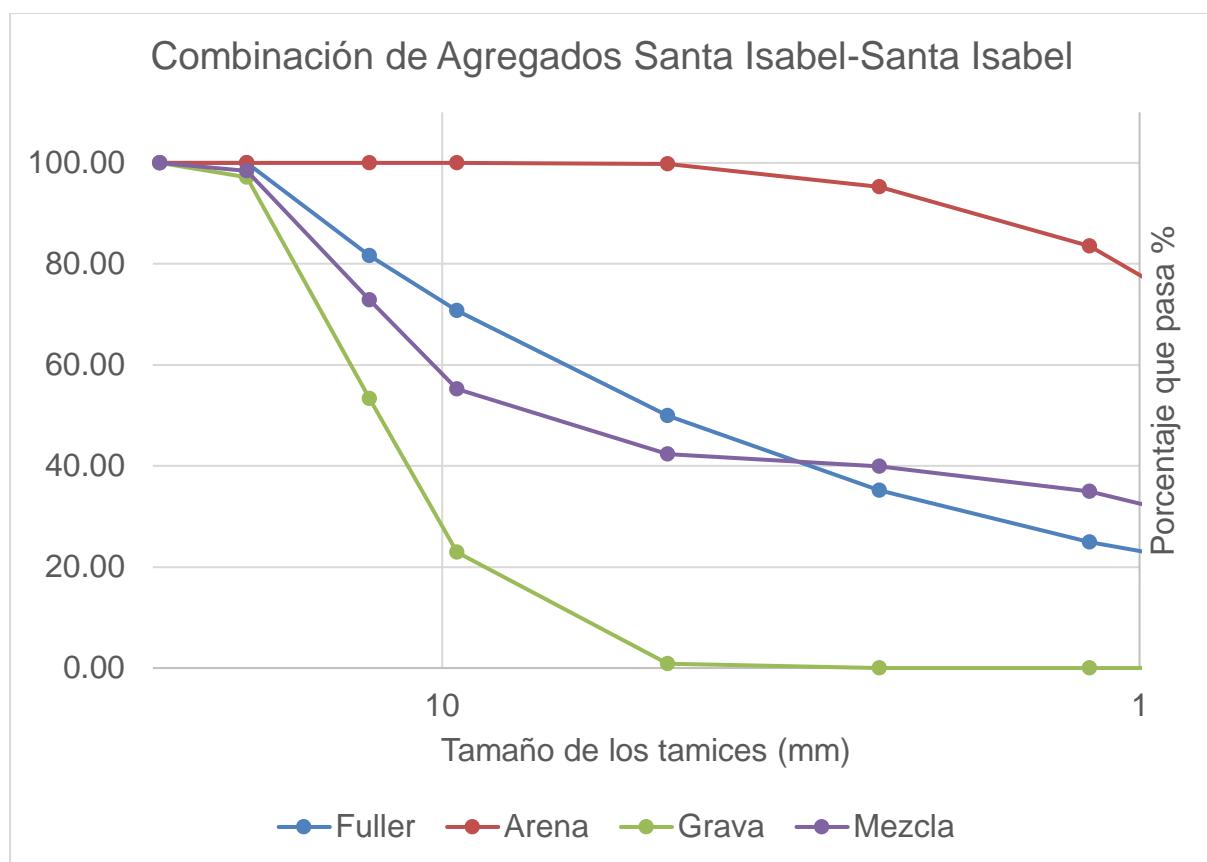


Figura 15. Ajuste de la mezcla de agregados para la combinación 1, Santa Isabel - Santa Isabel

A continuación, se presentan los valores obtenidos durante la caracterización de materiales, fundamentales para hallar el porcentaje de árido fino y grueso necesarios, procedentes Santa Isabel y Paute respectivamente.

Descripción	Valor
Módulo de finura del agregado fino (MFa)	2.3
Módulo de finura del agregado grueso (MFg)	6.79
Módulo de finura de la curva de Fuller para el tamaño de 3/4" (MF Fuller)	4.91
Porcentaje de árido fino (a) %	41
Porcentaje de árido grueso (G) %	58

Tabla 29. Porcentajes de agregados para la combinación Paute-Santa Isabel

En la siguiente tabla se puede observar la granulometría combinada y separada de los áridos finos y gruesos procedentes de Santa Isabel y Paute respectivamente:

Tamaño	Tamiz	Arena (a)	Grava (G)	Mezcla
		% Pasa	% Pasa	
25.4	1	100.00	100.00	100.00

19.05	0.75	100.00	97.20	98.37
12.7	0.5	100.00	53.30	72.82
9.525	0.375	100.00	22.96	55.17
4.75	#4	99.79	0.86	42.22
2.36	#8	95.20	0.00	39.80
1.18	#16	83.51	0.00	34.92
0.6	#30	60.11	0.00	25.13
0.36	#50	22.70	0.00	9.49
0.15	#100	8.51	0.00	3.56
0.075	#200	1.39	0.00	0.58

Tabla 30. Granulometría de la combinación Santa Isabel-Paute

El grafico a continuación, muestra el comportamiento que tienen los áridos finos, gruesos, su combinación con respecto a la curva de Fuller.

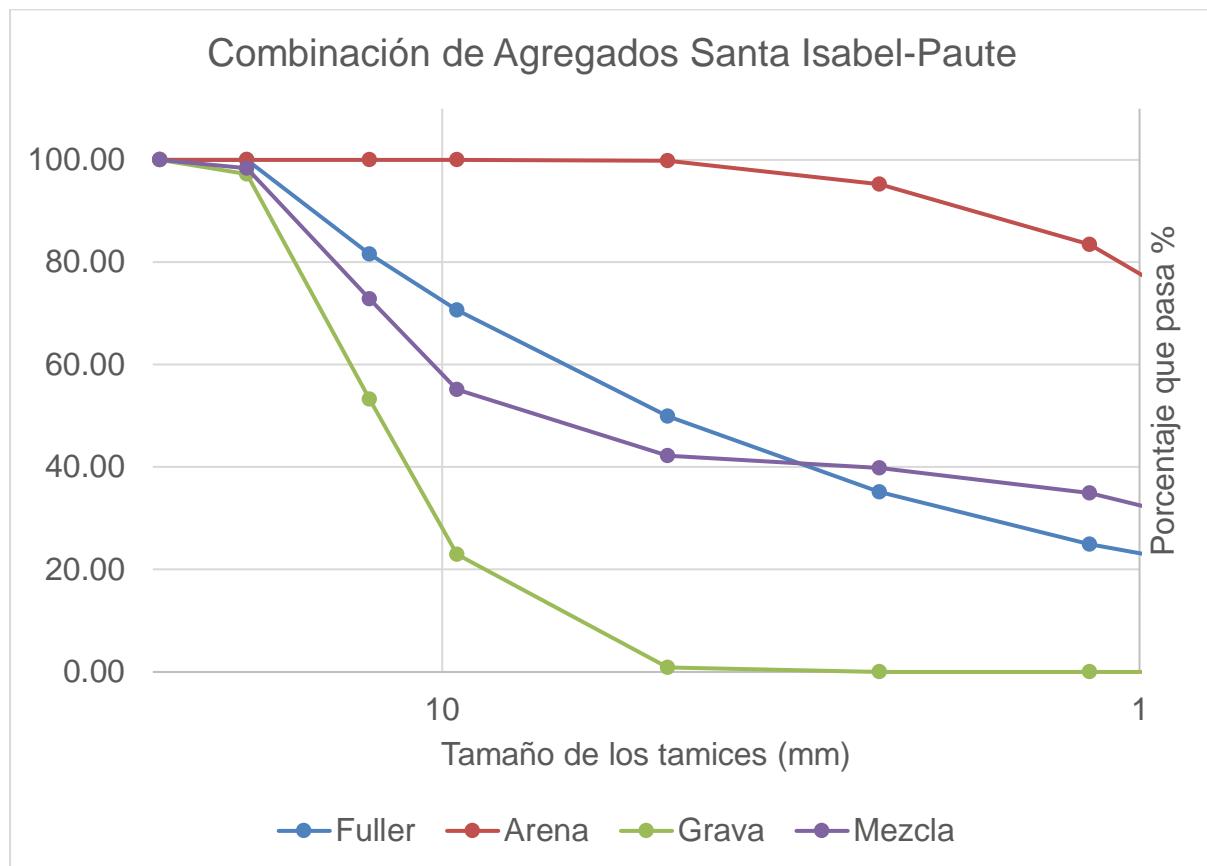


Figura 16. Ajuste de la mezcla de agregados para la combinación 2 (Santa Isabel - Paute)

Como se puede observar en la figura 16, la combinación de la granulometría de los agregados fino y grueso se aproxima a la curva de Fuller.

Para calcular el volumen absoluto de los agregados se ocupa la siguiente ecuación:

$$Vr = 1 - (Vw + Va + Vc)$$

Donde:

Vr: Volumen absoluto de los agregados

Vw: Volumen de agua

Va: Volumen de aire (2% del volumen total de concreto)

Vc: Volumen de cemento

Una vez obtenido el valor del volumen absoluto de los agregados se multiplica por el porcentaje de cada agregado, con la siguiente ecuación:

$$V_{\text{agregado fino}} = \% \text{ agregado fino} * V_r$$

$$V_{\text{agregado grueso}} = \% \text{ agregado grueso} * V_r$$

El peso de los agregados se determina en base al peso específico seco de cada material, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Masa agregado fino} = V_{\text{agregado fino}} * \text{Densidad del agregado fino}$$

$$\text{Masa agregado grueso} = V_{\text{agregado grueso}} * \text{Densidad del agregado grueso}$$

La norma ACI 211 diseña las proporciones de los materiales con lo que se prepara el hormigón para obtener un metro cúbico de mezcla, por lo tanto, se realizó una hoja de cálculo que optimiza el proceso de conseguir las cantidades para elaborar el concreto.

4.1.1.7. Ajuste por humedad y absorción del agregado (paso 7)

El ajuste por humedad y absorción es un factor fundamental en el diseño del hormigón, ya que, debido a la porosidad, los agregados tienden a absorber agua, y de igual manera las partículas retienen agua superficial provocando una capa de humedad en los áridos.

La cantidad de agua de mezclado se modifica debido a estos factores, dependiendo de los valores de humedad y absorción se tienen algunos casos:

Si la absorción es mayor a la humedad, el agregado absorbe agua de mezclado, por lo tanto, se debe agregar una cantidad equivalente a la diferencia entre la absorción y la humedad de los áridos.

Si la absorción es menor que la humedad, el agregado aporta agua a la mezcla, de manera que se requiere disminuir el agua de mezclado de forma equivalente a la diferencia entre la absorción y la humedad de los agregados.

Si la absorción es igual a la humedad, no se requiere ningún ajuste en el agua de mezclado.

Para el ajuste por humedad de los agregados se ocupan las siguientes ecuaciones:

$$Fh = \text{Agregado fino seco} * \left(1 + \frac{\text{Humedad Af}}{100}\right)$$

$$Gh = \text{Agregado grueso seco} * \left(1 + \frac{\text{Humedad Ag}}{100}\right)$$

El cálculo de la adición o disminución de la cantidad de agua de mezclado se tiene la siguiente ecuación:

$$Wh = W1 - F * \frac{(haf - hf)}{100} - G * \frac{(hag - hg)}{100}$$

Donde:

Wh: Cantidad de agua de mezclado por m³ de concreto

W1: Cantidad inicial de agua de mezclado por m³ de concreto

haf: Humedad del agregado fino en porcentaje

hf: Absorción del agregado fino en porcentaje

hag: Humedad del agregado grueso en porcentaje

hg: Absorción del agregado grueso en porcentaje

F: Cantidad de agregado fino

G: Cantidad de agregado grueso

La dosificación final son los valores de Wh, Fh, Gh, medidas que se ocupan al momento de pesar y elaborar la mezcla.

4.1.1.8. Ajuste en las mezclas de prueba (paso 8)

La corrección de la mezcla de hormigón por asentamiento se realiza con el fin de cumplir con los requisitos de trabajabilidad, para verificar dicha propiedad es necesario realizar el ensayo

del Cono de Abrams, así como, la prueba de densidad y el contenido de aire de la mezcla, estos resultados se utilizan para realizar el ajuste de agua de mezclado y verificar el rendimiento del hormigón.

Si el asentamiento de la mezcla de hormigón es menor del requerido, es posible que sea necesario agregar una cantidad mayor de agua o un aditivo plastificante para aumentar la fluidez de la mezcla, sin embargo, el proyecto consiste en obtener el valor de asentamiento 4 cm \pm 1 cm sin el uso de ningún tipo de aditivo por especificaciones de la empresa.

Por otra parte, si el asentamiento es mayor a lo deseado, se corrige disminuyendo la cantidad de agua de mezclado, lo que aumentara la cantidad de agregados o cemento a la mezcla, de manera de mantener la cohesión y consistencia de la mezcla.

Para dicha corrección de asentamiento se utiliza la recomendación del ACI 211, el cual indica, que por cada centímetro de desfase en el asentamiento se debe agregar o disminuir 2 litros de agua por metro cúbico de hormigón, y nuevamente recalcular los valores de la dosificación repitiendo los pasos antes mencionados.

Es importante mencionar que la corrección del asentamiento debe realizarse de forma gradual, evaluando los resultados y en base a la experiencia tomar la decisión correcta para modificar la dosificación final, en base a la prueba y error de cada ensayo, a fin de que la mezcla cumpla con los requisitos especificados de resistencia, trabajabilidad y rendimiento.

4.1.1.9. Ejemplo de Dosificación de la Mezcla

Para el ejemplo se utilizará uno de los ensayos de la investigación, el mismo que sirvo que como punto de partida para la elaboración de las futuras mezclas. Esta dosificación se realiza siguiendo los pasos del manual ACI 211.1 como procedimiento y como materia prima cemento hidráulico tipo HE. Para la estimación de la proporción de agregados se usa el método ACI 211.1, los datos se muestran a continuación en la tabla 31.

CEMENTO	ATENAS TIPO HE		Unidad
	Gravedad específica:	3	gr/cm ³
GRAVA	Procedencia:	Santa Isabel	
	Tamaño máximo nominal:	3/4	Pulgadas
	Absorción:	2.64	%
	Humedad:	5.26	%
	Gravedad específica:	2589	kg/m ³
	Peso unitario compactado:	1436	kg/m ³

	Módulo de finura:	6.79	
ARENA	Procedencia:	Santa Isabel	
	Absorción:	2.02	%
	Humedad:	14.42	%
	Gravedad específica:	2502	kg/m ³
	Módulo de finura:	2.30	

Tabla 31. Datos de la materia prima

Relación A/C = 0.620

Material	Porcentaje (%)	Cantidad (kg)	Volumen (m ³)	Corrección por humedad (kg)	Corrección por absorción (kg)	Peso por m ³ de hormigón (kg)
Cemento		387.1	0.129			387.1
Arena		616	0.246	704.8	-87.4	704.8
Grava		944.2	0.365	993.9	-26.1	993.91
Agua		240	0.240			126.5
Aire	2		0.02			
Volumen (m³) =			1.00	Peso unitario (kg/m³) =		2212.4

Tabla 32. Ejemplo de dosificación de la mezcla para una relación A/C de 0.62

4.2. Ensayos en el hormigón

El hormigón es un material de suma importancia utilizado en las construcciones de cualquier tipo de infraestructura. Por lo tanto, es esencial garantizar la calidad, resistencia y durabilidad de las estructuras de hormigón. Las propiedades y características del hormigón nos ayudan a asegurar que se cumpla con los estándares y requisitos necesarios técnicos establecidos. También nos proporcionan la información necesaria para optimizar el diseño del mismo.

4.2.1. Elaboración de la mezcla

Para la realización de la mezcla de hormigón se debe preparar los materiales, los equipos y herramientas necesarias para la ejecución de este proceso. A continuación, se presentan los equipos y herramientas necesarias empezar con la elaboración:

- Mezcladora de hormigón: también se le conoce con el nombre de hormigonera. La máquina que es utilizada para este trabajo de titulación es la mezcladora de tambor, por lo general son portátiles.



Figura 17: Concretera.

- Báscula: las balanzas utilizadas deben tener una exactitud dentro del 0.3%. Para determinar las masas de los materiales que conforman el hormigón es preferible determinar con una exactitud cercana al 0.1% de la capacidad total.
- Baldes industriales: estos son utilizados para el pesaje de los materiales (cemento, áridos finos y gruesos)
- Bandejas: las mismas que son utilizadas para la obtención de humedad natural de los agregados.
- Cuchareta, pala: herramientas necesarias para la recolección del material.

La elaboración de la mezcla abarca tres fases, la primera consiste en la preparación de los materiales que conforman el hormigón, mezcla de materiales y obtención del concreto (producto hormigón), y por último el control de la calidad del hormigón (mediante ensayos para hormigón fresco y endurecido).

- Preparación de los materiales: para dar inicio con la preparación se debe concluir con el diseño del hormigón, donde se obtienen las proporciones específicas de cada elemento que componen al concreto, para este trabajo de titulación se realizó el diseño para un volumen de 0.2 m³, se encuentra la humedad natural en la cual se encuentra los áridos, como siguiente paso se realiza el pesaje de los áridos, agua y del cemento, este con la ayuda de basculas.

La norma NTE INEN 3124 señala que previo a encontrar la humedad natural y realizar el pesaje de los áridos finos y gruesos, se debe preparar los agregados para asegurar una condición definida y uniforme en la humedad. El proceso se llama homogenización consiste en mezclar y distribuir de manera uniforme cualquier árido. Es de suma importancia porque si no se realiza este procedimiento de manera adecuada pueden existir variaciones en la resistencia, trabajabilidad.

- Mezcla de materiales y obtención del hormigón: la norma NTE INEN 3124 indica como se debe realizar el proceso de mezclado para concreteras de tipo tambor. Previo a encender la concretera se adiciona el agregado grueso, y parte del agua del mezclado. Se enciende la mezcladora y luego se agrega el agregado fino, cemento y el restante de agua, este proceso se realiza con la maquina encendida. Una vez añadido todos los materiales se continua con el proceso de mezclado por 3 min. Culminado el tiempo se procede a apagar y dejar en reposo por 3 min, durante este tiempo se debe cubrir el extremo abierto para prevenir la evaporación. Como siguiente paso se vuelve a encender por 2 min. Como resultado final se obtiene el hormigón. Para disminuir la segregación, se puede depositar el hormigón en una bandeja húmeda, limpia y remezclar con la ayuda de una pala o cuchareta hasta obtener una apariencia uniforme.
- Control de calidad del hormigón: tiene como finalidad garantizar el cumplimiento de los estándares y especificaciones requeridas. Como el hormigón es un material utilizado en construcción debido a su resistencia, trabajabilidad, durabilidad, es necesario llevar un control riguroso. Algunos parámetros que se manejan son los de trabajabilidad (asentamiento), control de aire, densidad del concreto y resistencia a la compresión.

4.2.2. Toma de Muestras

La norma NTE INEN 1763 indica que los ensayos para el hormigón deben realizarse en los primeros 5 minutos una vez ya obtenida la mezcla, este tiempo es para los ensayos de asentamiento, contenido de aire y temperatura en caso de ser necesario. El moldeo de especímenes para el ensayo de resistencia a compresión debe ser dentro de los primeros 15 min una vez obtenido el hormigón. Además, se debe tener mucho cuidado con la mezcla, se debe proteger del sol, del viento, de algunas causas que provoquen evaporación rápida y de cualquier medio de contaminación.

El volumen mínimo de la mezcla para que sea utilizada en los ensayos de resistencia debe ser de 28 litros. En este trabajo de titulación se realizó el diseño para la obtención de un volumen de 0.2 m^3 , el mismo que es suficiente para realizar todos los ensayos necesarios para el control de calidad, es decir, asentamiento, densidad del hormigón, contenido de aire, ensayo para la resistencia a la compresión (INEN, 2010).

La norma NTE INEN 1763, señala que, en el muestreo para mezcladoras estacionarios, excepto mezcladores para pavimentadoras, no se debe obtener porciones de la muestra de

la parte inicial o final del hormigón. Se debe realizar el muestro mediante el paso completo a un recipiente a través de flujo de descarga.

4.2.3. Ensayo de Asentamiento

El ensayo de asentamiento también conocido como el ensayo de cono de Abrams, es una característica del hormigón fresco que determina la trabajabilidad y consistencia de la mezcla. Evalúa la adecuación del hormigón tomando en cuenta su manejabilidad y capacidad de adaptación, este último hace referencia a las diferentes condiciones que se presentan en construcción. El valor de asentamiento proporciona un indicio de la consistencia del hormigón, es decir, un mayor asentamiento hace referencia a que el hormigón es más fluido, lo que facilita su colocación en campo. Por otro lado, un asentamiento menor indica que el hormigón es menos maleable y más seco, lo que dificulta su distribución. Este ensayo es utilizado para realizar el ajuste de la cantidad de agua utilizada en la mezcla de hormigón de manera que se garantice el cumplimiento de los requisitos establecidos. El asentamiento requerido por la empresa Hormi Center, el cual tiene un valor de 4 ± 1 cm, por lo que para el diseño teórico de la mezcla se realiza con 4 cm.

La trabajabilidad en el hormigón es una propiedad del hormigón fresco, que hace referencia a la facilidad con la que se puede mezclar, colocar, compactar durante el proceso de construcción, es decir, se evalúa su manejabilidad y capacidad de ser moldeado en obra. Una buena trabajabilidad proporciona ventajas significativas, debido a que permite una distribución homogénea de los agregados y pasta de cemento, mejorando la resistencia y durabilidad del concreto.

La norma NTE INEN 1578 hace referencia al ensayo de determinación del asentamiento para hormigones con árido grueso no mayor a 37.5 mm, a continuación, se indican las herramientas necesarias para la realización del ensayo según la norma:

- Molde: debe estar elaborado por un material que sea atacado fácilmente por la pasta de cemento, además el espesor debe estar entre a 1.5 - 1.15 mm, debe tener la forma de un cono truncado, con el diámetro superior de 100 mm, el diámetro inferior de 200 mm, y una altura de 300 mm estas medidas tienen una tolerancia de ± 3 mm, el molde debe tener dos estribos y manijas en las que se pueden apoyar los pies y las manos.
- Varilla de compactación: es una varilla recta, lisa, de acero con un diámetro de 16 mm, los extremos deben ser redondeados con una punta semiesférica con diámetro de 16 mm, esto puede darse en ambos extremos o en uno solo siendo este el extremo de compactación.

- Instrumento de medida: puede ser cualquier equipo de medición ya sea rígido o semirrígido, que marque incrementos de 5 mm o menos, por ejemplo: regla, cinta de medir enrollada.
- Cucharón: debe tener un tamaño suficiente que sea capaz de recopilar una cantidad de hormigón significativa de la muestra, también debe evitar que se derrame la mezcla durante la colocación.

Según la norma NTE INEN 1578, el procedimiento para realizar el ensayo del asentamiento consiste en humedecer el molde y colocarlo sobre una superficie plana, rígida, humedecida y no absorbente. El operador del ensayo se debe parar sobre los estribos del molde sosteniéndolo firmemente y fijándolo a la placa base durante el llenado y la limpieza. Se divide el molde y se llena en tres capas. Con la ayuda de un cucharon, se coloca el hormigón de manera no se derrame por los bordes, además se sigue el perímetro de la parte superior asegurando una distribución uniforme, y minimizando la segregación que se puede producir. Se puede dividir al molde de manera que el primer tercio tenga una altura de 70 mm, continuando con el segundo llegando a una altura de 160 mm, todo esto medido desde la base.

Utilizando la varilla de compactación, cada capa debe ser compactada con 25 golpes distribuidos de manera uniforme sobre la sección transversal. En la primera capa es necesario inclinar la varilla de compactación ligeramente, la mitad de los golpes se distribuyen cerca del perímetro, para continuar con golpes verticales en espiral hacia el centro. Para la segunda y tercera capa se compacta de tal forma que la varilla de compactación penetre ligeramente la capa anterior. (INEN, 2010)

Antes del proceso de compactación de la tercera capa, se debe dejar un excedente de hormigón de tal forma que sobrepase la parte superior del molde. Después del proceso de compactación, si el hormigón queda por debajo del borde superior del molde, se debe agregar más mezcla. De tal manera que siempre se mantenga por encima de la parte superior. Continuando con el proceso, rodando en el borde superior del molde la varilla de compactación, se enrasa la superficie de hormigón. Concluido este proceso, se debe empujar firmemente hacia abajo el molde y limpiar la mezcla que rodea cono, esto para evitar interferencias en el movimiento del hormigón. Se retira el molde cuidadosamente, el tiempo de duración debe estar entre los $5 \text{ s} \pm 3 \text{ s}$, evitando los movimientos laterales o de torsión. Todo el proceso del ensayo de asentamiento se debe culminar en un periodo no mayor a 2.5 min. Determina el asentamiento midiendo la diferencia entre la parte superior del molde y el centro original desplazado de la superficie superior de la muestra. (INEN, 2010)

En caso de existir un corte o desprendimiento de la muestra se le considera nulo al ensayo de asentamiento, por lo que se debe realizar nuevamente el ensayo. (INEN, 2010)



Figura 18: Ensayo de asentamiento.

Utilizando el método de prueba y error, se realizaron varias mezclas para la obtención del asentamiento estipulado, con la variación de la cantidad de agua hasta obtener el requisito requerido. Se puede observar en la siguiente tabla las mezclas realizadas para la obtención del asentamiento deseado:

Se presenta la cantidad de mezclas necesarias hasta obtener el requisito estipulado por la empresa Hormi Center:

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI			
Fecha de elaboración de la prueba:		13/1/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.54	f'c:	240
Muestra N°:	1	Asentamiento (cm):	1.7

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI			
Fecha de elaboración de la prueba:		14/1/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.54	f'c:	180
Muestra N°:	1	Asentamiento (cm):	2.8

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI			
Fecha de elaboración de la prueba:		18/1/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.54	f'c:	240
Muestra N°:	1	Asentamiento (cm):	3.5

Tabla 33: Asentamientos. Combinación Santa Isabel-Santa Isabel para la muestra 1 diseñado por el Método ACI

A continuación, se presenta los valores de los asentamientos obtenidos, los datos mostrados son de las muestras en las cuales cumplen con los requisitos establecidos por la empresa Hormi Center.

En la siguiente tabla se pueden observar los valores de los asentamientos obtenidos para las muestras guías, las mismas que fueron diseñadas con el método ACI:

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI			
Fecha de elaboración de la prueba:		18/1/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.54	f'c:	240
Muestra N°:	1	Asentamiento (cm):	3.5

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI			
Fecha de elaboración de la prueba:		19/1/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.62	f'c:	180
Muestra N°:	2	Asentamiento (cm):	3.2

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI			
Fecha de elaboración de la prueba:		24/1/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.77	f'c:	120
Muestra N°:	3	Asentamiento (cm):	3.4

Tabla 34: *Ensayo de Asentamiento, Método ACI, Combinación Santa Isabel-Santa Isabel*

Como se puede observar en la tabla mostrada anteriormente, los asentamientos cumplen con los requisitos establecidos.

Los diseños y las mezclas que se presentan se realizaron con el método ACI-Fuller, para los dos tipos de combinaciones de agregados, y también para los tipos de cementos.

Se muestra la combinación Santa Isabel-Santa Isabel, en la que se diseñó con el método ACI-Fuller, utilizando el Cemento Tipo HE:

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Fecha de elaboración de la prueba:		26/1/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.6		
Muestra N°:	4	Asentamiento (cm):	3.9

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Fecha de elaboración de la prueba:		30/2/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.64		
Muestra N°:	5	Asentamiento (cm):	3.5

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Fecha de elaboración de la prueba:		31/2/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.67		
Muestra N°:	6	Asentamiento (cm):	4

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Fecha de elaboración de la prueba:		1/2/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.7		
Muestra N°:	7	Asentamiento (cm):	3.9

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Fecha de elaboración de la prueba:		2/2/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.72		
Muestra N°:	8	Asentamiento (cm):	4

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Fecha de elaboración de la prueba:		8/3/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.8		
Muestra N°:	9	Asentamiento (cm):	4.7

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Fecha de elaboración de la prueba:		8/3/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.85		
Muestra N°:	10	Asentamiento (cm):	4.4

Tabla 35: *Ensayo de Asentamiento, Método ACI-Fuller, Combinación Santa Isabel-Santa Isabel. Cemento tipo HE.*

En la siguiente tabla se presentan los valores de asentamiento obtenidos para el diseño método ACI-Fuller, para la combinación de agregados Paute-Santa Isabel, con el Cemento Tipo HE:

Combinación: Paute-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Fecha de elaboración de la prueba:		7/2/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.6		

Muestra N°:	11	Asentamiento (cm):	4.7
-------------	----	--------------------	-----

Combinación: Paute-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Fecha de elaboración de la prueba:		9/2/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.64		
Muestra N°:	12	Asentamiento (cm):	4.4

Combinación: Paute-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Fecha de elaboración de la prueba:		13/2/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.68		
Muestra N°:	13	Asentamiento (cm):	4

Combinación: Paute-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Fecha de elaboración de la prueba:		13/2/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.72		
Muestra N°:	14	Asentamiento (cm):	3.4

Combinación: Paute-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Fecha de elaboración de la prueba:		14/2/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.76		
Muestra N°:	15	Asentamiento (cm):	4.6

Combinación: Paute-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Fecha de elaboración de la prueba:		9/3/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.85		
Muestra N°:	16	Asentamiento (cm):	4.5

Tabla 36: Ensayo de Asentamiento, Método ACI-Fuller, Combinación Paute-Santa Isabel. Cemento tipo HE.

A continuación, se presentan los datos medidos durante el ensayo del asentamiento, el cual se diseñó con el método ACI-Fuller, con el cemento Tipo GU, y la combinación de agregados Santa Isabel-Santa Isabel:

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Fecha de elaboración de la prueba:		2/3/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.46		

Muestra N°:	17	Asentamiento (cm):	4.1
-------------	----	--------------------	-----

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
--------------------------	--	--	--

Fecha de elaboración de la prueba:		BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.5	2/3/2023
Muestra N°:	18	Asentamiento (cm): 4.6

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
--------------------------	--	--	--

Fecha de elaboración de la prueba:		7/3/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.6		
Muestra N°:	19	Asentamiento (cm):	3.8

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
--------------------------	--	--	--

Fecha de elaboración de la prueba:		8/3/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.53		
Muestra N°:	20	Asentamiento (cm):	4.3

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
--------------------------	--	--	--

Fecha de elaboración de la prueba:		8/3/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.56		
Muestra N°:	21	Asentamiento (cm):	4.1

Tabla 37: *Ensayo de Asentamiento, Método ACI-Fuller, Combinación Santa Isabel-Santa Isabel. Cemento tipo GU.*

Se puede observar que en la siguiente tabla los valores del asentamiento medidos durante los ensayos realizados, que tienen como combinación de agregados Paute-Santa Isabel y el cemento utilizado es el tipo GU:

Combinación: Paute-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
--------------------------	--	--	--

Fecha de elaboración de la prueba:		15/2/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.6		
Muestra N°:	22	Asentamiento (cm):	4.5

Combinación: Paute-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
--------------------------	--	--	--

Fecha de elaboración de la prueba:		23/2/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.5		
Muestra N°:	23	Asentamiento (cm):	3.5

Combinación: Paute-Santa Isabel**Método ACI-Fuller**

Fecha de elaboración de la prueba:	27/2/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.46	
Muestra N°:	24	Asentamiento (cm): 4.7

Combinación: Paute-Santa Isabel**Método ACI-Fuller**

Fecha de elaboración de la prueba:	1/3/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.53	
Muestra N°:	25	Asentamiento (cm): 3.8

Combinación: Paute-Santa Isabel**Método ACI-Fuller**

Fecha de elaboración de la prueba:	1/3/2023	BTCH (m3): 0.02
A/C:	0.56	
Muestra N°:	26	Asentamiento (cm): 4.2

Tabla 38: *Ensayo de Asentamiento, Método ACI-Fuller, Combinación Paute-Santa Isabel. Cemento tipo GU.***4.2.4. Ensayo de Contenido de Aire**

El aire que contiene el hormigón en su interior afecta directamente a su durabilidad, resistencia y manejabilidad. Motivo por el cual una vez obtenida la mezcla se realiza el ensayo de contenido de aire, realizando así un control de calidad del hormigón, además de ajustar las proporciones en el diseño de la mezcla.

La norma ASTM C231, señala el procedimiento para la realización del ensayo de contenido de aire del concreto recién mezclado mediante el método de presión. A continuación, se indican los equipos necesarios para el ensayo:

- Cuenco de medición: de forma cilíndrica, de acero con un diámetro 0.75 a 1.25 veces la altura, con un volumen mínimo de 6 litros. Debe poseer una brida que permita un agarre hermético a presión con el sistema de capa. Debe ser lo suficientemente rígido para evitar expansiones a no más del 0.1%.
- Sistema de Tapa: debe estar fabricada de acero o cualquier metal que no sea atacado fácilmente por la pasta de cemento. Debe tener una brida que proporcione un ajuste hermético con el cuenco de medición. También debe tener un sistema de lectura directa de contenido de aire, además de válvulas de aire en donde se puede introducir agua según sea necesario.
- Varilla compactadora: debe ser redonda, lisa, con un diámetro de 16 mm \pm 2 mm, su longitud debe ser de al menos 100 mm mayor que la profundidad del cuenco de

medición y menor que 600 mm de longitud total. Debe tener un extremo para compactar el cual sea redondo con un diámetro de 16 mm

- Martillo de goma
- Barra de ensrasado
- Embudo
- Cucharón

La norma ASTAM C231 indica que, para iniciar con el ensayo se debe humedecer el cuenco de medición y ubicarlo en una superficie plana, a nivel y firme. Cuando se realiza el ensayo por medio de varillado se divide al cuenco en tres capas, aproximadamente del mismo volumen. Con ayuda de un cucharón se distribuye el hormigón de manera equitativa en el molde minimizando la segregación, para luego proceder con el compactado por varillado, se realizan 25 golpes uniformemente sobre la sección transversal. La primera capa se compacta atravesando todo su espesor, evitando tocar el fondo del cuenco de medición. En las siguientes dos capas se debe atravesar completamente el espesor de la capa introduciendo la varilla unos 25 mm a la capa anterior. Una vez concluido la compactación de cada capa utilizando el martillo de goma se debe golpear el molde de medición unas 10 o 15 veces cerrando cualquier hueco que deje el varillado, además, de liberar el aire las burbujas que se quedaron atrapadas en las capas. Concluido una vez el proceso de compactación se procede a enrasar la superficie superior deslizando la barra de ensrasado, el hormigón debe estar a nivel del borde superior del cuenco. Se coloca el sistema de tapa y se sella herméticamente con el cuenco de medición, en las válvulas de con la ayuda de un embudo se introduce agua hasta que empiece a salir por la otra válvula en un flujo continuo, se bombea el aire dentro de la cámara hasta que el manómetro este sobre la línea de presión inicial. Se golpea el manómetro ligeramente con la mano hasta se estabilice su índice. Golpear el molde de medición vigorosamente para liberar restricciones locales, golpear suavemente el manómetro con la mano y leer el porcentaje de aire medido sobre el dial.

El ensayo de contenido de aire fue realizado para todas las muestras que cumplían con el asentamiento requerido.



Figura 19: Cuenco de medición y sistema de tapa (Ensayo contenido de aire)

A continuación, se presenta los valores de contenido de aire para las mezclas diseñadas por el método ACI, con la combinación de Santa Isabel- Santa Isabel:

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI			
Muestra N°	Fecha Ensayo	A/C	% Contenido de Aire
1	18/1/2023	0.54	1.8
2	19/1/2023	0.62	1.7
3	24/1/2023	0.77	1.7

Tabla 39: Contenido de aire. Método ACI. Combinación Santa Isabel. Cemento Atenas Tipo HE.

En la siguiente tabla se puede observar los valores obtenidos por la realización del ensayo para la combinación Santa Isabel-Santa Isabel, diseñados por el método ACI-Fuller con el cemento Atenas tipo HE:

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Muestra N°	Fecha Ensayo	A/C	% Contenido de Aire
4	26/1/2023	0.6	1.75
5	30/1/2023	0.64	1.7
6	31/1/2023	0.67	1.6
7	1/2/2023	0.7	1.3
8	7/9/2023	0.72	1.5
9	8/3/2023	0.8	1.25
10	8/3/2023	0.85	1.25

Tabla 40: Contenido de aire. Método ACI-Fuller. Combinación santa Isabel-Santa Isabel. Cemento Atenas Tipo HE.

Los valores del ensayo de contenido de aire obtenidos para la mezcla que se realizó con el método ACI-Fuller, para la combinación Paute-Santa Isabel, con el cemento tipo Atenas HE se presentan a continuación:

Combinación: Paute-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Muestra N°	Fecha Ensayo	A/C	% Contenido de Aire
11	7/2/2023	0.6	1.2
12	9/2/2023	0.64	1.45
13	13/2/2023	0.68	1.4
14	13/2/2023	0.72	1.5
15	14/2/2023	0.76	1.3
16	9/3/2023	0.85	1.25

Tabla 41: Contenido de aire. Método ACI-Fuller. Combinación Paute-Santa Isabel. Cemento Atenas Tipo HE.

Se muestra el porcentaje de contenido de aire obtenido durante el ensayo se presenta a continuación para los hormigones diseñados con el método ACI-Fuller, con el mismo cemento Atenas tipo GU, pero con diferentes agregados gruesos:

Combinación Santa Isabel - Santa Isabel:

Combinación: Santa Isabel-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Muestra N°	Fecha Ensayo	A/C	% Contenido de Aire
17	2/3/2023	0.46	2
18	2/3/2023	0.5	1.85
19	7/3/2023	0.6	1.65
20	8/3/2023	0.53	1.75
21	8/3/2023	0.56	1.7

Tabla 42: Contenido de aire. Método ACI-Fuller. Combinación Santa Isabel-Santa Isabel. Cemento Atenas Tipo GU.

Combinación Paute - Santa Isabel:

Combinación: Paute-Santa Isabel

Método ACI-Fuller			
Muestra N°	Fecha Ensayo	A/C	% Contenido de Aire
22	15/2/2023	0.46	1.8
23	23/2/2023	0.5	1.75
24	27/2/2023	0.6	1.6
25	1/3/2023	0.53	1.7
26	1/3/2023	0.56	1.65

Tabla 43: Contenido de aire. Método ACI-Fuller. Combinación Paute-Santa Isabel. Cemento Atenas Tipo GU.

4.2.5. Elaboración de Especímenes (Cilindros para Ensayo de Resistencia)

La norma NTE INEN 3124 señala que los especímenes deben ser elaborados lo más cerca posible del lugar donde van a ser almacenados en las primeras 24 horas. Deben ser ubicados en una superficie libre de vibraciones, se debe evitar golpes, sacudidas, inclinaciones. Los moldes cilíndricos tienen las dimensiones de 100 mm de diámetro, con 200 mm de altura. Según la tabla 1 de la norma, se presenta el número de capas y de golpes necesarios para elaborar los cilindros, mismo que son necesarios para el ensayo de resistencia a la compresión.

Tamaño de espécimen diámetro (mm)	Modo de consolidación	Número de capas igual profundidad
75 a 100	varillado	2
Tamaño de espécimen diámetro (mm)	Diámetro de la varilla (mm)	Número de golpes/capas
75 hasta < 150	10 ± 2	25

Tabla 44: Modo de consolidación, numero de capas y golpes, según las dimensiones de los moldes cilíndricos.

Fuente: (INEN, 2017)

Con el propósito de determinar la resistencia a la compresión en diferentes etapas de cada mezcla, se fabricaron seis cilindros por muestra. La ruptura de los especímenes se distribuyó de la siguiente manera: dos cilindros a los 3 días, dos a los 7 días y dos a los 28 días. No se realizan más muestras debido a la disponibilidad de los moldes. Lo ideal para el trabajo de titulación es realizar tantas muestras como sean posibles.



Figura 20: Cilindros elaborados.

4.2.6. Curado

El curado es un proceso fundamental para los ensayos de resistencia del hormigón, consiste en garantizar el desarrollo adecuado de las propiedades del concreto. Implica mantener condiciones controladas la temperatura y humedad, para que el mismo alcance su durabilidad

y resistencia óptima. El hormigón experimenta un proceso químico denominado hidratación. Sin el curado de las muestras esta reacción no se ejecutaría, provocando un hormigón débil y propenso a fisuraciones y agrietamientos prematuros. Mantener el hormigón húmedo evita la evaporación excesiva del agua, permitiendo el desarrollo de la resistencia. El curado es importante debido a que nos ayuda a obtener resultados precisos y representativos de las propiedades del concreto.

La norma NTE INEN 3124 señala que una vez obtenidos los especímenes estos deben ser almacenados, también se debe cubrir con una lámina de preferencia una placa no reactiva hasta que se retiren de los moldes. Con el fin de proteger la parte externa del cilindro, de esa manera prevenir contaminación, perdida de humedad y no absorban reactivos que afecten el hormigón.

Los moldes deben ser retirados luego de 24 horas \pm 8 horas después de ser moldeados. Los especímenes deben ser curados en agua a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, desde el tiempo de moldeo hasta el momento del ensayo. Los cilindros de hormigón deben mantener agua libre sobre su superficie completa en todo momento (INEN, 2017).



Figura 21: Curado de los especímenes.

4.2.7. Ensayo de Rotura

El ensayo de rotura tiene como finalidad evaluar la resistencia a la compresión, además, nos ayuda a realizar un control de calidad sobre el hormigón. Proporciona información sobre la capacidad del hormigón para resistir cargas a compresión, asimismo, el ensayo permite verificar si las mezclas cumplen con estándares y requisitos establecidos en el diseño.

Una vez concluidos los 3,7,28 días de elaboración de los especímenes, se procede con el ensayo de rotura, o también llamado el ensayo de resistencia a la compresión.

La norma NTE INEN 1573 señala que la máquina de ensayo debe tener suficiente capacidad y debe disponer de velocidades de carga. También se debe realizar la calibración del equipo

por lo menos una vez al año, inmediatamente después de efectuar reparaciones o ajustes que afecten la operación del sistema de fuerza. El diseño de la máquina debe ser operado con energía eléctrica y la carga debe ser aplicada continuamente. El espacio provisto para los especímenes debe ser lo suficiente grande para que puedan ser acomodados. Su precisión no debe exceder el 1% del porcentaje de error. Debe estar equipada con dos bloques de carga de acero con caras endurecidas, debe ser bloque esférico para el apoyo de la parte superior y para la parte inferior un bloque sólido. Las caras de los bloques deben exceder por lo menos un 3% el diámetro de los cilindros de ensayo. El indicador de carga debe estar compuesto por un dial, que señala la carga aplicada por el equipo.

Antes de la rotura se determina el diámetro, altura y el peso de cada muestra para la obtención del área y densidad respectivamente. Los especímenes no deben ser ensayados si cualquier diámetro individual difiere de cualquier otro diámetro del mismo cilindro en más del 2%. El ensayo se debe realizar lo más pronto posible, es decir, luego de extraer la muestra del almacenamiento húmedo. El espécimen debe mantenerse húmedo en el periodo comprendido entre la remoción del almacenamiento y el ensayo. La norma nos indica que existen tiempos de tolerancia admisibles para ensayo, a continuación, se presenta la tabla 2 de la NTE INEN 1573:

Edad de Ensayo	Tolerancia admisible
24 horas	0.5 h o 2.1%
3 días	2 horas o 2.8%
7 días	6 horas o 3.6%
287 días	20 horas o 3.0%
90 días	2 días o 2.2 %

Tabla 45: Tolerancia de tiempo admisible para el ensayo de rotura Fuente: (INEN, 2010)

Para la realización del ensayo de rotura se debe colocar y asegurar que el espécimen este en el centro de los bloques de carga, además, se verifica que el indicador de carga se encuentre encerado. Se procede con el ensayo controlando la velocidad de carga por medio de una perilla.



Figura 22: Ensayo rotura de Cilindros. (Resistencia a la compresión)

5. Resultados

Para garantizar un diseño óptimo para la empresa es necesario conocer las propiedades físico-mecánicas de los materiales que componen la mezcla de hormigón, además, en base a las pruebas de resistencia a la compresión de cada diseño, se obtienen puntos significativos para realizar la curva de relación agua/cemento vs resistencia para cada combinación de áridos, así como, para cada tipo de cemento empleado. Estos diseños deben cumplir con los requisitos de asentamiento y rendimiento solicitados por la empresa para que puedan ser considerados en la guía gráfica.

Los porcentajes de cada árido fueron calculados por el método de Fuller para cada tipo de combinación, estos valores se ajustaron de manera que su trabajabilidad sea la correcta y no exista segregación de los materiales. Dichas combinaciones de áridos cumplen con los límites establecidos por la NTE INEN 872 para mezclas de hormigón. En este capítulo se enlistan los valores de las características principales de los agregados que se utilizan para diseñar y elaborar hormigones con resistencias de 210 kg/cm², 240 kg/cm², 280 kg/cm², 300 kg/cm² y 320 kg/cm².

Para la trabajabilidad del hormigón se consideró los estándares establecidos por la empresa, y se obtuvo como resultado los valores de asentamientos obtenidos en las tablas 35,36, 37, 38, los mismos que cumplen con lo solicitado por la empresa al encontrarse en un rango de 3 a 5 centímetros.

Como se indica en las figuras 2 y 3, la resistencia a compresión del cemento tipo HE es más elevada que el cemento tipo GU, por lo que, se consideró valores menores de la relación agua/cemento para el tipo GU, las mismas que varían entre 0.46 y 0.60. Mientras que, para el cemento tipo HE las relaciones agua/cemento varían entre 0.60 y 0.85. Con estas relaciones A/C, se consiguieron resistencias específicas, las cuales son consideradas como puntos significativos para la guía gráfica de la empresa.

Una vez obtenida la curva específica para cada tipo de material, se procede a determinar un valor de la relación agua/cemento para diseñar hormigones con las resistencias más comerciales de la empresa, de esta manera se optimizarán los pesos y se minimizarán los costos de producción.

5.1. Caracterización de los materiales

En la siguiente tabla se detallan las principales características de los agregados (finos y gruesos), las cuales son datos que se utilizan para obtener una proporción adecuada en la mezcla de hormigón, y de este modo conseguir una resistencia específica.

	Arena: Santa Isabel	Grava 1: Santa Isabel	Grava 2: Paute
Peso volumétrico seco suelto (kg/m³)	1254	1276	1291
Peso volumétrico seco compactado (kg/m³)	1455	1436	1451
Módulo de finura	2.30	6.79	6.78
Tamaño Máximo Nominal (pulgada)	-	3/4	3/4
Densidad SH (kg/m³)	2502	2522	2498
Densidad SSS (kg/m³)	2552	2588	2550
Densidad Aparente (kg/m³)	2635	2702	2637
Absorción (%)	2.02	2.64	2.11

Tabla 46. Resultado de la caracterización de los áridos

Como se observa en la tabla 46, los valores de los agregados gruesos son muy similares, razón por la cual, la empresa utiliza estos áridos de diferentes canteras sin temor a una alteración significativa en la resistencia, sin embargo, la absorción del agregado de Paute ocasiona que las mezclas realizadas con la combinación 2 requiera una cantidad menor de agua de mezclado.

5.2. Obtención de las proporciones óptimas por el método gráfico de Fuller

La tabla 47 muestra los resultados finales de las proporciones que se usaron para el diseño del hormigón. El método gráfico de Fuller se basa en la granulometría de cada agregado y sus módulos de finura. Para cada combinación se detalla los porcentajes de la arena y la grava.

	Combinación 1	Combinación 2
Procedencia Arena	Santa Isabel	Santa Isabel
Procedencia Grava	Santa Isabel	Paute
Cantidad Arena (%)	42	42
Cantidad Grava (%)	58	58

Tabla 47. Porcentajes finales de los áridos para la mezcla de hormigón

Debido a que la granulometría de los agregados gruesos es parecida y solo se cuenta con un tipo de agregado fino, los porcentajes son similares, de igual manera los diseños tendrán valores parecidos en las proporciones de la mezcla.

5.3. Densidad, rendimiento y porcentaje de aire del hormigón

Algunos de los ensayos del hormigón en estado fresco determinan la calidad de la mezcla, así como, la relación entre el diseño y el producto obtenido. Estos ensayos son: la densidad, el rendimiento y el contenido de aire. Las pruebas realizadas con el cemento tipo HE y con la combinación 1 de áridos se detallan en la siguiente tabla.

Cemento tipo HE: Combinación 1

Relación A/C	Densidad teórica (kg/m ³)	Densidad real (kg/m ³)	Rendimiento (%)	Contenido de aire (%)
0.60	2198.587	2258.00	97	1.75
0.64	2219.008	2310.14	96	1.70
0.67	2210.104	2300.14	96	1.60
0.70	2207.696	2302.57	96	1.30
0.72	2202.601	2294.14	96	1.50
0.80	2209.638	2284.43	97	1.25
0.85	2207.330	2293.00	96	1.25

Tabla 48. Rendimiento y contenido de aire de los ensayos con el cemento HE y la combinación 1

La tabla 48 muestra los resultados de densidad y rendimiento de los ensayos realizados con el cemento tipo HE y la combinación 2 de agregados, para cada relación agua/cemento analizado.

Cemento tipo HE: Combinación 2

Relación A/C	Densidad teórica (kg/m ³)	Densidad real (kg/m ³)	Rendimiento (%)	Contenido de aire (%)
0.60	2202.162	2308.71	95	1.20
0.64	2206.700	2302.43	96	1.45
0.68	2204.756	2306.71	96	1.40
0.72	2202.044	2305.14	96	1.50
0.76	2200.603	2302.00	96	1.30
0.85	2193.546	2288.29	96	1.25

Tabla 49. Rendimiento y contenido de aire de los ensayos con el cemento HE y la combinación 2

Análogamente, los ensayos fueron realizados para las mezclas con el cemento tipo GU y las dos combinaciones de áridos. En la tabla 49 se observan los resultados para la combinación 1 de áridos con el agregado grueso procedente de Santa Isabel.

Cemento tipo GU: Combinación 1

Relación A/C	Densidad teórica (kg/m ³)	Densidad real (kg/m ³)	Rendimiento (%)	Contenido de aire (%)
0.46	2191.268	2255.43	97	2.0
0.50	2186.548	2262.71	97	1.85
0.53	2193.756	2274.22	96	1.75
0.56	2187.263	2256.68	97	1.70
0.60	2187.424	2276.14	96	1.65

Tabla 50. Rendimiento y contenido de aire de los ensayos con el cemento GU y la combinación 1

Finalmente, en la tabla 50 se muestra los resultados de densidad, rendimiento y contenido de aire de las mezclas elaboradas con el cemento tipo GU y la combinación 2 de agregados.

Cemento tipo GU: Combinación 2

Relación A/C	Densidad teórica (kg/m ³)	Densidad real (kg/m ³)	Rendimiento (%)	Contenido de aire (%)
0.46	2173.464	2269.43	96	1.80
0.50	2173.525	2255.14	96	1.75
0.53	2185.235	2275.63	96	1.70
0.56	2182.365	2269.68	96	1.65

0.60	2193.987	2294.00	96	1.60
------	----------	---------	----	------

Tabla 51. Rendimiento y contenido de aire de los ensayos con el cemento GU y la combinación 2

En los ensayos realizados de rendimiento de las mezclas de hormigón se puede observar que sus valores son mayores al 96 %, dicho porcentaje es aceptable y aprobado por la empresa. De igual manera, el contenido de aire de las mezclas varía en un rango entre 1.25% y 2%, lo que demuestra que el valor colocado en el diseño teórico previo fue el correcto.

5.4. Resistencia a la compresión

La resistencia a compresión se obtuvo mediante la rotura de 6 cilindros que pasaron por el proceso de curado en la piscina durante el tiempo establecido. Se tomaron como puntos de control la ruptura de dos cilindros a los 3 días, dos cilindros a los 7 días y dos cilindros a los 28 días.

Para obtener el valor de la resistencia a compresión se utilizó la siguiente ecuación:

$$f'c \left(\frac{kg}{cm^2} \right) = \frac{4 * P}{\pi * (D)^2}$$

Donde:

$f'c$: Resistencia a compresión del hormigón (kg/cm^2)

P: Carga máxima de compresión (kg)

D: Diámetro promedio de la sección transversal (cm)

En la siguiente tabla se presenta los valores de las medidas usadas para obtener la resistencia a compresión de la combinación 1 de áridos con el cemento HE, el procesamiento de datos se lo realiza de igual manera para la combinación 2 y el cemento GU.

Cemento HE: Combinación 1

A/C	Días	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga (KN)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
0.600	4	10.12	80.4360817	202.903	257.228
0.600	4	10.12	80.4360817	212.122	268.915
0.600	7	10.18	81.3926966	259.138	324.658
0.600	7	10.2	81.7128249	240.598	300.250
0.600	28	10.13	80.5951248	332.431	420.604
0.600	28	10.11	80.2771956	326.537	414.783

0.640	3	10.35	84.1338148	171.413	207.756
0.640	3	10.4	84.9486654	159.253	191.167
0.640	7	10.46	85.9316697	239.613	284.340
0.640	7	10.47	86.0960535	229.384	271.682
0.640	28	10.3	83.3228912	312.88	382.908
0.640	28	10.28	82.9996213	306.295	376.309
0.670	3	10.44	85.6033733	164.499	195.954
0.670	3	10.3	83.3228912	147.589	180.622
0.670	7	10.35	84.1338148	210.459	255.081
0.670	7	10.37	84.4592838	209.13	252.493
0.670	28	10.34	83.9713159	280.338	340.433
0.670	28	10.33	83.8089741	287.844	350.225
0.700	2	10.3	83.3228912	112.929	138.204
0.700	2	10.4	84.9486654	107.67	129.247
0.700	7	10.33	83.8089741	183.714	223.528
0.700	7	10.43	85.4394607	187.33	223.578
0.700	28	10.28	82.9996213	273.965	336.589
0.700	28	10.29	83.1611777	264.235	324.004
0.720	4	10.4	84.9486654	143.654	172.442
0.720	4	10.26	82.6769797	156.21	192.666
0.720	7	10.3	83.3228912	188.82	231.081
0.720	7	10.41	85.1121067	177.067	212.142
0.720	28	10.27	82.8382219	243.014	299.145
0.720	28	10.28	82.9996213	227.99	280.105

Tabla 52. Resultados de resistencia a la compresión con el cemento HE y la combinación 1

5.5. Curvas relación A/C vs Resistencia a la compresión

Los puntos que conforman la guía gráfica para la empresa Hormi Center están representados por la cantidad de resistencia a compresión que se obtenga por cada valor de relación A/C establecido, esto para cada tipo de cemento con su respectiva combinación de áridos. Para facilitar el análisis de los resultados se consideró que la resistencia máxima se obtendrá a los 28 días después de la confección de los cilindros de muestra, es decir, el 100% de la resistencia. Para conseguir la curva de relación A/C vs resistencia se ocuparon los puntos que cumplieron con los requisitos de trabajabilidad, una vez obtenido los datos de resistencia como puntos significativos, estos se ajustaron a una curva mediante un proceso de regresión

exponencial con un coeficiente de determinación (R^2) mayor a 0.98, dicha curva fue realizada en una hoja electrónica de Excel, por lo que, proporciona un modelo óptimo para validar la curva relación A/C vs resistencia para cada tipo de cemento y sus combinaciones de agregados.

Además, el análisis realizado indica el porcentaje de la resistencia que se obtiene a los 7 días de confección, estos valores son considerados como datos de control. Este indicador nos garantiza que la resistencia de diseño se está cumpliendo.

5.5.1. Curva A/C vs resistencia para el cemento tipo HE

Combinación 1: arena Santa Isabel, grava Santa Isabel

Se realizaron pruebas utilizando el cemento tipo HE para evaluar la resistencia de diferentes combinaciones de áridos. En el caso de la combinación 1, utilizando agregados provenientes de la mina de Santa Isabel, se obtuvieron los siguientes resultados detallados en la tabla 53. De igual manera, se observan los porcentajes de resistencia a los 7 días de fraguado, dando como resultado un valor aproximado al 72 %.

A/C	Días	Resistencia (kg/cm ²)	Porcentaje
0.600	7	312.454	74.80%
0.600	28	417.694	100.00%
0.640	7	278.011	73.24%
0.640	28	379.609	100.00%
0.670	7	253.787	73.49%
0.670	28	345.329	100.00%
0.700	7	223.553	67.68%
0.700	28	330.297	100.00%
0.720	7	221.612	73.96%
0.720	28	299.625	100.00%
0.800	7	165.208	66.92%
0.800	28	246.885	100.00%
0.850	7	158.774	74.78%
0.850	28	212.325	100.00%
% PROMEDIO a los 7 días =			72.12%

Tabla 53. Resistencias obtenidas con el cemento tipo HE y la combinación 1

Los valores de resistencia obtenidos se consideran puntos clave para la creación de la guía gráfica correspondiente al cemento tipo HE y la combinación 1. Posteriormente, se llevó a cabo un ajuste de curva mediante una regresión exponencial, visualizada en la figura 23, que proporciona un valor del coeficiente de determinación (R^2) de 0.99.

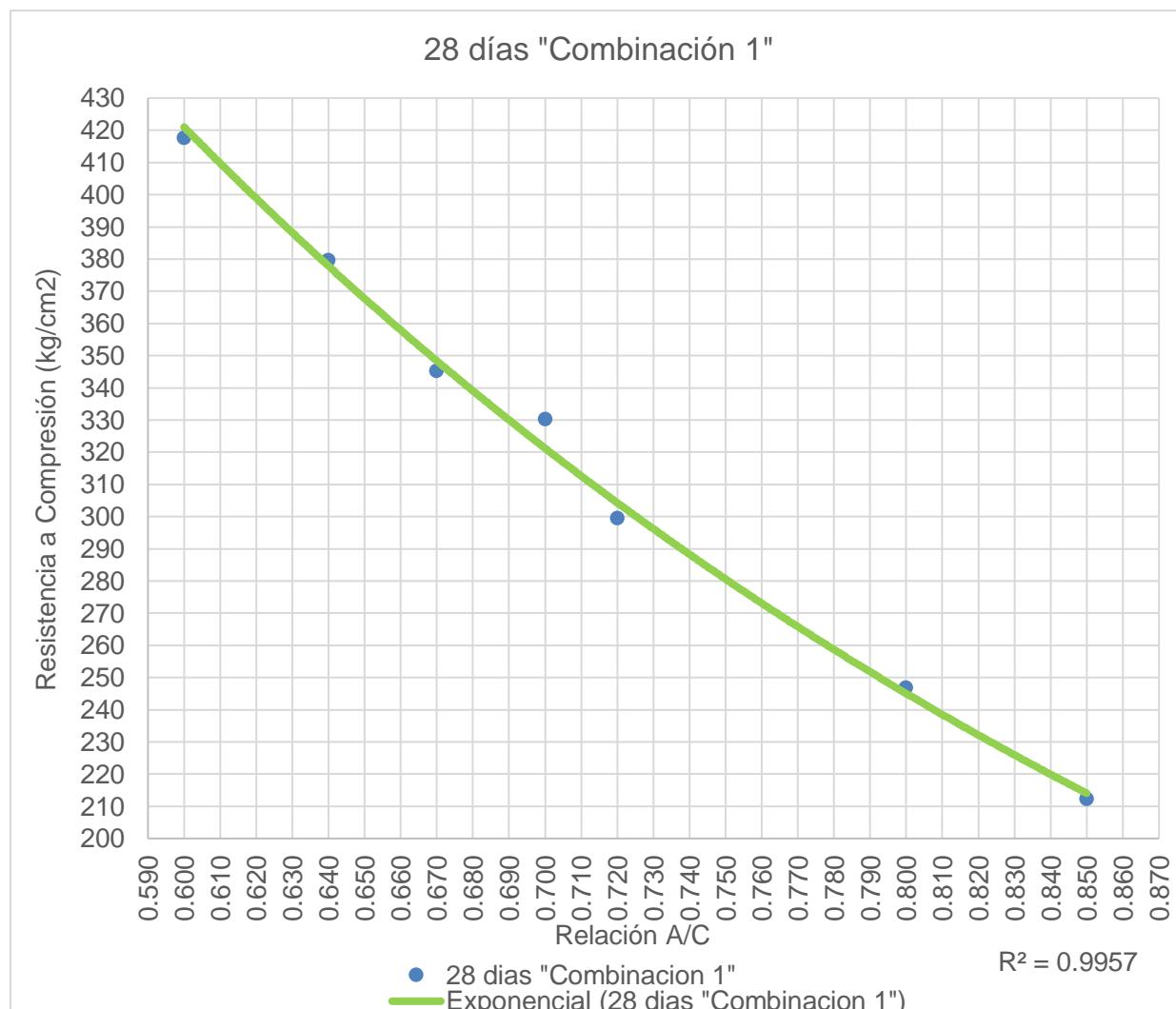


Figura 23. Curva Relación A/C vs Resistencia de la combinación 1 y el cemento HE

Combinación 2: arena Santa Isabel, grava Paute

De igual manera, se presentan en la tabla 54 los resultados de las resistencias obtenidas para relación agua/cemento (A/C), utilizando el cemento tipo HE y la combinación 2 de agregados. Además, se destaca que el porcentaje promedio de resistencia a los 7 días es de 68%.

A/C	Días	Resistencia (kg/cm ²)	Porcentaje
0.600	7	315.843	72.69%
0.600	28	434.477	100.00%

0.640	7	270.284	67.90%
0.640	28	398.076	100.00%
0.680	7	241.697	67.13%
0.680	28	360.038	100.00%
0.720	7	210.383	71.19%
0.720	28	295.504	100.00%
0.760	7	180.055	69.47%
0.760	28	259.185	100.00%
0.850	7	116.929	58.88%
0.850	28	198.586	100.00%
% PROMEDIO a los 7 días =			67.88%

Tabla 54. Resistencias obtenidas con el cemento tipo HE y la combinación 2

La figura 24, representa la guía gráfica que solicitó la empresa Hormi Center para la elaboración del hormigón con el cemento HE y la combinación 2 de agregados provenientes de Santa Isabel para la arena y Paute para la grava. Para la elaboración de la curva se utilizaron como puntos de referencia para el ajuste exponencial a los datos obtenidos en la tabla 54.

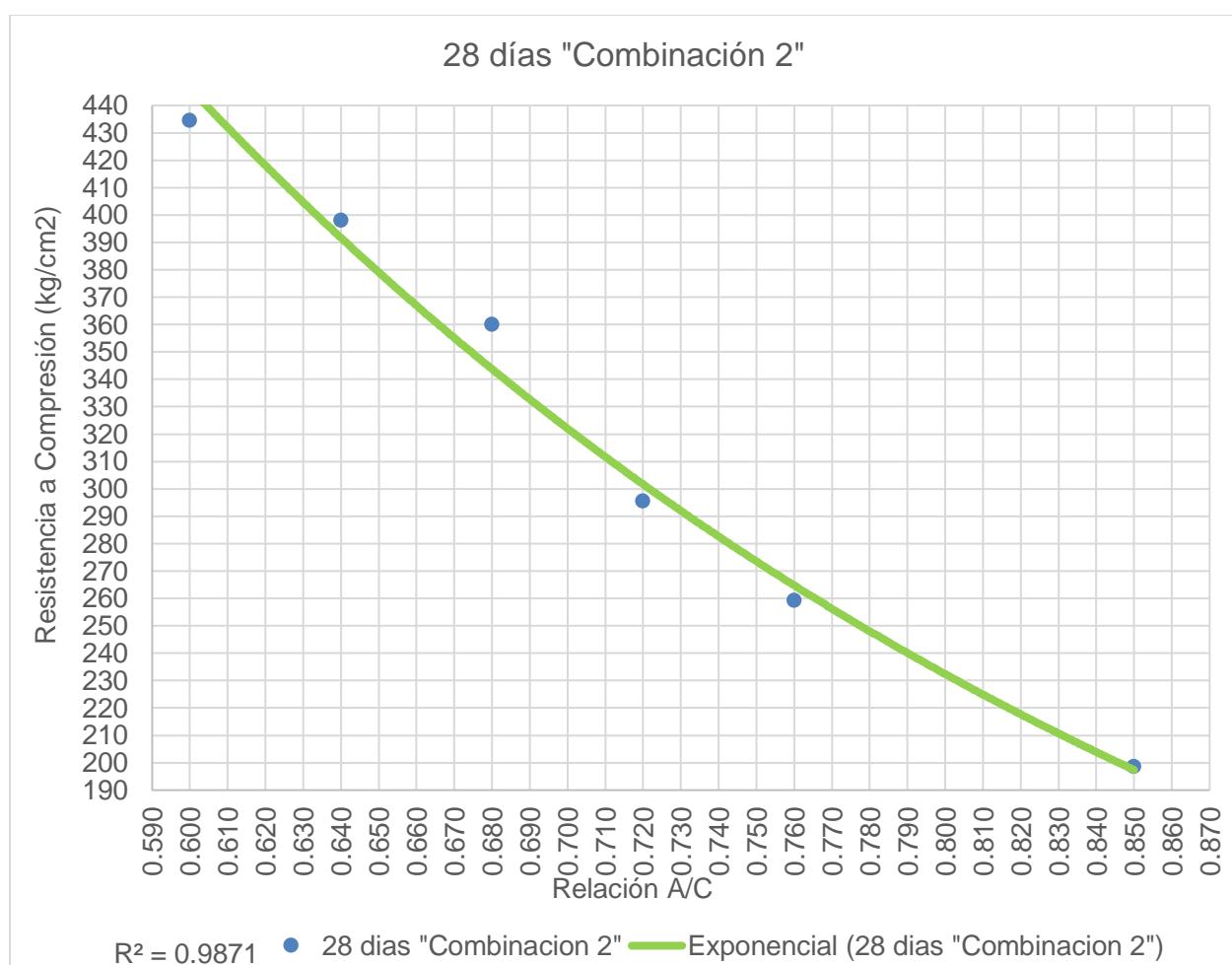


Figura 24. Curva Relación A/C vs Resistencia de la combinación 2 y el cemento HE

5.5.2. Curva A/C vs resistencia para el cemento tipo GU

Combinación 1: arena Santa Isabel, grava Santa Isabel

Mediante los ensayos realizados variando la relación A/C, se obtuvieron resultados de resistencia menores con el cemento GU, por lo que, se tuvieron que disminuir dichas relaciones, de manera que cumplan con las resistencias comerciales de la empresa.

En la tabla 55, se detallan las relaciones A/C usadas y las resistencias obtenidas a los 7 y 28 días de su confección.

A/C	Días	Resistencia (kg/cm ²)	Porcentaje
0.460	7	269.804	70.92%
0.460	28	380.459	100.00%
0.500	7	235.851	72.87%
0.500	28	323.673	100.00%

0.600	7	131.506	65.01%
0.600	28	202.292	100.00%
0.530	7	187.883	69.41%
0.530	28	270.693	100.00%
0.560	7	163.689	71.96%
0.560	28	227.463	100.00%
		% PROMEDIO a los 7 días =	70.03%

Tabla 55. Resistencias obtenidas con el cemento tipo GU y la combinación 1

Con los puntos obtenidos en la tabla 55, se procedió a realizar el ajuste de la curva para los diseños de hormigón elaborados con el cemento tipo GU y la combinación 1 de agregados. En la figura 25 se observa la guía gráfica solicitada que puede ser usada cuando se requieran cantidades menores de concreto. La curva cuenta con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.99.

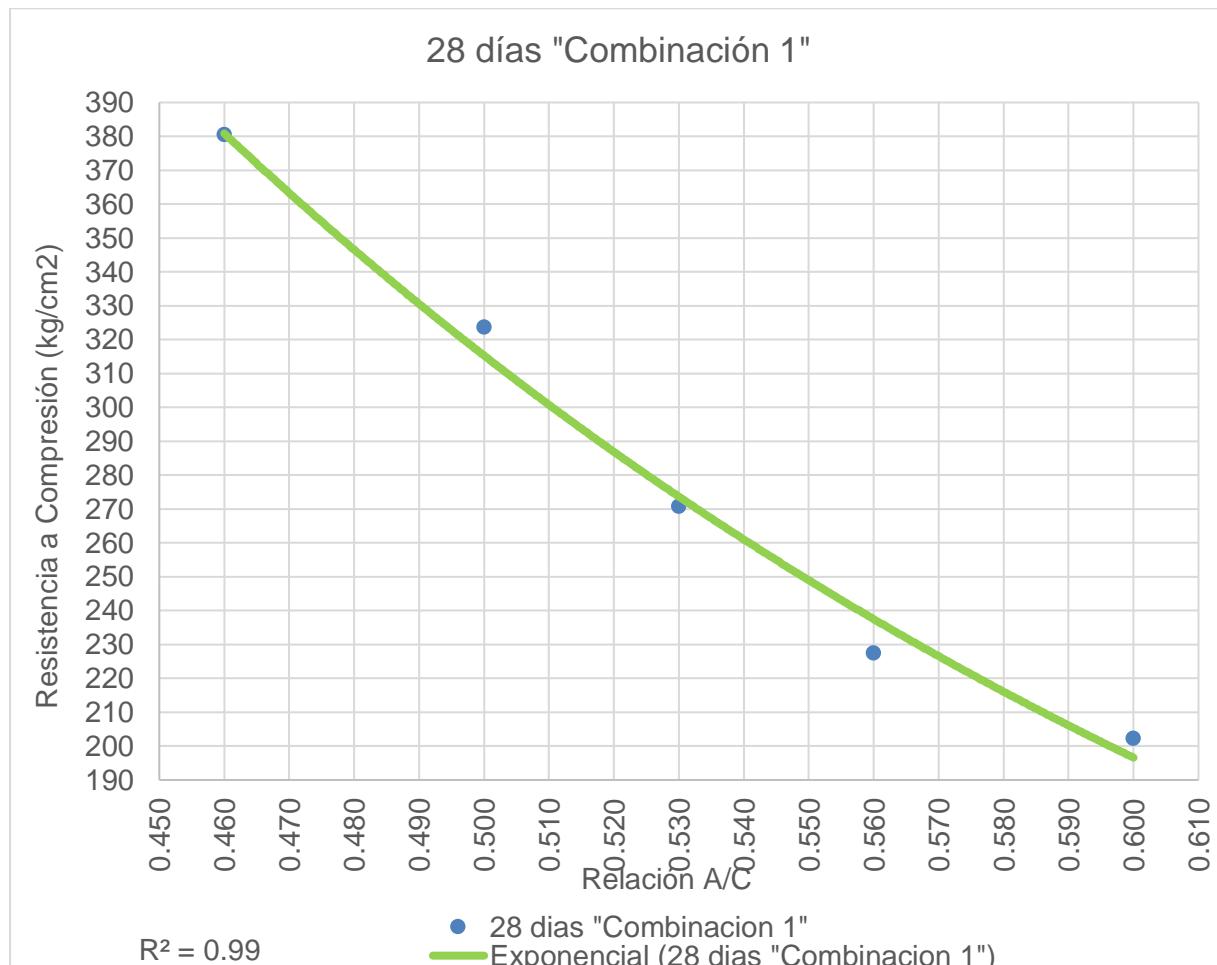


Figura 25. Curva Relación A/C vs Resistencia de la combinación 1 y el cemento GU

Combinación 2: arena Santa Isabel, grava Paute

Al analizar los resultados obtenidos anteriormente, se notó la similitud en los resultados de resistencia entre los dos tipos de combinaciones, por lo que, se procedió a utilizar las mismas relaciones A/C para la combinación 2 de áridos.

En la tabla 56, se enlistan los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión, utilizando el cemento tipo GU y la combinación 2 de agregados.

A/C	Días	Resistencia (kg/cm ²)	Porcentaje
0.600	7	119.967	58.95%
0.600	28	203.496	100.00%
0.500	7	228.510	69.80%
0.500	28	327.391	100.00%
0.460	7	262.815	69.04%
0.460	28	380.651	100.00%
0.530	7	198.578	71.37%
0.530	28	278.235	100.00%
0.560	7	172.256	72.64%
0.560	28	237.124	100.00%
% PROMEDIO a los 7 días =			68.36%

Tabla 56. Resistencias obtenidas con el cemento tipo GU y la combinación 2

La figura 26, muestra la guía gráfica obtenida con los puntos de la tabla 56, esta curva se ajustó a una regresión exponencial, la misma que tiene un coeficiente de determinación (R^2) de 0.99, lo que indica que la curva se aproxima eficientemente a los resultados de los ensayos y tiene una confiabilidad adecuada para la elaboración de hormigón con el cemento tipo GU y la combinación 2 de áridos.

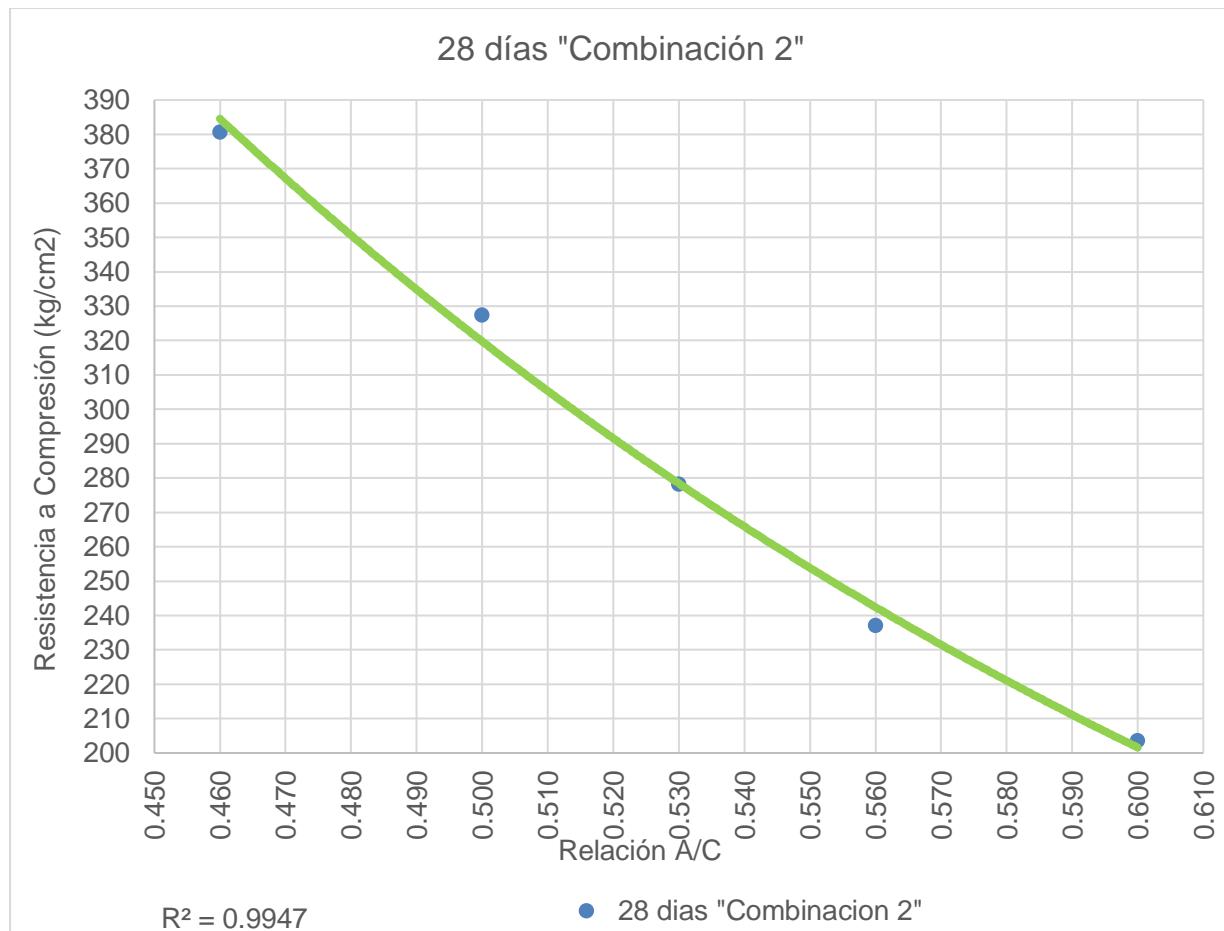


Figura 26. Curva Relación A/C vs Resistencia de la combinación 2 y el cemento GU

Como se pueden observar en las gráficas 23, 24, 25 y 26, estas tienen un coeficiente de determinación (R^2) mayor al 0.98, lo que muestra que las curvas de ajustan correctamente a los resultados obtenidos mediante los ensayos de compresión realizados. Además, se confirma que la influencia de los agregados no afecta directamente a la resistencia del hormigón, esto debido a las características similares de los agregados gruesos, por lo tanto, se obtuvieron curvas relación A/C vs resistencia semejantes entre los dos tipos de combinaciones de agregados.

Los resultados de los puntos de control a los 7 días muestran un promedio de porcentajes entre el 68 % y 72 %. Estos valores se encuentran alrededor del 70%, porcentaje que sirve para evaluar la evolución del hormigón en edades tempranas.

Como parte de los objetivos, se determinaron estas guías gráficas que facilitarán los diseños de hormigón para cualquier resistencia, lo que significará una disminución de recursos y costos para la empresa, optimizando de este modo su producción.

5.6. Relaciones A/C para el diseño de las resistencias específicas

Una vez obtenidas las guías gráficas relación A/C vs resistencia, se realizó una aproximación en cada curva específica para obtener las relaciones A/C óptimas para realizar los diseños de las resistencias comerciales de la empresa. En la tabla 57, se observan valores en un rango entre 0.70 y 0.85 para las dos combinaciones y el cemento tipo HE.

Cemento Tipo HE

	Combinación 1: Arena Santa Isabel, Grava Santa Isabel	Combinación 2: Arena Santa Isabel, Grava Paute
Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Relación agua/ cemento (A/C)	Relación agua/ cemento (A/C)
210	0.85	0.83
240	0.81	0.79
280	0.75	0.74
300	0.72	0.72
320	0.70	0.70

Tabla 57. Relaciones A/C de las resistencias más comerciales con el cemento tipo HE

Finalmente, se realizó el mismo proceso de aproximación en las curvas guías para el cemento tipo GU, como se indica en la tabla 58, los valores de relación A/C son menores que las usadas con el cemento tipo HE, esto debido a la resistencia menor del cemento GU. De igual manera, las relaciones A/C son específicas para los diseños más comerciales de la empresa y las dos combinaciones de áridos.

Cemento Tipo GU

	Combinación 1: Arena Santa Isabel, Grava Santa Isabel	Combinación 2: Arena Santa Isabel, Grava Paute
Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Relación agua/ cemento (A/C)	Relación agua/ cemento (A/C)
210	0.58	0.59
240	0.55	0.56
280	0.52	0.53
300	0.51	0.51
320	0.50	0.50

Tabla 58. Relaciones A/C de las resistencias más comerciales con el cemento tipo GU

Las relaciones agua/cemento (A/C) en los diseños de las resistencias comerciales de la empresa muestran una similitud en ambas combinaciones de áridos. Los agregados gruesos

presentan propiedades físico-mecánicas similares entre sí, lo que resulta en una variación insignificante en los resultados de resistencia.

Sin embargo, hay una diferencia notable en las relaciones A/C entre el cemento tipo GU y el cemento tipo HE. El cemento tipo GU tiene relaciones A/C mucho más bajas, oscilando entre 0.50 y 0.59, en comparación con el cemento tipo HE, que varía entre 0.70 y 0.85. Esto implica que los diseños que utilizan cemento tipo GU requieran una mayor cantidad de material, lo que a su vez aumentará los costos de producción.

5.7. Costos

El éxito y competitividad de la empresa Hormi Center depende en su totalidad del hormigón, considerado como su principal fuente de ingresos. Por lo tanto, conocer su costo de producción por metro cúbico de cada resistencia comercial es fundamental para su crecimiento y mejora en el mercado.

Cada componente del hormigón tiene un costo unitario, los cuales al sumarse y cuantificarse según la cantidad en el que se ocupen dentro de la mezcla de hormigón por metro cúbico, se obtiene el precio total de producción, sin embargo, se debe tener en cuenta que para el trabajo de titulación este valor no considera los costos indirectos como salarios, gasolina, seguros, entre otros.

Los precios unitarios del agua y los agregados fueron proporcionados por la empresa Hormi Center, mientras que, el precio del cemento HE se solicitó a la empresa Atenas, y el costo del saco de cemento tipo GU se obtuvo de las ferreterías como un valor general. En la siguiente tabla se muestran los valores de cada componente para la elaboración del hormigón.

Precios unitarios

Descripción	Valor	Dólares/Unidad
Cemento Atenas HE	134.00	tn
Cemento Atenas GU	0.16	kg
Arena Santa Isabel	21.00	m3
Grava Santa Isabel	19.50	m3
Grava Paute	23.00	m3
Agua	0.18	m3
Arena sin transporte	7.50	m3
Grava Santa Isabel sin transporte	8.00	m3
Grava Paute sin transporte	12.00	m3

Transporte Arena	12.00	m3
Transporte Grava Santa Isabel	13.00	m3
Transporte Grava Paute	11.00	m3

Tabla 59. Precios unitarios de los materiales que componen la mezcla

Como punto de partida, se cuenta con los datos de los diseños propios de la empresa, los cuales se detallan en la tabla 59, junto con las resistencias comerciales correspondientes. Estos costos finales están dados por metro cúbico de hormigón.

Diseños actuales de la empresa Hormi Center

Resistencia (kg/cm ²)	210		240		280		300	
	Peso (kg)	Precio (\$/m ³)						
Cemento	265.00	35.51	290.00	38.86	318.00	42.61	328.00	43.95
Arena	1249.10	10.48	1179.92	9.90	1161.12	9.75	1116.71	9.37
Grava	669.78	6.17	689.38	6.35	678.39	6.25	709.68	6.53
Agua	156.94	0.03	167.17	0.03	169.30	0.03	170.38	0.03
Total, por m³ (\$)	52.19		55.14		58.63		59.89	

Tabla 60. Costos de producción de los diseños actuales de la empresa

Posteriormente, se plantearon nuevos diseños en base a la guía gráfica ya obtenida, y se obtuvieron costos de producción utilizando el cemento Atenas tipo HE para cada tipo de combinación de áridos, se debe tener en cuenta la distribución de este tipo de cemento es a gran escala, y se la realiza solo a empresas que se dedican a fabricación y distribución de hormigón. En las tablas 61 y 62, se observan los precios por metro cúbico de hormigón para los agregados gruesos de Santa Isabel y Paute, respectivamente.

Cemento Tipo HE: Combinación 1

Resistencia (kg/cm ²)	210		240		280		300		320	
	Peso (kg)	Precio (\$/m ³)								
Cemento	284.71	38.15	298.77	40.03	322.67	43.24	336.11	45.04	345.71	46.33
Arena	748.11	6.28	742.66	6.23	733.39	6.16	728.18	6.11	724.45	6.08
Grava	1003.91	7.56	996.59	7.51	984.15	7.41	977.16	7.36	972.16	7.32

Agua	163.45	0.03	164.02	0.03	164.99	0.03	165.54	0.03	165.93	0.03
Total, por m3 (\$)	52.02		53.80		56.84		58.54		59.76	

Tabla 61. Costos de producción de los diseños propuestos con el cemento tipo HE y la combinación 1

Cemento Tipo HE: Combinación 2

Resistencia (kg/cm ²)	210		240		280		300		320	
	Peso (kg)	Precio (\$/m ³)								
Cemento	263.86	35.36	277.22	37.15	295.95	39.66	304.17	40.76	312.86	41.92
Arena	772.76	6.49	767.65	6.44	760.48	6.38	757.33	6.36	754.01	6.33
Grava	992.90	9.14	986.33	9.08	977.12	9.00	973.07	8.96	968.80	8.92
Agua	165.41	0.03	165.76	0.03	166.26	0.03	166.48	0.03	166.71	0.03
Total, por m³ (\$)	51.01		52.70		55.07		56.10		57.20	

Tabla 62. Costos de producción de los diseños propuestos con el cemento tipo HE y la combinación 2

Análogamente, se realizaron diseños con el cemento Atenas tipo GU, cabe recalcar que la comercialización de este tipo de cemento es por medio de bolsas de 50 kilogramos con un valor de mercado de aproximadamente 8.05 dólares. A diferencia del cemento tipo HE, el tipo GU es de libre comercialización y venta al público. Las tablas 63 y 64, detallan los costos de producción para este tipo de cemento y sus respectivas combinaciones de agregados.

Cemento Tipo GU: Combinación 1

Resistencia (kg/cm ²)	210		240		280		300		320	
	Peso (kg)	Precio (\$/m ³)								
Cemento	437.93	70.51	461.82	74.35	488.46	78.64	498.04	80.18	508.00	81.79
Arena	758.37	6.37	747.50	6.27	735.38	6.17	731.03	6.14	726.50	6.10
Grava	816.45	6.15	804.75	6.06	791.70	5.96	787.01	5.93	782.14	5.89
Agua	170.55	0.03	171.75	0.03	173.08	0.03	173.56	0.03	174.06	0.03

Total, por m3 (\$)	83.05	86.72	90.81	92.28	93.81
---------------------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

Tabla 63. Costos de producción de los diseños propuestos con el cemento tipo GU y la combinación 1

Cemento Tipo GU: Combinación 2

Resistencia (kg/cm²)	210		240		280		300		320	
	Peso (kg)	Precio (\$/m3)								
Cemento	398.31	64.13	419.64	67.56	443.40	71.39	460.78	74.19	470.00	75.67
Arena	781.77	6.56	772.31	6.48	761.77	6.39	754.05	6.33	749.97	6.30
Grava	818.65	7.54	808.74	7.45	797.70	7.34	789.63	7.27	785.35	7.23
Agua	180.71	0.03	181.37	0.03	182.10	0.03	182.64	0.03	182.92	0.03
Total, por m3 (\$)	78.26		81.52		85.16		87.82		89.23	

Tabla 64. Costos de producción de los diseños propuestos con el cemento tipo GU y la combinación 2

Los resultados obtenidos, muestran un costo de producción mayor al ocupar el cemento Atenas tipo GU, esto debido a la resistencia a compresión de este, el cual es de 29.3 MPa, mientras que el cemento Atenas tipo HE tiene una resistencia de 47.4 MPa. Por lo que, para obtener las resistencias solicitados se necesita una cantidad mayor de cemento, provocando un aumento en los costos de producción.

Por otra parte, la combinación 2 de agregados que provienen de Santa Isabel y Paute, para arena y grava, respectivamente, es la más económica. Esto debido a sus características especiales de absorción, ya que necesita menos cantidad de agua de mezclado, lo que disminuye los costos.

A continuación, se realizó gráficas para comparar los costos de producción para la elaboración de cada resistencia comercial, con el tipo de cemento HE y GU, y las dos combinaciones de agregados analizados. Además, de una comparación con los diseños que ocupa la empresa. De este modo, se obtiene una mejor visualización de los resultados y los precios de cada resistencia. En las figuras 27, 28, 29, 30 y 31, se observan una comparación en los costos de producción para los diseños de 210 kg/cm², 240 kg/cm², 280 kg/cm², 300 kg/cm² y 320 kg/cm², respectivamente.

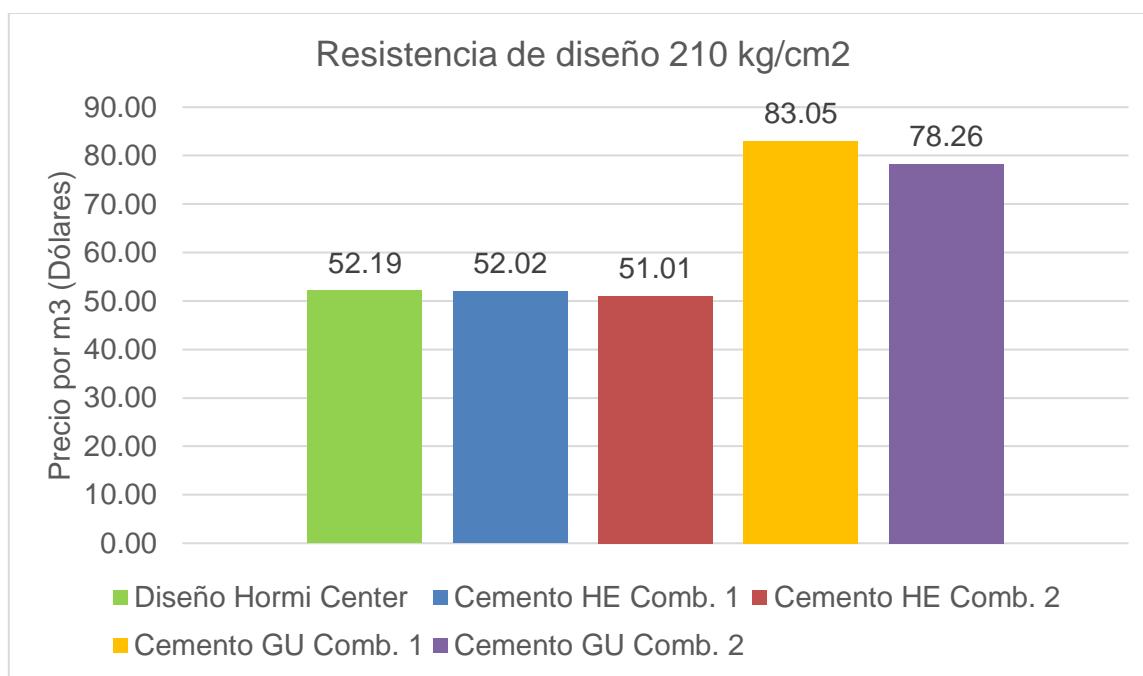


Figura 27. Costos de producción para la resistencia de 210 kg/cm²

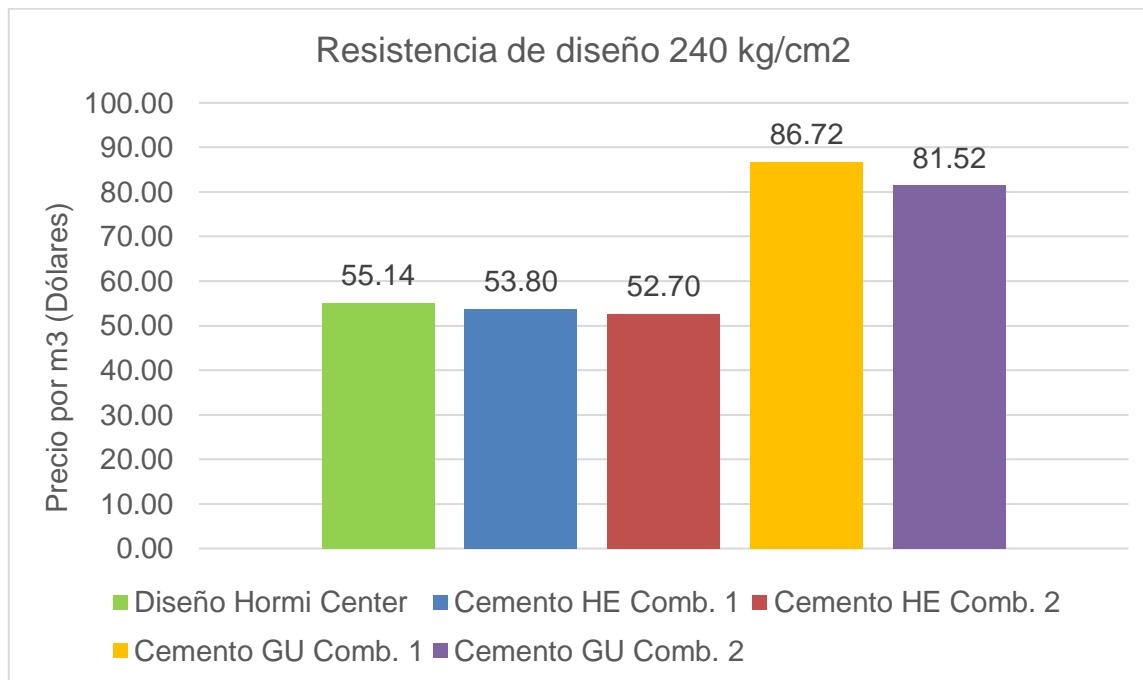


Figura 28. Costos de producción para la resistencia de 240 kg/cm²

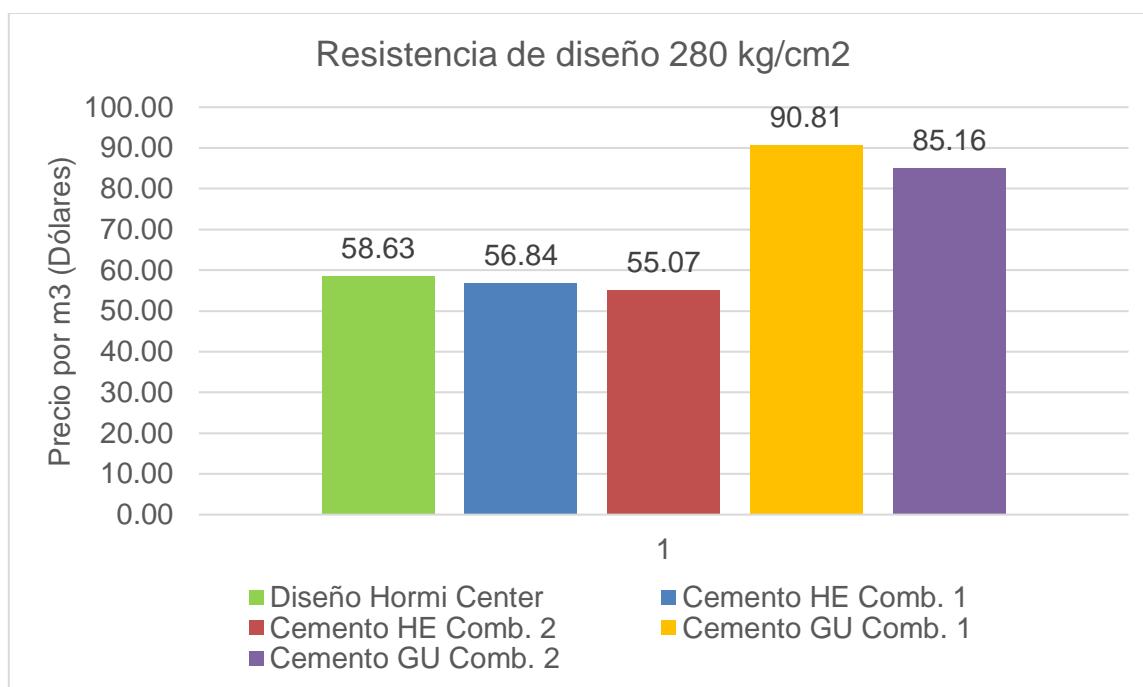


Figura 29. Costos de producción para la resistencia de 280 kg/cm²

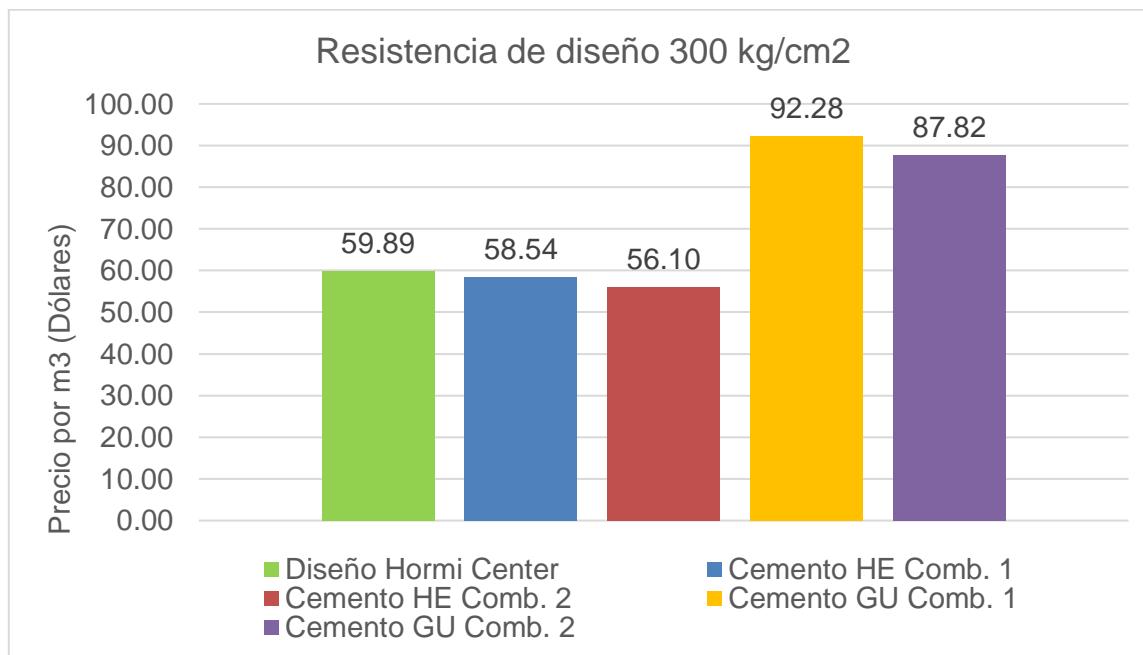


Figura 30. Costos de producción para la resistencia de 300 kg/cm²

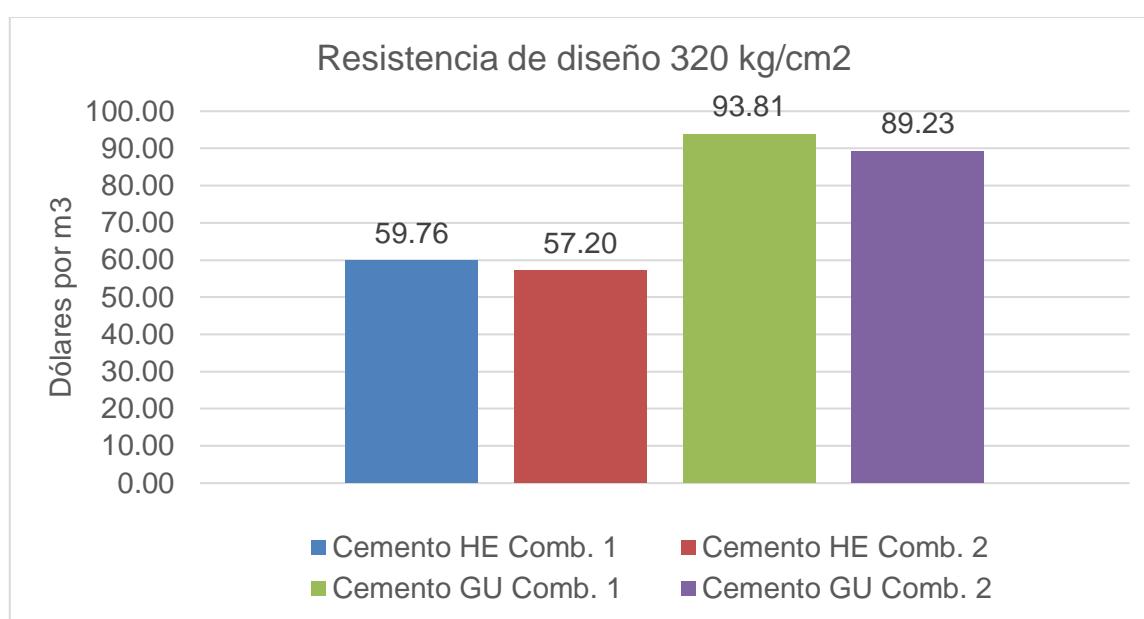


Figura 31. Costos de producción para la resistencia de 320 kg/cm²

Como se observa en las gráficas, existe una disminución de costos en los diseños propuestos en la relación a los diseños actuales de la empresa Hormi Center. Para obtener resistencias mayores la necesidad de una cantidad mayor de cemento aumenta los costos, sin embargo, los diseños propuestos están en un rango de 1.00 a 3.00 dólares de ahorro por metro cúbico de hormigón comparado con los diseños actuales. Por otra parte, la combinación 2 de agregados muestra diferencia de 1.00 a 2.00 dólares, respecto a la combinación 1 de agregados.

El cemento tipo HE muestra una disminución significativa de costos (alrededor de 35 dólares por metro cúbico) para obtener las resistencias requeridas comparado con la fabricación de hormigón utilizando el cemento GU, sin embargo, la comercialización del cemento HE es a gran escala y solo es utilizado por las empresas que se dedican a la elaboración de hormigón.

6. Conclusiones

La caracterización de los áridos empleados en la fabricación del hormigón por parte de la empresa Hormi Center, han demostrado cumplir con los estándares establecidos por la norma NTE INEN 872. Dando como resultados: en el agregado fino, un módulo de finura de 2.30, valor que debe encontrarse en el rango de 2.3 a 3.1 según la normativa, de igual manera, la granulometría se encuentra dentro de los porcentajes adecuados como se observa en la figura 5. Además, los agregados gruesos de Santa Isabel y Paute, tienen valores de módulo de finura de 6.79 y una similar distribución de partículas en su granulometría como se indican en las figuras 7 y 8, las mismas que cumple con lo establecido en la normativa. Por otra parte, la absorción para el agregado grueso de Santa Isabel es de 2.64, mientras que para el agregado de Paute es de 2.10, por lo que, dicha característica influye directamente en la cantidad de agua de mezclado, siendo el árido de Paute el que ocupará menor cantidad de agua en el diseño. Como resultado del proceso de estimación de agregados en la mezcla, las proporciones de áridos utilizadas en la elaboración del hormigón son semejantes entre las dos combinaciones de agregados (Santa Isabel – Santa Isabel y Santa Isabel – Paute), con un valor del 42 % para el árido fino y 58 % del árido grueso.

En consideración a las réplicas de los ensayos, se debe tener en cuenta la influencia de los factores meteorológicos del ambiente en el que se elaboran los diseños de hormigón, las mezclas de concreto del presente trabajo de titulación fueron realizadas en la ciudad de Azogues que generalmente presenta un clima nublado, con una variación de temperatura que oscila entre los 10°C a 22°C. Las variaciones de temperatura, así como las condiciones climáticas afectan a las dosificaciones de la mezcla, se notó una pérdida de trabajabilidad temprana por evaporación del agua de mezclado, lo que dificultaba la obtención del asentamiento adecuado. Por lo tanto, se debe realizar la corrección necesaria del agua de mezclado dependiendo de la temperatura y humedad del ambiente, y de este modo garantizar la calidad y los requisitos impuestos de trabajabilidad y consistencia del hormigón.

La cantidad de agua de mezclado se controla en base a los requisitos de consistencia del hormigón, valores que fueron impuestos por la empresa 4 cm \pm 1 cm. Como parte de la corrección de agua de mezclado, se consideró la cantidad de humedad de los áridos utilizados en la mezcla, dicha cantidad debe ser cuantificada diariamente previo al diseño del hormigón, además de la absorción de cada árido. La consistencia plástica (4 cm \pm 1 cm) solicitada por la empresa se debe a que en esta mezcla se colocan aditivos plastificante y retardante ya establecidos por la fábrica, para que en su posterior entrega en obra tenga una consistencia fluida de 14 a 17 centímetros.

Los resultados de los ensayos de peso unitario del hormigón en estado fresco muestran valores inferiores a 2400 kg/m³, por lo tanto, se clasifica como un hormigón convencional. De igual manera, se reflejan los resultados de rendimiento del hormigón porcentajes mayores al 96 %, validando la eficacia del diseño previo y la elaboración final del concreto. Otro factor que cumple con las recomendaciones del método ACI 211.1 es el contenido de aire, el mismo que no supera el 2 %, y confirma que dicho porcentaje es el adecuado en el diseño del hormigón.

Las directrices visuales de la empresa se muestran a través de las curvas de relación agua/cemento frente a resistencia a la compresión (Figuras 23, 24, 25, 26). Estas curvas se generaron utilizando puntos de resistencia obtenidos al variar la relación agua/cemento. Luego, estos puntos se ajustaron a una curva mediante regresión exponencial, con un nivel de confianza superior al 98%. Esto proporciona una validez para utilizar la relación agua/cemento obtenido gráficamente en los diseños.

Se registraron las siguientes relaciones agua/cemento para el cemento Atenas tipo He en la combinación 1 (agregados provenientes de Santa Isabel): 0.85, 0.81, 0.75, 0.72 y 0.70, correspondientes a las resistencias de 210 kg/cm², 240 kg/m², 280 kg/cm², 300 kg/cm² y 320 kg/cm² respectivamente. Para la combinación 2 (agregado fino de Santa Isabel y agregado grueso de Paute), se obtuvieron relaciones de 0.83, 0.79, 0.74, 0.72 y 0.70 para las mismas resistencias. Estos resultados fueron obtenidos mediante el análisis gráfico de las figuras 23 y 24. Por otro lado, en el caso del cemento Atenas tipo GU, para las resistencias mencionadas anteriormente, se obtuvieron gráficamente (Figuras 25, 26) las relaciones agua/cemento de 0.58, 0.55, 0.52, 0.51 y 0.50 para la primera combinación, y de 0.59, 0.56, 0.53, 0.51 y 0.50 para la segunda combinación, respectivamente. Estos resultados indican que la elección de diferentes tipos de áridos gruesos no tiene un impacto significativo en la resistencia a la compresión del hormigón. En otras palabras, independientemente del árido grueso utilizado, se logra la resistencia deseada.

El agregado grueso proveniente de Santa Isabel y el de Paute pueden ser utilizados de manera intercambiable sin comprometer la calidad del hormigón. La consistencia en los resultados de las relaciones agua/cemento para diferentes resistencias comerciales respalda la confiabilidad y la versatilidad de los materiales utilizados por Hormi Center. La disponibilidad de ambos agregados y la garantía de calidad que ofrecen permiten seleccionar cualquiera de ellos en la elaboración de su hormigón.

Al comparar los cementos tipo HE y GU, se observa que la relación agua/cemento es menor para el cemento GU. Esto se debe a las propiedades específicas de cada tipo de cemento.

Por lo tanto, para obtener las mismas resistencias comerciales implica agregar una mayor cantidad de cemento lo que puede comprometer la trabajabilidad del hormigón. en este trabajo de titulación las relaciones agua cemento no pueden menores a 0.46 debido a que valores por debajo influyen a la durabilidad.

Al analizar las gráficas (Figuras 27, 28, 29, 30, 31), se puede observar que el uso de una mayor cantidad de cemento tipo GU en los diseños resulta en un aumento en los costos de producción de hormigón para el constructor. Esto se debe a que se requiere una mayor cantidad de cemento GU para lograr la resistencia deseada en comparación con los cementos tipo He. Por lo tanto, es crucial considerar cuidadosamente la relación costo-beneficio al seleccionar el tipo de cemento para la producción de hormigón.

Además, al analizar los costos de producción (Figuras 27, 28, 29, 30, 31), se puede observar que la combinación 2 de agregados (Santa Isabel-Paute) presenta una disminución en los costos en comparación con la combinación 1 (Santa Isabel-Santa Isabel). Esto convierte a la combinación de agregados provenientes de la cantera de Paute en un factor clave a considerar, ya que no se ve afectada la calidad y resistencia del hormigón, independientemente del tipo de árido grueso utilizado. En términos de la relación costo-beneficio para la empresa, la utilización de la combinación dos generaría mayores ingresos y garantizaría la calidad del hormigón.

Al comparar los resultados del proyecto de titulación con los diseños actuales de la empresa, se pudo observar una mejora en el rendimiento de los diseños propuestos. Esto se logró mediante un cambio en las proporciones de los agregados, lo que permitió obtener un ahorro significativo por metro cúbico de hormigón. La clave fue aumentar el porcentaje de árido grueso al 58%, en contraste con el 45% utilizado normalmente, para lograr resistencias mayores sin comprometer la trabajabilidad. El aumento en el porcentaje de árido grueso no generó problemas de segregación de los materiales y resultó en un ahorro de 1 a 3 dólares por metro cúbico en los costos de producción de los diseños para las resistencias más comunes. Estos resultados demuestran que los diseños propuestos son más eficientes en términos de costo a comparación de los diseños utilizados actualmente por la empresa.

7. Referencias

Atenas, C. (2021). *Cemento Atenas Tipo GU Ficha Técnica*. Cuenca.

Atenas, C. (2021). *Ficha Técnica Cemento HE*. Cuenca.

Cáder, G., & Oliva, C. (Septiembre de 2012). *Adaptación del método de diseño de mezclas de concreto según ACI 211.1 utilizando los tipos de cemento ASTM C-1157 tipo Gu y ASTM C-1157 tipo He*. Santa Ana: Repositorio Universidad de El Salvador.

Flores Molacho, N. (2020) Análisis comparativo de costos y resistencia a la compresión del concreto tradicional y el concreto predosificado seco. Universidad privada del Norte (Trujillo Perú).

González-Díaz, E., Jaizme-Vega, E., & Jubera-Perez, J. (2018). Assessment of the influence of the effective water-cement ratio on the workability and strength of a commercial concrete used for the construction of concrete caissons. *Revista de la construcción*.

Guevara, G., Hidalgo, C., Pizarro, M., I, R., Rojas, L., & Segura, G. (2012). *Efecto de la variación agua/cemento en el concreto*. Costa Rica: Tecnología en marcha.

INEN. (2010). *ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO FINO*. QUITO.

INEN. (2010). *ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO GRUESO*. QUITO.

INEN. (2010). *ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA (PESO VOLUMÉTRICO) Y EL PORCENTAJE DE VACÍOS*. QUITO.

INEN. (2010). *Áridos. Muestreo*. Quito.

INEN. (2010). *Áridos. Reducción de muestras a tamaño de ensayo*. Quito.

INEN. (2010). *HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO*. QUITO.

INEN. (2010). *HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO*. QUITO.

INEN. (2010). *HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. MUESTREO*. QUITO.

INEN. (2010). *NTE INEN 151*. Quito.

INEN. (2011). *Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad*. Quito.

INEN. (2011). *ÁRIDOS PARA HORMIGÓN. REQUISITOS*.

INEN. (2011). *ÁRIDOS. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS, FINO y GRUESO*. Quito.

INEN. (2011). *NTE INEN 872*. Quito.

INEN. (2017). *HORMIGÓN. ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE ENSAYO EN EL LABORATORIO*. QUITO.

Lema W. B, Castillo E. M (2017). Relaciones agua/cemento en diseño de vértices extremos aplicado a mortero. *Maskana*, 9 (1), 125-140. Doi: 10.18537/mskn.09.01.12

Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2009). *Materiales para ingeniería civil*. PEARSON EDUCACION, S. A.

Orbe, L., & Zúñiga, P. (2013). *Optimización de la relación agua/cemento en el diseño de hormigones estándar establecidos en los códigos ACI-ASTM*. Quito-Ecuador: Repositorio Escuela Politécnica Nacional.

Riojas Ortiz J. R. (2018) Curvas de Correlación entre la relación agua/cemento y la resistencia a compresión axial del mortero para las canteras El Gavilán y Bazán. [Título Profesional Universidad Privada del Norte] Repositorio Académico de la Universidad Privada del Norte. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/13489>

Rodríguez de Densale, G., Sabalsagaray, S., Romay, C., & Benavídez, C. (2008). *Avances en la producción de hormigón verde en el Uruguay*. Montevideo-Uruguay: Gestión de la calidad, patología y recuperación de la construcción.

Sanchez De Guzmán, D. (2001). *Tecnología del Concreto y del Mortero*. Bhandar.

Sólis-Carcaño, R., Moreno, E., & Arcudia-Abad, C. (2008). Study of the concrete's compressive strength due to the combined effect of the water-cement ratio, the coarse-fine aggregate ratio and the source of the aggregates. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*.

Toirac Corral, J. (2012). Caracterización granulométrica de las plantas productoras de arena en la República Dominicana, su impacto en la calidad y costo del hormigón. *Ciencia y Sociedad*, 37(3), 293-334. doi: <https://doi.org/10.22206/cys.2012.v37i3.pp293-334>

Vegas I., Azkarate I., Juerrero A., Frías M. Diseño y prestaciones de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados procedentes de escombro de hormigón. *Materiales de Construcción*, 59(295), 5-18. Doi: 10.3989/mc.2009.44207

Vidaud, E. (2013). *De La historia del cemento. CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA EN CONCRETO*.

Winter, G., & Nilson, A. H. (2002). *Proyecto de Estructuras de Hormigón*. Barcelona: REVERTÉ S. A.

8. Anexos