

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**EFECTO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS-MECÁNICAS
DEL CONCRETO CON RESISTENCIAS 210 Y 280 KG/CM²
AL SUSTITUIR MATERIAL CEMENTICIO POR COSTRA
PRODUCTO DE LA ELABORACIÓN DEL CLÍNKER**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CONSTRUCCIÓN Y MATERIALES

AUTOR: Br. Luis Alejandro Requejo Amaya

ASESOR: Dra. Rocío del Pilar Durand Orellana

TRUJILLO - PERÚ

2021

**“EFECTO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS-MECÁNICAS DEL CONCRETO
CON RESISTENCIAS 210 Y 280 KG/CM² AL SUSTITUIR MATERIAL
CEMENTICIO POR COSTRA PRODUCTO DE LA ELABORACIÓN DEL
CLÍNKER”**

JURADO EVALUADOR

PRESIDENTE

Ing. Alanoca Quenta, Ángel

CIP: 39009

SECRETARIO

Ing. Vega Benites, Jorge

CIP: 78666

VOCAL

Ing. Narváez Aranda, Ricardo

CIP: 58776

ASESOR

Ing. Durand Orellana, Rocío

CIP: 60518

PRESENTACIÓN

Señores Miembros del Jurado:

Dando cumplimiento y conforme a las normas establecidas en el Reglamento de Grados y Títulos y Reglamento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada Antenor Orrego, se pone a vuestra consideración la presente tesis, titulada:

“EFECTO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS-MECÁNICAS DEL CONCRETO CON RESISTENCIAS 210 Y 280 KG/CM² AL SUSTITUIR MATERIAL CEMENTICIO POR COSTRA PRODUCTO DE LA ELABORACIÓN DEL CLÍNKER”

Con la finalidad de obtener el título profesional de Ingeniero Civil.

Atentamente,

Br. Luis Alejandro Requejo Amaya

Trujillo, enero del 2021.

DEDICATORIA

La presente tesis va dedicada a:

Dios, por haberme dado el milagro de la vida, por hacer de mí una persona de bien, por ser esa luz que ilumina mi camino y por darme las fuerzas para salir adelante siempre que me enfrento ante cualquier adversidad.

A mi padre Augusto, por ser un ejemplo de responsabilidad, ética, sabiduría y respeto, por los incontables consejos, por siempre confiar en mí, por ser esa imagen de firmeza y amor y por ser ese hombro en el cual apoyarse en los momentos más adversos ¡Gracias!

A mi madre Carmen Rosa, por su infinito amor, bondad y comprensión, por su tenacidad e inagotable esfuerzo por hacer de mí una mejor persona, por inculcarme el valor del estudio y la honestidad y por ser un ejemplo de que con esfuerzo siempre se logra lo que uno se propone ¡Gracias!

A mi hermano Augusto Humberto, por ser mi mayor referente de cómo ser una mejor persona y profesional, por sus consejos, por su manera diferente de confiar en mí y por ser esa mano amiga que nunca te niega su apoyo ¡Gracias!

A mi tía Hilda, por su inconmensurable amor y bondad, por estar conmigo siempre en los momentos felices y adversos, por los cafés cada tarde, por su apoyo incondicional, por ser el motor y motivo del desarrollo de la presente tesis ¡Gracias!

A mis familiares, amigos, compañeros de estudios y trabajo, por el apoyo incondicional.
¡Gracias!

Luis A. Requejo Amaya

AGRADECIMIENTOS

Mi eterno agradecimiento a:

A mis familiares, por su paciencia, amor e incondicional apoyo, por los enseñanzas y consejos en el camino de convertirme en una persona de bien y buen profesional.

A la Dra. Rocío del Pilar Durand Orellana, asesora de tesis, por la orientación, consejos y excelente apoyo técnico durante todo el proceso de investigación.

A la plana docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Privada Antenor Orrego, por brindarme los conocimientos necesarios, sin los cuales no hubiera sido posible realizar la presente investigación.

A la empresa Cementos Pacasmayo S.A, en especial al área de Investigación y Desarrollo, que me brindaron y facilitaron el apoyo técnico, materia prima, herramientas y equipos necesarios para realizar de manera satisfactoria la investigación.

A los jurados, por sus opiniones y sugerencias para mejorar y hacer más entendible la presente tesis.

EL AUTOR

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar los efectos en las propiedades físicas - mecánicas de concretos 210 y 280 kg/cm² al sustituir material cementicio por costra, la cual es un residuo que se produce en el interior del horno durante el proceso de la elaboración del clínker. Por lo cual, se comparó a un concreto patrón versus concretos experimentales.

La investigación se centró en especímenes cilíndricos y prismáticos de concreto, los cuales fueron elaborados con Cemento Pacasmayo tipo I, agregados fino y grueso que fueron muestreados de la pila de agregados de Dino S.R.L y costra que fue recolectada de la zona de desmonte de la empresa Cementos Pacasmayo S.A.A, la misma que fue molida hasta llegar a una determinada finura. Asimismo, se evaluó la actividad puzolánica de la costra según las normas ASTM C311 y ASTM C989.

Se realizaron 8 diferentes tipos de diseños (4 para concretos 210 kg/cm² y 4 para concretos 280 kg/cm²) según el método Módulo de fineza combinación de los agregados, los mismos que fueron dosificados en proporciones de 0%, 20%, 35% y 50% de sustitución. Las muestras estuvieron conformadas por 96 especímenes cilíndricos de 4 x 8" a los que se les evaluó su resistencia a la compresión a 1, 3, 7 y 28 días; 24 especímenes cilíndricos de 6 x 12" a los que se les evaluó su permeabilidad al aire y resistividad eléctrica; y 16 especímenes prismáticos (vigas) de 22 x 6 x 6" a los que se les evaluó su resistencia a la flexión a los 28 días. Así mismo a cada diseño se les evaluó su temperatura, consistencia (asentamiento) y peso unitario, de los cuales se obtuvieron concretos del tipo normal con asentamientos entre 5" - 6" clasificándolos de esta manera como mezclas fluidas.

Como conclusión, se obtuvo que el porcentaje de sustitución óptimo de costra por cemento es al 20%, ya que es ahí donde se halla un balance entre costo-desempeño, teniendo incrementos respecto a resistencia a la compresión, manteniendo la resistencia a la flexión, permeabilidad y resistividad eléctrica. Además, es un 10% más económico que los diseños patrón y contribuye de manera positiva al cuidado del medio ambiente como consecuencia de la reducción de emisión de CO₂ al ambiente al utilizar menor cantidad de cemento.

Palabras clave: concreto, costra, material cementicio, sustitución, propiedades físicas

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the effects on the physical-mechanical properties of 210 and 280 kg / cm² concrete when substituting cementitious material for crust, which is a residue that is produced inside the kiln during the process of making the clinker. Therefore, it was compared to a concrete pattern versus concrete experimental.

The research focused on cylindrical and prismatic concrete specimens, which were made with Cemento Pacasmayo type I, fine and coarse aggregates that were sampled from the pile of aggregates of Dino S.R.L and crust that was collected from the company's clearing area. Cementos Pacasmayo S.A.A, the same one that was ground to a certain fineness. Likewise, the pozzolanic activity of the crust was evaluated according to the ASTM C311 and ASTM C989 standards.

Eight different types of designs were made (4 for concretes 210 kg/cm² and 4 for concretes 280 kg/cm²) according to the method Modulus of fineness combination of the aggregates, which were dosed in proportions of 0%, 20%, 35 % and 50% replacement. The samples consisted of 96 4 x 8" cylindrical specimens that were evaluated for their compressive strength at 1, 3, 7 and 28 days; 24 cylindrical specimens of 6 x 12" which were evaluated for their air permeability and electrical resistivity; and 16 prismatic specimens (beams) of 22 x 6 x 6" which were evaluated for their flexural strength at 28 days. Likewise, each design was evaluated for its temperature, consistency (settlement) and unit weight, from which normal-type concretes with settlements between 5 " - 6" were obtained, thus classifying them as fluid mixtures.

As a conclusion, it was obtained that the optimum percentage of substitution of crust for cement is 20%, since it is there where there is a balance between cost-performance, having increases with respect to compressive strength, maintaining flexural strength, permeability and electrical resistivity. In addition, it is 10% cheaper than standard designs and contributes positively to caring for the environment as a consequence of the reduction of CO₂ emissions to the environment by using less cement.

Keywords: concrete, crust, cementitious material, substitution, physical properties

INDICE

PRESENTACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT	vii
INDICE	viii
INDICE DE TABLAS	x
INDICE DE FIGURAS.....	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Realidad problemática	1
1.2. Formulación del problema.....	2
1.3. Objetivos	2
1.4. Justificación del estudio.....	3
II. MARCO DE REFERENCIA.....	4
2.1. Antecedentes	4
2.2. Marco teórico.....	7
2.3. Marco conceptual	11
2.4. Hipótesis	12
2.5. Variables	12
2.6. Operalización de variables.....	13
III. MATERIALES Y MÉTODOS	14
3.1. Tipo y nivel de investigación	14
3.2. Población y muestra.....	14
3.3. Diseño de contratación	15
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	16
3.5. Procedimiento de recolección de datos	17
3.6. Procedimiento y análisis de datos	38
IV. RESULTADOS.....	39
4.1. Costra	39
4.2. Agregado fino.....	43
4.3. Agregado grueso	48
4.4. Diseño de mezcla	53
4.5. Ensayos al concreto fresco	54

4.6.	Ensayos al concreto endurecido	57
4.7.	Costo por metro cúbico del concreto.....	69
4.8.	Prueba de hipótesis.....	73
V.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	75
5.1.	De la costra.....	75
5.2.	Del agregado fino	76
5.3.	Del agregado grueso.....	76
5.4.	Del concreto en estado fresco.....	77
5.5.	Del concreto en estado endurecido.....	78
5.6.	Del costo por metro cúbico del concreto.....	80
VI.	CONCLUSIONES	82
VII.	RECOMENDACIONES	85
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
	ANEXOS.....	88

INDICE DE TABLAS

Tabla 01	<i>Operalización de variables</i>	13
Tabla 02	<i>Muestra de diseños 210 y 280 kg/cm² sometidos a resistividad eléctrica, permeabilidad al aire y resistencia a la compresión</i>	14
Tabla 03	<i>Muestra de diseños 210 y 280 kg/cm² sometidos a resistencia a la flexión</i>	15
Tabla 04	<i>Cantidad de masas mínimas de muestra para ensayo de contenido de humedad según su TNM</i>	20
Tabla 05	<i>Cantidad mínima de muestra para agregado global o grueso</i>	21
Tabla 06	<i>Rangos granulométricos para el agregado fino</i>	22
Tabla 07	<i>Requisitos granulométricos para el agregado grueso</i>	23
Tabla 08	<i>Capacidad del recipiente de medida según TNM</i>	24
Tabla 09	<i>Volumen de agua de litro por metro cúbico para TNM de agregados y consistencias indicadas</i>	28
Tabla 10	<i>Porcentaje (%) de aire atrapado según el TNM</i>	28
Tabla 11	<i>Relación a/c según f'cr</i>	29
Tabla 12	<i>Módulo de fineza según contenido de cemento en bolsas/m³ y TNM</i>	30
Tabla 13	<i>Capacidad del recipiente de medición según TNM</i>	33
Tabla 14	<i>Tolerancias permisibles según edad de ensayo</i>	34
Tabla 15	<i>Valores de resistencia del concreto recomendados según el rango de Tráfico</i>	36
Tabla 16	<i>Clases de permeabilidad según su valor kT</i>	37
Tabla 17	<i>Clasificación de penetración de iones cloruro según su valor kΩ-cm y tamaño de probeta</i>	38
Tabla 18	<i>Pérdida al fuego del cemento y costra</i>	39
Tabla 19	<i>Composición química del cemento y costra</i>	39
Tabla 20	<i>Porcentaje de retenido en malla #325 del cemento y costra</i>	41
Tabla 21	<i>IAP a 7 días según normas ASTM C311 Y ASTM C989</i>	41
Tabla 22	<i>IAP a 28 días según normas ASTM C311 Y ASTM C989</i>	42
Tabla 23	<i>Contenido de humedad (%) de la arena natural</i>	43
Tabla 24	<i>Análisis granulométrico de la arena natural</i>	44
Tabla 25	<i>Peso unitario suelto de la arena natural</i>	46
Tabla 26	<i>Peso unitario compactado de la arena natural</i>	46
Tabla 27	<i>Peso específico y porcentaje de absorción de la arena natural</i>	47
Tabla 28	<i>Contenido de humedad (%) de la piedra zarandeada H57</i>	48
Tabla 29	<i>Análisis granulométrico de la piedra zarandeada H57</i>	49
Tabla 30	<i>Peso unitario suelto de la piedra zarandeada H57</i>	51
Tabla 31	<i>Peso unitario compactado de la piedra zarandeada H57</i>	51
Tabla 32	<i>Peso específico y porcentaje de absorción de la piedra zarandeada H57</i>	52
Tabla 33	<i>Diseños de mezcla para concretos f'c: 210 kg/cm²</i>	53
Tabla 34	<i>Diseños de mezcla para concretos f'c: 280 kg/cm²</i>	53
Tabla 35	<i>Temperatura y asentamiento de diseños de concreto f'c: 210 kg/cm²</i>	54
Tabla 36	<i>Temperatura y asentamiento de diseños de concreto f'c: 280 kg/cm²</i>	54
Tabla 37	<i>Peso unitario de diseños de concreto f'c: 210 kg/cm²</i>	55
Tabla 38	<i>Peso unitario de diseños de concreto f'c: 280 kg/cm²</i>	56
Tabla 39	<i>Resistencia a la compresión de diseños de concreto f'c: 210 kg/cm²</i>	57
Tabla 40	<i>Resistencia a la compresión de diseños de concreto f'c: 280 kg/cm²</i>	60
Tabla 41	<i>Módulo de ruptura de diseños de concreto f'c: 210 kg/cm²</i>	63
Tabla 42	<i>Módulo de ruptura de diseños de concreto f'c: 280 kg/cm²</i>	64
Tabla 43	<i>Permeabilidad al aire de diseños de concreto f'c: 210 kg/cm²</i>	65
Tabla 44	<i>Permeabilidad al aire de diseños de concreto f'c: 280 kg/cm²</i>	66
Tabla 45	<i>Resistividad eléctrica de diseños de concreto f'c: 210 kg/cm²</i>	67
Tabla 46	<i>Resistividad eléctrica de diseños de concreto f'c: 280 kg/cm²</i>	68
Tabla 47	<i>Precios unitarios de los componentes del concreto</i>	69

Tabla 48	Costo por metro cúbico de diseños de concreto $f'c: 210 \text{ kg/cm}^2$	70
Tabla 49	Costo por metro cúbico de diseños de concreto $f'c: 280 \text{ kg/cm}^2$	71
Tabla 50	Sumatoria de volumen absoluto de diseño de concreto 210 kg/cm^2	89
Tabla 51	Sumatoria de volumen absoluto de diseño de concreto $f'c: 280 \text{ kg/cm}^2$	94
Tabla 52	IAP detallado a 7 días – ASTM C311	99
Tabla 53	IAP detallado a 7 días – ASTM C989	99
Tabla 54	IAP detallado a 28 días – ASTM C311	100
Tabla 55	IAP detallado a 28 días – ASTM C989	100
Tabla 56	Resistencia a la compresión a 1 día detallada de diseños de concreto $f'c: 210 \text{ kg/cm}^2$	101
Tabla 57	Resistencia a la compresión a 3 días detallada de diseños de concreto $f'c: 210 \text{ kg/cm}^2$	101
Tabla 58	Resistencia a la compresión a 7 días detallada de diseños de concreto $f'c: 210 \text{ kg/cm}^2$	102
Tabla 59	Resistencia a la compresión a 28 días detallada de diseños de concreto $f'c: 210 \text{ kg/cm}^2$	102
Tabla 60	Resistencia a la compresión a 1 día detallada de diseños de concreto $f'c: 280 \text{ kg/cm}^2$	103
Tabla 61	Resistencia a la compresión a 3 días detallada de diseños de concreto $f'c: 280 \text{ kg/cm}^2$	103
Tabla 62	Resistencia a la compresión a 7 días detallada de diseños de concreto $f'c: 280 \text{ kg/cm}^2$	104
Tabla 63	Resistencia a la compresión a 28 días detallada de diseños de concreto $f'c: 280 \text{ kg/cm}^2$	104
Tabla 64	Resistencia a la flexión detallada de diseños de concreto $f'c: 210 \text{ kg/cm}^2$	105
Tabla 65	Resistencia a la flexión detallada de diseños de concreto $f'c: 280 \text{ kg/cm}^2$	106
Tabla 66	Permeabilidad al aire detallada de diseños de concreto $f'c: 210 \text{ kg/cm}^2$	107
Tabla 67	Permeabilidad al aire detallada de diseños de concreto $f'c: 280 \text{ kg/cm}^2$	107
Tabla 68	Resistividad eléctrica detallada de diseños de concreto $f'c: 210 \text{ kg/cm}^2$	108
Tabla 69	Resistividad eléctrica detallada de diseños de concreto $f'c: 280 \text{ kg/cm}^2$	108

INDICE DE FIGURAS

Figura 01. Representación de un horno rotatorio.	8
Figura 02. Composición química del Cemento tipo I.	40
Figura 03. Composición química de la costra.	40
Figura 04. IAP a 7 días según normas ASTM C311 Y ASTM C989.	42
Figura 05. IAP a 28 días según normas ASTM C311 Y ASTM C989.	42
Figura 06. Curva granulométrica de la arena natural.	45
Figura 07. Curva granulométrica del agregado grueso.	50
Figura 08. Peso unitario de diseños de concreto 210 kg/cm ²	55
Figura 09. Peso unitario de diseños de concreto 280 kg/cm ²	56
Figura 10. Resistencia a la compresión general de diseños de concreto 210 kg/cm ²	57
Figura 11. Resistencia a la compresión a 1 día de diseños de concreto 210 kg/cm ²	58
Figura 12. Resistencia a la compresión a 3 días de diseños de concreto 210 kg/cm ²	58
Figura 13. Resistencia a la compresión a 7 días de diseños de concreto 210 kg/cm ²	59
Figura 14. Resistencia a la compresión a 28 días de diseños de concreto 210 kg/cm ²	59
Figura 15. Resistencia a la compresión general de diseños de concreto 280 kg/cm ²	60
Figura 16. Resistencia a la compresión a 1 día de diseños de concreto 280 kg/cm ²	61
Figura 17. Resistencia a la compresión a 3 días de diseños de concreto 280 kg/cm ²	61
Figura 18. Resistencia a la compresión a 7 días de diseños de concreto 280 kg/cm ²	62
Figura 19. Resistencia a la compresión a 28 días de diseños de concreto 280 kg/cm ²	62
Figura 20. Módulo de ruptura de diseños de concreto 210 kg/cm ²	63
Figura 21. Módulo de ruptura de diseños de concreto 210 kg/cm ²	64
Figura 22. Permeabilidad al aire de diseños de concreto 210 kg/cm ²	65
Figura 23. Permeabilidad al aire de diseños de concreto 280 kg/cm ²	66
Figura 24. Resistividad eléctrica de diseños de concreto 210 kg/cm ²	67
Figura 25. Resistividad eléctrica de diseños de concreto 280 kg/cm ²	68
Figura 26. Costos por metro cúbico de diseños de concreto 210 kg/cm ²	71
Figura 27. Costos por metro cúbico de diseños de concreto 280 kg/cm ²	72
Figura 28. Muestro y procesamiento de la costra.	110
Figura 29. Bolsa de Cemento tipo I.	111
Figura 30. Pilas de agregado grueso y agregado fino.	111
Figura 31. Elaboración de perlas de la costra.	112
Figura 32. Ensayo de retenido en malla %325 por vía húmeda.	113
Figura 33. Ensayo de resistencia a la compresión en probetas de mortero (IAP).	114
Figura 34. Ensayo de contenido de humedad de piedra zarandeada H57 y arena natural.	115
Figura 35. Ensayo granulométrico de piedra zarandeada H57 y arena natural.	116
Figura 36. Ensayo de peso unitario de piedra zarandeada H57 y arena natural.	117
Figura 37. Ensayo de peso específico de piedra zarandeada H57 y arena natural.	118
Figura 38. Ensayo de determinación de asentamiento del concreto.	119
Figura 39. Ensayo de determinación de temperatura en el concreto.	120
Figura 40. Ensayo de peso unitario del concreto.	120
Figura 41. Mezclado del concreto.	121
Figura 42. Elaboración de probetas cilíndricas de concreto.	121
Figura 43. Elaboración de probetas prismáticas de concreto.	122
Figura 44. Ensayo de resistencia a la compresión.	123
Figura 45. Ensayo de resistencia a la flexión.	124
Figura 46. Ensayo de permeabilidad al aire.	125
Figura 47. Ensayo de resistividad eléctrica.	125

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Durante mucho tiempo se viene haciendo estudios con respecto al tema de la búsqueda de nuevos materiales en la construcción, la cual servirá para reemplazar en la elaboración del concreto ya sea al cemento, el cual conforma el principal material del concreto, o a los agregados, (...). En el Perú, nuestra realidad con respecto en la búsqueda de la implementación de una nueva tecnología en el mundo de la construcción nos ha llevado a evolucionar de las estructuras que eran construidas con adobe como viviendas y monumentos, a la construcción de concreto en las nuevas y actuales edificaciones de nuestro país, pero dentro de esta evolución, se han visto con la necesidad de buscar un nuevo material que complemente o reemplace a los materiales conformados por el concreto. (Diaz & Rodríguez, 2019, p. 17)

De tal manera, muchas investigaciones se centraron en buscar un remplazo parcial para el cemento, que sea abundante y eco amigable, y que además contenga silicatos y aluminatos de calcio, materiales puzolánicos, que son las principales sustancias que dan las características primordiales al cemento. Así mismo, existen varias razones para que en el mundo los productores de cemento desarrollen el uso de adiciones minerales en la de elaboración de morteros y concretos. Como, por ejemplo: temas ecológicos, reducción de costos y relativa flexibilidad para la obtención de cementos y concretos de mejor comportamiento y/o propiedades especiales. (Milles, 2012).

En nuestra localidad, la empresa Cementos Pacasmayo S.A.A es una empresa enfocada a la fabricación de cemento y cal. Producto de los mantenimientos programados de su maquinaria industrial se genera gran cantidad de residuos, los cuales en cierta cantidad son dispuestos en almacenes de residuos y los demás, en zonas de desmonte, convirtiéndolos en nichos de fauna nociva y causa de enfermedades ocasionadas por el polvo y la

contaminación. Estos como la costra, la cual es producto de la misma elaboración del clinker y que se estima se generan alrededor de 60 toneladas por año, podría emplearse en el diseño de concreto no convencional.

Sin embargo, se desconoce la incidencia de este en las propiedades físicas y mecánicas del concreto cuando se utiliza como adición o material cementicio de sustitución, siendo este un factor vital en obras que demanden reducción económica, mejora en la calidad del concreto y cuidado del medio ambiente. Partiendo de estas premisas, el resultado del procesamiento de la costra presenta un gran potencial para su aplicación en un diseño no convencional de concreto, específicamente como remplazo en porcentajes al cemento, básicamente por tener una composición química similar a este.

De obtenerse un comportamiento físico aceptable, permitiría disminuir la capacidad de demanda de cemento para la producción de pasta, mortero y concreto, lo que sería útil para reducir costos en posibles ejecuciones de obras internas de la empresa Cementos Pacasmayo S.A.A o de alguna otra institución que lo demande.

1.2. Formulación del problema

¿Cuáles serán los efectos producidos en las propiedades físicas y mecánicas del concreto con resistencias a la compresión $f'c$: 210 y 280 kg/cm² al sustituir el 20,35 y 50 % de cemento por costra, producto de la elaboración del clinker, al compararse con una mezcla patrón (sin sustitución)?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar los efectos en las propiedades físicas y mecánicas de concretos $f'c$: 210 y 280 kg/cm² al sustituir material cementicio por costra.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar el índice de actividad puzolánica de la materia prima alternativa de acuerdo con las normas ASTM C311 y ASTM C989.
- Caracterizar los agregados de acuerdo con sus NTP vigentes.

- Realizar los diseños de mezcla con los datos obtenidos provenientes de la caracterización según el método de módulo de fineza de la combinación de agregados.
- Determinar las propiedades físicas en estado fresco del concreto experimental sin y con sustitución de acuerdo con sus NTP vigentes.
- Determinar la resistencia a la compresión de las probetas cilíndricas a 1,3,7 y 28 días de acuerdo con su NTP vigente.
- Determinar la resistencia a la flexión de las vigas a 28 días de acuerdo con su NTP vigente.
- Realizar los ensayos especiales no destructivos (resistividad eléctrica, permeabilidad al aire) de acuerdo con las normas SIA 262/1 Y AASHTO Designation: TP 95-14.
- Analizar y comparar los datos obtenidos respecto a desempeño físico y costo de elaboración.

1.4. Justificación del estudio

En busca de una posible solución para obtener un concreto de calidad, eco amigable y con buenas propiedades físicas, nos enfocaremos en el uso de costra, el cual es un material abundante que se obtuvo durante el mantenimiento del horno horizontal rotatorio en el cual se produce el clinker.

El enfoque principal de esta investigación es la implementación de la costra procesada como reemplazo parcial del cemento, lo cual no solamente servirá para disminuir los costos de producción en la elaboración del concreto, sino que también se busca mejorar propiedades físicas y mecánicas del concreto tales como la resistencia a la compresión y flexión. Además, que se evaluará su efecto en la resistividad al ataque de iones cloruros y la permeabilidad.

Es decir, con esta alternativa, se podrá mejorar las propiedades físicas y mecánicas del concreto, aminorar la contribución a la polución atmosférica de la costra como material grueso y particulado, reducir el espacio físico ocupado por este material y obtener un concreto más económico.

II. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Antecedentes

Carrillo (2018) en su tesis de pregrado titulada *Sustitución del cemento por 8% y 16% en combinación del molusco Trachy Cardium Procerum (Pata de mula) y hoja de eucalipto en mortero y determinar su resistencia, de la Universidad San Pedro (Chimbote, Perú)*, tuvo como objetivo sustituir el 8% y 16 % al cemento con (pata de mula y hoja de eucalipto) en una mezcla de mortero y determinar su resistencia a compresión en la ciudad de Chimbote. Del cual se llegaron a las siguientes conclusiones: la composición química del molusco Pata de Mula, indica su potencial como puzolana, ya que contiene un 99.906 % de componentes cementantes en mayor proporción de CaO; mientras que la hoja de Eucalipto calcinada está compuesta por 64,179 % de componentes cementantes; y que, la resistencia del mortero a compresión de la sustitución del 8% y 16% fueron menores en un 5.00% y 16.86% respectivamente en comparación de la muestra patrón. Los aportes rescatados de esta investigación son en cuanto al potencial como puzolana que puede tener un material respecto a su porcentaje de componentes cementantes; y también, brinda valores porcentuales de resistencia a la compresión al variar el porcentaje de sustitución, lo cual será tomado como referencia base.

Castro & Alfaro (2019) en su tesis de pregrado titulada *Análisis comparativo de las propiedades físicas-mecánicas del concreto de resistencias $f'c = 210, 280, 350 \text{ Kg/cm}^2$ sustituyendo material cementicio por cáscara de huevo*, de la Universidad Privada Antenor Orrego (Trujillo, Perú), tuvieron como objetivo analizar y comparar la variación de las propiedades físicas y mecánicas de un concreto con resistencias $f'c = 210, 280, 350 \text{ kg/cm}^2$ sustituyendo material cementicio por cáscara de huevo con respecto al concreto patrón. Llegando a las siguientes conclusiones: los resultados de resistencia a la compresión para los concretos experimentales donde se utiliza la cáscara de huevo como un sustituyente y como adición, a la edad 7 días supera la resistencia de diseño y actúa como un acelerante de resistencia a edades tempranas; y que, en cuanto a su resistencia a la compresión, el porcentaje que dio resultados satisfactorios es de 15% como

sustitución y del 2% como adición de cáscara de huevo, lo cual indica que en dichas cantidades actuarían como un reemplazante efectivo del cemento. De esta investigación, los aportes dados son respecto a la influencia en la resistencia a la compresión del material de sustitución en edades tempranas y sobre porcentajes de sustitución efectivos, los cuales serán tomados en cuenta como punto de partida.

López (2018) en su tesis de pregrado titulada *Sustitución de 5% y 10% de cemento por ceniza de cascara de maní en la resistencia de un mortero – 2017*, de la Universidad San Pedro (Chimbote, Perú), tuvo como objetivo determinar la resistencia de un mortero, después en la sustitución de 5 y 10% de cemento por ceniza de cascara de maní. Concluyendo lo siguiente: la relación A/C del mortero experimental al 5% y 10% aumenta respecto al patrón debido a la porosidad que produce la ceniza de cáscara de maní; y que, con el transcurrir del tiempo de 28 días a más el mortero experimental puede diferenciar la disminución de resistencia respecto al patrón. Los aportes brindados por esta investigación son que en caso el material cementicio de sustitución sea poroso, la relación a/c aumentará; y que, es posible que a edades tardías se presente una disminución de resistencia a la compresión de los diseños experimentales con sustitución. Esta información será tomada en cuenta para los diseños con el material cementicio elegido para el desarrollo de la presente investigación.

Mendoza (2017) en su tesis de pregrado titulada *Determinación de las propiedades físico - mecánicas de un concreto de $f'c=210$ kg/cm² con adición de puzolana volcánica en Cajamarca*, de la Universidad Nacional de Cajamarca (Cajamarca, Perú), tuvo como objetivo determinar la influencia de la adición de puzolana volcánica en las propiedades físico – mecánicas de un concreto de $f'c=210$ kg/cm² adicionando puzolana en porcentajes de 10%, 15% y 20% del peso del cemento utilizado en la mezcla, a edades de 7 y 60 días. Concluyendo que: la incorporación de la adición de puzolana traquítica en el diseño de concreto optimiza los costos de producción de este presentando un ahorro de S/ 14.9 cuando se adiciona un 10%, S/ 22.35 al adicionar un 15% y S/ 29.8 al adicionar

un 20%. Montos que son altamente considerables al momento de ejecutar una obra de gran envergadura; y que, la influencia en el concreto de la adición de puzolana traquítica sólo se presenta en el concreto cuyas edades son mayores, ya que su fraguado es lento y su medición no sería la correcta en edades tempranas. Los aportes de esta investigación son que los costos de producción de concreto van disminuyendo de acuerdo al aumento de sustitución de cemento; y que, la influencia del material cementicio de sustitución se presenta a edades tardías. Estos aportes serán tomados en cuenta como forma de justificación en el tema económico y de desempeño de las propiedades físicas del concreto con porcentajes de sustitución.

Rocha & Romero (2017) en su investigación *Reutilización del catalizador gastado de craqueo catalítico, como reemplazante parcial del cemento en concreto autocompactados*, de la Universidad Nacional de Trujillo (Trujillo, Perú), se realizó un estudio para determinar el grado de actividad puzolánica del catalizador gastado de craqueo catalítico y se evaluó su reemplazo por cemento portland en la preparación de concretos auto-compactados. Concluyendo lo siguiente: al evaluar la influencia del CGCC sobre la resistencia a la compresión de concretos autocompactantes con relación de $a/c = 0.38$, se observó que en una sustitución del 10% de cemento portland tipo 1 mejorado, este alcanza su reemplazo óptimo. Este porcentaje es el más indicado para mejorar significativamente la resistencia a la compresión, ya que el resultado obtenido supera a la muestra patrón en 3.53%. El aporte de esta investigación es respecto al porcentaje de reemplazo óptimo en el cual se logra un mejor desempeño en cuanto a resistencia a la compresión. Este valor será tomado como valor referencial para definir los porcentajes de sustitución.

2.2. Marco teórico

La información teórica expuesta referente a definiciones, funciones, mecanismos de formación y problemas ocasionados de la costra, fue rescatada de la investigación titulada “Caracterización de costras y anillos en hornos rotatorios de cemento” por González (1999, pp. 19-23) en la cual refiere:

2.2.1. Costra

En el proceso de producción de clínker una costra puede ser definida como una capa endurecida formada por el mismo material en transporte. En algunas ocasiones el material se acumula de forma preferencial en algunas zonas del horno provocando la formación de costras excesivas que reciben el nombre de anillos, los cuales son clasificados en base a su composición mineralógica como anillos de clínker y de crudo.

Los anillos cuyos minerales son los propios del clínker son duros y su densidad varía de acuerdo con el tamaño de las partículas que lo forman, contribuyendo las partículas de grano fino a una estructura densa y estratificada, mientras que una composición porosa resulta de partículas gruesas. Los anillos de crudo generalmente son porosos y blandos.

Se denominan incrustaciones o revestimientos las formaciones de capas más delgadas formadas en las zonas donde la temperatura es menor a 1100 ° C, generalmente en la entrada del horno y las partes más bajas del precalentador.

2.2.1.1. Definición de costra estable y sus funciones dentro del proceso

La formación de una costra constante y estable durante el proceso de la formación de clínker en las zonas de más alta temperatura como lo son las zonas de baja y alta transición y sinterización es necesaria ya que principalmente protege el revestimiento refractario y reduce las pérdidas de calor a través de la coraza del horno.

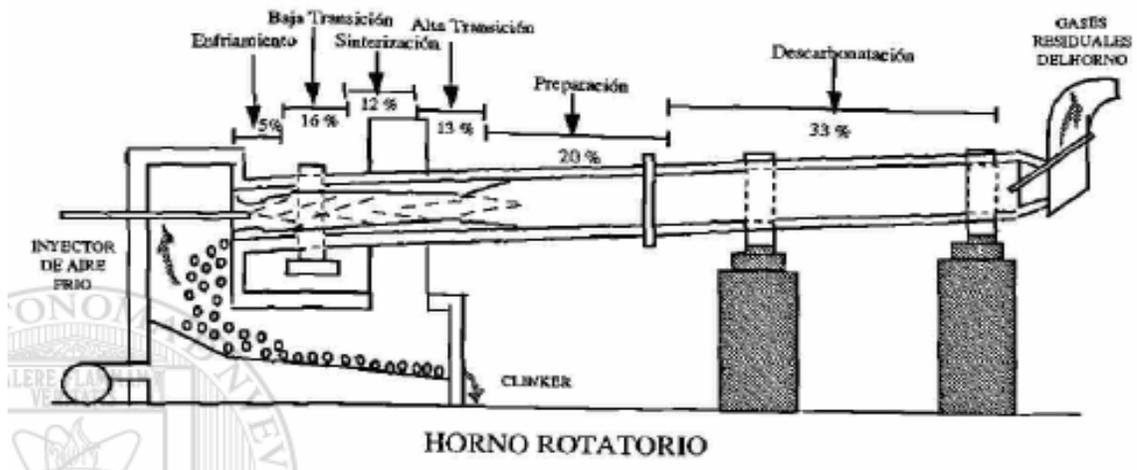


Figura 01. Representación de un horno rotatorio.
 Fuente: (Gonzalez Carranza, 1999)

2.2.1.2. Funciones de las costras formadas en zonas de la zona de alta temperatura

- Proteger al ladrillo refractario contra un posible sobrecalentamiento y cambios bruscos de temperatura.
- Proteger el revestimiento refractario contra el efecto abrasivo de la carga de clínker en movimiento.
- Proteger el revestimiento refractario contra ataques químicos generados por los componentes del clínker, la ceniza del combustible y la atmósfera generada.
- Mejorar el amalgamamiento de la masa del clínker, debido a la rugosidad de la superficie de la costra.
- Reducir la radiación de calor y proteger la carcasa del horno contra sobrecarga térmicas.

2.2.1.3. Mecanismos de formación

a) Mecanismos de formación de costra estable y anillos

Como se mencionó anteriormente que los anillos constituyen una formación exagerada de costra, su mecanismo de formación es el mismo que explica la formación de costra, el cual se describe a continuación:

Las partículas o nódulos de clínker ya formados se adhieren o pegan al refractario o a la capa más externa de costra ya formada a través de puentes capilares de adherencia de la fase líquida presente en el material. Cuando tales puentes capilares se solidifican por enfriamiento, esta solidificación produce la cementación de la partícula o nódulo, quedando definitivamente integrada a la costra protectora. En una concepción ideal del sistema, al llegarse a la temperatura de fusión de la fase líquida, se producirá simultáneamente la nodulización del material y la adhesión de éste a las paredes. El equilibrio perfecto se establece en el momento que los nódulos tienen suficiente masa para desprenderse por gravedad y no quedar cementados. En este punto ya se debe disponer de costra suficiente y a partir de ese momento se detiene el encostramiento.

Al formarse un anillo se rompe el equilibrio mencionado anteriormente, ya que la costra se sigue pegando, y esto puede ser una consecuencia de los siguientes factores:

- a) Grado de nodulización incorrecta: al no producirse una suficiente nodulización, las partículas sueltas con presencia de fase líquida quedarán pegadas formándose progresivamente el anillo.
- b) Disponibilidad de fase líquida: cuando no se llega a nodulizar correctamente cada partícula tendrá más proporción de líquido, volviéndose más pegajosa y aumentando así la tendencia a la formación de anillos.

2.2.1.4. Problemas ocasionados por la formación de costras, anillos e incrustaciones

Las costras no pertenecientes a la costra estable, los anillos y las incrustaciones son obstáculos para una operación uniforme del horno, ya que pueden causar algunos de los siguientes disturbios:

- Daños causados sobre el revestimiento refractario.
- Impiden el flujo de material y de los gases hasta el límite de hacer imposible la operación del horno.

- La calidad del clinker puede ser variable.
- Pérdidas de producción como consecuencia de paro de horno, para la remoción de los anillos.

2.2.2. Propiedades físicas y mecánicas

Las propiedades físicas son las que se ponen de manifiesto ante estímulos como la electricidad, la luz, el calor o la aplicación de fuerzas a un material. Describen características como elasticidad, conductividad eléctrica o térmica, magnetismo o comportamiento óptico, que por lo general no se alteran por otras fuerzas que actúan sobre el mismo. (Propiedades físicas-Mecánicas de los materiales., 2013, párr. 1)

Las propiedades mecánicas son aquellas propiedades de los sólidos que se manifiestan cuando aplicamos una fuerza. Las propiedades mecánicas de los materiales se refieren a la capacidad de estos de resistir acciones de cargas: las cargas o fuerzas actúan momentáneamente, tienen carácter de choque. (Propiedades físicas-Mecánicas de los materiales., 2013, párr. 2)

2.2.3. Economía

El costo del concreto es la suma del costo total de los materiales, de la mano de obra empleada y del equipamiento. Sin embargo, excepto para algunos concretos especiales, el costo de la mano de obra y el equipamiento son muy independientes del tipo y calidad del concreto producido. Por lo tanto, los costos de los materiales son los más importantes y los que se deben tomar en cuenta para comparar mezclas diferentes. Debido a que el cemento es más costoso que los agregados, es claro que minimizar el contenido del cemento en el concreto es el factor más importante para reducir el costo del concreto. En general, esto puede ser echo del siguiente modo:

- ✓ Utilizando el menor slump que permita una adecuada colocación.
- ✓ Utilizando una relación óptima del agregado grueso al agregado fino.
- ✓ Utilizando el mayor tamaño máximo del agregado (respetando las limitaciones indicadas en el capítulo anterior).
- ✓ Y cuando sea necesario utilizando un aditivo conveniente.

Es necesario además señalar que, en adición al costo, hay otros beneficios relacionados con un bajo contenido de cemento. En general, las contracciones serán reducidas y habrá menor calor de hidratación. Por otra parte, un muy bajo contenido de cemento disminuirá la resistencia temprana del concreto y la uniformidad del concreto será una consideración crítica. (Laura Huanca, 2006, pp. 2-3)

2.3. Marco conceptual

Las siguientes definiciones fueron extraídas de la Norma Técnica Peruana 334.001:2019 la cual se titula CEMENTOS. Terminología relacionada al cemento hidráulico. 4ª Edición.

- **Finura:** Superficie específica. La finura de un material pulverulento puede ser expresada como superficie específica, m²/kg, que corresponde a la superficie de un kilogramo de gránulos cuya superficie se hubiera extendido teóricamente.
- **Perlas:** Discos de vidrio de muestras fundidas para el ensayo de rayos X en el espectrómetro.
- **Propiedad hidráulica:** La propiedad hidráulica es la aptitud de un material pulverizado de fraguar y endurecer en presencia de agua y de forma compuestos prácticamente estables.
- **Propiedades puzolánicas:** La propiedad puzolánica es la aptitud de un material, que pulverizado fija hidróxido de calcio a la temperatura ambiente, formando en presencia de agua compuestos que poseen propiedades hidráulicas.

Las siguientes definiciones fueron extraídas de la Norma Técnica Peruana 339.047:2014 (revisada el 2019) la cual se titula CONCRETO. Definiciones y terminología relativas al concreto y agregados. 3ª Edición.

- **Ataque de sulfatos:** La forma más común de ataque químico del concreto, causada por los sulfatos en las aguas subterráneas o en el suelo, que se manifiesta por la expansión y la desintegración del concreto.
- **Durabilidad:** Capacidad del concreto, mortero, grout o revoque de cemento Portland de resistir a la acción de la intemperie y otras condiciones de servicio, tales como ataque químico, congelación-deshielo y abrasión.

- **Materiales cementosos:** Término que comprende las adiciones minerales que se incorporan a los cementos Portland, en especial en las centrales de mezcla de hormigón (concreto), como son las cenizas volantes y de escoria de alto horno, la microsílíce, etc.
- **Relación agua-material cementoso:** Relación de la masa de agua por la masa de cemento más los materiales cementosos en el concreto, cuando ingresa independientemente a la mezcla, incluyendo al cemento Portland o cemento adicionado y la escoria, la puzolana, la microsílíce, el filler según los casos.
- **Puzolanas:** Son sustancias naturales o industriales silíceas o silicoaluminosas, o una combinación de ambas. Los materiales puzolánicos no endurecen por sí mismos cuando se amasan con agua, pero finamente molidos, reaccionan, en presencia de agua, a la temperatura ambiente con el hidróxido de calcio disuelto $[Ca(OH)_2]$ y forman compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio, capaces de desarrollar resistencia. Estos compuestos son similares a los que se forman durante el endurecimiento de los materiales hidráulicos. Las puzolanas constarán esencialmente de SiO_2 , reactivo, no menor del 25 % en masa. No endurecen por sí mismo con el agua.

2.4. Hipótesis

Si se sustituye cantidades de cemento en relaciones de 20,35 y 50% por costra, entonces se obtendrá un concreto más económico y con un mejor desempeño en sus propiedades físico-mecánicas.

2.5. Variables

2.5.1. Variable independiente

- Porcentajes de costra.

2.5.2. Variable dependiente

- Las propiedades físicas y mecánicas del concreto.
- Costo por metro cúbico del concreto.

2.6. Operalización de variables

Tabla 01

Operalización de variables

Variables			Dimensiones	Indicadores	Instrumentos
Tipo	Descripción conceptual	Descripción operacional			
Independiente Costra	En el proceso de la producción de clínker una costra es definida como una capa endurecida formada por el mismo material en transporte.	Molida, la costra hecha perla se analiza mediante un espectrómetro de rayos X para evaluar su composición química. Además, mediante vía húmeda se determina el peso y porcentaje de gramos retenidos en la malla #325 para conocer la finura del material. Estos dos parámetros son de suma importancia pues influyen directamente en las propiedades físicas y mecánicas del concreto.	Composición química	Componente químico (%)	Espectrómetro de rayos X
			Propiedades físicas	Retenido en malla #325 (%)	Balanza
Dependiente Propiedades físicas y mecánicas del concreto	Las propiedades físicas son las que se ponen de manifiesto ante estímulos como la electricidad, la luz, el calor o la aplicación de fuerzas a un material. Las propiedades mecánicas son aquellas propiedades de los sólidos que se manifiestan cuando aplicamos una fuerza.	Como parte de determinar la calidad inicial del concreto se realizan los ensayos en estado fresco como el asentamiento ("), peso unitario (kg/m ³) y temperatura (°C). Siendo parámetro principal de calidad en concreto endurecido se ensaya la resistencia a la compresión y flexión en una prensa expresando estas propiedades mecánicas en kg/cm ² . La permeabilidad al aire se mide por el método µTorrent y es expresada en kT Mientras que la resistividad eléctrica es determinada con el Resipod proceq en conformidad a la norma ASSHTO TP95-14 y se expresa en kΩ-cm. Estos dos últimos parámetros físicos influyen en la durabilidad del concreto.	Ensayos en estado fresco	Asentamiento (")	Cono de Abrams
				Peso unitario (kg/m ³)	Balanza
				Temperatura (°C)	Termómetro
			Ensayos en estado endurecido	Resistencia a la compresión (kg / cm ²)	Prensa de compresión
				Resistencia a la flexión (kg / cm ²)	Prensa de flexión
				Permeabilidad al aire kT (10 ⁻¹⁶ m ²)	PermeaTORR
Resistividad eléctrica (kΩ-cm)	Resipod proceq				
Dependiente Costo por metro cúbico del concreto	El costo del concreto es la suma del costo de los materiales, de la mano de obra empleada y el equipamiento.	El costo por metro cúbico del concreto es calculado mediante la sumatoria de los precios por metro cúbico de cada componente del concreto. Este precio total tiene como variable el costo estimado de la costra, el cual determina la mayor diferencia entre el costo de un concreto convencional y uno con costra.	Costo de diseño de mezcla	Costo total por metro cúbico (S/. x m ³)	Excel

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Tipo y nivel de investigación

El tipo de la presente investigación es aplicada, y su nivel es experimental.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

La población es el concreto con resistencias f_c : 210 y 280 kg/cm².

3.2.2. Muestra

Por tratarse de una investigación netamente experimental, la muestra está constituida por 120 probetas cilíndricas y por 16 vigas, las cuales han sido ensayadas para determinar su resistencia a la compresión, flexión, permeabilidad al aire y resistividad eléctrica de acuerdo con normas nacionales e internacionales.

Tabla 02

Muestra de diseños 210 y 280 kg/cm² sometidos a resistividad eléctrica, permeabilidad al aire y resistencia a la compresión

Dosificación	Ensayo			Número de especímenes
	Resistencia a la compresión	Permeabilidad al aire	Resistividad eléctrica	
D1 (C210: Patrón)	12	3	3	15
D2 (C210: 20 % Costra molida)	12	3	3	15
D3 (C210: 35 % Costra molida)	12	3	3	15
D4 (C210: 50 % Costra molida)	12	3	3	15
D5 (C280: Patrón)	12	3	3	15
D6 (C280: 20 % Costra molida)	12	3	3	15
D7 (C280: 35 % Costra molida)	12	3	3	15
D8 (C280: 50 % Costra molida)	12	3	3	15
				120

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 03

Muestra de diseños 210 y 280 kg/cm² sometidos a resistencia a la flexión

Dosificación	Ensayo	
	Resistencia a la flexión	Número de especímenes
D1 (C210: Patrón)	2	2
D2 (C210: 20 % Costra molida)	2	2
D3 (C210: 35 % Costra molida)	2	2
D4 (C210: 50 % Costra molida)	2	2
D5 (C280: Patrón)	2	2
D6 (C280: 20 % Costra molida)	2	2
D7 (C280: 35 % Costra molida)	2	2
D8 (C280: 50 % Costra molida)	2	2
		16

Nota. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Diseño de contratación

ESQUEMA DE DISEÑO DE INVESTIGACIÓN



Donde:

- **G_C**: Representa al concreto patrón $f'c = 210$ y 280 kg/cm².
- **G_E**: Representa al concreto con costra.
- **XX**: Representa a los 3 tipos de porcentajes de reemplazo de cemento (20,35 y 50%).
- **O₁**: Representa las propiedades físicas-mecánicas medidas del concreto patrón $f'c = 210$ y 280 kg/cm².
- **O₂**: Representa las propiedades físicas-mecánicas medidas del concreto con costra $f'c = 210$ y 280 kg/cm².

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Técnicas de acopio de datos

- **Observación directa:** Se aplicó esta técnica a los ensayos que se realizaron en esta investigación, los mismo que cumplen con los estándares establecidos por las normas nacionales e internacionales.
- **Análisis documental:** Se utilizaron diferentes tipos de fuentes documentales como: normas nacionales e internacionales, libros, artículos científicos y tesis, los mismos que se encuentran citados en la parte de referencias bibliográficas de la investigación.

3.4.2. Instrumentos de acopio

Se utilizaron los siguientes instrumentos:

- **Ficha de experimentación:** Hojas de datos en las cuáles se anotaron características de las muestras, códigos de especímenes de mortero - concreto y parámetros relacionados a ensayos de concreto en estado fresco y endurecido.

Además, se utilizaron diversos tipos de instrumentos de laboratorio para el procesamiento, caracterización y medida de los parámetros físicos de materia prima y probetas.

Teniendo los siguientes instrumentos para el procesamiento de la costra:

- Chancadora primaria
- Molino de bolas de 25kg de capacidad
- Perladora
- Espectrómetro de rayos X
- Prensa de resistencia a la compresión en cubos de mortero

Los siguientes instrumentos para la caracterización de agregado fino y grueso:

- Estufa
- Tamices normalizados

Y los siguientes instrumentos para realizar los ensayos de concreto fresco y endurecido:

- Termómetro
- Prensa para determinar la resistencia a la compresión (probetas cilíndricas 4" x 8" y vigas)
- Resipod proceq para determinar la resistividad eléctrica
- PermeaTORR para determinar la permeabilidad al aire

3.5. Procedimiento de recolección de datos

3.5.1. Costra

La costra utilizada en la actual investigación ha sido muestreada de la zona de desmonte de la fábrica de Cementos Pacasmayo S.A.A.

Posteriormente, se chancó la costra dentro del laboratorio de Investigación y Desarrollo de la fábrica Cementos Pacasmayo.

Después de tener la costra chancada, se colocó en bandejas y se dejó secar durante 24 horas dentro del horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Al estar completamente seca, se molió la muestra en el molino de bolas durante 1 hora y media.

Finalmente, se determinó el porcentaje (%) retenido en la malla # 325 por vía húmeda.

3.5.2. Cemento

El cemento utilizado durante la investigación fue el Pacasmayo tipo I.

3.5.3. Agregados

El agregado grueso y fino utilizados en este proyecto fueron muestreados de las cajoneras existentes en las instalaciones de Dino – Pacasmayo, los mismos que provienen de la cantera de Cerro Chilco ubicada en San Pedro de Lloc-La Libertad.

3.5.4. Ensayos de laboratorio a la costra

3.5.4.1. Análisis químico

a. Pérdida al fuego

- En un crisol, pesar alrededor de 2 gramos de muestra molida.
- Colocar el crisol + muestra en la mufla (la cual está a una temperatura de 950° C) por unos 20 minutos.
- Retirar el crisol + muestra de la mufla y llevar al desecador en el cual estará alrededor de 25 minutos.
- Retirar el crisol + muestra del desecador y pesar.
- Realizar el cálculo de pérdida al fuego de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{pérdida al fuego (\%)} = \frac{\text{peso sin calcinar} - \text{peso calcinado}}{\text{peso calcinado}} \times 100$$

b. Elaboración de perlas

- En un crisol de aluminio, pesar 7.700 gramos de fundente de litio y añadir 0.700 gramos de muestra molida.
- Colocar el crisol con muestra en la perladora y dejar que se complete el proceso (aproximadamente 18 minutos).
- Retirar la perla y codificar.

c. Fluorescencia por rayos X

- Llevar la perla hacia el espectrómetro, el cual brindará la composición química del material.

3.5.4.2. Porcentaje de retenido en malla # 325, vía húmeda

Brinda una idea de la finura del material.

- Pesar 1 gramo de muestra molida y colocar sobre la malla # 325.
- Mojar la malla con material con una corriente muy suave de agua.
- Ajustar la presión de la boquilla aspersora a 10psi.
- Colocar la malla bajo la boquilla por un minuto imprimiéndole movimientos circulares.

- Llevar la malla al horno por aproximadamente unos 12 minutos o hasta que la malla se seque por completo.
- Finalmente, pesar el material retenido en la malla #325 y multiplicamos ese valor por 100 para obtener el porcentaje retenido.

3.5.4.3. Índice de actividad puzolánica (IAP)

El IAP brinda una idea del performance en cuánto a resistencia al sustituir porcentajes (%) de cemento.

- Se realizaron 2 tipos de mezclas (Según norma ASTM C311 y según norma ASTM C989).
- Para esto se realizó una mezcla patrón para 6 cubos (los cuales se ensayaron a la compresión a 7 y 28 días) de acuerdo a la norma ASTM C109, la que indica la siguiente dosificación: 500 gramos de cemento, 1375 gramos de arena de Ottawa y una cantidad de agua suficiente para alcanzar una fluidez de 110 ± 5 .
- Se hizo lo mismo para la norma ASTM C311 en la cual se reemplazó la cantidad de cemento en un 20% y para la norma ASTM C989 en la cual se reemplazó el 50%.
- Posteriormente se ensayó a compresión los morteros a 7 y 28 días.
- El índice de actividad puzolánica (IAP) se calculó según la siguiente fórmula.

$$IAP = \frac{\text{Prom resistencias con \% de sustitución}}{\text{Prom resistencias sin \% de sustitución}} \times 100$$

3.5.5. Ensayos de laboratorio a los agregados

3.5.5.1. Contenido de humedad (NTP 339.185)

Este ensayo se realizó para obtener la cantidad evaporable del agregado fino y grueso por secado, expresado en porcentaje.

El procedimiento seguido para determinar el contenido de humedad en conformidad a la NTP 339.185, fue el siguiente:

- Seleccionar la cantidad de muestra en conformidad con los parámetros mínimos establecidos en la NTP 339.185.

Tabla 04

Cantidad de masas mínimas de muestra para ensayo de contenido de humedad según su TNM

Tamaño nominal máximo mm (Pulg)^	Masa mínima de la muestra de ensayo (Kg)
4.75 (0.187) (No. 4)	0.5
9.5 (3/8")	1.5
12.5 (1/2")	2
19.0 (3/4")	3
25.0 (1")	4
37.5 (1 1/2")	6
50 (2")	8
63 (2 1/2")	10
75 (3")	13
90 (3 1/2")	16
100 (4")	25
150 (6")	50

Nota. Fuente: NTP 339.185

- Colocar la muestra en bandejas, anotando el dato del peso inicial húmedo.
- Posteriormente dejarlas en el horno por un período de 24 horas a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$.
- Retirar la muestra del horno, dejar enfriar y determinar el peso seco.
- Calcular el porcentaje de contenido de humedad.

$$w (\%) = \frac{\text{peso muestra húmeda} - \text{peso muestra seca}}{\text{peso muestra seca}} \times 100$$

3.5.5.2. Análisis granulométrico (NTP 400.012)

Este ensayo se realizó para determinar la distribución por tamaño de las partículas de agregado fino y grueso mediante tamizado. De esta forma se halló el módulo de finura y el tamaño máximo nominal del agregado, los cuales fueron fundamentales en el desarrollo de los diseños de mezcla.

El procedimiento seguido para determinar el perfil granulométrico en conformidad a la NTP 400.012, es el siguiente:

- Seleccionar la cantidad muestra en conformidad con los parámetros mínimos establecidos en la NTP 400.012.
- Para el agregado fino, la cantidad mínima será 300 gramos. Mientras que, para el agregado grueso, será el establecido en la siguiente tabla:

Tabla 05

Cantidad mínima de muestra para agregado global o grueso

Tamaño Máximo Nominal Aberturas Cuadradas mm (pulg)	Cantidad de la Muestra de Ensayo, Mínimo kg (lb)
9.5 (3/8)	1 (2)
12.5 (1/2)	2 (4)
19.0 (3/4)	5 (11)
25.0 (1)	10 (22)
37.5 (1 1/2)	15 (33)
50 (2)	20 (44)
63 (2 1/2)	35 (77)
75 (3)	60 (130)
90 (3 1/2)	100 (220)
100 (4)	150 (330)
125 (5)	300 (660)

Nota. Fuente: NTP 400.012

- Seleccionar los tamices establecidos en la NTP 400.012 para los agregados fino y grueso, en el cual se colocará la muestra seca.
- Encajar los respectivos tamices en el orden de abertura decreciente desde la tapa hasta el fondo.
- Antes de empezar a agitar los tamices, anotar el dato de muestra inicial.
- Sujetar la hilera de tamices e imprimir movimientos rectos y de vaivén.

- Si durante 1 minuto, no ha pasado más del 1% en peso del material retenido sobre el tamiz, la operación de tamizado se dará por finalizada.
- Pesarse la cantidad retenida de muestra en cada tamiz y el fondo.
- Para calcular el módulo de finura, se tiene:

$$M.F = \frac{\sum \% \text{Acum. ret (1 1/2", 3/4", 3/8", N°4, N° 8, N°16, N°30, N°50, N°100)}}{100}$$

- Adicionalmente, verificar que nuestro análisis granulométrico cumpla con los porcentajes de la NTP 400.037 para agregado fino y agregado grueso según las tablas 6 y 7 respectivamente.

Tabla 06

Rangos granulométricos para el agregado fino

Tamiz	Porcentaje que pasa
9,5 mm (3/8 pulg)	100
4.75 mm (No.4)	95 a 100
2.36 mm (No. 8)	80 a 100
1.18 mm (No. 16)	50 a 85
600 μm (No. 30)	25 a 60
300 μm (No. 50)	05 a 30
150 μm (No. 100)	0 a 10

Nota. Fuente: NTP 400:037

Tabla 07

Requisitos granulométricos para el agregado grueso

Huso	Tamaño máximo nominal	Porcentaje que pasa por los tamices normalizados													
		100 mm (4 pulg)	90 mm (3 1/2 pulg)	75 mm (3 pulg)	63 mm (2 1/2 pulg)	50 mm (2 pulg)	37,5 mm (1 1/2 pulg)	25,0 mm (1 pulg)	19,0 mm (3/4 pulg)	12,5 mm (1/2 pulg)	9,5 mm (3/4 pulg)	4,75 mm (No. 4)	2,36 mm (No. 8)	1,18 mm (No. 16)	300 µm (No. 50)
1	90 mm - 37,5 mm (3 1/2 pulg - 1 1/2 pulg)	100	90 - 100	-	25 - 60	-	0 - 15	-	0 - 5	-	-	-	-	-	-
2	63 mm - 37,5 mm (2 1/2 pulg - 1 1/2 pulg)	-	-	100	90 - 100	35 - 70	0 - 15	-	0 - 5	-	-	-	-	-	-
3	50 mm - 25 mm (2 1/2 pulg - 1 pulg)	-	-	-	100	90 - 100	35 - 70	0 - 15	-	0 - 5	-	-	-	-	-
357	50 mm - 25 mm (2 1/2 pulg - 1 pulg)	-	-	-	100	95 - 100	-	35 - 70	-	10 - 30	-	0 - 5	-	-	-
4	37,5 mm - 19 mm (1 1/2 pulg - 3/4 pulg)	-	-	-	-	100	90 - 100	20 - 55	0 - 5	-	0 - 5	-	-	-	-
467	37,5 mm - 4,75 mm (1 1/2 pulg - No. 4)	-	-	-	-	100	95 - 100	-	35 - 70	-	10 - 30	0 - 5	-	-	-
5	25,0 mm - 12,5 mm (1 pulg - 1/2 pulg)	-	-	-	-	-	100	90 - 100	20 - 55	0 - 10	0 - 5	-	-	-	-
56	25,0 mm - 9,5 mm (1 pulg - 3/8 pulg)	-	-	-	-	-	100	90 - 100	40 - 85	10 - 40	0 - 15	0 - 5	-	-	-
57	25,0 mm - 4,75 mm (1 pulg - No. 4)	-	-	-	-	-	100	95 - 100	-	25 - 60	-	0 - 10	0 - 5	-	-
6	19,0 mm - 9,5 mm (3/4 pulg - 3/8 pulg)	-	-	-	-	-	-	100	90 - 100	20 - 55	0 - 15	0 - 5	-	-	-
67	19,0 mm - 4,75 mm (3/4 pulg - No. 4)	-	-	-	-	-	-	100	90 - 100	-	20 - 55	0 - 10	0 - 5	-	-
7	12,5 mm - 4,75 mm (1/2 pulg - No. 4)	-	-	-	-	-	-	-	100	90 - 100	40 - 70	0 - 15	0 - 5	-	-
8	9,5 mm - 2,36 mm (3/8 pulg - No. 8)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 - 100	10 - 30	0 - 10	0 - 5	-
89	12,5 mm - 9,5 mm (1/2 pulg - 3/8 pulg)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	90 - 100	20 - 55	5 - 30	0 - 10	0 - 5
9	4,75 mm - 1,18 mm (No. 4 - No. 16)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 - 100	10 - 40	0 - 10	0 - 5

Nota. Fuente: NTP 400:037

3.5.5.3. Peso unitario (NTP 400.017)

Este ensayo se realizó para determinar el peso unitario suelto o compactado y el cálculo de vacíos tanto para agregado fino como agregado grueso, este dato nos servirá en el posterior diseño de mezcla. El procedimiento seguido para determinar el peso unitario suelto y compactado en conformidad a la NTP 400.017(ASTM-C29), es el siguiente:

- Escoger el recipiente de acuerdo con los requisitos estipulados en la NTP 400.017.

Tabla 08
Capacidad del recipiente de medida según TNM

TMN del agregado		Capacidad del recipiente	
mm	pulg	m ³	p ³
12.5	1/2	0.0028 (2.8)	1/10
25.0	1	0.0093 (9.3)	1/3
37.5	1 1/2	0.0140 (14)	1/2
75.0	3	0.0280 (28)	1
100.0	4	0.0700 (70)	2 1/2
125.0	5	0.1000 (100)	3 1/2

Nota. Fuente: NTP 400.017.

- Seleccionar la cantidad de muestra seca, la cual será aproximadamente de 125 a 200% la cantidad requerida para llenar el recipiente.

a. **Peso unitario suelto**

- Llenar el recipiente de medida hasta llegar al tope con cucharón o pala, descargando el agregado desde una altura que no exceda 50 mm encima del borde superior del mismo.
- Nivelar la superficie del agregado con una espátula o los dedos.

b. Peso unitario compactado

- Llenar el recipiente a 1/3 del total y nivelar la superficie con los dedos.
- Apisonar de manera uniforme con 25 golpes la capa de agregado con la varilla de apisonado de manera uniforme.
- Llenar a los 2/3 del recipiente total y apisonar igualmente que el primer tercio.
- Posteriormente, llenar el recipiente de medida a sobre volumen y apisonar de la misma forma que las anteriores capas.
- Nivelar la superficie del agregado con una espátula o los dedos.
- Finalmente, pesar la masa del recipiente más su contenido.
- Para calcular el valor del peso unitario suelto y compactado, tenemos:

$$P.U = \frac{(Peso\ muestra + recipiente) - (Peso\ recipiente)}{Volumen\ del\ recipiente}$$

3.5.5.4. Peso específico y absorción

a. Agregado grueso (NTP 400.021)

- Seleccionar la cantidad de muestra en conformidad con los parámetros mínimos establecidos en la NTP 400.021.
- Tamizar la muestra por el tamiz N° 4 y eliminar todo el material que pasante.
- Lavar la muestra tamizada para eliminar todo tipo de polvo e impurezas en la superficie de las partículas.
- Sumergir la muestra en agua y dejar en reposo durante 24 horas.
- Secar la muestra superficialmente hasta quitarle el brillo, para obtener el estado “saturado superficialmente seco (SSS)”.
- Determinar el peso el de la canastilla. y de la muestra SSS.
- Colocar la muestra SSS en la canastilla, sumergir en un recipiente con agua y determinar el nuevo peso de la canastilla más la muestra sumergida.

- Finalmente, colocar la muestra dentro del horno durante 24 horas para determinar de esa manera el porcentaje de absorción.
- Para calcular el valor del peso específico y absorción del agregado, se tiene:

$$\text{Peso específico} : \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Absorción (\%)} : \frac{B - A}{A} \times 100$$

Donde:

- A:** Masa de la muestra seca al horno.
- B:** Masa de la muestra saturada superficialmente seca.
- C:** Masa de la muestra sumergida al agua.

b. Agregado fino (NTP 400.022)

- Seleccionar la cantidad de muestra en conformidad con los parámetros mínimos establecidos en la NTP 400.022.
- Sumergir la muestra en agua y dejar reposar por un período de 24 horas.
- Decantar el agua de manera cuidadosa para evitar la pérdida de finos, extender la muestra sobre una superficie plana expuesta a una corriente de aire tibio y remover con frecuencia para garantizar un secado uniforme.
- Aplicar el método del cono para determinar el estado de saturado superficialmente seco, el cual consiste en colocar la muestra en forma suelta en el molde cónico hasta llenarlo, luego aplicar 25 golpes y finalmente levantar el cono metálico verticalmente. Si existe humedad libre, la muestra mantendrá su forma, en caso contrario, si se derrumba, se habrá alcanzado la condición de saturado superficialmente seca.
- Llenar el picnómetro con agua y anotar el peso.

- Vertir la mitad de agua, introducir 500 gramos de material SSS, completar con agua y anotar el peso.
- Extraer la muestra cuidadosamente del picnómetro y llevar a la estufa a una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Finalmente, pesar la muestra seca.
- Para calcular el peso específico y absorción del agregado, se tiene:

$$\text{Peso específico} : \frac{A}{C - D}$$

$$\text{Absorción (\%)} : \frac{B - A}{A} \times 100$$

Donde:

- A:** Masa de la muestra seca al horno.
- B:** Masa de la muestra saturada superficialmente seca.
- C:** Masa de frasco con agua + muestra
- D:** Masa de frasco con agua y muestra

3.5.6. Diseño de mezcla por el método módulo de fineza combinación de los agregados)

- a) Determinar la resistencia promedio, en caso tengamos datos estadísticos de producción en obra utilizaremos la siguiente fórmula:

$$f'_{cr} = f'c + 1.34D_s \dots \dots \dots (1)$$

$$f'_{cr} = f'c + 2.33D_s - 35 \dots (2)$$

- b) Seleccionar el asentamiento.

c) Determinar el volumen de agua (l/m³) según la siguiente tabla:

Tabla 09

Volumen de agua de litro por metro cúbico para TNM de agregados y consistencias indicadas

Asentamiento	Agua en lt/m ³ , para TNM agregados y consistencia indicadas							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
Concreto sin aire incorporado								
1"- 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3"- 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6"- 7"	243	228	216	202	190	178	160	--
Concreto con aire incorporado								
1"- 2"	181	175	168	160	150	142	122	107
3"- 4"	202	193	184	175	165	157	133	119
6"- 7"	216	205	187	184	174	166	154	--

Nota. Fuente: ACI

d) Determinar el contenido de aire atrapado según la siguiente tabla:

Tabla 10

Porcentaje (%) de aire atrapado según el TNM

TNM del agregado grueso	Aire atrapado (%)
3/8"	3.0
1/2"	2.5
3/4"	2.0
1"	1.5
1 1/2"	1.0
2"	0.5
3"	0.3
4"	0.2

Nota. Fuente: ACI.

- e) Determinar la relación agua/cemento según la siguiente tabla (interpolar si es necesario):

Tabla 11
Relación a/c según f'_{cr}

f'_{cr} , Kg/cm ²	Relación de a/c en peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
150	0.80	0.71
200	0.70	0.61
250	0.62	0.53
300	0.55	0.46
350	0.48	0.40
400	0.43	0.34
450	0.38	0.30

Nota. Fuente: ACI.

- f) Calcular el factor cemento de la siguiente forma:

$$\text{Cemento (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{Volumen agua}(\frac{1}{\text{m}^3})}{\text{relación a/c}}$$

- g) Calcular la cantidad de bolsas de cemento de la siguiente forma:

$$\text{Bolsas de cemento/m}^3 = \frac{\text{Cemento (kg/m}^3\text{)}}{42.5 \text{ kg}}$$

- h) Calcular la sumatoria de volumen absoluto sin contar el volumen de agregados de la siguiente forma:

$$\text{Volumen absoluto (m}^3\text{)} = \frac{\text{Peso seco (kg)}}{\text{Peso específico}(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}$$

$$\sum \text{Volumen absoluto (m}^3\text{)} = \text{Vol abs (Cemento)} + \text{Vol Abs (Agua)} + \% \text{Aire}$$

- i) Calcular el volumen de agregados de la siguiente forma:

$$\text{Volumen agregados (m}^3\text{)} = 1 - \sum \text{Volumen absoluto (m}^3\text{)}$$

- j) Determinar el módulo de fineza de la combinación de agregados según la siguiente tabla (interpolarse si es necesario):

Tabla 12

Módulo de fineza según contenido de cemento en bolsas/m³ y TNM

TNM del agregado grueso	Módulo de fineza de la combinación de agregados el cual da las mejores condiciones de trabajabilidad para distintos contenidos de cemento en bolsas/m ³			
	6	7	8	9
3/8"	3.96	4.04	4.11	4.19
1/2"	4.46	4.54	4.61	4.69
3/4"	4.96	5.04	5.11	5.19
1"	5.26	5.34	5.41	5.49
1 1/2"	5.56	5.64	5.71	5.79
2"	5.86	5.94	6.01	6.09
3"	6.16	6.24	6.31	6.39

Nota. Fuente: ACI.

- k) Calcular el porcentaje de agregado fino de la siguiente forma:

$$r_f (\%) = \frac{m_g - m}{m_g - m_f} \times 100$$

Donde:

- rf:** Porcentaje de agregado fino.
- mg:** Módulo de fineza del agregado grueso.
- m:** Módulo de fineza de la combinación.
- mf:** Módulo de fineza del agregado fino.

- l) Calcular el porcentaje del agregado grueso de la siguiente forma:

$$r_g (\%) = (100\% - r_f(\%))$$

- m) Calcular el volumen del agregado fino y grueso de la siguiente forma:

$$\text{Volumen AF} = \text{Volumen agregados} \times r_f \%$$

$$\text{Volumen AG} = \text{Volumen agregados} \times r_g \%$$

- n) Calcular los pesos secos de los agregados de la siguiente forma:
- $$\text{Peso seco AF} = \text{Volumen AF} \times \text{Peso específico AF}$$
- $$\text{Peso seco AG} = \text{Volumen AG} \times \text{Peso específico AG}$$
- o) Realizar la corrección por humedad de los agregados de la siguiente forma:
- $$\text{Peso húmedo AF} = \text{Peso seco AF} \times (1 + \% \text{ humedad})$$
- $$\text{Peso húmedo AG} = \text{Peso seco AG} \times (1 + \% \text{ humedad})$$
- p) Calcular el aporte de agua por parte de los agregados de la siguiente forma:
- $$\text{Aporte agua AF} = \text{Peso seco AF} \times (\% \text{ humedad} - \% \text{ absorción})$$
- $$\text{Aporte agua AG} = \text{Peso seco AG} \times (\% \text{ humedad} - \% \text{ absorción})$$
- q) Calcular la cantidad de agua efectiva del diseño de la siguiente forma:
- $$\text{Vol agua efec} = \text{Vol agua de diseño} - (\text{Aporte agua AF} + \text{Aporte agua AG})$$
- r) Expresar el diseño de mezcla con pesos húmedos.

3.5.7. Ensayos al concreto fresco

3.5.7.1. Determinación del asentamiento (NTP 339.035)

Este ensayo es útil para determinar el asentamiento del concreto plástico de cemento hidráulico, el cual fue de vital importancia para evaluar la consistencia del concreto no endurecido.

El procedimiento seguido para determinar el asentamiento en conformidad a la NTP 339.035, es el siguiente:

- Seleccionar la cantidad de muestra representativa en conformidad con los parámetros mínimos establecidos en la NTP 399.036.
- Humedecer cuidadosamente el molde y colocar sobre una superficie rígida, plana, húmeda y no absorbente. El molde firmemente se fija en su respectivo lugar durante el llenado asegurando las abrazaderas o pisando las aletas.
- Llenar el molde vaciando en 3 capas el concreto, de manera que cada capa corresponda a la tercera parte del volumen del molde, para lo que cada capa se compacta aplicando 25 golpes con la barra

compactadora distribuidos y aplicados de manera uniforme en cada sección de la capa.

- Antes de compactar la última capa, el molde se llena por exceso.
- Enrasar el borde superior del molde con la barra compactadora
- Asegurar el molde contra la base de manera firme y eliminar el concreto que sobra alrededor del molde para evitar cualquier tipo de interferencia con el movimiento del concreto que se va a asentar.
- Retirar de manera inmediata el molde del concreto levantándolo en dirección vertical de forma cuidadosa.
- Medir de manera inmediata el asentamiento, el cual es determinado por la diferencia entre la altura del molde y la del centro desplazado de la cara superior del cono que se ha deformado.

3.5.7.2. Temperatura (NTP 339.114/ ASTM C1064)

Este ensayo sirve para medir la temperatura de mezclas de concreto fresco y que puede ser utilizado para verificar la conformidad para la temperatura del concreto fresco en obra con un requerimiento especificado.

El procedimiento seguido para determinar el asentamiento en conformidad a la NTP 339.114 (ASTM-C1064), es el siguiente:

- Seleccionar la cantidad de muestra representativa en conformidad con los parámetros mínimos establecidos en la NTP 399.036.
- Colocar el dispositivo con el cual se realizará la medición de temperatura en la mezcla de concreto fresco, de manera que el sensor esté sumergido en un mínimo de 75 milímetros.
- Introducir el dispositivo medidor de temperatura durante un mínimo de 2 minutos o hasta que la lectura se estabilice, y posteriormente leer y registrar la temperatura.

3.5.7.3. Peso unitario (NTP 339.046/ASTM C138)

Este ensayo sirve para determinar el peso unitario (densidad) del concreto fresco y verificar su rendimiento.

El procedimiento seguido para determinar el asentamiento en conformidad a la NTP 339.046 (ASTM-C1064), es el siguiente:

- Seleccionar la cantidad de muestra representativa en conformidad con los parámetros mínimos establecidos en la NTP 399.036.
- Seleccionar la capacidad del recipiente de acuerdo con tabla dada en la NTP 339.046.

Tabla 13

Capacidad del recipiente de medición según TNM

TNM del agregado grueso		Capacidad de recipiente de medición	
pulg	mm	pie ³	L
1	25	0.2	6
1 1/2	37.5	0.4	11
2	50	0.5	14
3	75	1	28
4 1/2	112	2.5	70
6	150	3.5	100

Nota. Fuente: Adaptado de la NTP 339.046

- Colocar el concreto fresco dentro del recipiente distribuyéndolo de manera homogénea en 3 capas.
- Apisonar cada una de las capas con 25 golpes y posteriormente golpear con el mazo por un rango de 10 a 15 veces.
- Al acabar la consolidación de la última capa, alisar la superficie con la ayuda de la placa plana para dejar el recipiente nivelado.
- Finalmente, limpiar todo el exceso de concreto adherido a las paredes exteriores del recipiente, y pesar el recipiente con el concreto.

3.5.8. Ensayos al concreto endurecido

3.5.8.1. Resistencia a la compresión (NTP 339.034/ASTM C39)

El procedimiento seguido para determinar la resistencia a la compresión en conformidad a la NTP 339.034 (ASTM-C39), es el siguiente:

- Retirar las probetas previamente codificadas de la poza de curado.
- Transportar las probetas hacia la prensa, evitando golpes y daños en el trayecto.
- Los especímenes deben ensayarse húmedos y en el rango de tolerancia permisible que nos indica la NTP 339.034.

Tabla 14

Tolerancias permisibles según edad de ensayo

Edad de ensayo	Tolerancia permisible
24h	± 0.5 h ó 2.1%
3d	± 2.0 h ó 2.8%
7d	± 6.0 h ó 3.6%
28d	± 20.0 h ó 3.0%
90d	± 48.0 h ó 2.2%

Nota. Fuente: NTP 339.034.

- Colocar los platos de retención con sus debidas almohadillas de neopreno en la parte inferior y superior de las probetas e inmediatamente ubicar el bloque de rotura inferior sobre el cabezal de la prensa y el bloque de rotura superior bajo la rótula del cabezal.
- Aplicar la carga forma continua y sin detenimiento hasta la falla del espécimen.

3.5.8.2. Resistencia a la flexión (NTP 339.078/ASTM C78)

El procedimiento que se sigue para determinar la resistencia a la flexión en conformidad a la NTP 339.078 (ASTM-C78), es el siguiente:

- Retirar las probetas previamente codificadas y divididas en 3 partes iguales equivalentes a la altura de la viga.
- Transportar las probetas hacia la prensa, evitando golpes y daños en el trayecto.
- Colocar la viga con una de sus caras laterales hacia arriba (de costado) y centrar en los bloques de soporte de manera que sus ejes queden alineados con la marca de cada tercio.
- Aplicar una carga constante hasta el fallo.
- Tomar 3 medidas por cada dimensión del plano de falla.
- Registrar la profundidad promedio, ancho promedio, y línea de ubicación de la fractura.
- Para calcular la resistencia se tendrá en cuenta lo siguiente:

Si es que la falla ocurre dentro del 1/3 central, el módulo de rotura se calcula con la siguiente fórmula:

$$Mr = PL/bd^2$$

Si es que la falla ocurre fuera del 1/3 central, pero no más lejos del 5 % de la luz, el módulo de rotura se calculará con la siguiente fórmula:

$$Mr = 3Pa/bd^2$$

Donde:

- Mr:** Módulo de rotura.
- P:** Máxima carga aplicada.
- L:** Luz.
- b:** Ancho promedio.
- d:** Altura promedio.
- a:** Distancia promedio entre el soporte más cercano medido en la superficie de tensión de la viga y la línea de fractura.

Si la falla ocurre fuera del tercio central pero no más lejos del 5 % de la luz, descartaremos el ensayo.

- Finalmente clasificar el valor de Mr, según la siguiente tabla:

Tabla 15

Valores de resistencia del concreto recomendados según el rango de Tráfico

Rangos de Tráfico Pesado expresado en EE	Resistencia mínima a la Flexotracción del Concreto (Mr)	Resistencia mínima equivalente a la Compresión Del Concreto (F'c)
≤ 5'000,000 EE	40 kg/cm ²	280 kg/cm ²
> 5'000,000 EE ≤ 15'000,000 EE	42 kg/cm ²	300 kg/cm ²
> 15'000,000 EE	45 kg/cm ²	350 kg/cm ²

Nota. Fuente: Manual de carreteras. Suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Sección suelos y pavimentos R. D. N° 10- 2014 - MTC/14

3.5.8.3. Permeabilidad al aire

Este ensayo brinda parámetros para evaluar la durabilidad potencial del concreto como medida de su resistencia al ingreso de sustancias /medios agresivos.

El procedimiento “Método μ Torrent” seguido para determinar la permeabilidad al aire en conformidad a la NORMA SUIZA SIA 262/1-E, es el siguiente:

- Limpiar la cara superior de la probeta cilíndrica de 6 x 12”.
- Colocar la célula activa de succión en la cara superior de la probeta.
- Presionar “start” en la pantalla táctil del PermeaTORR, esperar 3 sonidos y presionar el botón de luz verde para que empiece el ensayo.
- Esperar que vuelva a sonar el PermeaTORR y presionar el botón de luz verde para finalizar el ensayo.
- Tomar el dato (kT [$10^{-16}m^2$]) que muestra la pantalla táctil y clasificar según la tabla 16:

Tabla 16
Clases de permeabilidad según su valor kT

Clase de Permeabilidad		kT (10^{-16} m^2)
PK0	Despreciable	< 0.001
PK1	Muy Baja	0.001 - 0.01
PK2	Baja	0.01 - 0.1
PK3	Moderada	0.1 - 1.0
PK4	Alta	1.0 - 10
PK5	Muy Alta	10 - 100
PK6	Ultra Alta	> 100

Nota. Fuente: Norma suiza SIA 262/1-E

3.5.8.4. Resistividad eléctrica

Este ensayo nos brinda parámetros para evaluar la potencial durabilidad del concreto como medida de su resistencia al ataque de iones cloruros. El procedimiento seguido para determinar la resistividad eléctrica en conformidad a la ASSHTO TP95-14, es el siguiente:

- Una vez teniendo las probetas cilíndricas delimitadas por 4 cuadrantes ($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$), extraer la primera muestra y colocarla transversalmente con la marca de 0° visible.
- Ubicar el resipod en el lado longitudinal de la muestra y aplicar una ligera presión.
- Anotar el valor ($k\Omega\text{-cm}$) que muestra el resipod al momento de estabilizarse.
- Repetir los pasos con los demás cuadrantes hasta tener 8 lecturas (2 pasadas).
- Finalmente hallar el promedio de las lecturas y clasificar según la siguiente tabla:

Tabla 17

Clasificación de penetración de iones cloruro según su valor kΩ-cm y tamaño de probeta

Penetración de iones cloruros	Ensayo de resistividad eléctrica superficial	
	Cilindros de 100 x 200 mm(4 x 8")(kΩ-cm)	Cilindros de 150 x 300 mm(6 x 12")(kΩ-cm)
Alta	< 12	<9 .5
Moderada	12 - 21	9.5 - 16.5
Baja	21 - 37	16.5 - 29
Muy baja	37 - 254	29 - 199
Despreciable	> 254	> 199

Nota. Fuente: AASHTO Designation: TP 95-14.

3.6. Procedimiento y análisis de datos

El respectivo procesamiento de los datos se efectuó por medio de análisis estadístico básico para de esa manera evaluar la influencia de las variables en estudio con el programa Microsoft Excel en el cual se encuentran formatos con información necesaria para cada propiedad física-mecánica.

El estimador estadístico a utilizar será:

Promedio: Es la suma de todos los resultados dividido entre el número total de datos, tal como lo indica la formula siguiente:

$$\bar{x} = \frac{\sum_i^n X_i}{n}$$

Donde:

\bar{x} : Promedio

Σ : Sumatoria

X_i : Observación de la muestra

n : Tamaño de la muestra

El análisis de los resultados se presentará a través de tablas y gráficos de líneas mediante el programa Microsoft Excel.

IV. RESULTADOS

4.1. Costra

4.1.1. Pérdida al fuego (LoI)

Se exponen los resultados de pérdida al fuego del cemento y costra en estado molido en la tabla 18.

Tabla 18
Pérdida al fuego del cemento y costra

Parámetro / Materia	Cemento tipo I	Costra
Peso húmedo	-	16.3629
Peso seco	-	16.323
Peso muestra	-	2.0006
LoI	3.03%	1.99%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Composición química

Se muestra la composición química del cemento y costra en la tabla 19.

Tabla 19
Composición química del cemento y costra

Parámetro / Materia	Cemento tipo I	Costra
SiO ₂	20.04%	20.39%
Al ₂ O ₃	4.34%	4.17%
Fe ₂ O ₃	2.82%	3.75%
CaO	63.39%	62.02%
MgO	1.92%	1.94%
SO ₃	2.77%	3.02%
Na ₂ O	0.48%	0.85%
K ₂ O	0.64%	1.41%
Otros	0.00%	0.70%
LoI	3.03%	1.99%

Nota. Fuente: Laboratorio rayos X – Cementos Pacasmayo.

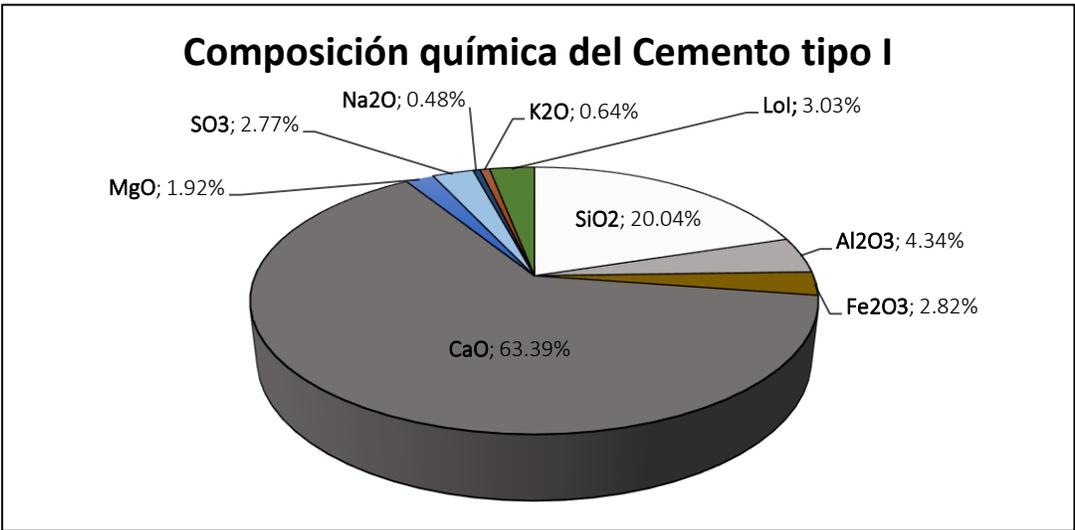


Figura 02. Composición química del Cemento tipo I.
Fuente: Elaboración propia.

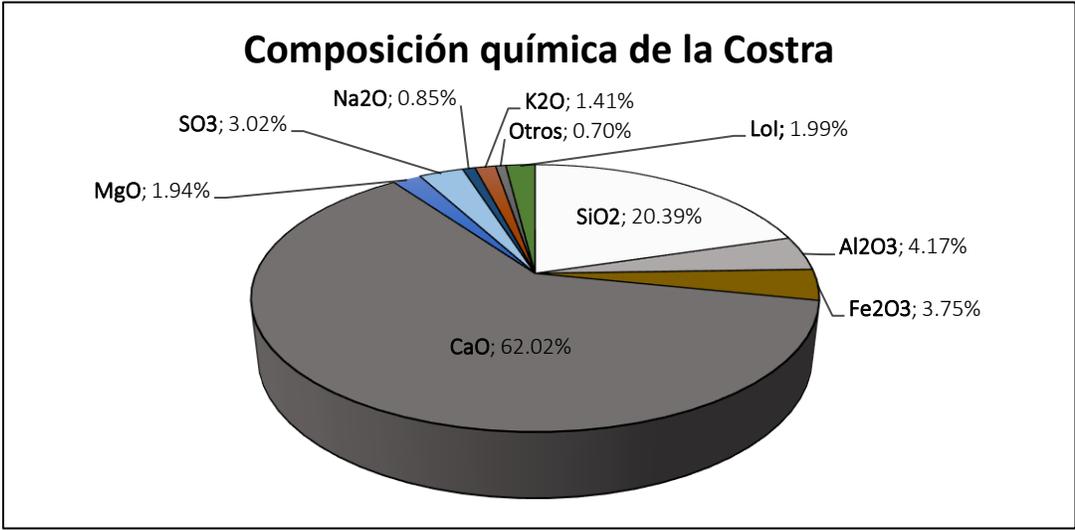


Figura 03. Composición química de la costra.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Porcentaje de retenido en malla #325

El cemento y la costra fueron ensayados mediante lavado en la malla #325 para determinar su finura.

Los resultados se exhiben en la tabla 20.

Tabla 20
Porcentaje de retenido en malla #325 del cemento y costra

Parámetro / Materia	Cemento tipo I	Costra molida
Peso inicial (g)	1.000	1.000
Peso después de lavado y secado (g)	0.0103	0.052
RM325	1.03%	5.02%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. Índice de actividad puzolánica (IAP)

Se ensayó la resistencia a la compresión de los morteros a la edad de 7 y 28 días.

Al aplicar la fórmula para determinar el IAP, se obtuvieron los resultados que se presentan en las tablas 21 y 22.

Tabla 21
IAP a 7 días según normas ASTM C311 Y ASTM C989

Materia/ Parámetro	Patrón	Costra
ASTM C311	100	95
ASTM C989	100	59

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22
 IAP a 28 días según normas ASTM C311 Y ASTM C989

Materia/ Parámetro	Patrón	Costra
ASTM C311	100	94
ASTM C989	100	64

Nota. Fuente: Elaboración propia.

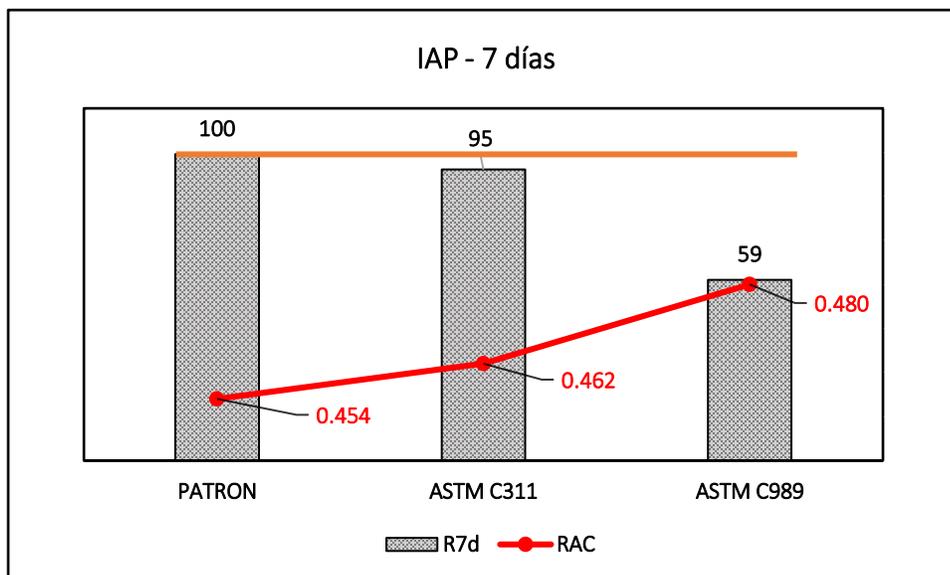


Figura 04. IAP a 7 días según normas ASTM C311 Y ASTM C989.
 Fuente: Elaboración propia.

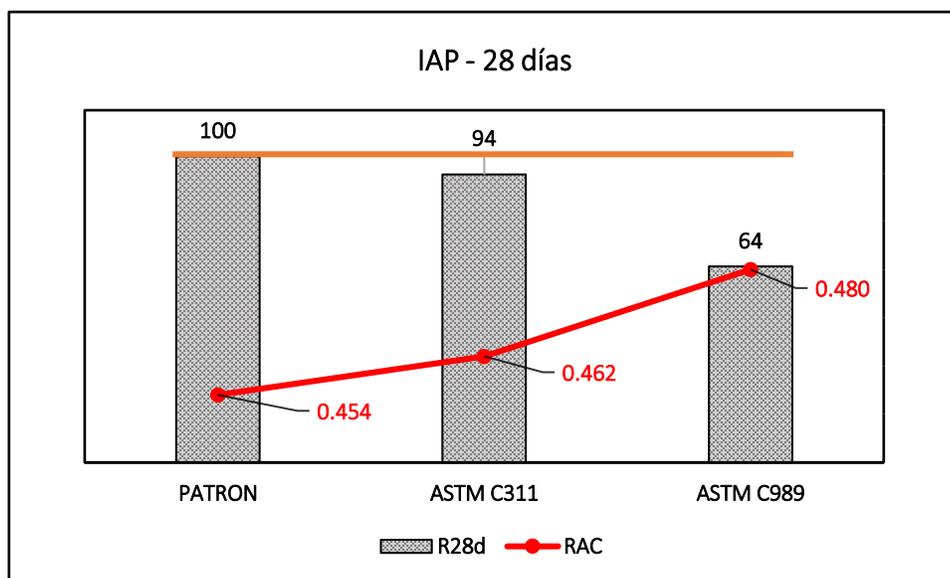


Figura 05. IAP a 28 días según normas ASTM C311 Y ASTM C989.
 Fuente: Elaboración propia.

4.2. Agregado fino

4.2.1. Contenido de humedad (NTP 339.185)

El porcentaje de contenido de humedad de la arena natural fue ensayado de acuerdo a los lineamientos de la NTP 339.185.

El resultado se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 23

Contenido de humedad (%) de la arena natural

Parámetro / Materia	Arena natural	
Peso de muestra húmeda	3284.50	3119.80
Peso de muestra seca	3272.20	3109.00
Contenido de humedad (%)	0.37%	0.35%
Promedio	0.36%	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Análisis granulométrico (NTP 400.012)

Los resultados del análisis granulométrico de la arena natural se presentan en la tabla 24:

Tabla 24
Análisis granulométrico de la arena natural

Tamiz estándar	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido Acumulado (%)	Pasante (%)	Rangos (NTP 400.037)	
						Mínimo	Máximo
2"	50.000	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
1 1/2"	37.500	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
1"	25.000	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
3/4"	19.000	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
1/2"	12.500	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
3/8"	9.500	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
Nº 4	4.750	0.90	0.08	0.08	99.92	95.00	100.00
Nº 8	2.360	126.30	10.85	10.92	89.08	80.00	100.00
Nº 16	1.180	163.00	14.00	24.92	75.08	50.00	85.00
Nº 30	0.600	184.00	15.80	40.72	59.28	25.00	60.00
Nº 50	0.300	359.80	30.90	71.62	28.38	5.00	30.00
Nº 100	0.150	257.50	22.11	93.74	6.26	0.00	10.00
Nº 200	0.075	55.70	4.78	98.52	1.48	0.00	5.00
Fondo	0.000	17.10	1.47	99.99	0.01	0.00	0.00

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que la masa antes del ensayo fue de 1164.40 gramos y la masa final después del ensayo de 1164.30 gramos, se obtiene una diferencia porcentual de 0.00 %.

$$M.F = \frac{\sum \% \text{Acum. ret (1 1/2", 3/4", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100)}}{100}$$

$$M.F = \frac{\sum \% \text{Acum. ret (0.00 + 0.00 + 0.00 + 0.10 + 10.90 + 24.90 + 40.70 + 71.60 + 93.70)}}{100}$$

$$M.F = 2.42$$

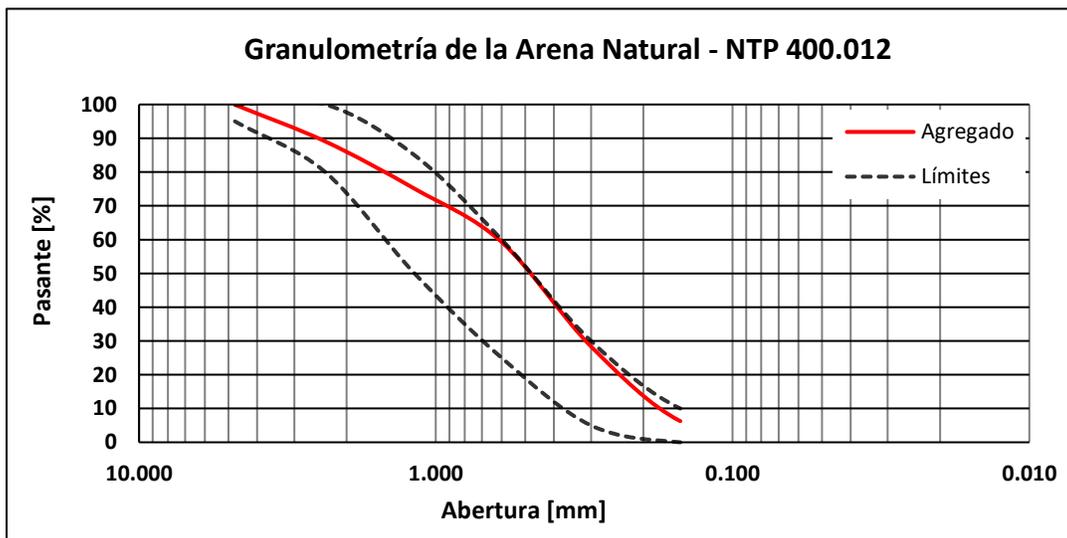


Figura 06. Curva granulométrica de la arena natural.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Peso unitario (NTP 400.017)

a) Peso unitario suelto

Los resultados del peso unitario suelto de la arena natural se presentan en la tabla 25:

Tabla 25
Peso unitario suelto de la arena natural

Parámetro / Materia	Arena natural		Promedio
Peso de la muestra + recipiente (Kg)	21.18	21.34	-
Peso de recipiente (Kg)	5.24	5.24	-
Peso neto de la muestra (Kg)	15.94	16.10	-
Volumen del recipiente (m ³)	0.00944	0.00944	-
Peso unitario suelto (Kg/m ³)	1689	1706	1697

Nota. Fuente: Elaboración propia.

b) Peso unitario compactado

Los resultados del peso unitario compactado de la arena natural se presentan en la tabla 26:

Tabla 26
Peso unitario compactado de la arena natural

Parámetro / Materia	Arena natural		Promedio
Peso de la muestra + recipiente (Kg)	22.72	22.82	-
Peso de recipiente (Kg)	5.24	5.24	-
Peso neto de la muestra (Kg)	17.48	17.58	-
Volumen del recipiente (m ³)	0.00944	0.00944	-
Peso unitario compactado (Kg/m ³)	1852	1862	1857

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.2.4. Peso específico y absorción (NTP 400.022)

Los resultados del peso específico y absorción de la arena natural se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 27

Peso específico y porcentaje de absorción de la arena natural

Parámetro / Materia	Arena natural		Promedio
(1) Masa de la muestra SSS	500.00	500.00	-
(2) Masa de frasco con agua	1466.20	1466.20	-
(3) Masa de frasco con agua + muestra	1966.20	1966.20	-
(4) Masa de frasco con agua y muestra	1780.00	1779.10	-
(5) [3-4]	186.20	187.10	-
(6) Peso de muestra seco al horno	494.20	493.80	-
Peso específico (Base seca)	2.65	2.64	2.65
Peso específico (SSS)	2.69	2.67	2.68
Absorción (%)	1.17	1.26	1.21

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Agregado grueso

4.3.1. Contenido de humedad (NTP 339.185 / ASTM C-566)

El contenido de humedad de la arena natural fue ensayado de acuerdo a los lineamientos de la NTP 339.185.

El resultado se presenta la tabla 28:

Tabla 28

Contenido de humedad (%) de la piedra zarandeada H57

Parámetro / Materia	Piedra zarandeada H57	
Peso de muestra húmeda	6260.30	5954.70
Peso de muestra seca	6243.50	5938.70
Peso de agua	16.80	16.00
Contenido de humedad (%)	0.27%	0.27%
Promedio	0.27%	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Análisis granulométrico (NTP 400.012)

Los resultados del análisis granulométrico de la arena natural se presentan en la tabla 29:

Tabla 29

Análisis granulométrico de la piedra zarandeada H57

Tamiz estándar	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	Retenido (%)	Retenido Acumulado (%)	Pasante (%)	Rangos H57 (NTP 400.037)	
						Mínimo	Máximo
2"	50.000	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
1 1/2"	37.500	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00
1"	25.000	66.60	0.62	0.62	99.38	95.00	100.00
3/4"	19.000	1605.90	14.96	15.58	84.42	65.00	85.00
1/2"	12.500	4882.30	45.49	61.07	38.93	25.00	60.00
3/8"	9.500	2358.90	21.98	83.04	16.96	18.00	44.00
Nº 4	4.750	1733.60	16.15	99.19	0.81	0.00	10.00
Nº 8	2.360	39.10	0.36	99.56	0.44	0.00	5.00
Nº 16	1.180	18.10	0.17	99.73	0.27	0.00	0.00
Nº 30	0.600	0.00	0.00	99.73	0.27	0.00	0.00
Nº 50	0.300	0.00	0.00	99.73	0.27	0.00	0.00
Nº 100	0.150	0.00	0.00	99.73	0.27	0.00	0.00
Nº 200	0.075	0.00	0.00	99.73	0.27	0.00	0.00
Fondo	Fondo	29.30	0.27	100.00	0.00	0.00	0.00

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que la masa antes del ensayo fue de 10733.80 gramos y la masa final después del ensayo de 10733.80 gramos, se obtiene una diferencia porcentual de 0.00 %.

$$M.F = \frac{\sum \% \text{Acum. ret (1 1/2", 3/4", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100)}}{100}$$

$$M.F = \frac{\sum \% \text{Acum. ret (0.00 + 15.58 + 83.04 + 99.19 + 99.56 + 99.73 + 99.73 + 99.73 + 99.73)}}{100}$$

$$M.F = 6.96$$

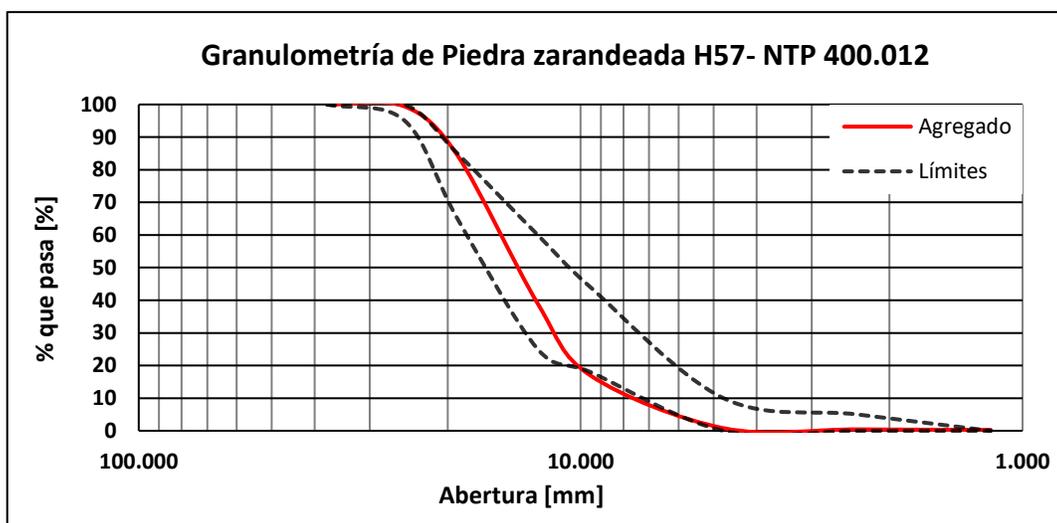


Figura 07. Curva granulométrica de la piedra zarandeada H57.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.3. Peso unitario (NTP 400.017)

a) Suelto

Los resultados del peso unitario suelto de la piedra zarandeada H57 se presentan en la tabla 30:

Tabla 30
Peso unitario suelto de la piedra zarandeada H57

Parámetro / Materia	Piedra zarandeada H57		Promedio
Peso de recipiente (g)	5.24	5.24	-
Peso de la muestra + recipiente (Kg)	20.06	20.00	-
Peso neto de la muestra (g)	14.82	14.76	-
Volumen del recipiente (cm ³)	0.00944	0.00944	-
Peso unitario suelto (Kg/m ³)	1569.92	1563.56	1567

Nota. Fuente: Elaboración propia.

b) Compactado

Los resultados del peso unitario suelto de la piedra zarandeada H57 se presentan en la tabla 31:

Tabla 31
Peso unitario compactado de la piedra zarandeada H57

Parámetro / Materia	Piedra zarandeada H57		Promedio
Peso de recipiente (g)	5.24	5.24	-
Peso de la muestra + recipiente (Kg)	21.54	21.54	-
Peso neto de la muestra (g)	16.3	16.3	-
Volumen del recipiente (cm ³)	0.00944	0.00944	-
Peso unitario compactado (Kg/m ³)	1727	1727	1727

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.3.4. Peso específico y absorción (NTP 400.021)

Los resultados del peso específico y absorción de la piedra zarandeada H57 se presentan en la tabla 32:

Tabla 32

Peso específico y porcentaje de absorción de la piedra zarandeada H57

Parámetro / Materia	Piedra zarandeada H57		Promedio
(1) Masa de la muestra SSS	5000.00	5000.10	-
(2) Masa de la muestra SSS + canastilla (Sumergido)	3952.80	3954.00	-
(3) Masa de la canastilla (Sumergido)	812.00	812.00	-
(4) Masa de la muestra SSS (Sumergido) = (B-C)	3140.80	3142.00	-
(5) (1-2)	1859.20	1858.10	-
(6) Masa de la muestra seca al horno	4955.20	4955.40	-
Peso específico (Base seca)	2.67	2.67	2.67
Peso específico (SSS)	2.69	2.69	2.69
Absorción (%)	0.90	0.90	0.90

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.4. Diseño de mezcla

Los diseños de mezcla para los diferentes porcentajes (%) de sustitución se exhiben en las tablas 33 y 34:

Tabla 33

Diseños de mezcla para concretos $f'c$: 210 kg/cm²

Materia / Parámetro	D1 (0 % Sustitución)	D2 (20 % Sustitución)	D3 (35 % Sustitución)	D4 (50 % Sustitución)
Cemento tipo I (Kg/m ³)	315.63	252.50	205.16	157.82
Costra molida (Kg/m ³)	0.00	63.13	110.47	157.81
Agua (L)	214.81	214.81	214.81	214.81
Arena natural (Kg/m ³)	632.97	632.97	632.97	632.97
Piedra zarandeada H57 (Kg/m ³)	1186.00	1186.00	1186.00	1186.00

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34

Diseños de mezcla para concretos $f'c$: 280 kg/cm²

Materia / Parámetro	D5 (0 % Sustitución)	D6 (20 % Sustitución)	D7 (35 % Sustitución)	D8 (50 % Sustitución)
Cemento tipo I (Kg/m ³)	374.07	299.26	243.15	187.04
Costra molida (Kg/m ³)	0.00	74.81	130.92	187.03
Agua (L)	214.44	214.44	214.44	214.44
Arena natural (Kg/m ³)	579.78	579.78	579.78	579.78
Piedra zarandeada H57 (Kg/m ³)	1191.36	1191.36	1191.36	1191.36

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.5. Ensayos al concreto fresco

4.5.1. Temperatura y asentamiento

Los resultados de temperatura y asentamiento de las diferentes mezclas de concreto se muestran en las tablas 35 y 36.

4.5.1.1. Concreto 210 kg/cm²

Tabla 35

Temperatura y asentamiento de diseños de concreto f'c: 210 kg/cm²

Materia / Parámetro	D1 (0 % Sustitución)		D2 (20 % Sustitución)		D3 (35 % Sustitución)		D4 (50 % Sustitución)	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
	Temperatura (° C)	29.2	28.7	29.5	28.6	29.5	28.8	29.3
Asentamiento (")	6	6	6	6	5 1/2	5 1/2	5	5

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.5.1.2. Concreto 280 kg/cm²

Tabla 36

Temperatura y asentamiento de diseños de concreto f'c: 280 kg/cm²

Materia / Parámetro	D5 (0 % Sustitución)		D6 (20 % Sustitución)		D7 (35 % Sustitución)		D8 (50 % Sustitución)	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
	Temperatura (°C)	29.2	28.9	29.1	28.9	29.4	29.0	29.4
Asentamiento (")	6	6	6	6	5 1/2	5 1/2	5	5

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.5.2. Peso unitario

Los resultados referentes al peso unitario de las diferentes mezclas de concreto se presentan en las tablas 37 y 38.

4.5.2.1. Concreto 210 kg/cm²

Tabla 37

Peso unitario de diseños de concreto f'c: 210 kg/cm²

Materia / Parámetro	D1 (0 % Sustitución)	D2 (20 % Sustitución)	D3 (35 % Sustitución)	D4 (50 % Sustitución)
Peso de recipiente (Kg)	5.21	5.21	5.21	5.21
Peso de muestra + recipiente (Kg)	27.79	27.69	27.62	27.57
Peso neto de la muestra (Kg)	22.58	22.48	22.41	22.36
Volumen del recipiente (m ³)	0.00944	0.00944	0.00944	0.00944
Peso Unitario (Kg/m ³)	2392	2381	2374	2369

Nota. Fuente: Elaboración propia.

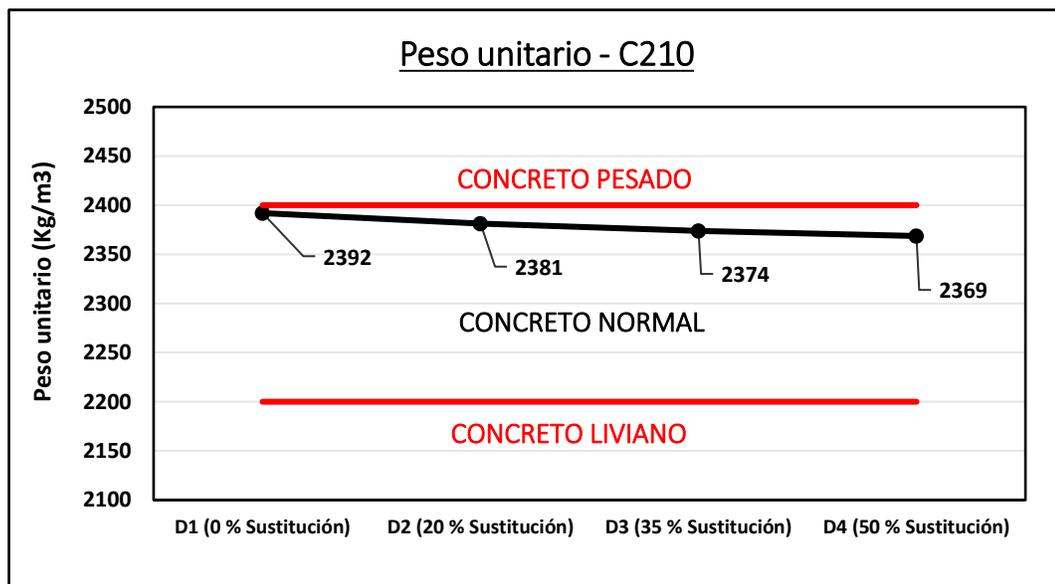


Figura 08. Peso unitario de diseños de concreto f'c: 210 kg/cm².
Fuente: Elaboración propia.

4.5.2.2. Concreto 280 kg/cm²

Tabla 38

Peso unitario de diseños de concreto f'c: 280 kg/cm²

Materia / Parámetro	D5 (0 % Sustitución)	D6 (20 % Sustitución)	D7 (35 % Sustitución)	D8 (50 % Sustitución)
Peso del recipiente (Kg)	5.21	5.21	5.21	5.21
Peso de muestra + recipiente (Kg)	27.96	27.72	27.68	27.61
Peso neto de la muestra (Kg)	22.75	22.51	22.47	22.4
Volumen del recipiente (m ³)	0.00944	0.00944	0.00944	0.00944
Peso Unitario (Kg/m ³)	2410	2385	2380	2373

Nota. Fuente: Elaboración propia.

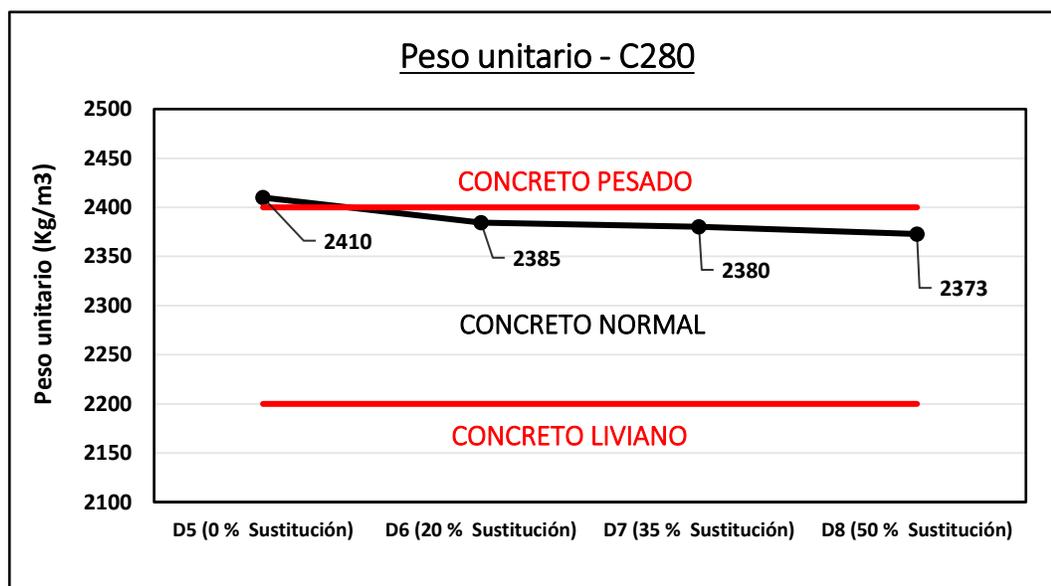


Figura 09. Peso unitario de diseños de concreto f'c: 280 kg/cm².
Fuente: Elaboración propia.

4.6. Ensayos al concreto endurecido

4.6.1. Resistencia a la compresión (NTP 339.034/ASTM C39)

Los resultados de resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de concreto se presentan en las tablas 39 y 40.

4.6.1.1. Concreto 210 kg/cm²

a. Resumen general

Tabla 39

Resistencia a la compresión de diseños de concreto $f'c$: 210 kg/cm²

Diseño	f'c prom. 1D (Kg/cm ²)	f'c prom. 3D (Kg/cm ²)	f'c prom. 7D (Kg/cm ²)	f'c prom. 28D (Kg/cm ²)
D1 (0 % Sustitución)	77.94	176.38	252.30	345.63
D2 (20 % Sustitución)	69.26	190.42	271.55	330.66
D3 (35 % Sustitución)	48.63	151.60	216.84	268.99
D4 (50 % Sustitución)	33.20	120.12	171.68	220.40

Nota. Fuente: Elaboración propia.

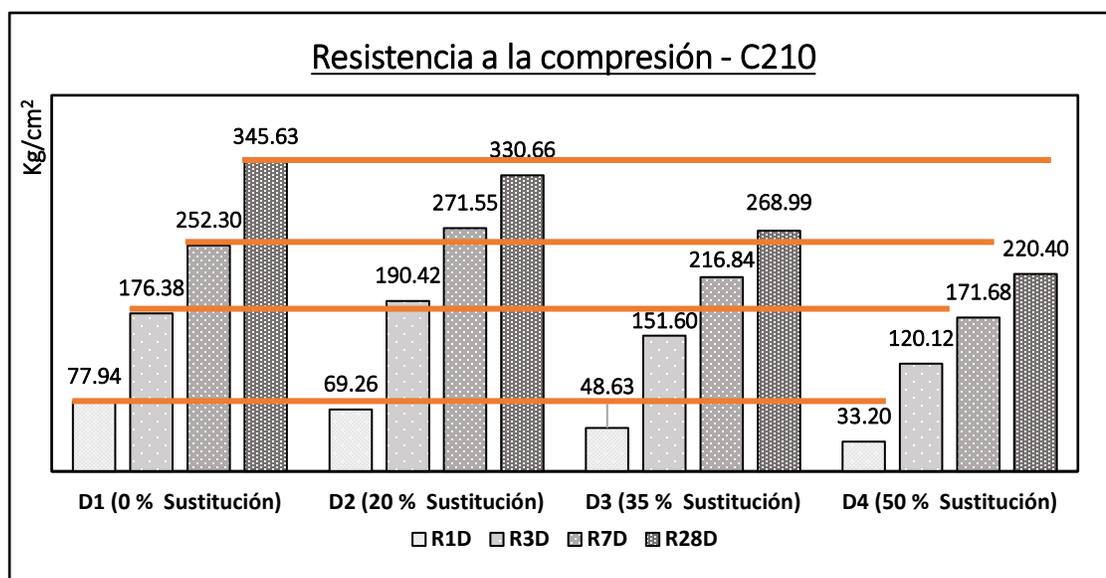


Figura 10. Resistencia a la compresión general de diseños de concreto $f'c$: 210 kg/cm².

Fuente: Elaboración propia.

b. Resistencia a la compresión a 1 día

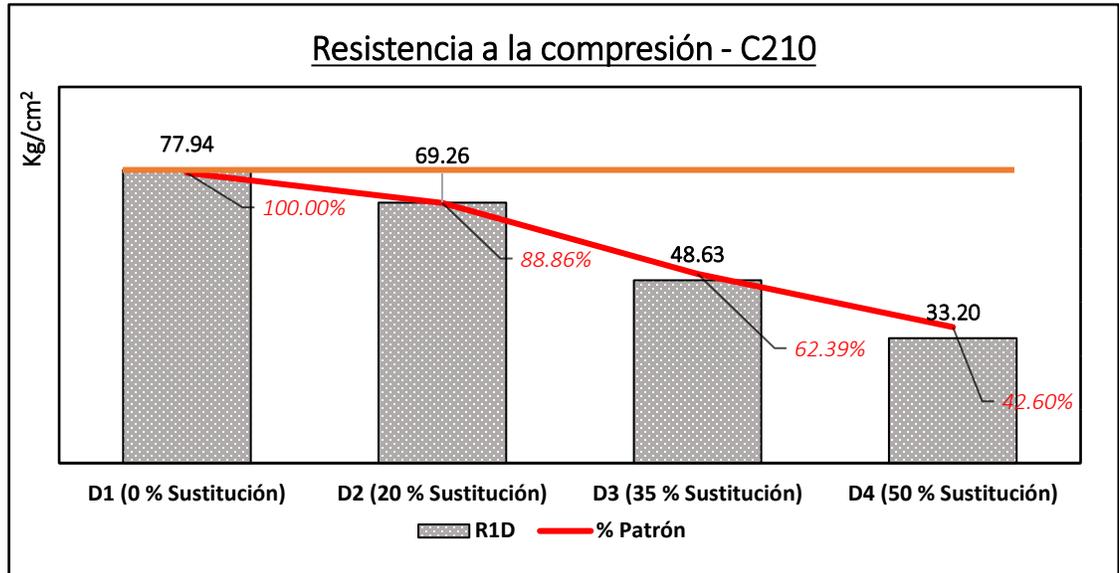


Figura 11. Resistencia a la compresión a 1 día de diseños de concreto $f'c$: 210 kg/cm².
Fuente: Elaboración propia.

c. Resistencia a la compresión a 3 días

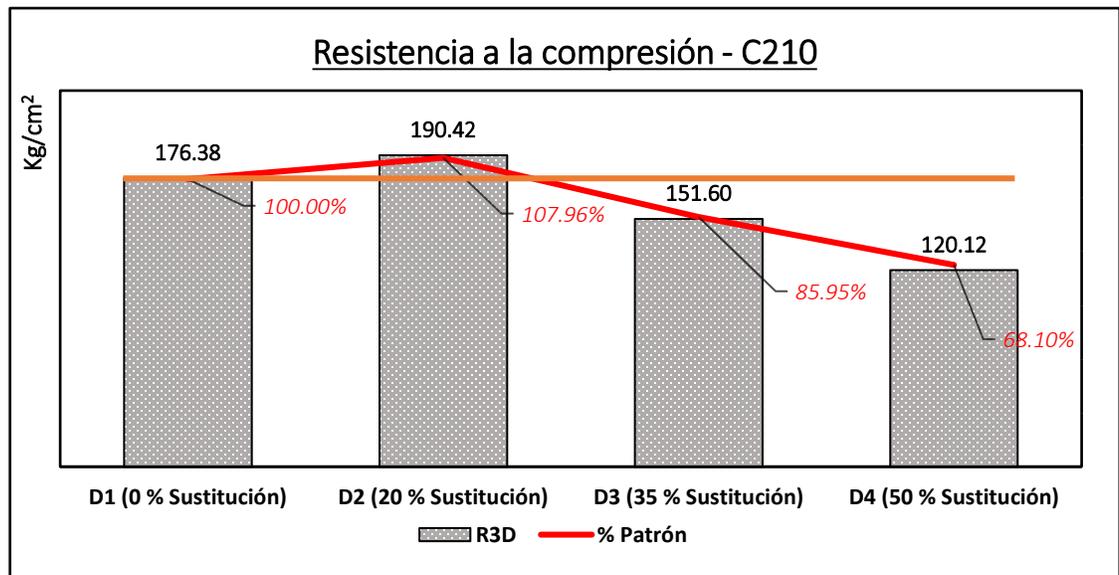


Figura 12. Resistencia a la compresión a 3 días de diseños de concreto $f'c$: 210 kg/cm².
Fuente: Elaboración propia.

d. Resistencia a la compresión a 7 días

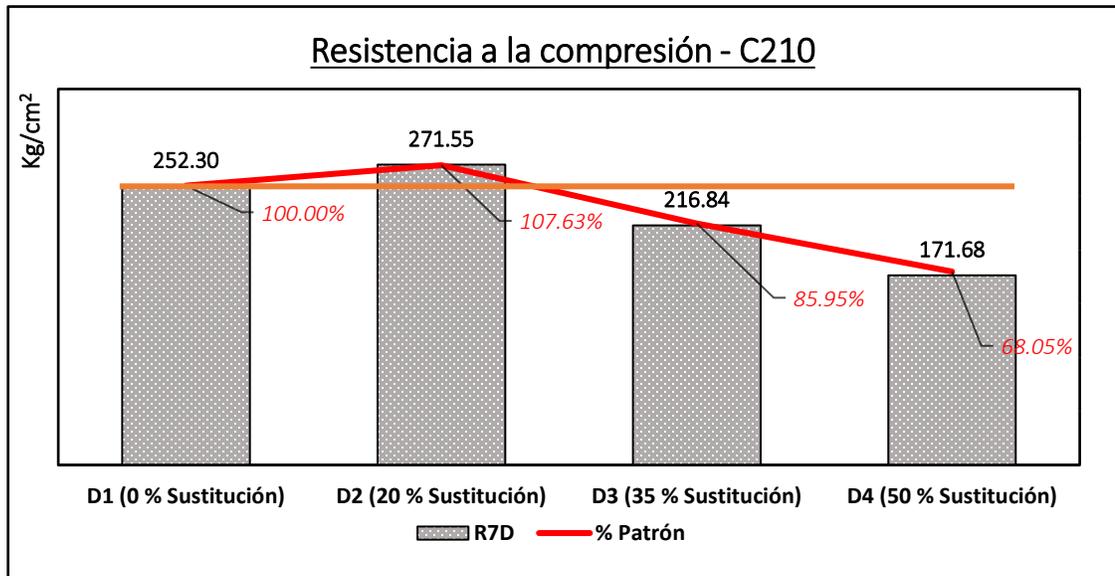


Figura 13. Resistencia a la compresión a 7 días de diseños de concreto f_c : 210 kg/cm².
Fuente: Elaboración propia.

e. Resistencia a la compresión a 28 días

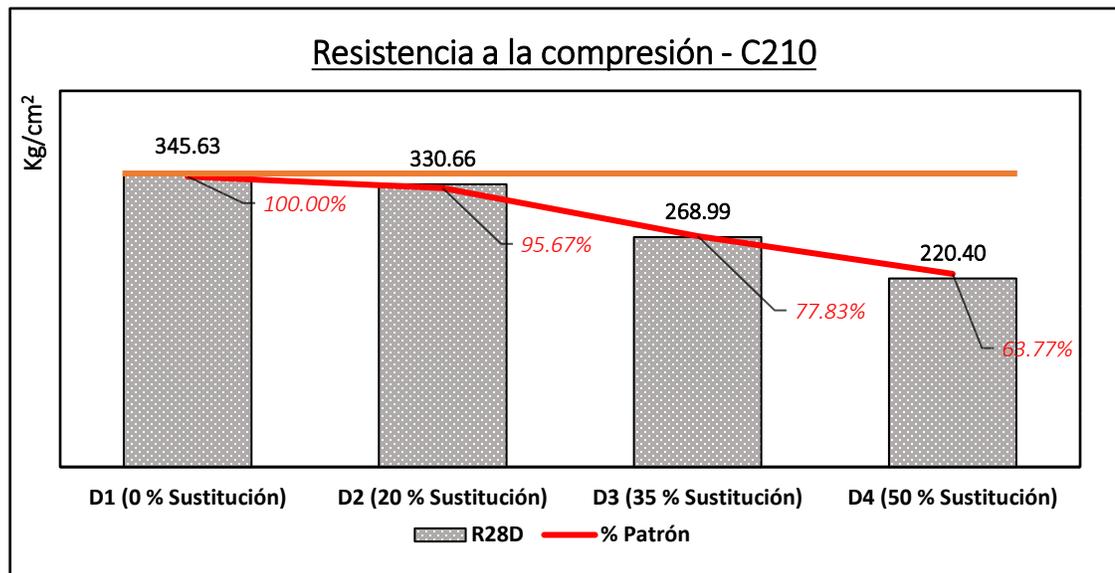


Figura 14. Resistencia a la compresión a 28 días de diseños de concreto f_c : 210 kg/cm².
Fuente: Elaboración propia.

4.6.1.2. Concreto 280 kg/cm²

a. Resumen general

Tabla 40

Resistencia a la compresión de diseños de concreto $f'c$: 280 kg/cm²

Diseño	f'c prom. 1D (Kg/cm ²)	f'c prom. 3D (Kg/cm ²)	f'c prom. 7D (Kg/cm ²)	f'c prom. 28D (Kg/cm ²)
D5 (0 % Sustitución)	101.94	236.29	324.88	406.80
D6 (20 % Sustitución)	116.43	262.37	330.20	422.23
D7 (35 % Sustitución)	91.90	223.75	279.56	344.16
D8 (50 % Sustitución)	66.58	165.02	213.10	281.07

Nota. Fuente: Elaboración propia.

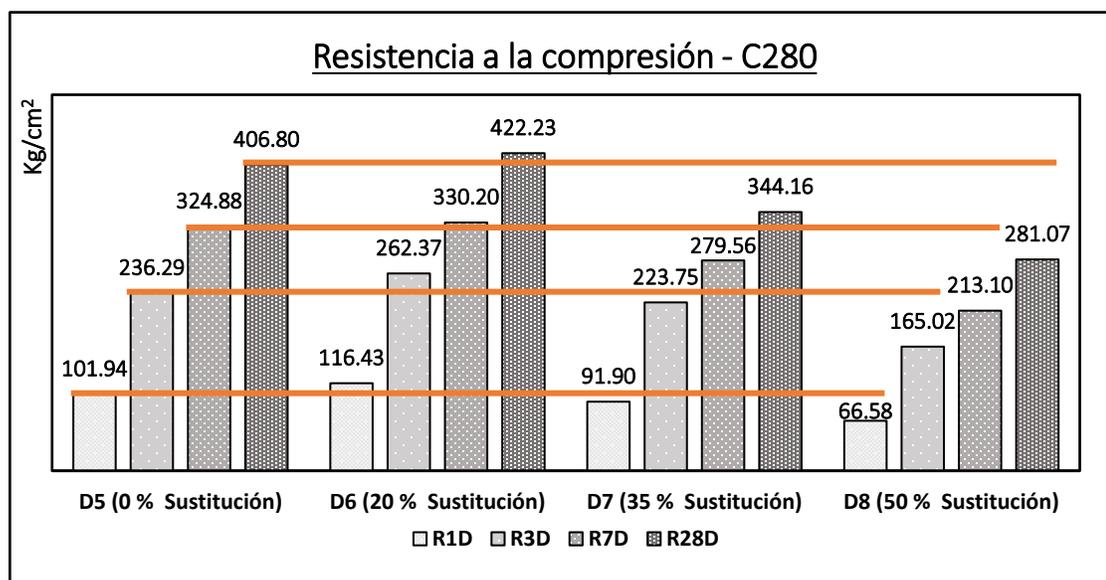


Figura 15. Resistencia a la compresión general de diseños de concreto $f'c$: 280 kg/cm². Fuente: Elaboración propia.

b. Resistencia a la compresión a 1 día

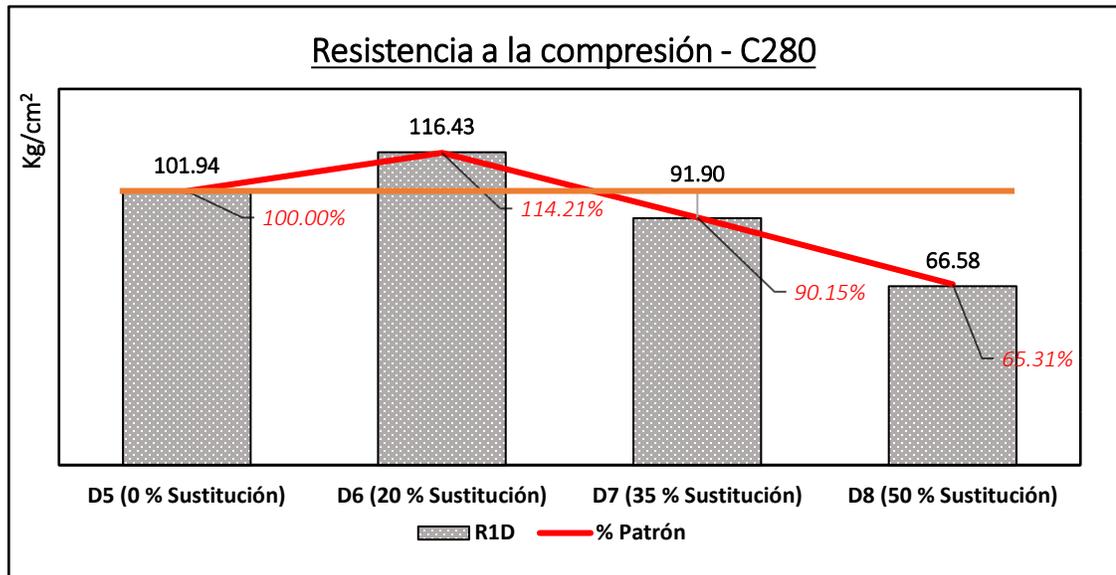


Figura 16. Resistencia a la compresión a 1 día de diseños de concreto f_c : 280 kg/cm².
Fuente: Elaboración propia.

c. Resistencia a la compresión a 3 días

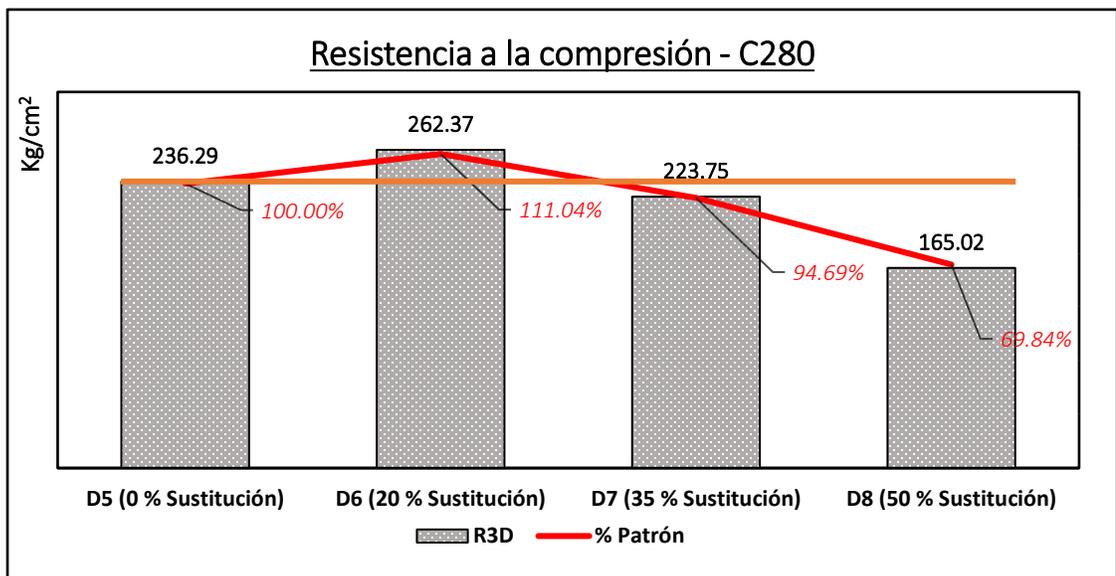


Figura 17. Resistencia a la compresión a 3 días de diseños de concreto f_c : 280 kg/cm².
Fuente: Elaboración propia.

d. Resistencia a la compresión a 7 días

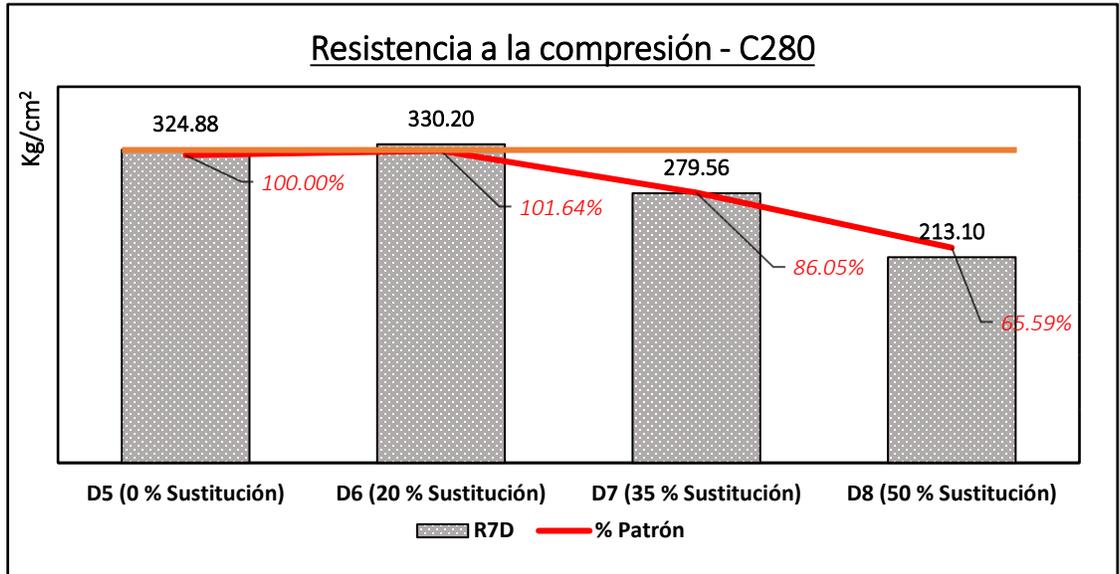


Figura 18. Resistencia a la compresión a 7 días de diseños de concreto f_c : 280 kg/cm². Fuente: Elaboración propia.

e. Resistencia a la compresión a 28 días

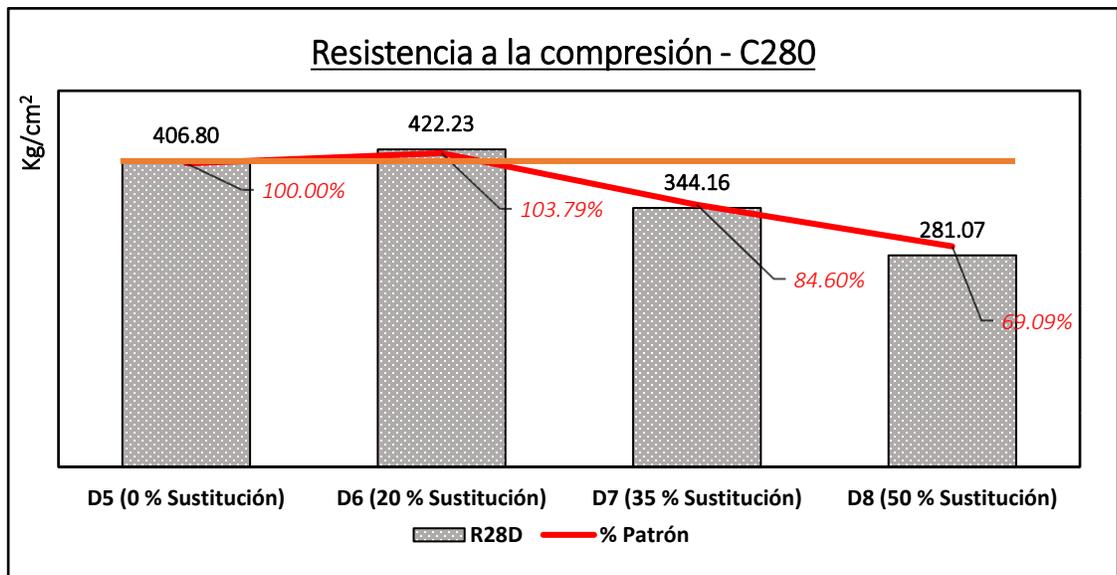


Figura 19. Resistencia a la compresión a 28 días de diseños de concreto f_c : 280 kg/cm². Fuente: Elaboración propia.

4.6.2. Resistencia a la flexión (NTP 339.078/ASTM C78)

Los resultados respecto a resistencia a la flexión de las diferentes mezclas de concreto se presentan en las tablas 41 y 42.

4.6.2.1. Concreto 210 kg/cm²

Tabla 41

Módulo de ruptura de diseños de concreto $f'c$: 210 kg/cm²

Diseño	Mr promedio (Kg/cm ²)
D1 (0 % Sustitución)	53.83
D2 (20 % Sustitución)	53.25
D3 (35 % Sustitución)	44.79
D4 (50 % Sustitución)	41.44

Nota. Fuente: Elaboración propia.

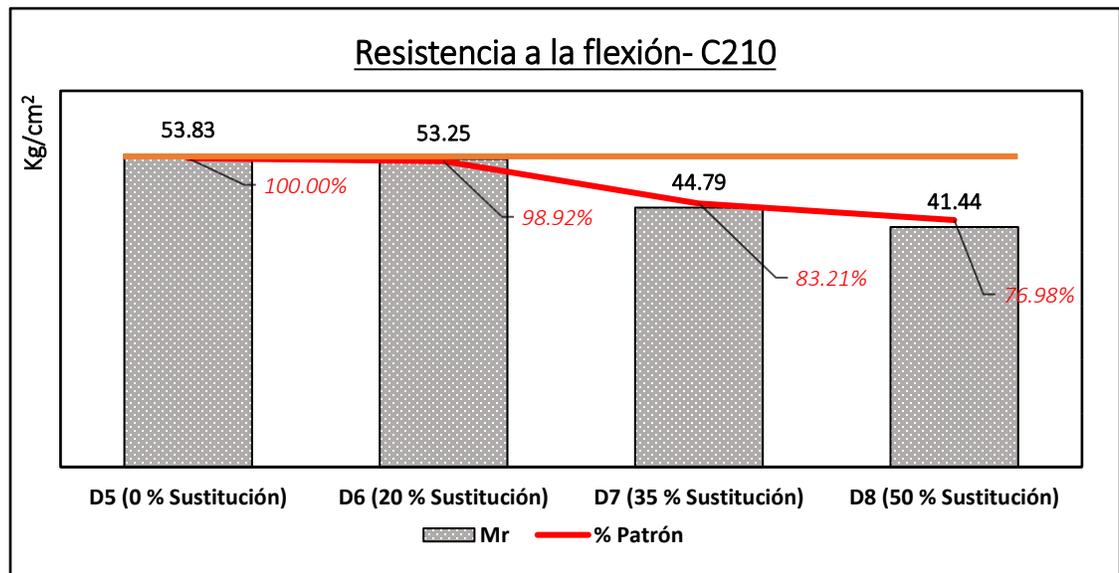


Figura 20. Módulo de ruptura de diseños de concreto $f'c$: 210 kg/cm².

Fuente: Elaboración propia.

4.6.2.2. Concreto 280 kg/cm²

Tabla 42

Módulo de ruptura de diseños de concreto $f'c$: 280 kg/cm²

Diseño	Mr promedio (Kg/cm ²)
D5 (0 % Sustitución)	63.57
D6 (20 % Sustitución)	61.57
D7 (35 % Sustitución)	55.63
D8 (50 % Sustitución)	50.66

Nota. Fuente: Elaboración propia.

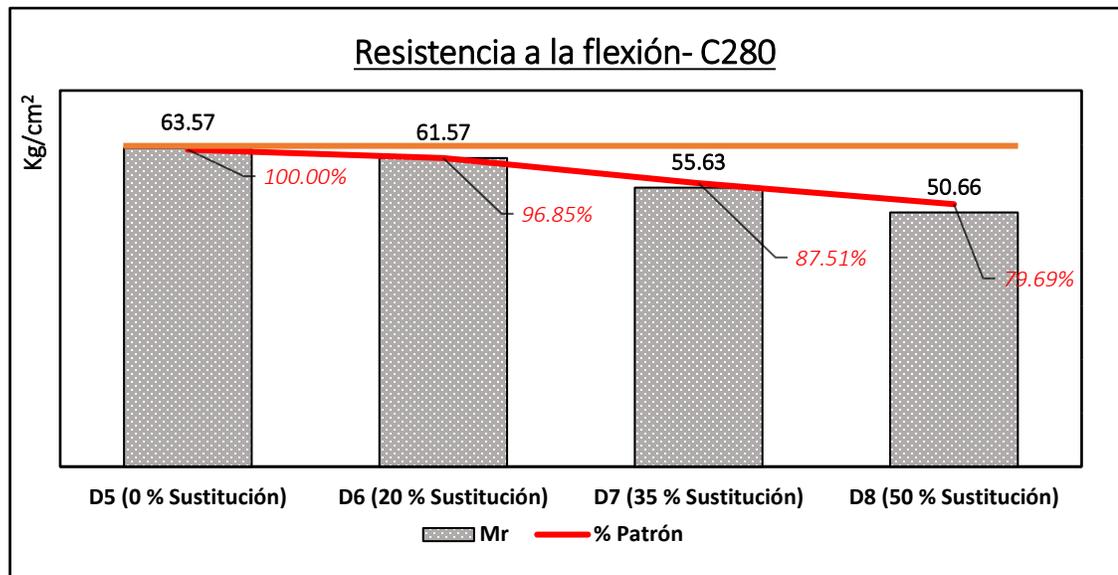


Figura 21. Módulo de ruptura de diseños de concreto $f'c$: 280 kg/cm².
Fuente: Elaboración propia.

4.6.3. Permeabilidad al aire

Los resultados de permeabilidad al aire de las diferentes mezclas de concreto se presentan en las tablas 43 y 44.

4.6.3.1. Concreto 210 kg/cm²

Tabla 43

Permeabilidad al aire de diseños de concreto f'c: 210 kg/cm²

Materia / Parámetro	Promedio (kT (10-16 m ²))
D1 (0 % Sustitución)	0.017
D2 (20 % Sustitución)	0.028
D3 (35 % Sustitución)	0.034
D4 (50 % Sustitución)	0.034

Nota. Fuente: Elaboración propia.

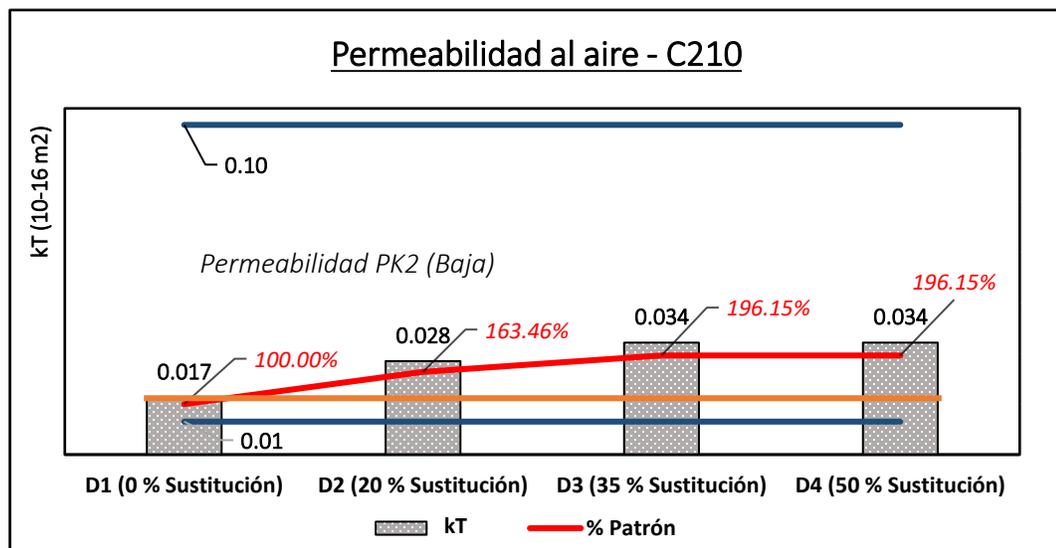


Figura 22. Permeabilidad al aire de diseños de concreto f'c: 210 kg/cm².
Fuente: Elaboración propia.

4.6.3.2. Concreto 280 kg/cm²

Tabla 44

Permeabilidad al aire de diseños de concreto $f'c$: 280 kg/cm²

Materia / Parámetro	Promedio (kT (10-16 m ²))
D5 (0 % Sustitución)	0.017
D6 (20 % Sustitución)	0.025
D7 (35 % Sustitución)	0.024
D8 (50 % Sustitución)	0.021

Nota. Fuente: Elaboración propia.

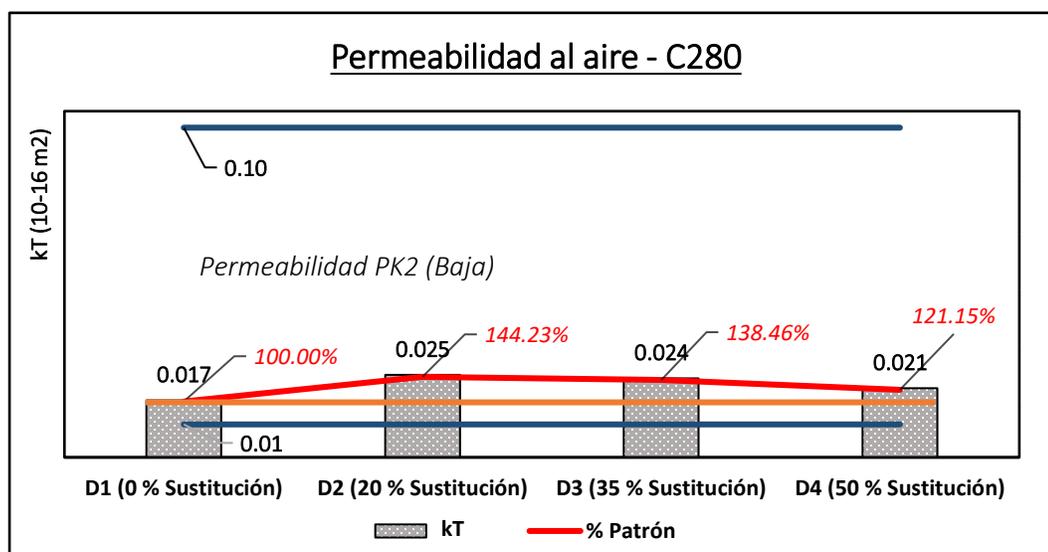


Figura 23. Permeabilidad al aire de diseños de concreto $f'c$: 280 kg/cm².
Fuente: Elaboración propia.

4.6.4. Resistividad eléctrica

Los resultados respecto a la resistividad eléctrica de las diferentes mezclas de concreto se muestran en las tablas 45 y 46.

4.6.4.1. Concreto 210 kg/cm²

Tabla 45

Resistividad eléctrica de diseños de concreto $f'c$: 210 kg/cm²

Materia / Parámetro	Promedio (kΩ-cm)
D1 (0 % Sustitución)	7.98
D2 (20 % Sustitución)	7.60
D3 (35 % Sustitución)	6.88
D4 (50 % Sustitución)	6.85

Nota. Fuente: Elaboración propia.

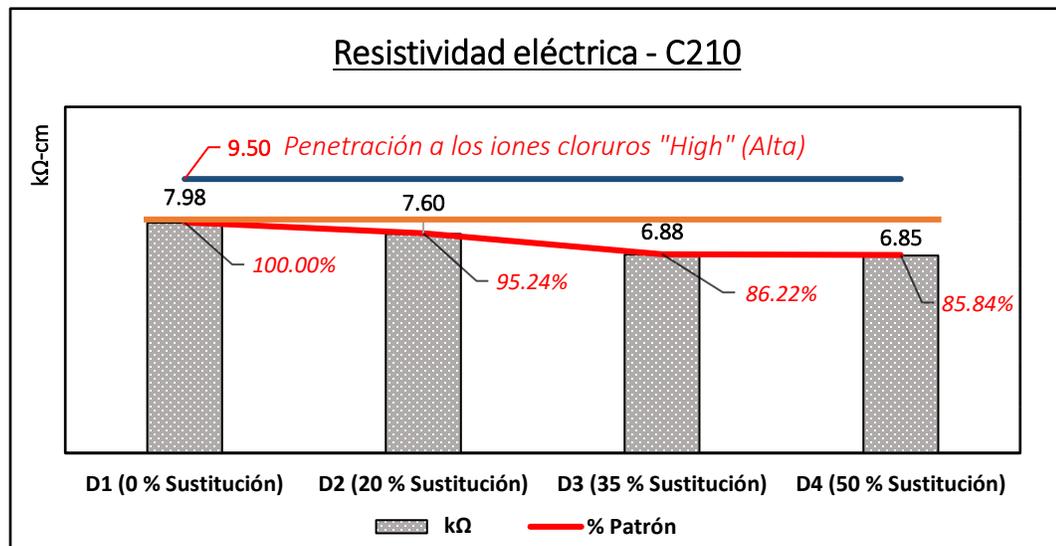


Figura 24. Resistividad eléctrica de diseños de concreto $f'c$: 210 kg/cm².
Fuente: Elaboración propia.

4.6.4.2. Concreto 280 kg/cm²

Tabla 46

Resistividad eléctrica de diseños de concreto $f'c$: 280 kg/cm²

Materia / Parámetro	Promedio (kΩ-cm)
D5 (0 % Sustitución)	8.95
D6 (20 % Sustitución)	8.72
D7 (35 % Sustitución)	8.13
D8 (50 % Sustitución)	8.13

Nota. Fuente: Elaboración propia.

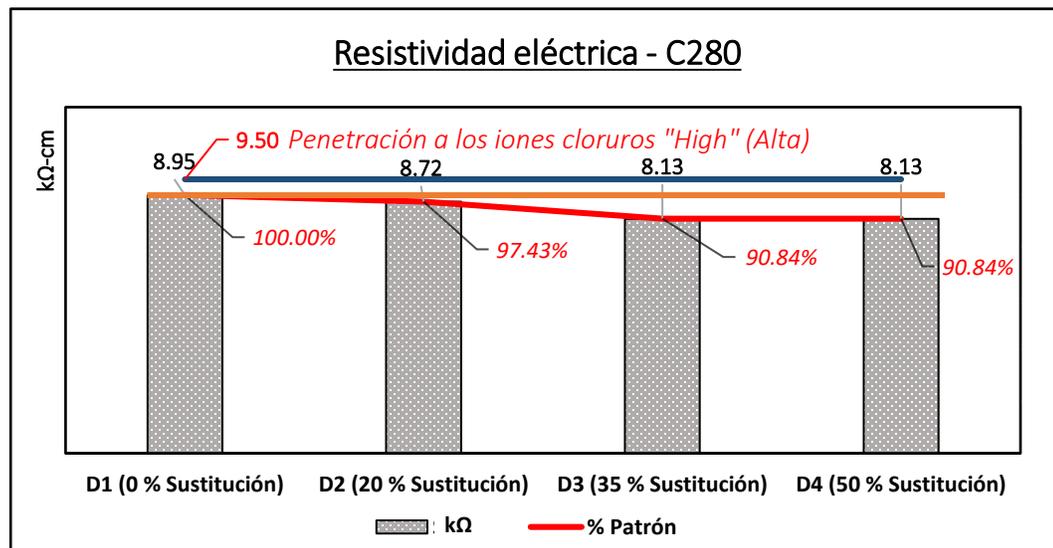


Figura 25. Resistividad eléctrica de diseños de concreto $f'c$: 280 kg/cm².
Fuente: Elaboración propia.

kΩ

4.7. Costo por metro cúbico del concreto

De acuerdo con los siguientes valores típicos de costo de producción del cemento, tenemos:

- Trituración : 15%
- Molienda de crudo : 20%
- Calcinación : 40%
- Molienda de cemento : 20%
- Envasado : 5%

Para el procesamiento de la costra únicamente tomaremos en cuenta el costo de molienda de cemento, por lo cual el costo de la costra molida será:

Costo de procesamiento de costra : Precio del cemento * 20%

Tabla 47

Precios unitarios de los componentes del concreto

Materia / Parámetro	Unidad	Cantidad	Precio (S/.)
Cemento tipo I	Kg	42.5	25.00
Costra molida	Kg	42.5	5.00
Agua	L	1000	6.30
Arena natural	Kg	1000	21.00
Piedra zarandeada H57	Kg	1000	23.00

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Por lo cual el precio por metro cúbico de cada diseño de mezcla de concreto será:

$$\text{Costo por m}^3 : \sum \left(\frac{\text{Peso por metro cúbico de concreto}}{\text{Cantidad}} \right) * \text{Precio}$$

Los costos por metro cúbico de las diferentes mezclas de concreto se muestran en las tablas 48 y 49.

4.7.1. Concreto 210 kg/cm²

Por lo que:

$$D1 \left(\frac{S/.}{m^3} \right): \left(\frac{315.63}{42.50} \right) * 25 + \left(\frac{0.00}{42.50} \right) * 5 + \left(\frac{214.81}{1000} \right) * 6.30 + \left(\frac{632.97}{1000} \right) * 21 + \left(\frac{1186.00}{1000} \right) * 23 = \mathbf{168.18}$$

$$D2 \left(\frac{S/.}{m^3} \right): \left(\frac{252.50}{42.50} \right) * 25 + \left(\frac{63.13}{42.50} \right) * 5 + \left(\frac{214.81}{1000} \right) * 6.30 + \left(\frac{632.97}{1000} \right) * 21 + \left(\frac{1186.00}{1000} \right) * 23 = \mathbf{152.58}$$

$$D3 \left(\frac{S/.}{m^3} \right): \left(\frac{205.16}{42.50} \right) * 25 + \left(\frac{110.47}{42.50} \right) * 5 + \left(\frac{214.81}{1000} \right) * 6.30 + \left(\frac{632.97}{1000} \right) * 21 + \left(\frac{1186.00}{1000} \right) * 23 = \mathbf{140.88}$$

$$D4 \left(\frac{S/.}{m^3} \right): \left(\frac{157.82}{42.50} \right) * 25 + \left(\frac{157.81}{42.50} \right) * 5 + \left(\frac{214.81}{1000} \right) * 6.30 + \left(\frac{632.97}{1000} \right) * 21 + \left(\frac{1186.00}{1000} \right) * 23 = \mathbf{129.19}$$

Tabla 48

Costo por metro cúbico de diseños de concreto f'c: 210 kg/cm²

Materia / Parámetro	Costo	% Patrón (D1)
D1 (0 % Sustitución)	168.18	100.00%
D2 (20 % Sustitución)	152.58	90.72%
D3 (35 % Sustitución)	140.88	83.77%
D4 (50 % Sustitución)	129.19	76.82%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

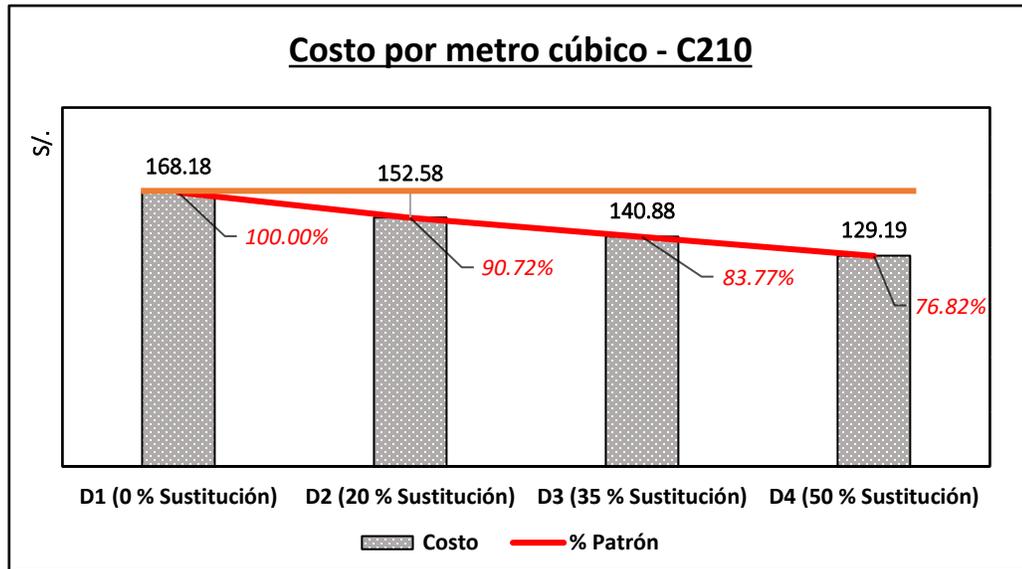


Figura 26. Costos por metro cúbico de diseños de concreto f'_c : 210 kg/cm².
Fuente: Elaboración propia.

4.7.2. Concreto 280 kg/cm²

$$D5 \left(\frac{S/}{m^3} \right): \left(\frac{374.07}{42.50} \right) * 25 + \left(\frac{0.00}{42.50} \right) * 5 + \left(\frac{214.44}{1000} \right) * 6.30 + \left(\frac{579.78}{1000} \right) * 21 + \left(\frac{1191.36}{1000} \right) * 23 = 190.56$$

$$D5 \left(\frac{S/}{m^3} \right): \left(\frac{299.26}{42.50} \right) * 25 + \left(\frac{74.81}{42.50} \right) * 5 + \left(\frac{214.44}{1000} \right) * 6.30 + \left(\frac{579.78}{1000} \right) * 21 + \left(\frac{1191.36}{1000} \right) * 23 = 172.07$$

$$D5 \left(\frac{S/}{m^3} \right): \left(\frac{243.15}{42.50} \right) * 25 + \left(\frac{130.92}{42.50} \right) * 5 + \left(\frac{214.44}{1000} \right) * 6.30 + \left(\frac{579.78}{1000} \right) * 21 + \left(\frac{1191.36}{1000} \right) * 23 = 158.21$$

$$D5 \left(\frac{S/}{m^3} \right): \left(\frac{187.04}{42.50} \right) * 25 + \left(\frac{187.03}{42.50} \right) * 5 + \left(\frac{214.44}{1000} \right) * 6.30 + \left(\frac{579.78}{1000} \right) * 21 + \left(\frac{1191.36}{1000} \right) * 23 = 144.35$$

Tabla 49

Costo por metro cúbico de diseños de concreto f'_c : 280 kg/cm²

Materia / Parámetro	Costo	% D5
D5 (0 % Sustitución)	190.56	100.00%
D6 (20 % Sustitución)	172.07	90.30%
D7 (35 % Sustitución)	158.21	83.02%
D8 (50 % Sustitución)	144.35	75.75%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

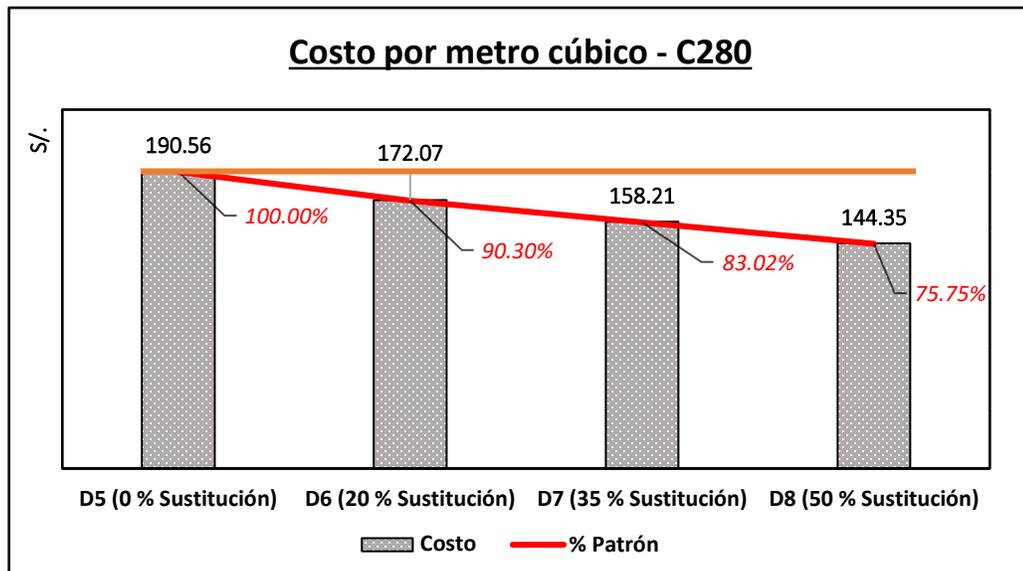


Figura 27. Costos por metro cúbico de diseños de concreto $f'c$: 280 kg/cm².
Fuente: Elaboración propia.

4.8. Prueba de hipótesis

Se planteó la hipótesis que *“Si se sustituye cantidades de cemento en relaciones de 20,35 y 50% por costra, entonces se obtendrá un concreto más económico y con un mejor desempeño en sus propiedades físico-mecánicas”*.

En ese sentido, según los resultados, se llega a las siguientes conclusiones:

Respecto a sus propiedades físicas-mecánicas:

- Con un 20 % de sustitución en concreto 210 kg/cm², para 3 y 7 días se logran incrementos de aproximadamente 8% en cuanto a su resistencia a la compresión. Mientras que la misma sustitución para un concreto 280 kg/cm² presenta incrementos de 14.21%, 11.04%, 1.64% y 3.79% para 1, 3, 7 y 28 días respectivamente. Generando así un mejor desempeño en esta vital propiedad mecánica. Para los diseños con sustitución de 35% y 50%, la disminución es significativa y por lo tanto no recomendable.
- Respecto a la resistencia a la flexión para los diseños con 20% de sustitución, la disminución es mínima, teniendo como valores un -1.08% y 3.15% para concretos f'c: 210 kg/cm² y 280 kg/cm² respectivamente. Estos, al no ser valores tan elevados, se puede afirmar que al sustituirse 20%, la resistencia a la flexión no aumenta ni decrece de manera significativa. Para los diseños con 35 y 50%, la disminución es significativa y por lo tanto no recomendable.
- Con respecto a la permeabilidad al aire de todos los diseños, se evidencia que mientras mayor es la sustitución, menor es la permeabilidad, sin embargo, al ser valores tan pequeños, la diferencia no es significativa. Por lo tanto, se considera que los valores son similares, concluyendo así que el desempeño respecto a la permeabilidad al haber sustitución no se ve afectada.
- De igual forma, se evidencia que la resistividad eléctrica se ve un poco afectada mientras mayor es la sustitución, sin embargo, los valores con 20% de sustitución son similares a los diseños sin sustitución, afirmando así que el desempeño en cuanto a resistividad al haber sustitución no se ve afectada.

Y, respecto a su costo:

- Mientras mayor es la sustitución, menor es el costo por metro cúbico de los diseños, exhibiendo disminuciones de 10%,17% y 24% para 20%,35 y 50% de sustitución respectivamente. Generando así concretos más económicos.

Analizando todos estos factores, se valida la hipótesis planteada de que al sustituir un 20% de cemento por costra, se obtienen concretos más económicos con un mejor desempeño en cuanto a su resistencia a la compresión y con similares valores que los diseños sin sustitución en cuanto a resistencia a la flexión, permeabilidad al aire y resistividad eléctrica.

Para los diseños con 35 y 50%, se rechaza la hipótesis ya que a pesar de que son concretos mucho más económicos que el diseño sin sustitución y con 20% de sustitución, las propiedades mecánicas tales como su resistencia a la compresión y resistencia a la flexión se ven claramente afectados.

V. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1. De la costra

5.1.1. Pérdida al fuego (LoI)

Según los resultados que se presentan en la tabla 18, los valores de pérdida al fuego por parte de los 2 materiales evaluados son muy similares. La principal diferencia radica en que la costra es un material extraído directamente del horno, mientras que, el cemento tipo I además de clínker tiene porcentajes de caliza (4%) y yeso (5%) lo cual hace aumentar el porcentaje global de pérdida al fuego.

5.1.2. Composición química

Los materiales tienen porcentajes similares en casi todos sus componentes resaltando la **SiO₂**(Sílice), **Al₂O₃**(Alúmina) y **CaO** (Óxido de calcio). Estos compuestos, al hidratarse son los que otorgan las principales propiedades al concreto.

Por lo tanto, se asume que el cemento y la costra al hidratarse tendrán similares propiedades.

5.1.3. Índice de actividad puzolánica

De acuerdo a la norma ASTM C311, un material es del tipo puzolánico cuando su valor de índice de puzolanidad es igual o mayor a 75 %. Mientras que la norma ASTM C989 considera que un material es de Grado 80 cuando su índice de actividad es como mínimo 70%.

En las figuras 4 y 5 se observa que el índice de actividad a 7 y 28 días significativo se alcanza cuando se aplica la norma ASTM C 311 (80 % de cemento y 20 % de costra) dado que sus valores son 94 y 95 respectivamente, lo cual cumple con lo estipulado en dicha norma. Mientras que, cuando se aplica la norma ASTM C989 (50% de cemento y 50% de costra), no se llega a los valores mínimos establecidos por la norma, además que al obtener valores como 59 y 64, se puede deducir que el material que está reaccionando en su mayoría es el cemento.

5.1.4. Retenido en malla #325

Los resultados indican que la costra, al molerse, es un material con menor finura (5.02%) que el cemento tipo I (1.03%). El mayor grado de finura está relacionando con un mejor desempeño en cuanto a sus propiedades mecánicas, por lo que, es presumible que la costra al ser un material con menor finura exhiba menores valores al evaluar sus propiedades mecánicas.

5.2. Del agregado fino

5.2.1. Contenido de humedad

La tabla N° 23, muestra el porcentaje de contenido de humedad evaporable por secado de la arena natural.

Al obtener un valor de 0.36%, se infiere que no tiene un contenido de humedad muy elevado. Por lo tanto, no afectará de manera significativa en la determinación de cantidad de agua efectiva del diseño de mezcla.

5.2.2. Análisis granulométrico

Tras aplicar la fórmula con los datos de la tabla 24 con el fin de determinar el módulo de fineza, se obtiene un valor de 2.42. Este valor se adecua a lo citado en la NTP 400.037: “... y su módulo de fineza no será menor de 2,3 ni mayor de 3,1”.

Asimismo, la arena natural utilizada en el ensayo cumple con los límites de los rangos establecidos en la NTP 400.037 (ver tabla N° 6).

5.3. Del agregado grueso

5.3.1. Contenido de humedad

La tabla N° 28, muestra el porcentaje de contenido de humedad evaporable por secado de la piedra zarandeada H57.

Al obtener un valor de 0.27%, se infiere que no tiene un contenido de humedad muy elevado. Por lo tanto, no afectará de manera significativa en la determinación de cantidad de agua efectiva del diseño de mezcla.

5.3.2. Análisis granulométrico

Tras realizar el análisis granulométrico y comparar los porcentajes pasantes con la tabla 7, se aprecia que el agregado grueso en estudio se adecua al Huso 57, lo cual se evidencia de manera más clara en la figura 7.

Asimismo, al tener el primer retenido en el tamiz estándar de 1", el tamaño máximo nominal (TMN) de la muestra es de 1".

5.4. Del concreto en estado fresco

5.4.1. Temperatura y asentamiento

La temperatura determinada para todas las muestras de los 8 tipos de diseño está en el rango de 28.7 – 29.5 ° C. Estos valores son algo elevados pero que es menor a los 32° C que, según algunos autores, es la temperatura máxima para que no se produzca fraguado falso, pérdidas en el asentamiento, etc.

En cuanto al asentamiento (slump), los valores están en el rango de 5"-6" lo cual significa que las mezclas son del tipo "fluido".

De igual forma, se evidencia que tanto para los diseños de 210 kg/cm² como para los de 280 kg/cm², no hay cambio de asentamiento entre los diseños con 0% de sustitución y los diseños con 20% de sustitución. Mientras que, hay una disminución de ½" y 1" respecto a los diseños con 35% de sustitución y 50% de sustitución.

5.4.2. Peso unitario

Respecto al peso unitario determinado para los diseños de 210 kg/cm² y 280 kg/cm², se evidencia que mientras mayor es el porcentaje de sustitución de cemento por costra, menor es el peso unitario del concreto. Esto sería porque la costra es un material más ligero que el cemento.

Además, los resultados se ubican dentro del rango de concreto normal (2200-2400 kg/m³).

5.5. Del concreto en estado endurecido

5.5.1. Resistencia a la compresión

De los resultados presentados en la tabla 39 (considerando al diseño 1 como “patrón”), se rescata lo siguiente:

- Para resistencia a la compresión a 1 día, todos los valores son inferiores al D1 (0% de sustitución), lo cual indica que para diseños de concreto 210 kg/cm², la costra al hidratarse no es un material que otorgue resistencias de manera inmediata.
- En el D2 (20 % de sustitución) para 3 y 7 días, la resistencia a la compresión resultante es mayor al D1 (0% de sustitución) presentando incrementos de 7.96% y 7.63% respectivamente. Mientras que, para 28 días la resistencia decae un 4.33%.
- En el D3 los resultados no son muy elevados, con valores que fluctúan entre 62% – 86% respecto al patrón (D1).
- Para 50 % de sustitución (D4), los resultados son pobres con valores que oscilan entre los rangos de 42% - 69% respecto al diseño patrón (D1).

De los resultados presentados en la tabla 40 (considerando al diseño 5 como “patrón”), se rescata lo siguiente:

- Para las edades de 1,3,7 y 28 días, el D6 es mayor al D5 presentando incrementos de 14.21%,11.04%, 1.64% y 3.79% respectivamente.
- En el D7 los resultados a diferencia del D3, son más elevados con valores de 90.15%, 94.69%, 86.05% y 84.60% respecto al D5 para las edades de 1, 3, 7 y 28 días respectivamente.
- Para 50 % de sustitución (D8), los resultados guardan relación con el D4 con valores que oscilan entre los rangos de 55% - 70% respecto al diseño patrón (D5).

Sin embargo, los diseños 1,2,3 y 4 cumplen con el f_c de diseño (210 kg/cm^2) al cumplir los 28 días de curado, siendo el mayor valor 345.63 (D1) y el menor de 220.40 (D4).

De igual forma, los diseños 5,6,7 y 8 cumplen con el f_c de diseño (280 kg/cm^2) al cumplir los 28 días de curado, siendo el mayor valor 422.23 (D6) y el menor de 281.07 (D4).

De esta manera, la sustitución que mejores resultados presenta es al 20% (D2 Y D6) con valores que sobrepasan al diseño sin sustitución de cemento por costra.

Además, se evidencia que cuando se reemplaza al 50%, la resistencia disminuye de manera significativa. Siendo este valor tan elevado de sustitución, un valor no óptimo en cuanto a resistencia a la compresión.

Esto da a entender que mientras más porcentaje se sustituya a partir de 20%, la resistencia a la compresión disminuirá de manera constante.

5.5.2. Resistencia a la flexión

De acuerdo a la tabla 41, el D2 (20% de sustitución) es el más cercano al D1 (0% de sustitución) con solo una disminución de 1.08%. Mientras que, para el D3 (35% de sustitución) y D4 (50% de sustitución) la disminución es de 16.79% y 23.02% respectivamente.

Igualmente, de acuerdo a la tabla 42, el D6 presenta únicamente una disminución de 3.15% respecto al D5. Mientras que, para el D7 y D8 la disminución es de 12.49% y 20.31% respectivamente.

Es decir, al igual que con la resistencia a la compresión, mientras más porcentaje de cemento de sustituya por costra a partir del 20%, la resistencia a la flexión decrecerá de manera significativa.

Finalmente, con respecto a la tabla 15 "*Valores recomendados de resistencia del concreto según rango de Tráfico*", los resultados cumplen con las resistencias mínimas a la flexión las cuales estipulan un mínimo de 45 kg/cm^2 para un tráfico "> 15'000,000 EE".

5.5.3. Permeabilidad al aire

De acuerdo a las tablas 43 y 44, los resultados de permeabilidad de los diseños con sustitución son más elevados que los diseños sin sustitución, sin embargo, estos valores al ser tan pequeños son más vulnerables a tener mayor dispersión.

Comparando los resultados con la tabla 16 "*Clases de permeabilidad según su kT* ", la clasificación de estos está en el rango PK2 (Baja) por lo cual, a pesar de la diferencia entre los valores, se puede afirmar que los valores son similares, concluyendo así de esta forma en que la costra no tiene demasiada influencia en la permeabilidad al aire del concreto.

5.5.4. Resistividad eléctrica

De acuerdo con las tablas 45 y 46, los resultados de resistividad eléctrica de los diseños con sustitución son inferiores que los diseños sin sustitución, sin embargo, no hay mucha diferencia entre uno y otro.

Comparando los resultados con la tabla 17 "*Clasificación de penetración de iones cloruro según su valor $k\Omega\text{-cm}$ y tamaño de probeta*", la clasificación de estos está en el rango de penetración a los iones cloruros High (Alta) por lo cual, a pesar de la diferencia entre los valores, se puede afirmar que los valores son similares, concluyendo así de esta forma en que la costra no tiene demasiada influencia en la resistividad eléctrica del concreto. Cabe resaltar que a mayor es la sustitución, menor es su resistividad.

5.6. Del costo por metro cúbico del concreto

Como el precio unitario del procesamiento de la costra es un 20% del precio total del cemento, el valor por metro cúbico de los diseños con sustitución será menor que los diseños sin sustitución. Estos valores irán disminuyendo mientras mayor es la sustitución, tal como se aprecia en las tablas 48 y 49.

En este sentido, al sustituirse un 20% de cemento, la disminución es de aproximadamente de 10%; al sustituirse un 35%, es de 17% y al sustituirse un 50%, es de 24%.

Esta disminución de costo por metro cúbico es relevante ya que en obras que demanden gran cantidad de volumen de metros cúbicos de concreto, el ahorro total será muy significativo. Sin embargo, hay que tener en cuenta la relación entre el costo y desempeño físico-mecánico del concreto, ya que no sería óptimo sacrificar en gran manera las propiedades físicas-mecánicas con tal de tener un concreto más económico.

VI. CONCLUSIONES

- Se evaluó la utilización de costra de horno molida como reemplazo parcial de cemento en la elaboración de concreto.
- Los valores de pérdida al fuego obtenida por parte del cemento y la costra son similares siendo estos de 3.03% para el cemento tipo I y 1.99% para la costra.
- Tras evaluar la composición química del cemento y la costra, se obtuvo porcentajes similares en casi todos sus componentes resaltando la SiO₂(Silice), Al₂O₃(Alúmina) y CaO (Óxido de calcio).
- Se comprueba la actividad puzolánica de la costra cuando se aplica la norma ASTM C311 (20% de sustitución) la cual tiene como un requisito mínimo de 75%, siendo los valores obtenidos 95 y 94 para 7 y 28 días respectivamente. Así mismo, no es posible clasificar la costra cuando se aplica la norma ASTM C989 (50% de sustitución) ya que no llega a los valores mínimos establecidos.
- La costra es un material menos fino que el cemento debido a que su retenido en la malla #325 es de 5.02% y el del cemento tipo I es de 1.03%.
- El agregado fino y el agregado grueso cumplen con los parámetros establecidos en la NTP 400:037, estando el agregado grueso en la clasificación de Huso 57.
- Se obtuvo los módulos de finura de 2.42 y 6.96 para el agregado fino y el agregado grueso respectivamente. Así mismo, se determinó el TMN de 1" para el agregado grueso.
- Las temperaturas determinadas para todos los diseños de concreto se encontraron en el rango de 28.7 °C – 29.5 °C, estando por debajo de la temperatura máxima (32 ° C) en la que se producen pérdidas de asentamiento, fraguados falsos, etc.
- La consistencia determinada para los diferentes tipos de diseños de concreto es del tipo fluida (> 5") teniendo valores que oscilan entre los rangos de 5"-6". Se resalta que los diseños sin sustitución y los diseños con 20% de sustitución mantienen la misma consistencia (6").

- Los pesos unitarios determinados en las mezclas se clasifican como normal (2200-2400 kg/m³). Estos pesos unitarios van disminuyendo mientras mayor sea la sustitución de cemento por costra.
- Se determinó que en diseños 210 kg/cm², una sustitución de 20% de costra por cemento, influye de manera positiva, incrementando la resistencia a la compresión en 7.96% y 7.63% para 3 y 7 días respectivamente.
- Para diseños 280 kg/cm², una sustitución de 20% de costra por cemento, igualmente influye de manera positiva, incrementando la resistencia a la compresión en 14.21%, 11.04%, 1.64% y 3.79% para 1,3,7 y 28 días respectivamente.
- Para los diseños con 35% y 50% de sustitución, las resistencias a la compresión decrecen de manera significativa, concluyendo a que a mayor es el porcentaje de sustitución a partir del 20%, menor es la resistencia a la compresión. Sin embargo, todos los diseños cumplieron con su resistencia de diseño.
- La sustitución de cemento por costra no influye de manera positiva en cuanto a su resistencia a la flexión. Mientras mayor es la sustitución, menor es la resistencia a la flexión, resaltando que solo existe una disminución de 1.08% y 3.15% respecto a los diseños con 0 % de sustitución para los diseños con 20% de sustitución en concretos 210 kg/cm² y 280 kg/cm² respectivamente.
- Los diseños cumplen con la resistencia a la flexión mínima (45 kg/cm²) según el “Manual de carreteras. Suelos, geología, geotecnia y pavimentos” para un tráfico > 15 000,000 EE.
- En cuanto a la permeabilidad al aire, mientras mayor es la sustitución, mayor es la permeabilidad, sin embargo, al ser valores tan pequeños, se consideran como si fueran similares.
- Todos los diseños se encuentran en el rango de permeabilidad PK2 (Baja).
- Respecto a su resistividad eléctrica, mientras mayor es la sustitución, menor es la resistividad. Siendo los diseños con 20% de sustitución los más cercanos a los diseños sin sustitución.

- Todos los diseños se encuentran en el rango penetración a los iones cloruros High “Alta”.
- Mientras mayor es la sustitución, menor es el costo por metro cúbico del concreto. Obteniendo valores de disminución de aproximadamente 10%,17% y 24% al sustituir un 20%,35% y 50% de costra por cemento respectivamente.
- Se afirma que el uso de la costra en mezclas de concreto puede contribuir a la protección del medio ambiente, debido a la reutilización que se le da a un residuo industrial; así como la disminución de consumo de cemento lo que trae como consecuencia a una mayor reducción de emisión de CO₂ al ambiente.
- Finalmente, se concluye que el porcentaje óptimo de sustitución de costra por cemento es al 20%, ya que es ahí donde se halla un balance entre costo-desempeño, teniendo incrementos en resistencia a la compresión, manteniendo la resistencia a la flexión, permeabilidad y resistividad eléctrica. Y, además, siendo un 10% más económico.

VII. RECOMENDACIONES

- Tomando en cuenta los resultados obtenidos en la presente investigación, se recomienda la sustitución de costra por cemento al 20%, ya que con este porcentaje el concreto incrementa su resistencia a la compresión y no se ve afectada en sus demás propiedades físicas tales como consistencia, resistencia a la flexión, permeabilidad al aire y resistividad eléctrica. Sumado a esto, los concretos al 20% de sustitución, resultan ser más económico y brindan beneficios ambientales al ser eco amigables.
- Ya que en esta investigación se utilizó cemento Pacasmayo tipo I, se recomienda ampliar la investigación para otros tipos de cementos como por ejemplo los tipos ICo, HE, IP, etc.
- Es recomendable que el proceso de molienda de la costra no se mantenga por un tiempo mayor a 2 horas, ya que, en lugar de reducir la finura se estaría aumentando. Este fenómeno se llama “apelmazamiento”.
- Se recomienda a futuros tesisistas ampliar la investigación, con porcentajes de sustitución inferiores al 20%, realizando diferentes tipos de ensayos para determinar un mayor número de propiedades del concreto y manteniendo diferentes relaciones a/c.
- Finalmente, se recomienda seguir experimentando con residuos de industrias ya que muchos de estos se encuentran almacenados en zonas de desmonte convirtiéndose así en pasivos ambientales.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abanto Castillo, F. (1997). *Tecnología del concreto*. Recuperado de <https://www.udocz.com/read/tecnologia-del-concreto-teoria-y-problemas-ing-flavio-abanto-castillo>
- Asocreto. (2010). *Tecnología del Concreto*. Recuperado de <https://doku.pub/documents/tecnologia-del-concreto-tomo-1-9qgo5vjv3kln>
- ASSHTO TP 95-14. (2014). *Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. EE.UU.
- Carrillo, R. (2018). *Sustitución del cemento por 8% y 16% en combinación del molusco Trachy Cardium Procerum (Pata de mula) y hoja de eucalipto en mortero y determinar su resistencia (tesis de pregrado)*. Universidad San Pedro, Chimbote, Perú.
- Castro, D., & Alfaro, J. (2019). *Análisis comparativo de las propiedades físicas-mecánicas del concreto de resistencias $f_c = 210, 280, 350$ Kg/cm² sustituyendo material cementicio por cáscara de huevo (tesis de pregrado)*. Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú.
- Díaz, J., & Rodríguez, J. (2019). *Mejoramiento de la resistencia de un concreto $f_c 210$ kg/cm², sustituyendo el 10% de arena gruesa por polvo de roca granito de la cantera de talambo en la ciudad de chepen – la libertad (tesis de pregrado)*. Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú.
- Gonzalez Carranza, Y. (Diciembre de 1999). *Caracterización de costras y anillos en hornos rotatorios de cemento (tesis de maestría)*. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.
- Laura Huanca, S. (2006). *Diseño de Mezclas de Concreto*. Puno. Recuperado de <https://itacanet.org/esp/construccion/concreto/dise%C3%B1o%20de%20mezclas.pdf>
- López, R. (2018). *Sustitución de 5% y 10% de cemento por ceniza de cascara de maní en la resistencia de un mortero – 2017 (tesis de pregrado)*. Chimbote, Perú.
- Mendoza, A. (2017). *Determinación de las propiedades físico - mecánicas de un concreto de $f'_c=210$ kg/cm² con adición de puzolana volcánica en Cajamarca (tesis de pregrado)*. Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú.
- Milles, I. (2012). *Estudio de la actividad puzolánica de catalizadores gastados de craqueo catalítico (fcc) como posible remplazo del material cementante (tesis de pregrado)*. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Neville, A. (1999). *Tecnología del concreto*. Recuperado de <https://www.coursehero.com/file/45817875/Neville-Tecnolog%C3%ADa-del-Concretopdf/>
- Pasquel Carbajal, E. (1998). *Tópicos de tecnología del concreto en el Perú*. Lima. Recuperado de <https://issuu.com/jj1989/docs/145311372-topicos-de-tecnologia-de-Propiedades-fisicas-Mecanicas-de-los-materiales>. (21 de noviembre de 2013). Recuperado de <https://danybarker.wordpress.com/2013/11/21/397/>

- Rivva López, E. (1992). *Diseño de mezclas*. Recuperado de <https://www.udocz.com/read/dise-o-de-mezclas-enrique-rivva-lopez>
- Rocha, C., & Romero, C. (2017). *Reutilización del catalizador gastado de craqueo catalítico, como remplazante parcial del cemento en concretos autocompactados (tesis de pregrado)*. Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.
- Santillán, M. (01 de marzo de 2019). *Nuevos concretos a partir de los residuos de construcción*. Recuperado de <http://ciencia.unam.mx/leer/841/nuevos-concretos-a-partir-de-residuos-de-la-construccion->
- Vidaud, E., & Vidaud, I. (2014). Control de calidad al concreto. *Construcción y tecnología en concreto*, 24-27. Recuperado de <http://www.imcyc.com/revistacyt/pdf/febrero2014/ingenieria.pdf>

ANEXOS

ANEXO 01: DISEÑO DE MEZCLA POR EL MÉTODO DE MÓDULO DE FINEZA COMBINACIÓN DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO F'C: 210 KG/CM² (DISEÑO 1- PATRÓN)

A. Determinación de la resistencia promedio

- ✓ Teniendo como dato una desviación estándar de 20.
- ✓ Para un F'c de 210 kg/cm², se tiene:

$$f'_{cr} = 210 + 1.34(20)$$

$$f'_{cr} = 236 \text{ kg/cm}^2$$

B. Selección del asentamiento

Con el fin de obtener un concreto plástico, se opta por seleccionar un asentamiento entre 6-7".

C. Volumen unitario de agua

De la tabla de volumen por agua por m³, para un asentamiento de 6 – 7", TMN del agregado grueso es 1" y concreto sin aire incorporado; el volumen de agua por m³ es 202 l/m³.

D. Contenido de aire

De la tabla N° 10, el contenido de aire para un agregado grueso con un TMN igual a 1", es 1.5%.

E. Relación agua/cemento

De la tabla 11, teniendo en consideración un f'cr = 236 kg/cm² y un concreto sin aire incorporado, procedemos a interpolar:

F'c	a/c
200	0.70
236	X
250	0.62

$$\frac{250 - 200}{236 - 200} = \frac{0.62 - 0.70}{x - 0.70}$$

$$x (\text{relación a/c}) = 0.64$$

F. Factor cemento

$$\text{Cemento} = \frac{202}{0.64} = 315.63 \text{ kg}$$

G. Cálculo de bolsas de cemento

$$\text{Cemento} = \frac{316 \text{ kg}}{42.5 \text{ kg}} = 7.43 \text{ bolsas}$$

H. Sumatoria de volumen absoluto

Tabla 50

Sumatoria de volumen absoluto de diseño de concreto 210 kg/cm²

Material	Peso seco (kg)	Peso específico (kg/m ³)	Volumen absoluto (m ³)
Cemento	315.63	3110	0.102
Agua	202.00	1000	0.202
Agregado grueso	-	-	-
Agregado fino	-	-	-
Aire	1.50	100	0.015
		$\Sigma =$	0.319

Nota. Fuente: Elaboración propia.

I. VOLUMEN DE AGREGADOS

$$\text{Volumen agregados} = 1 - 0.319 = 0.681 \text{ m}^3$$

J. Cálculo del módulo de fineza combinación de agregados

Bolsas de cemento	Módulo de fineza
7	5.34
7.43	m
8	5.41

$$\frac{8 - 7}{7.44 - 7} = \frac{5.41 - 5.34}{x - 5.34}$$

$$m \text{ (Módulo de fineza combinación de agregados)} = 5.37$$

K. Cálculo del porcentaje de agregado fino

$$r_f = \frac{m_g - m}{m_g - m_f}$$

Donde:

mg: Módulo de fineza del agregado grueso.

m: Módulo de fineza de la combinación.

mf: Módulo de fineza del agregado fino.

Entonces:

$$r_f = \left(\frac{6.96 - 5.37}{6.96 - 2.42} \right) \times 100$$

$$r_f = 35.02 \%$$

L. Cálculo del porcentaje de agregado grueso

$$r_g = (100 - r_f)$$

$$r_g = (100 - 35.02)$$

$$r_g = 64.98\%$$

M. Cálculo de volumen de agregado fino y grueso

$$\text{Vol AF} = \text{Volumen agregados} \times r_f \%$$

$$\text{Vol AF} = 0.681 \times 35.02 \%$$

$$\text{Vol AF} = 0.238$$

$$\text{Vol AG} = \text{Volumen agregados} \times r_g \%$$

$$\text{Vol AG} = 0.681 \times 64.98 \%$$

$$\text{Vol AG} = 0.443$$

N. Cálculo de los pesos secos de los agregados

$$\text{Peso seco AF} = \text{Volumen AF} \times \text{Peso específico AF}$$

$$\text{Peso seco AF} = 0.238 \times 2650$$

$$\text{Peso seco AF} = 630.70$$

$$\text{Peso seco AG} = 0.443 \times 2670$$

$$\text{Peso seco AG} = 1182.81$$

O. Corrección por humedad de los agregados

$$\text{Peso húmedo AF} = \text{Peso seco AF} \times (1 + \% \text{ humedad})$$

$$\text{Peso húmedo AF} = 630.70 \times (1 + 0.36/100)$$

$$\text{Peso húmedo AF} = 632.97$$

$$\text{Peso húmedo AG} = \text{Peso seco AG} \times (1 + \% \text{ humedad})$$

$$\text{Peso húmedo AG} = 1182.81 \times (1 + 0.27/100)$$

$$\text{Peso húmedo AG} = 1186.00$$

P. Cálculo de aporte de agua por parte de los agregados

$$\text{Aporte agua AF} = \text{Peso seco AF} \times (\% \text{ humedad} - \% \text{ absorción})$$

$$\text{Aporte agua AF} = 630.70 \times (0.36/100 - 1.21/100)$$

$$\text{Aporte agua AF} = -5.36$$

$$\text{Aporte agua AG} = \text{Peso seco AG} \times (\% \text{ humedad} - \% \text{ absorción})$$

$$\text{Aporte agua AG} = 1182.81 \times (0.27/100 - 0.90/100)$$

$$\text{Aporte agua AG} = -7.45$$

Q. Agua efectiva

$$\text{Vol agua efec} = \text{Vol agua de diseño} - (\text{Aporte agua AF} + \text{Aporte agua AG})$$

$$\text{Vol agua efec} = 202 - (-5.36 + -7.45)$$

$$\text{Vol agua efec} = 202 - (-12.81)$$

$$\text{Vol agua efec} = 214.81$$

R. Cantidad de material por m³ corregida por humedad

- **Cemento** : 315.63 kg/m³
- **Agua** : 214.81 l/m³
- **Arena natural** : 623.97 kg/m³
- **Piedra zarandeada H57** : 1186.00 kg/m³

ANEXO 02: DISEÑO DE MEZCLA POR EL MÉTODO DE MÓDULO DE FINEZA COMBINACIÓN DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO F'C: 210 KG/CM² (DISEÑO 2,3 Y 4)

Se mantendrá la cantidad de agua, agregado fino y agregado grueso como constantes, por lo tanto, el valor que cambiará en peso porcentual será el del cemento.

a) Para 20% (Diseño 2):

- **Cemento** (315.63 x 80%) : 252.50 kg/m³
- **Costra** (315.63 x 20%) : 63.13 kg/m³
- **Agua** : 214.81 l/m³
- **Arena natural** : 623.97 kg/m³
- **Piedra zarandeada H57** : 1186.00 kg/m³

b) Para 35% (Diseño 3):

- **Cemento** (315.63 x 65%) : 205.16 kg/m³
- **Costra** (315.63 x 35%) : 110.47 kg/m³
- **Agua** : 214.81 l/m³
- **Arena natural** : 623.97 kg/m³
- **Piedra zarandeada H57** : 1186.00 kg/m³

c) Para 35% (Diseño 4):

- **Cemento** (315.63 x 50%) : 157.82 kg/m³
- **Costra** (315.63 x 50%) : 157.81 kg/m³
- **Agua** : 214.81 l/m³
- **Arena natural** : 623.97 kg/m³
- **Piedra zarandeada H57** : 1186.00 kg/m³

**ANEXO 03: DISEÑO DE MEZCLA POR EL MÉTODO DE MÓDULO DE FINEZA
COMBINACIÓN DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO F'C: 280 KG/CM² (DISEÑO 5-
PATRÓN)**

A. Determinación de la resistencia promedio

- ✓ Teniendo como dato una desviación estándar de 20.
- ✓ Para un F'c de 280 kg/cm², tenemos:

$$f'_{cr} = 280 + 1.34(20)$$

$$f'_{cr} = 307 \text{ kg/cm}^2$$

B. Selección del asentamiento

Con el fin de obtener un concreto plástico, se opta por seleccionar un asentamiento entre 6-7".

C. Volumen unitario de agua

De la tabla, para un asentamiento de 6 – 7", TMN del agregado grueso es 1" y concreto es sin aire incorporado; el volumen de agua por m³ es 202 l/m³.

D. Contenido de aire

De la tabla N° 10, el contenido de aire para un agregado grueso con un TMN igual a 1", es de 1.5%.

E. Relación agua/cemento

De la tabla N° 11, teniendo en consideración para un f' cr : 307 kg/cm² y un concreto sin aire incorporado, procedemos a interpolar:

F'c	a/c
300	0.55
307	x
350	0.48

$$\frac{350 - 300}{307 - 300} = \frac{0.48 - 0.55}{x - 0.55}$$

$$x \text{ (relación a/c)} = 0.54$$

F. Factor cemento

$$\text{Cemento} = \frac{202}{0.54} = 374.07 \text{ kg}$$

G. Cálculo de bolsas de cemento

$$\text{Cemento} = \frac{374.07 \text{ kg}}{42.5 \text{ kg}} = 8.80 \text{ bolsas}$$

H. Sumatoria de volumen absoluto

Tabla 51

Sumatoria de volumen absoluto de diseño de concreto f'c: 280 kg/cm²

Materiales	Peso seco (kg)	Peso específico (kg/m ³)	Volumen absoluto (m ³)
Cemento	374.07	3110	0.120
Agua	202.00	1000	0.202
Agregado grueso	-	-	-
Agregado fino	-	-	-
Aire	1.50	100	0.015
		$\Sigma =$	0.337

Nota. Fuente: Elaboración propia.

I. Volumen de agregados

$$\text{Volumen agregados} = 1 - 0.337 = 0.663 \text{ m}^3$$

J. Cálculo del módulo de fineza combinación de agregados

Bolsas de cemento	Módulo de fineza
8	5.41
8.80	m
9	5.49

$$\frac{9 - 8}{8.80 - 8} = \frac{5.49 - 5.41}{m - 5.41}$$

$$m \text{ (Módulo de fineza combinación de agregados)} = 5.47$$

K. Cálculo del porcentaje de agregado fino

$$r_f = \frac{m_g - m}{m_g - m_f}$$

Donde:

mg: Módulo de fineza del agregado grueso.

m: Módulo de fineza de la combinación.

mf: Módulo de fineza del agregado fino.

Entonces:

$$r_f = \left(\frac{6.96 - 5.47}{6.96 - 2.42} \right) \times 100$$

$$r_f = 32.82 \%$$

L. Cálculo del porcentaje de agregado grueso

$$r_g = (100 - r_f)$$

$$r_g = (100 - 32.82)$$

$$r_g = 67.18\%$$

M. Cálculo de volumen de agregado fino y grueso

$$\text{Vol AF} = \text{Volumen agregados} \times r_f \%$$

$$\text{Vol AF} = 0.663 \times 32.82 \%$$

$$\text{Vol AF} = 0.218$$

$$\text{Vol AG} = \text{Volumen agregados} \times r_g \%$$

$$\text{Vol AG} = 0.663 \times 67.18 \%$$

$$\text{Vol AG} = 0.445$$

N. Cálculo de los pesos secos de los agregados

$$\text{Peso seco AF} = \text{Volumen AF} \times \text{Peso específico AF}$$

$$\text{Peso seco AF} = 0.218 \times 2650$$

$$\text{Peso seco AF} = 577.70$$

$$\text{Peso seco AG} = 0.445 \times 2670$$

$$\text{Peso seco AG} = 1188.15$$

O. Corrección por humedad de los agregados

$$\text{Peso húmedo AF} = \text{Peso seco AF} \times (1 + \% \text{ humedad})$$

$$\text{Peso húmedo AF} = 577.70 \times (1 + 0.36/100)$$

$$\text{Peso húmedo AF} = 579.78$$

$$\text{Peso húmedo AG} = \text{Peso seco AG} \times (1 + \% \text{ humedad})$$

$$\text{Peso húmedo AG} = 1188.15 \times (1 + 0.27/100)$$

$$\text{Peso húmedo AG} = 1191.36$$

P. Aporte de agua por parte de los agregados

$$\text{Aporte agua AF} = \text{Peso seco AF} \times (\% \text{ humedad} - \% \text{ absorción})$$

$$\text{Aporte agua AF} = 577.70 \times (0.36/100 - 1.21/100)$$

$$\text{Aporte agua AF} = -4.93$$

$$\text{Aporte agua AG} = \text{Peso seco AG} \times (\% \text{ humedad} - \% \text{ absorción})$$

$$\text{Aporte agua AG} = 1188.15 \times (0.27/100 - 0.90/100)$$

$$\text{Aporte agua AG} = -7.51$$

Q. Agua efectiva

$$\text{Vol agua efec} = \text{Vol agua de diseño} - (\text{Aporte agua AF} + \text{Aporte agua AG})$$

$$\text{Vol agua efec} = 202 - (-4.93 + -7.51)$$

$$\text{Vol agua efec} = 202 - (-12.44)$$

$$\text{Vol agua efec} = 214.44$$

R. Cantidad de material por m³ corregida por humedad

- **Cemento** : 374.07 kg/m³
- **Agua** : 214.44 l/m³
- **Arena natural** : 579.78 kg/m³
- **Piedra zarandeada H57** : 1191.36 kg/m³

ANEXO 04: DISEÑO DE MEZCLA POR EL MÉTODO DE MÓDULO DE FINEZA COMBINACIÓN DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO F'C: 280 KG/CM² (DISEÑO 6,7 Y 8)

Se mantendrá la cantidad de agua, agregado fino y agregado grueso como constantes, por lo tanto, el valor que cambiará en peso porcentual será el del cemento.

a. Para 20% (Diseño 6):

- **Cemento (374.07 x 80%)** : 299.26 kg/m³
- **Costra (374.07 x 20%)** : 74.81 kg/m³
- **Agua** : 214.44 l/m³
- **Arena natural** : 579.78 kg/m³
- **Piedra zarandeada H57** : 1191.36 kg/m³

b. Para 35% (Diseño 7):

- **Cemento (374.07 x 65%)** : 243.15 kg/m³
- **Costra (374.07 x 35%)** : 130.92 kg/m³
- **Agua** : 214.44 l/m³
- **Arena natural** : 579.78 kg/m³
- **Piedra zarandeada H57** : 1191.36 kg/m³

c. Para 35% (Diseño 8):

- **Cemento (374.07 x 50%)** : 187.04 kg/m³
- **Costra (374.07 x 50%)** : 187.03 kg/m³
- **Agua** : 214.44 l/m³
- **Arena natural** : 579.78 kg/m³
- **Piedra zarandeada H57** : 1191.36 kg/m³

ANEXO 05: TABLAS DETALLADAS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

Tabla 52
IAP detallado a 7 días – ASTM C311

ASTM C311- IAP A 7 DÍAS		
Materia/ Parámetro	Patrón	Costra
Cemento	500	400
Costra molida	-	100
Agua	227	231
Fluidez	109	111
R a/mc	0.454	0.462
R7d	4490	4250
IAP	100	95

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 53
IAP detallado a 7 días – ASTM C989

ASTM C989 – IAP A 7 DÍAS		
Materia/ Parámetro	Patrón	Costra
Cemento	500	250
Costra molida	-	250
Agua	227	240
Fluidez	109	112
R a/mc	0.454	0.480
R7d	4490	2670
IAP	100	59

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 54
IAP detallado a 28 días – ASTM C311

ASTM C311 – IAP A 28 DÍAS		
Materia/ Parámetro	Patrón	Costra
Cemento	500	400
Costra molida	-	100
Agua	227	231
Fluidez	109	111
R a/mc	0.454	0.462
R28d	5170	4870
IAP	100	94

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 55
IAP detallado a 28 días – ASTM C989

ASTM C989 – IAP A 28 DÍAS		
Materia/ Parámetro	Patrón	% Costra
Cemento	500	250
Costra molida	-	250
Agua	227	240
Fluidez	109	112
R a/mc	0.454	0.480
R28d	5170	3300
IAP28d	100	64

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 56

Resistencia a la compresión a 1 día detallada de diseños de concreto $f'c$: 210 kg/cm²

Diseño	Probetas	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga (kN)	f'c (kg/cm ²)	f'c promedio (Kg/cm ²)
D1 (0 % Sustitución)	C210 D1-1	10.16	81.07	61.80	77.73	77.94
	C210 D1-1	10.16	81.07	64.00	80.50	
	C210 D1-1	10.16	81.07	60.10	75.59	
D2 (20 % Sustitución)	C210 D2-1	10.16	81.07	55.60	69.93	69.26
	C210 D2-1	10.16	81.07	53.70	67.54	
	C210 D2-1	10.16	81.07	55.90	70.31	
D3 (35 % Sustitución)	C210 D3-1	10.16	81.07	39.50	49.68	48.63
	C210 D3-1	10.16	81.07	36.50	45.91	
	C210 D3-1	10.16	81.07	40.00	50.31	
D4 (50 % Sustitución)	C210 D4-1	10.16	81.07	25.70	32.32	33.20
	C210 D4-1	10.16	81.07	26.80	33.71	
	C210 D4-1	10.16	81.07	26.70	33.58	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 57

Resistencia a la compresión a 3 días detallada de diseños de concreto $f'c$: 210 kg/cm²

Diseño	Probetas	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga (kN)	f'c (kg/cm ²)	f'c promedio (Kg/cm ²)
D1 (0 % Sustitución)	C210 D1-1	10.16	81.07	133.00	167.28	176.38
	C210 D1-1	10.16	81.07	145.40	182.88	
	C210 D1-1	10.16	81.07	142.30	178.98	
D2 (20 % Sustitución)	C210 D2-1	10.16	81.07	138.70	174.45	190.42
	C210 D2-1	10.16	81.07	154.00	193.69	
	C210 D2-1	10.16	81.07	161.50	203.13	
D3 (35 % Sustitución)	C210 D3-1	10.16	81.07	121.50	152.82	151.60
	C210 D3-1	10.16	81.07	120.30	151.31	
	C210 D3-1	10.16	81.07	119.80	150.68	
D4 (50 % Sustitución)	C210 D4-1	10.16	81.07	97.40	122.50	120.12
	C210 D4-1	10.16	81.07	94.10	118.35	
	C210 D4-1	10.16	81.07	95.00	119.49	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 58

Resistencia a la compresión a 7 días detallada de diseños de concreto $f'c$: 210 kg/cm²

Diseño	Probetas	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga (kN)	$f'c$ (kg/cm ²)	$f'c$ promedio (Kg/cm ²)
D1 (0 % Sustitución)	C210 D1-1	10.16	81.07	197.10	247.90	252.30
	C210 D1-1	10.16	81.07	199.70	251.17	
	C210 D1-1	10.16	81.07	205.00	257.84	
D2 (20 % Sustitución)	C210 D2-1	10.16	81.07	218.20	274.44	271.55
	C210 D2-1	10.16	81.07	215.40	270.92	
	C210 D2-1	10.16	81.07	214.10	269.28	
D3 (35 % Sustitución)	C210 D3-1	10.16	81.07	172.10	216.46	216.84
	C210 D3-1	10.16	81.07	176.70	222.24	
	C210 D3-1	10.16	81.07	168.40	211.80	
D4 (50 % Sustitución)	C210 D4-1	10.16	81.07	131.40	165.27	171.68
	C210 D4-1	10.16	81.07	133.70	168.16	
	C210 D4-1	10.16	81.07	144.40	181.62	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 59

Resistencia a la compresión a 28 días detallada de diseños de concreto $f'c$: 210 kg/cm²

Diseño	Probetas	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga (kN)	$f'c$ (kg/cm ²)	$f'c$ promedio (Kg/cm ²)
D1 (0 % Sustitución)	C210 D1-1	10.16	81.07	278.40	350.16	345.63
	C210 D1-1	10.16	81.07	273.50	343.99	
	C210 D1-1	10.16	81.07	272.50	342.74	
D2 (20 % Sustitución)	C210 D2-1	10.16	81.07	261.80	329.28	330.66
	C210 D2-1	10.16	81.07	265.20	333.56	
	C210 D2-1	10.16	81.07	261.70	329.15	
D3 (35 % Sustitución)	C210 D3-1	10.16	81.07	209.60	263.62	268.99
	C210 D3-1	10.16	81.07	211.30	265.76	
	C210 D3-1	10.16	81.07	220.70	277.59	
D4 (50 % Sustitución)	C210 D4-1	10.16	81.07	170.80	214.82	220.40
	C210 D4-1	10.16	81.07	177.80	223.63	
	C210 D4-1	10.16	81.07	177.10	222.75	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 60

Resistencia a la compresión a 1 día detallada de diseños de concreto $f'c$: 280 kg/cm²

Diseño	Probetas	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga (kN)	$f'c$ (kg/cm ²)	$f'c$ promedio (Kg/cm ²)
	C280 D1-1	10.16	81.07	80.60	101.37	
D5 (0 % Sustitución)	C280 D1-1	10.16	81.07	81.50	102.51	101.94
	C280 D1-1	10.16	81.07	81.05	101.94	
D6 (20 % Sustitución)	C280 D2-1	10.16	81.07	90.60	113.95	116.43
	C280 D2-1	10.16	81.07	93.60	117.73	
	C280 D2-1	10.16	81.07	93.50	117.60	
D7 (35 % Sustitución)	C280 D3-1	10.16	81.07	74.10	93.20	91.90
	C280 D3-1	10.16	81.07	70.50	88.67	
	C280 D3-1	10.16	81.07	74.60	93.83	
D8 (50 % Sustitución)	C280 D4-1	10.16	81.07	51.30	64.52	66.58
	C280 D4-1	10.16	81.07	53.70	67.54	
	C280 D4-1	10.16	81.07	53.80	67.67	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 61

Resistencia a la compresión a 3 días detallada de diseños de concreto $f'c$: 280 kg/cm²

Diseño	Probetas	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga (kN)	$f'c$ (kg/cm ²)	$f'c$ promedio (Kg/cm ²)
	C280 D1-1	10.16	81.07	191.70	241.11	
D5 (0 % Sustitución)	C280 D1-1	10.16	81.07	182.90	230.04	236.29
	C280 D1-1	10.16	81.07	189.00	237.71	
D6 (20 % Sustitución)	C280 D2-1	10.16	81.07	202.50	254.69	262.37
	C280 D2-1	10.16	81.07	222.30	279.60	
	C280 D2-1	10.16	81.07	201.00	252.81	
D7 (35 % Sustitución)	C280 D3-1	10.16	81.07	179.70	226.02	223.75
	C280 D3-1	10.16	81.07	171.60	215.83	
	C280 D3-1	10.16	81.07	182.40	229.41	
D8 (50 % Sustitución)	C280 D4-1	10.16	81.07	133.90	168.41	165.02
	C280 D4-1	10.16	81.07	132.00	166.02	
	C280 D4-1	10.16	81.07	127.70	160.61	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 62

Resistencia a la compresión a 7 días detallada de diseños de concreto $f'c$: 280 kg/cm²

Diseño	Probetas	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga (kN)	f'c (kg/cm ²)	f'c promedio (Kg/cm ²)
D5 (0 % Sustitución)	C280 D1-1	10.16	81.07	271.80	341.86	324.88
	C280 D1-1	10.16	81.07	262.90	330.66	
	C280 D1-1	10.16	81.07	240.20	302.11	
D6 (20 % Sustitución)	C280 D2-1	10.16	81.07	268.60	337.83	330.20
	C280 D2-1	10.16	81.07	262.90	330.66	
	C280 D2-1	10.16	81.07	256.10	322.11	
D7 (35 % Sustitución)	C280 D3-1	10.16	81.07	214.10	269.28	279.56
	C280 D3-1	10.16	81.07	229.90	289.16	
	C280 D3-1	10.16	81.07	222.80	280.23	
D8 (50 % Sustitución)	C280 D4-1	10.16	81.07	176.70	222.24	213.10
	C280 D4-1	10.16	81.07	166.50	209.42	
	C280 D4-1	10.16	81.07	165.10	207.65	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 63

Resistencia a la compresión a 28 días detallada de diseños de concreto $f'c$: 280 kg/cm²

Diseño	Probetas	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Carga (kN)	f'c (kg/cm ²)	f'c promedio (Kg/cm ²)
D1 (0 % Sustitución)	C280 D1-1	10.16	81.07	350.00	440.21	406.80
	C280 D1-1	10.16	81.07	320.70	403.36	
	C280 D1-1	10.16	81.07	299.60	376.82	
D2 (20 % Sustitución)	C280 D2-1	10.16	81.07	305.60	384.37	422.23
	C280 D2-1	10.16	81.07	341.20	429.14	
	C280 D2-1	10.16	81.07	360.30	453.17	
D3 (35 % Sustitución)	C280 D3-1	10.16	81.07	283.20	356.19	344.16
	C280 D3-1	10.16	81.07	268.40	337.58	
	C280 D3-1	10.16	81.07	269.30	338.71	
D4 (50 % Sustitución)	C280 D4-1	10.16	81.07	225.10	283.12	281.07
	C280 D4-1	10.16	81.07	218.10	274.32	
	C280 D4-1	10.16	81.07	227.20	285.76	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 64

Resistencia a la flexión detallada de diseños de concreto $f'c$: 210 kg/cm²

TIPO DE CONCRETO	Denominación	DIMENSIONES											CARGA MÁXIMA		RESULTADOS			
		Antes del ensayo						Después del Ensayo						P		Mr (MPa)	Mr (kg/cm ²)	Promedio Mr (kg/cm ²)
		Longitud total (mm)		Peralte (mm)		L (L entre apoyos) (mm)	b Ancho (mm)			d Altura (mm)			(Kn)	(kgf)				
1	2	3	1	2	3		1	2	3									
D1 (0 % Sustitución)	C210 D1-1	56.10	56.00	15.19	15.16	45.00	15.30	15.40	15.30	15.21	15.20	15.25	41.90	4271	5.31	54.11	53.83	
	C210 D1-1	56.10	56.00	15.20	15.21	45.00	15.30	15.30	15.30	15.25	15.25	15.23	41.50	4230	5.25	53.54		
D2 (20 % Sustitución)	C210 D2-1	56.10	56.00	15.19	15.16	45.00	15.30	15.40	15.30	15.21	15.20	15.25	42.70	4352	5.41	55.14	53.25	
	C210 D2-1	56.10	56.00	15.20	15.21	45.00	15.30	15.30	15.30	15.25	15.25	15.23	39.80	4057	5.04	51.35		
D3 (35 % Sustitución)	C210 D3-1	56.10	56.00	15.19	15.16	45.00	15.30	15.40	15.30	15.21	15.20	15.25	38.10	3884	4.83	49.20	44.79	
	C210 D3-1	56.10	56.00	15.20	15.21	45.00	15.30	15.30	15.30	15.25	15.25	15.23	31.30	3190	3.96	40.38		
D4 (50 % Sustitución)	C210 D4-1	56.10	56.00	15.19	15.16	45.00	15.30	15.40	15.30	15.21	15.20	15.25	34.00	3466	4.31	43.91	41.44	
	C210 D4-1	56.10	56.00	15.20	15.21	45.00	15.30	15.30	15.30	15.25	15.25	15.23	30.20	3078	3.82	38.96		

Nota. Todas las vigas presentan la falla en el 1/3 central. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 65

Resistencia a la flexión detallada de diseños de concreto $f'c$: 280 kg/cm²

TIPO DE CONCRETO	DIMENSIONES											CARGA MÁXIMA		RESULTADOS			
	Antes del ensayo						Después del Ensayo						P		Mr (MPa)	Mr (kg/cm ²)	Promedio Mr (kg/cm ²)
	Longitud total (mm)	Peralte (mm)	L (L entre apoyos) (mm)	b Ancho (mm)			d Altura (mm)			(Kn)	(kgf)						
1				2	3	1	2	3									
D5 (0 % Sustitución)	C280 D1-1	56.10	56.00	15.19	15.16	45.00	15.30	15.40	15.30	15.21	15.20	15.25	49.40	5035	6.26	63.79	63.57
	C280 D1-1	56.10	56.00	15.20	15.21	45.00	15.30	15.30	15.30	15.25	15.25	15.23	49.10	5005	6.22	63.35	
D6 (20 % Sustitución)	C280 D2-1	56.10	56.00	15.19	15.16	45.00	15.30	15.40	15.30	15.21	15.20	15.25	46.50	4740	5.89	60.05	61.57
	C280 D2-1	56.10	56.00	15.20	15.21	45.00	15.30	15.30	15.30	15.25	15.25	15.23	48.90	4984	6.19	63.09	
D7 (35 % Sustitución)	C280 D3-1	56.10	56.00	15.19	15.16	45.00	15.30	15.40	15.30	15.21	15.20	15.25	43.30	4414	5.49	55.92	55.63
	C280 D3-1	56.10	56.00	15.20	15.21	45.00	15.30	15.30	15.30	15.25	15.25	15.23	42.90	4373	5.43	55.35	
D8 (50 % Sustitución)	C280 D4-1	56.10	56.00	15.19	15.16	45.00	15.30	15.40	15.30	15.21	15.20	15.25	39.80	4057	5.04	51.40	50.66
	C280 D4-1	56.10	56.00	15.20	15.21	45.00	15.30	15.30	15.30	15.25	15.25	15.23	38.70	3945	4.90	49.93	

Nota. Todas las vigas presentan la falla en el 1/3 central. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 66

Permeabilidad al aire detallada de diseños de concreto $f'c$: 210 kg/cm²

Materia / Parámetro	Humedad		Permeabilidad	Promedio
	4.50	4.60	0.017	
D1 (0 % Sustitución)	4.60	4.50	0.018	0.017
	4.50	4.60	0.017	
	4.80	4.80	0.028	
D2 (20 % Sustitución)	4.70	4.90	0.028	0.028
	4.80	4.70	0.029	
	4.50	4.40	0.035	
D3 (35 % Sustitución)	4.50	4.50	0.034	0.034
	4.40	4.50	0.034	
	4.00	4.20	0.035	
D4 (50 % Sustitución)	4.20	4.10	0.034	0.034
	4.30	4.10	0.032	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 67

Permeabilidad al aire detallada de diseños de concreto $f'c$: 280 kg/cm²

Materia / Parámetro	Humedad		Permeabilidad	Promedio
	4.50	4.50	0.018	
D5 (0 % Sustitución)	4.50	4.50	0.017	0.017
	4.60	4.40	0.017	
	4.70	4.80	0.025	
D6 (20 % Sustitución)	4.80	4.80	0.024	0.025
	4.90	4.60	0.025	
	4.80	4.70	0.025	
D7 (35 % Sustitución)	4.70	4.90	0.023	0.024
	4.80	4.80	0.024	
	4.80	4.50	0.021	
D8 (50 % Sustitución)	4.60	4.70	0.020	0.021
	4.70	4.80	0.022	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 68

Resistividad eléctrica detallada de diseños de concreto $f'c$: 210 kg/cm²

Materia / Parámetro	Resistividad eléctrica			Promedio (kΩ-cm)
D1 (0 % Sustitución)	8.80	7.70	7.80	7.98
	8.00	7.50	8.30	
	8.00	8.50	8.10	
	7.80	7.00	8.30	
	7.70	7.60	7.70	
D2 (20 % Sustitución)	7.50	7.60	7.50	7.60
	7.40	7.40	7.60	
	7.80	7.70	7.70	
	7.50	6.70	6.50	
	7.40	6.60	6.50	
D3 (35 % Sustitución)	7.10	6.70	7.30	6.88
	6.50	6.90	6.80	
	7.00	6.30	6.30	
	6.60	7.00	6.80	
	7.90	6.80	6.80	
D4 (50 % Sustitución)	7.20	6.80	6.70	6.85

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 69

Resistividad eléctrica detallada de diseños de concreto $f'c$: 280 kg/cm²

Materia / Parámetro	Resistividad eléctrica			Promedio (kΩ-cm)
D5 (0 % Sustitución)	9.50	7.90	9.50	8.95
	9.20	9.60	9.50	
	8.60	8.90	8.50	
	8.70	8.70	8.80	
	8.70	7.80	9.70	
D6 (20 % Sustitución)	7.60	8.60	8.80	8.72
	9.00	9.40	9.20	
	8.90	7.90	9.00	
	8.10	8.10	8.20	
	7.80	7.70	7.90	
D7 (35 % Sustitución)	8.40	7.80	7.70	8.13
	8.00	8.50	9.30	
	8.10	8.10	8.20	
	7.90	8.00	7.90	
	8.00	8.30	8.00	
D8 (50 % Sustitución)	8.20	8.50	8.30	8.13

Nota. Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 06: CONSTANCIA DE ENSAYOS



CONSTANCIA

Que el señor LUIS ALEJANDRO REQUEJO AMAYA, practicante profesional del área de Investigación y Desarrollo en la empresa Cementos Pacasmayo S.A.A.:

- 1) Dispondrá del material de zona de desmonte (costra) de las instalaciones de la fábrica y de materia prima adicional (cemento, agregado fino, agregado grueso).
- 2) Realizará, en los laboratorios del Grupo Pacasmayo (Investigación y Desarrollo, Calidad Pacasmayo, Calidad DINO), los siguientes ensayos: *Retenido por vía húmeda, pérdida al fuego, difracción por rayos X, resistencia a la compresión de mortero y concreto, contenido de humedad, granulometría, peso específico, porcentaje de absorción, peso unitario de los agregados y del concreto, asentamiento, temperatura, resistencia a la flexión, resistividad eléctrica y permeabilidad al aire.*

Se expide la presente, para los fines que estime conveniente.

Pacasmayo, 12 de diciembre del 2019



GABRIEL MANSILLA PIASTAS
SUPERINTENDENTE DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD E
INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

ANEXO 07: REGISTRO FOTOGRÁFICO



Figura 28. Muestro y procesamiento de la costra



Figura 29. Bolsa de Cemento tipo I



Figura 30. Pilas de agregado grueso y agregado fino



Figura 31. Elaboración de perlas de la costra



Figura 32. Ensayo de retenido en malla %325 por vía húmeda



Figura 33. Ensayo de resistencia a la compresión en probetas de mortero (IAP)



Figura 34. Ensayo de contenido de humedad de piedra zarandeada H57 y arena natural



Figura 35. Ensayo granulométrico de piedra zarandeada H57 y arena natural



Figura 36. Ensayo de peso unitario de piedra zarandeada H57 y arena natural



Figura 37. Ensayo de peso específico de piedra zarandeada H57 y arena natural



Figura 38. Ensayo de determinación de asentamiento del concreto



Figura 39. Ensayo de determinación de temperatura en el concreto



Figura 40. Ensayo de peso unitario del concreto



Figura 41. Mezclado del concreto



Figura 42. Elaboración de probetas cilíndricas de concreto



Figura 43. Elaboración de probetas prismáticas de concreto



Figura 44. Ensayo de resistencia a la compresión



Figura 45. Ensayo de resistencia a la flexión



Figura 46. Ensayo de permeabilidad al aire



Figura 47. Ensayo de resistividad eléctrica