



# UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

## FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Metacaolín como sustituto del cemento para reducir la permeabilidad del  
hormigón estructural

### TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero civil

### AUTORES

Apaza Palacios, Crhistian Enrique  
ORCID: 0000-0002-9168-7754

Mallqui Ramirez, Cesar Enrique  
ORCID: 0000-0002-6038-2747

### ASESORA

Chavarria Reyes, Liliana Janet  
ORCID: 0000-0002-1759-2132

**Lima, Perú**

**2022**

## **Metadatos Complementarios**

### **Datos del autor(es)**

Apaza Palacios, Crhistian Enrique

DNI: 74162297

Mallqui Ramirez, Cesar Enrique

DNI: 42248530

### **Datos de asesor**

Chavarria Reyes, Liliana Janet

DNI: 25481792

### **Datos del jurado**

#### **JURADO 1**

Donayre Córdova, Oscar Eduardo

DNI: 06162939

ORCID: 0000-0002-4778-3789

#### **JURADO 2**

Chavarry Vallejos, Carlo Magno

DNI: 07410234

ORCID: 0000-0003-0512-8954

#### **JURADO 3**

Torres Chung, César Roberto

DNI: 41182279

ORCID: 0000-0002-3212-2817

### **Datos de la investigación**

Campo del conocimiento OCDE: 02.01.01

Código del Programa: 732016

## **DEDICATORIA**

Dedico a Dios por siempre cuidar de mí y a los seres que más amo. A mis padres y mi hermana por darme todo el cariño, apoyo y por su ayuda incondicional, que me motiva en todo momento a seguir adelante y como prueba de ello poder culminar satisfactoriamente esta investigación.

Apaza Palacios Christian Enrique

Dedico este gran esfuerzo con mucho cariño a mis padres por confiar en mí y a mis hermanos.

Mallqui Ramirez Cesar Enrique

## **AGRADECIMIENTO**

Un extenso agradecimiento a nuestra alma mater, La Universidad Ricardo Palma por brindarnos una vigorosa formación, a través de sus docentes. A nuestros asesores Dr. Ing. Chavarry Vallejos, Carlo Magno y Mg. Liliana Janet Chavarría Reyes por apoyarnos y motivarnos a perfeccionar el contenido y desarrollo de nuestra tesis, por la disciplina y compromiso. A nuestras familias y amigos, por estar presente en cada paso de nuestras vidas.

Christian Apaza y Cesar Mallqui

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>iii</b>
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>1</b>
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	1
1.1.1. Problema e importancia.....	1
1.1.2. Árbol de problema.....	3
1.2. Formulación del problema.....	5
1.2.1. Problema general.....	5
1.2.2. Problemas específicos .....	5
1.3. Objetivo general y específicos.....	5
1.3.1. Objetivo general .....	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. Delimitación de la investigación .....	6
1.4.1. Delimitación geográfica .....	6
1.4.2. Delimitación temporal.....	6
1.4.3. Delimitación temática .....	6
1.4.4. Delimitación muestral .....	6
1.5. Justificación del estudio.....	6
1.5.1. Conveniencia.....	6
1.5.2. Relevancia social.....	7
1.5.3. Aplicaciones prácticas.....	7
1.5.4. Utilidad metodológica.....	7
1.5.5. Valor teórico.....	7
1.6. Importancia de estudio.....	8
1.6.1. Nuevos conocimientos .....	8
1.6.2. Aporte.....	8
1.7. Limitaciones de estudio .....	8
1.7.1. Falta de estudios previos de investigación .....	8
1.7.2. Metodológicos y prácticos .....	8
1.7.3. Medidas para la recolección de datos.....	9
1.7.4. Obstáculos en la investigación .....	9
1.8. Alcance .....	9

1.9. Viabilidad del estudio .....	9
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>10</b>
2.1. Marco histórico .....	10
2.2. Investigaciones relacionadas con el tema .....	12
2.2.1. Investigaciones internacionales .....	12
2.2.2. Investigaciones nacionales .....	14
2.2.3. Artículos relacionados con el tema .....	17
2.3. Estructura teórica y científica que sustenta el estudio .....	25
2.3.1. Puzolanas .....	25
2.3.2. Metacaolín .....	25
2.3.3. Propiedades del metacaolín .....	26
2.3.4. Componentes de hormigón .....	28
2.3.5. Métodos Experimentales .....	31
2.4. Definición de términos básicos .....	33
2.5. Fundamentos teóricos que sustentan las tesis .....	35
<b>CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS .....</b>	<b>36</b>
3.1. Hipótesis .....	36
3.1.1. Hipótesis general .....	36
3.1.2. Hipótesis específicas .....	36
3.2. Variables .....	36
3.1.3. Variables independientes .....	36
3.1.4. Variables dependientes .....	36
3.3. Sistema de variables .....	37
3.1.5. Variable independiente .....	37
3.1.6. Variable dependiente .....	37
3.1.7. Operacionalización de variables .....	37
<b>CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>39</b>
4.1. Método de la investigación .....	39
4.2. Tipo de investigación .....	39
4.3. Nivel de investigación .....	39
4.4. Diseño de la investigación .....	39
4.5. Población y muestra .....	40
4.5.1. Población .....	40
4.5.2. Muestra .....	40

4.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	44
4.6.1. Técnicas de investigación.....	44
4.6.2. Descripción de instrumentos .....	44
4.6.3. Instrumentos de recolección de datos.....	44
4.6.4. Procesamiento y análisis de los resultados.....	44
<b>CAPÍTULO V: ASPECTOS ADMINISTRATIVOS .....</b>	<b>46</b>
5.1. Cronograma de actividades.....	46
5.2. Asignación de recursos .....	46
5.3. Presupuesto .....	47
5.4. Financiamiento .....	48
<b>CAPÍTULO VI: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>49</b>
6.1. Presentación de resultados .....	49
6.2. Análisis e interpretación de los resultados.....	85
6.2.1. Analizando los resultados del porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para aumentar la resistencia a la comprensión del hormigón estructural. ....	85
6.2.2. Analizando los resultados del porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para aumentar la resistencia a la flexión del hormigón estructural. ....	87
6.2.3. Analizando los resultados del porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir la porosidad del hormigón estructural. ....	89
6.2.4. Analizando los resultados del porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir penetrabilidad del ion cloruro del hormigón estructural. ....	91
6.2.5. Analizando los resultados del porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir la reacción álcali-sílice del hormigón estructural. ....	93
6.2.6. Analizando los resultados del porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para aumentar el asentamiento del hormigón estructural. ....	95
6.3. Contrastación de hipótesis .....	97
6.4. Comparación de resultados.....	111
<b>DISCUSIÓN .....</b>	<b>112</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>115</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>118</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>120</b>

<b>ANEXOS.....</b>	<b>126</b>
Anexo 1: Matriz de consistencia de la investigación.....	126
Anexo 2: Subtemas – Selección documental: Referencias - Resúmenes - Subtemas identificados.....	128
Anexo 3: Subtemas – Justificación – Objetivos específicos.....	133

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1. Composición química general en porcentaje del metacaolín. ....	28
Tabla N°2. Requerimiento de granulometría del agregado fino. ....	30
Tabla N°3. Tabla de rango aceptable de compresión axial.....	31
Tabla N°4. Clasificación de la permeabilidad al ión cloruro según la carga en coulomb. .....	32
Tabla N°5. Consistencia del hormigón según su asentamiento. ....	32
Tabla N°6. Operacionalización de variables.....	38
Tabla N°7. Cuadro comparativo de tipología. ....	41
Tabla N°8. Cuadro comparativo de población de diferentes investigaciones. ....	42
Tabla N°9. Cuadro comparativo de muestra de diferentes investigaciones. ....	43
Tabla N°10. Cronograma de actividades para la elaboración de tesis.....	46
Tabla N°11. Talento humano.....	47
Tabla N°12. Recursos, materiales y equipos. ....	47
Tabla N°13. Presupuesto de la investigación.....	48
Tabla N°14. Ensayo de resistencia a la compresión a los 7,14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5% y 10% con relacion a/c de 0.40. ....	50
Tabla N°15. Ensayo de resistencia a la flexión a los 7,14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5% y 10% con relacion a/c de 0.40. ....	51
Tabla N°16. Ensayo de asentamiento para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5% y 10% con relacion a/c de 0.40 .....	52
Tabla N°17. Ensayo de resistencia a la compresión a los 3, 7,14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10% y 20% con relacion a/c de 0.55.....	53
Tabla N°18. Ensayo de porosidad penetrable a los 56 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10%, 15% y 20% con relacion a/c de 0.45 y 0.55. ....	54
Tabla N°19. Ensayo de resistencia a la flexión a los 7, 14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5% y 10% con relacion a/c de 0.40. ....	56

Tabla N°20. Ensayo de resistencia a la flexión a los 7, 14, 28, 56, 90, 180 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10% y 15% con relacion a/c de 0.45.....	57
Tabla N°21. Ensayo de porosidad penetrable al agua a los 56 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 10%, 15% y 20% con relacion a/c de 0.40, 0.50 y 0.60.....	59
Tabla N°22. Prueba de expansión álcali-sílice a los 14 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10%, 15% y 20% con relacion a/c de 0.50.....	61
Tabla N°23. Ensayo de resistencia a la compresión a los 7,14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10 % y 15% con relacion a/c de 0.56.....	62
Tabla N°24. Ensayo de resistencia a la flexión a los 7,14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10% y 15% con relacion a/c de 0.56.....	63
Tabla N°25. Ensayo de asentamiento para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10 % y 15% con relacion a/c de 0.56. ....	64
Tabla N°26. Ensayo de resistencia a la compresión a los 7,14, 21 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10% , 15% y 20% con relacion a/c de 0.59. ....	65
Tabla N°27. Ensayo de asentamiento para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10% y 15% con relacion a/c de 0.44. ....	67
Tabla N°28. Ensayo de resistencia a la compresión a los 7,14 y 28 días para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10%, 20%, 30%, 40% y 50% con relación a/c de 0.43. ....	68
Tabla N°29. Ensayo de resistencia a la flexión a los 7,14 y 28 días para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10%, 20%, 30%, 40% y 50% con relación a/c de 0.43. ....	70
Tabla N°30. Ensayo de porosidad penetrable al agua a los 56 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10% y 15% con una relación a/c de 0.45.....	71

Tabla N°31. Prueba de penetrabilidad rápida de iones cloruros (RCPT) a los 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10%, 15% y 20% con relación a/c de 0.43. ....	73
Tabla N°32. Prueba de expansión álcali-sílice a los 14 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 10%, 15% y 20% con relacion a/c de 0.43. ....	74
Tabla N°33. Prueba de penetrabilidad rápida de iones cloruros (RCPT) a los 7, 14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10% y 20% con relación a/c de 0.30.....	75
Tabla N°34. Prueba de penetrabilidad rápida de iones cloruros (RCPT) a los 7, 14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10% y 20% para una relación a/c de 0.50. ....	76
Tabla N°35. Prueba de penetrabilidad rápida de iones cloruros (RCPT) a los 7,14 y 28 días de curado con agua potable para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, y 10% con relación a/c de 0.50. ....	78
Tabla N°36. Prueba de penetrabilidad rápida de iones cloruros (RCPT) a los 7,14 y 28 días de curado con agua de mar para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5% y 10% con relación a/c de 0.50. ....	79
Tabla N°37. Ensayo de asentamiento para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10% y 15% con relacion a/c de 0.45. ....	80
Tabla N°38. Ensayo de asentamiento para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10% y 15% con relacion a/c de 0.55. ....	81
Tabla N°39. Prueba de expansión de álcali-sílice a los 14 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10%, 15% y 20% con relacion a/c de 0.47. ....	83
Tabla N°40. Prueba de expansión de álcali-sílice a los 28 y 90 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10%, 15% y 20% con relación a/c de 0.45. ....	84

## ÍNDICE DE FIGURA

Figura N 1: Árbol del problema.....	4
Figura N 2: Fotografía del metacaolín a 2,000 aumentos.....	27
Figura N 3: Fotografía del metacaolín a 20,000 aumentos.....	27
Figura N 4: Mapa conceptual.....	35
Figura N 5: Métodos y técnicas de investigación.....	45
Figura N 6: Resultado del ensayo a la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.40.....	50
Figura N 7: Resultados del ensayo de resistencia a la flexión a los 7, 14 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.40.....	51
Figura N 8: Resultados del ensayo de asentamiento vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.40.....	52
Figura N 9: Resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 3,7 , 14 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.55.....	53
Figura N 10: Resultados de la porosidad penetrable a los 56 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.45 y 0.55.....	55
Figura N 11: Resultados del ensayo de resistencia a la flexión a los 7,14 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.40.....	56
Figura N 12: Resultados del ensayo de resistencia a la flexión a los 7, 14, 28, 56, 90 y 180 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.45.....	58
Figura N 13: Resultados de la porosidad penetrable a los 56 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.40, 0.50 y 0.60.....	60
Figura N 14: Resultados de la expansión álcali-sílice a los 14 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.50.....	61

Figura N 15: Resultados del ensayo de resistencia a la comprensión a los 7,14 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolin con una relación a/c de 0.56.....	62
Figura N 16: Resultados del ensayo de resistencia a la flexión a los 7,14 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolin con una relación a/c de 0.56. ....	63
Figura N 17: Resultados del ensayo de asentamiento vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolin con una relación a/c 0.56.....	64
Figura N 18: Resultados del ensayo de resistencia a la comprensión a los 7,14 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolin con una relación a/c de 0.59.....	66
Figura N 19: Resultados del ensayo de asentamiento vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolin con una relación a/c de 0.44.....	67
Figura N 20: Resultados del ensayo de resistencia a la comprensión a los 7,14 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolin con una relación a/c de 0.43.....	69
Figura N 21: Resultados del ensayo de resistencia a la flexión a los 7,14 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolin con una relación a/c de 0.43 .....	70
Figura N 22: Resultados de la porosidad penetrable a los 56 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.45.....	72
Figura N 23: Resultados de la permeabilidad a iones cloruros a los 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.43. ....	73
Figura N 24: Resultados de la expansión álcali-sílice a los 14 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.43.....	74
Figura N 25: Resultados de la permeabilidad a iones cloruros a los 7, 14, 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.30. ....	76
Figura N 26: Resultados de la permeabilidad a iones cloruros a los 7, 14, 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.50. ....	77

Figura N 27: Resultados de la permeabilidad a iones cloruros a los 7, 14, 28 días con agua potable vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.50 .....	78
Figura N 28: Resultados de la permeabilidad a iones cloruros a los 7, 14, 28 días con agua de mar vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.50. ....	79
Figura N 29: Resultados del ensayo de asentamiento vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolin con una relacion a/c de 0.45.....	81
Figura N 30: Resultados del ensayo de asentamiento vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolin con una relacion a/c de 0.55.....	82
Figura N 31: Resultados de la expansión álcali-sílice a los 14 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.47.....	85
Figura N 32: Resultados de la permeabilidad a iones cloruros a los 28 y 90 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.45. ....	85
Figura N 33: Resultados del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 7 días de curado. ....	97
Figura N 34: Resultados del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 14 días de curado. ....	98
Figura N 35: Resultados del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 28 días de curado. ....	98
Figura N 36: Resultados del ensayo de resistencia a la flexión del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 7 días de curado. ....	100
Figura N 37: Resultados del ensayo de resistencia a la flexión del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 14 días de curado .....	101
Figura N 38: Resultados del ensayo de resistencia a la flexión del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 28 días de curado. ....	101
Figura N 39: Resultados de la porosidad del hormigón vs. Autores con óptimos	

porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 56 días de curado. ....	103
Figura N 40: Resultados de la permeabilidad de iones cloruros del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 28 días de curado. ....	105
Figura N 41: Resultados de la prueba de expansión de álcali – sílice (ASR) del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 14 días de curado.....	107
Figura N 42: Resultados de la prueba de asentamiento del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento .....	109
Figura N 43: Porcentajes de metacaolín óptimos vs propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido.....	109

## RESUMEN

El motivo que tuvo esta investigación fue reducir la permeabilidad del hormigón estructural con la sustitución de cemento por metacaolín, cuyo principal objetivo fue determinar el porcentaje de metacaolín para reducir la permeabilidad del hormigón estructural, según fuentes consultadas nacionales e internacionales.

Esta investigación fue deductivo, de orientación aplicada con un enfoque cuantitativo y como instrumento de recolección de datos retroactivo ya que se usaron tablas de normas internacionales y nacionales e información precedente del tema de estudio, de tipo descriptivo, correlacional y explicativo. Fue una investigación causal (causa - efecto) dado que se estudió la relación entre la variable independiente incorporación de metacaolín (causa) y variable dependiente permeabilidad del hormigón estructural (efecto).

Los resultados evidenciaron que se incrementó la resistencia a la compresión y flexión del hormigón, con un 10% de sustitución de metacaolín, respecto a la permeabilidad del hormigón, se redujo la porosidad con un 20% de sustitución, la permeabilidad al ion cloruro y la expansión álcali -sílice del hormigón disminuyó con un 15% de metacaolín, a excepción del asentamiento en estado fresco que decreció conforme se incorporaba metacaolín en la mezcla, afectando su trabajabilidad con sustituciones mayores al 10%. Finalmente, la sustitución del 10% de metacaolín es beneficiosa si se requiere obtener un hormigón menos permeable, con excelentes propiedades físico – mecánicas y un asentamiento dentro de un rango aceptable.

**Palabras Claves:** Metacaolín, propiedades físico – mecánicas, trabajabilidad, permeabilidad del hormigón, compresión del hormigón, flexión del hormigón, ion cloruro, álcali-sílice y porosidad.

## **ABSTRACT**

The reason for this research was to reduce the permeability of structural concrete by replacing cement with metakaolin, whose main objective was to determine the percentage of metakaolin to reduce the permeability of structural concrete, according to national and international sources consulted.

This research was deductive, applied orientation with a quantitative approach and as a retrolective data collection instrument since tables of international and national standards and previous information on the subject of study were used, of a descriptive, correlational and explanatory type. It was a causal investigation (cause - effect) since the relationship between the independent variable incorporation of metakaolin (cause) and the dependent variable permeability of the structural concrete (effect) was studied.

The results showed that the compressive and flexural strength of the concrete increased, with a 10% substitution of metakaolin, with respect to the permeability of the concrete, the porosity was reduced with a 20% substitution, the permeability to the chloride ion and the Alkali-silica expansion of the concrete decreased with 15% metakaolin, except for slump in the fresh state, which decreased as metakaolin was incorporated into the mix, affecting its workability with substitutions greater than 10%. Finally, the substitution of 10% metakaolin is beneficial if it is required to obtain a less permeable concrete, with excellent physical-mechanical properties and a settlement within an acceptable range.

**Keywords:** Metakaolin, physical-mechanical properties, workability, concrete permeability, concrete compression, concrete bending, chloride ion, alkali-silica and porosity.

## INTRODUCCIÓN

El hormigón de hoy es un material de construcción muy demandado en la actualidad, se puede definir como una mezcla homogénea formado esencialmente por un aglomerante al que se añade materiales pétreos, su apariencia es una roca artificial que junto con el acero de refuerzo lo hacen ideal para ser empleado en obras civiles. La impermeabilización y protección contra la humedad de obras de construcción constituye, desde hace algún tiempo, un tema de especial preocupación tanto en nuestro país como en el mundo entero, La presencia de agua y otros agentes, en la estructura, produce alteraciones importantes de sus características físicas e incluso mecánicas que significan anualmente cuantiosas pérdidas de recursos para las empresas y el país, los problemas de impermeabilidad y protección de estructuras representan un frecuente problema aun no resuelto, ante esto en los últimos años cada vez es más frecuente el uso de materiales puzolanicos cementicios suplementarios, como el metacaolín, con cualidades únicas que mejoran las propiedades del hormigón entre ellas su impermeabilidad.

La presente investigación está enfocada en conocer más sobre los sustitutos puzolanicos específicamente el metacaolín, material ecológico que resulta de la calcinación de arcillas a temperaturas altas, con capacidad para sustituir al cemento en el diseño de mezcla, este novedoso material resulta indispensable para lograr un hormigón diferente a lo convencional con una funcionalidad y calidad diferente, para ser aplicado en todo tipo de obras civiles donde involucre el hormigón y se requiera reducir su permeabilidad para prolongar la vida útil de las estructuras y mejorar sus propiedades físico-mecánicas, introduciendo nuevas tecnologías beneficiosas para la construcción, las empresas y usuarios. Este sustituto presenta gran potencial para reducir las emisiones de carbono al medio ambiente, especialmente para los países en desarrollo como nuestro país.

Nuestro principal objetivo es determinar el metacaolín como sustituto del cemento para reducir la permeabilidad del hormigón estructural según las fuentes consultadas y normas nacionales e internacionales, para ello determinamos los siguientes objetivos específicos de nuestra investigación.

- Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para incrementar la resistencia a la compresión del hormigón estructural.

- Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para incrementar la resistencia a la flexión del hormigón estructural.
- Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir la porosidad del hormigón estructural.
- Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir la penetración del ion cloruro en el hormigón estructural.
- Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir la expansión álcali-sílice del hormigón estructural.
- Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para incrementar el asentamiento del hormigón estructural.

La investigación trata de VI capítulos, los cuales serán explicados a continuación: Capítulo I, presenta el problema de la investigación, objetivos, la justificación, limitaciones y la viabilidad de la investigación, Capítulo II, describe el marco teórico el cual está basado en variada información bibliográfica recopilada y estudiada con un fin de procesar los resultados de ensayos realizados por diferentes autores nacionales e internacionales, Capítulo III, elabora el sistema de hipótesis, general y específica, el sistema de variables dependientes e independientes y la definición de las variables, Capítulo IV, donde se elabora la metodología define y estructura el conjunto de métodos, tipo, nivel, diseño de una investigación aplicándolo a una población obteniendo muestras mediante técnicas de recolección de datos. Capítulo V, establece el cronograma de actividades y sustenta el presupuesto con el fin de culminar la tesis de forma óptima y en el tiempo requerido, Capítulo VI, se presenta el análisis de resultados de la investigación y la constratación de las hipótesis y por último se presentan las discusiones, conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación.

# CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1. Descripción de la realidad problemática

### 1.1.1. Problema e importancia

Actualmente, la importancia del hormigón estructural en proyectos de infraestructura radica en su versatilidad, y los avances tecnológicos han hecho posible la construcción de edificios tanto privados como públicos, es el material de construcción más utilizado en el mundo, con una producción global anual que alcanza casi los 13 mil millones de metros cúbicos (Arana, 2018).

El hormigón de hoy es un material de construcción muy útil, se puede definir como una mezcla de cemento Portland, agua, agregado grueso, fino y aire, su apariencia es una roca artificial con propiedades internas aparentemente simples pero que en realidad son muy complejas, sus propiedades especiales como resistencia a grandes esfuerzos, a las heladas, permeabilidad y el sellado que junto con el acero de refuerzo lo hacen ideal para estructuras en general, debido a su larga vida útil y bajos costos de mantenimiento (Gómez y Pérez, 2013).

En general el hormigón estructural combina dos elementos que lo hacen ideal para la construcción de infraestructuras, el hormigón, resistente a la compresión y acero, resistente a la tracción, que brindan una unidad eficiente y liviana, pero expuesta al clima húmedo, el suelo y la contaminación de la metrópolis de Lima durante la mayor parte del año lo debilitan, por lo que se requiere mejorar sus propiedades para asegurar su durabilidad en un mayor tiempo.

El uso de materiales cementicios suplementarios (SCM) para reemplazar los materiales tradicionales tiene un gran potencial para reducir las emisiones de carbono y el consumo de recursos valiosos en la producción de cemento, especialmente para los países en desarrollo. Actualmente se produce casi 1 tonelada de dióxido de carbono por tonelada de cemento Portland ordinario, por lo que es considerado una de las fuentes más importantes de emisión de

gases de efecto invernadero. La industria representa alrededor del 7% de las emisiones globales totales de dióxido de carbono. Hoy en día, más del 80 % del MCS utilizado para reducir el factor de Clinker del cemento es piedra caliza, cenizas volantes o escoria (Reddy y Reddy, 2021).

El aseguramiento de la durabilidad del hormigón estructural es necesario durante el concepto de diseño. La permeabilidad de los materiales cementosos es un indicador importante de la durabilidad y puede verse afectada por muchos factores, incluida la capilaridad o la porosidad inducida por grietas (Cappelleso et al., 2022).

Es útil utilizar hormigones adicionados que reduzcan la permeabilidad y por ende ayuden a la durabilidad de las estructuras. La permeabilidad del hormigón convencional, facilita el ingreso de agentes presentes en el medio, como el dióxido de carbono, humedad, sulfatos, bacterias, etc., ocasionando la corrosión de las armaduras de acero y abrasión del hormigón, que se agrava debido a malos procesos que ocurren durante el vaciado del hormigón en obra, a veces por la falta de un buen vibrado y curado, por último un mal diseño de mezcla con una relación a/c donde el agua es muy excesiva, la cantidad de cemento o tipo de agregados puede influir drásticamente en la permeabilidad del hormigón.

La impermeabilización y protección contra la humedad de obras de construcción constituye, desde hace algún tiempo, un tema de especial preocupación tanto en nuestro país como en el mundo entero. La presencia de agua, en la estructura, produce alteraciones importantes de sus características físicas e incluso mecánicas que significan anualmente cuantiosas pérdidas de recursos para las empresas y el país. Entre las consecuencias una alta permeabilidad conlleva a la poca durabilidad del hormigón, baja resistencia, menor densidad y mayor porosidad. Por este motivo, los problemas de impermeabilidad y protección de las estructuras representan un serio problema no resuelto, para solucionar este problema se puede optar en reemplazar en porcentaje o una fracción la cantidad de cemento por metacaolín, puzolana con propiedades cementicias, para así reducir la

permeabilidad del hormigón estructural y mejorar sus propiedades en estado fresco y endurecido, apoyándonos por investigaciones nacionales e internacionales realizadas sobre el tema.

#### 1.1.2. Árbol de problema

La problemática de las malas prácticas de construcción y baja calidad de los materiales da como resultado un hormigón con deficiencias como la permeabilidad a causa de la porosidad el cual permite la entrada de agentes agresivos presentes en el medio ambiente donde las estructuras se encuentran expuestas y causan deterioro al hormigón y acero afectando la resistencia, generando pérdidas económicas para las empresas y usuario, por la reducción de la vida útil de las estructuras. La Figura N 1, menciona las causas que nos dan motivo a realizar esta tesis buscando mitigar la permeabilidad con la ayuda del diseño de hormigón estructural con sustitución de forma parcial de cemento por metacaolín.

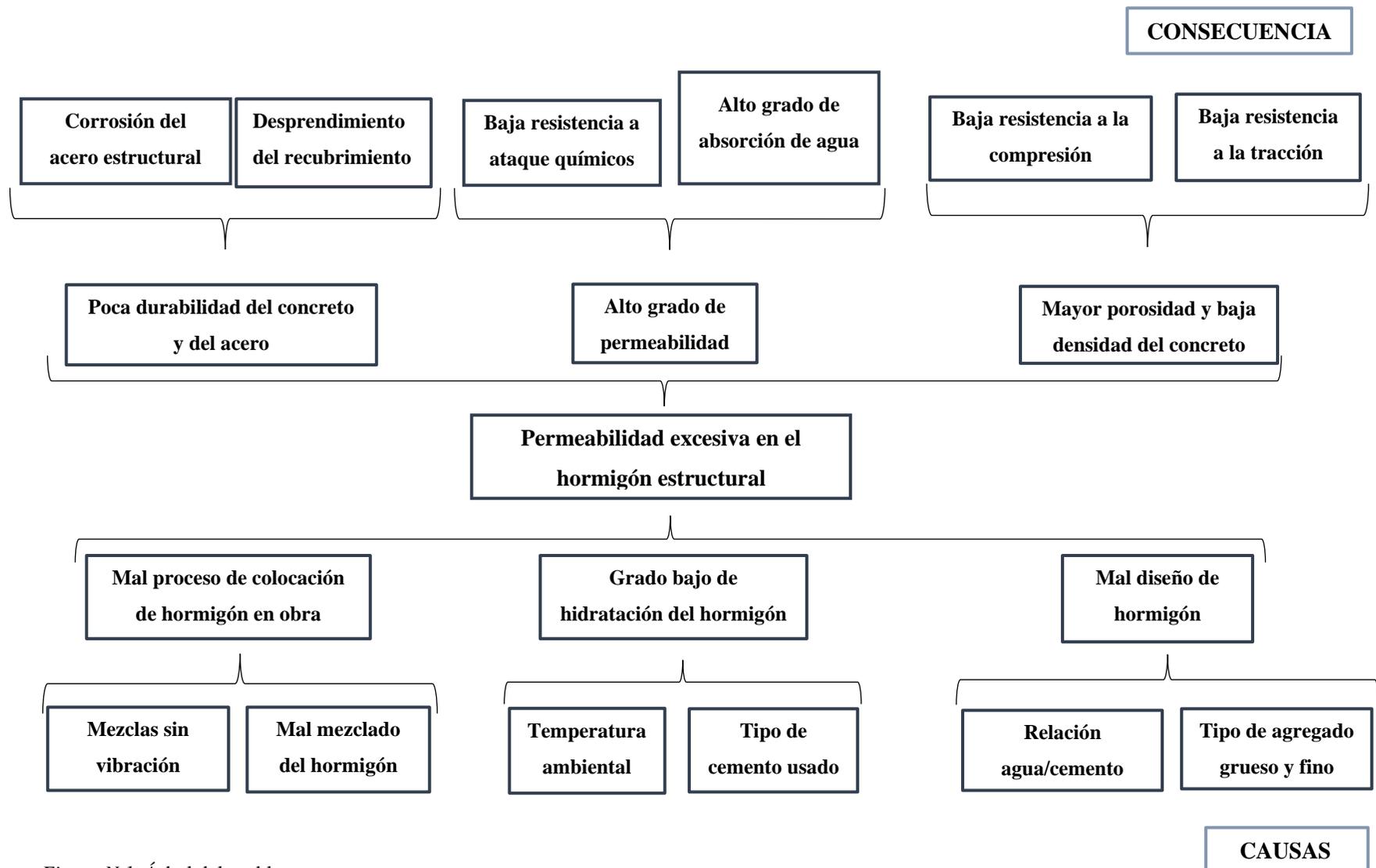


Figura N 1. Árbol del problema.  
Fuente: Elaboración propia

## 1.2. Formulación del problema

### 1.2.1. Problema general

¿En qué medida el metacaolín como sustituto del cemento influye en la permeabilidad del hormigón estructural?

### 1.2.2. Problemas específicos

- a) ¿En qué medida el porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento influye en la resistencia a la compresión del hormigón estructural?
- b) ¿En qué medida el porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento influye en la resistencia a la flexión del hormigón estructural?
- c) ¿En qué medida el porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento influye en la porosidad del hormigón estructural?
- d) ¿En qué medida el porcentaje del metacaolín como sustituto de cemento influye en la penetración del ion cloruro del hormigón estructural?
- e) ¿En qué medida el porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento influye en la expansión álcali-sílice del hormigón estructural?
- f) ¿En qué medida el porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento influye en el asentamiento del hormigón estructural?

## 1.3. Objetivo general y específicos

### 1.3.1. Objetivo general

Determinar el metacaolín como sustituto del cemento para reducir la permeabilidad del hormigón estructural según las fuentes consultadas y normas nacionales e internacionales.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- a) Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para incrementar la resistencia a la compresión del hormigón estructural.
- b) Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para incrementar la resistencia a la flexión del hormigón estructural.
- c) Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir la porosidad del hormigón estructural.
- d) Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir la penetración del ion cloruro del hormigón estructural.

- e) Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir la expansión álcali-sílice del hormigón estructural.
- f) Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para incrementar el asentamiento del hormigón estructural.

#### 1.4. Delimitación de la investigación

##### 1.4.1. Delimitación geográfica

Nuestra investigación contempla hormigones sustituidos con metacaolín que se usarán en zonas con temperaturas cálidas entre los 18°C-24°C, generalmente en la Costa del Perú. Serán hormigones que presenten una resistencia mayor o igual a 210 kg/cm<sup>2</sup>.

##### 1.4.2. Delimitación temporal

El desarrollo de la Investigación se realizará en un periodo de 26 semanas que inician la primera semana de mayo del 2022 y finaliza la segunda semana de noviembre del 2022.

##### 1.4.3. Delimitación temática

Campo: Sustituciones del hormigón.

Área Académica: Hormigón.

Línea de investigación: Tecnología del hormigón.

Sub-Línea de Investigación: Diseño de mezcla de hormigón, en base a descripción de fuentes consultadas y ensayos hechos en laboratorios.

##### 1.4.4. Delimitación muestral

Nuestra investigación será la síntesis y recolección de múltiples resultados de ensayos realizados con metacaolín como sustituto parcial de cemento, según las normas técnicas nacionales e internacionales, provenientes de artículos, ensayos y tesis vinculados directamente con nuestro tema de investigación.

#### 1.5. Justificación del estudio

##### 1.5.1. Conveniencia

Nuestra investigación busca una alternativa tecnológica y ambiental mediante la toma de información de investigaciones pasadas logrando dar un aporte teórico a la industria de la construcción, con la finalidad de reducir la permeabilidad del hormigón estructural. No obstante se busca saber qué porcentaje óptimo de metacaolín es el ideal para reemplazar el cemento

cumpliendo con los parámetros físicos y químicos que demandan la normativas vigentes y ambientales, ya que reduciremos el peso del cemento por m<sup>3</sup> de hormigón, por ende bajara la contaminación (dióxido de carbono) que conlleva en fabricar dicho material logrando un impacto ambiental favorable y mejorando las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón estructural.

#### 1.5.2. Relevancia social

Nuestra investigación busca proporcionar información útil a nuestro país para las futuras obras sobre el problema de permeabilidad del hormigón estructural y así evitar reparaciones prematuras a las mismas y se pueda prolongar la vida útil de las estructuras, además que se busca contribuir con un menor impacto ambiental y mejor sostenibilidad.

#### 1.5.3. Aplicaciones prácticas

Se aplicará a toda estructura que su material principal sea el hormigón y que esté expuesto a la humedad del suelo, por el clima, ataques químicos o abrasivos, logrando resistir a las fuerzas sísmicas y de carga.

#### 1.5.4. Utilidad metodológica

Se realizó la búsqueda de tesis y artículos nacionales e internaciones en las cuales se realizaron ensayos de laboratorio para poder determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento y su influencia en las propiedades del hormigón estructural, Esta investigación servirá de guía a las empresas y/o ingenieros civiles para llevar un mejor control de calidad, bajo la norma actualizada para evitar mayores deterioros, mayores costos de mantenimiento y/o rehabilitación.

#### 1.5.5. Valor teórico

La presente investigación deja constancia de información que se recopila de diversos autores en los cuales se utiliza como sustituto del cemento el metacaolín en la elaboración del hormigón, además se busca incentivar, incrementar y ampliar los estudios en la sustitución de metacaolín por el cemento para mejorar la permeabilidad y sus propiedades físico-mecánicas que este material confiere, así poder observar su comportamiento y comparar sus propiedades.

## 1.6. Importancia de estudio

### 1.6.1. Nuevos conocimientos

Nuestra investigación pretende conocer el uso del metacaolín elemento puzolánico alternativo como reemplazo parcial del cemento para mejorar la permeabilidad del hormigón estructural y como consecuencia mejorar las propiedades que derivan de ella como las propiedades mecánicas del hormigón, la durabilidad del hormigón y el acero estructural, de modo que puedan tomarse en cuenta estas ventajas como una alternativa para el diseño de hormigón estructural en las construcciones modernas.

### 1.6.2. Aporte

Esta investigación pretende aportar un diseño de mezcla óptimo de metacaolín en reemplazo del hormigón como una alternativa para la producción de hormigón de buena calidad para reducir la permeabilidad en elementos estructurales de modo que se pueda mejorar sus propiedades mecánicas y extender su durabilidad de elementos estructurales

## 1.7. Limitaciones de estudio

### 1.7.1. Falta de estudios previos de investigación

El metacaolín es un material que no es muy usado en nuestro país debido a la falta de difusión acerca de los posibles beneficios que podrían ofrecer al hormigón estructural, por lo tanto, no cuenta con mucha información local acerca del uso de este material, por otro lado, en el ámbito internacional su uso al parecer se evidencia en sus múltiples aplicaciones y beneficios al hormigón. Por lo que nos apoyaremos de información que asemeje a nuestros objetivos para poder realizar nuestra investigación satisfactoriamente.

### 1.7.2. Metodológicos y prácticos

Las metodologías de las investigaciones encontradas son similares a la que se aplica en nuestro país, la diferencia resalta principalmente en las normas vigentes usadas por cada país, pero aun así guardan semejanza con nuestra norma, por lo que podría generar pequeñas variaciones que trataremos de adaptar a nuestra investigación para mostrar resultados acorde a la realidad de nuestro país.

### 1.7.3. Medidas para la recolección de datos

Según las investigaciones recopiladas, se consideran múltiples factores, como la permeabilidad, resistencias a la compresión y flexión requerida, dosificación con diferentes porcentajes de sustitución de metacaolín como sustituto parcial del cemento, estos datos serán tomados adecuadamente y serán sintetizados para determinar el óptimo porcentaje de metacaolín que cumpla con nuestros objetivos e hipótesis planteadas en nuestra investigación.

### 1.7.4. Obstáculos en la investigación

Nuestra investigación tuvo ciertas limitaciones como la de no realizar nuestros propios ensayos en laboratorios, por ende solo confiamos en artículos y tesis con un máximo de antigüedad de publicación de 5 años. Además, las circunstancias que pasamos actualmente frente al COVID-19, las medidas de seguridad de algunas instituciones presentan horarios restringidos para el público, limitando el tiempo de búsqueda de más fuentes de investigación en horarios asequibles.

### 1.8. Alcance

La trascendencia de esta investigación radica principalmente en concientizar y promover el uso de materiales alternativos y menos contaminantes al medio ambiente como es el uso del metacaolín, específicamente a las personas vinculadas en el rubro de la construcción en general. Además de brindar un modelo teórico – metodológico para poner en práctica fácilmente.

### 1.9. Viabilidad del estudio

La presente investigación es viable ya que se dispone de información como tesis, artículos y revistas, además se cuenta medianamente con recursos económicos, humanos y de fuentes virtuales de información necesarios para llevarlo a cabo.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Marco histórico

Rodríguez (2018) menciona que en 1980 se reportó en Noruega el uso del “humo de sílice” como material aglutinante suplementario en la preparación del hormigón, se consideró que el hormigón exhibía propiedades especiales y nació la idea de utilizarlo, además estaban seguros que el metacaolín podría también sustituir al humo de sílice y ofrece ventajas respecto a este. El uso de adiciones en la industria cementera inicia durante el siglo XX, y se estima que los índices de consumo seguirán aumentando, principalmente por el desarrollo de superplastificantes y superpuzolanas como el metacaolín.

Reddy y Reddy (2021) explican que las arcillas que contienen más del 40% de caolín son adecuadas para los cementos de arcilla calcinada con piedra caliza. Las arcillas se pueden calcinar en hornos rotatorios convencionales, calcinadores flash, hornos de solera de rodillos, hornos de lanzadera y hornos de mufla. Cuando se calcina la arcilla que contiene caolín, se forma el metacaolín ya que contiene aluminosilicato, que al reaccionar con el hidróxido de calcio de las puzolanas convencionales forman el gel CSH (silicato de calcio hidratado) y aluminio hidratado. Además, la alúmina puede reaccionar con la piedra caliza para formar hidrato de carboaluminio.

Balykov et al. (2021) comentan que con la producción de aditivos minerales y la ayuda de un tratamiento térmico de arcillas de 2 horas a 700 °C logran valores más altos del índice normal que de un cemento portland. De la misma forma con la calcinación y sustitución del 10 % del cemento Portland por el aditivo de arcilla termo activado permite alcanzar la actividad del ligante mixto que supera en un 3 % el mismo indicador del ligante mixto a base de cemento Portland y metacaolín de alta calidad.

En la industria de la construcción en el Perú, el hormigón es el material compuesto más empleado, debido a su versatilidad de adaptarse a diferentes formas estructurales y arquitectónicas pero no escapa de la problemática de las malas prácticas de construcción que da como resultado un hormigón muy poroso, permeable y de baja resistencia, el cual permite la entrada de agentes agresivos presentes en el medio ambiente donde las estructuras se encuentran expuestas y causan su deterioro al

hormigón y acero, generando pérdidas económicas. Otro aspecto importante no ajeno es el impacto ambiental que se genera por las emisiones de CO<sub>2</sub> y el económico por el progresivo aumento del costo de los materiales como el cemento y acero.

El cemento por ser unos de los materiales más empleados en el mundo su precio ha ido aumentando rápidamente en los últimos años. Este alto costo del cemento ha llevado a una reducción de la calidad en la construcción de hormigón en países subdesarrollados y en desarrollo. Esta situación requiere la incorporación de un nuevo material natural como sustituto parcial del cemento. El metacaolín es un material capaz de reemplazar un cierto porcentaje de cemento cuando se utiliza en la elaboración del hormigón autocompactante permitiendo reducir las grietas y el costo de producción (Ayobami et al., 2019).

El progresivo aumento de costo de los materiales de construcción como el cemento hace que se requiera un material capaz de sustituirlo, el metacaolín es un material con características particulares que la hacen posible ser añadidas en proporciones para ser incluidas en el diseño de mezcla del hormigón, mejorando varias propiedades físico-mecánicas.

La industria de la construcción utiliza cada vez más los conceptos de sostenibilidad y durabilidad pero el cemento es el material que genera importantes emisiones de dióxido de carbono al medio ambiente por lo que el uso del hormigón puzolánico es la mejor solución para un desarrollo sostenible. Entre las puzolanas destaca el metacaolín que aumenta la resistencia a la compresión de la mezcla y requiere menos energía para su producción que el cemento convencional (Keerio et al., 2021). Actualmente las industrias buscan materiales más eco-amigables con el medio ambiente y que puedan en gran medida mejorar sus propiedades a un menor costo y menor impacto ambiental, siendo el metacaolín una alternativa no muy conocida debido a la falta de información de los beneficios que aportaría dicho material al hormigón.

Por lo tanto, hoy en día este hormigón (puzolánico) se ha convertido en un material de ingeniería de alta tecnología, cuyas propiedades, desempeño y versatilidad continuarán dejándonos maravillados. Entre ellas se puede mencionar una mejor, durabilidad, densidad, impermeabilidad y resistencia, su bajo consumo energético,

para su producción además de favorecer en la disminución del CO<sub>2</sub> lo hacen un material apto para ser empleado en la fabricación de hormigones, indispensable para las obras de ingeniería civil. Es por ello que mediante este trabajo de investigación tiene como objetivo principal analizar e identificar el porcentaje óptimo de metacaolín como sustituto del cemento para reducir la permeabilidad e incrementar las propiedades físico-mecánicas del Hormigón Estructural.

## 2.2. Investigaciones relacionadas con el tema

### 2.2.1. Investigaciones internacionales

Gachas y Velasco (2019) explican en su tesis sobre el comportamiento mecánico-físico y la permeabilidad a cloruros en hormigones con metacaolín adicionado, tal como lo especifica la normatividad colombiana, las muestras son 10%, 20% y 30% metacaolín, estos dos últimos porcentajes según los resultados tienden a reducir la resistencia a la compresión del material. Por otro lado, es claro que la adición de 10% de metacaolín mantiene la resistencia a compresión óptima dentro del rango especificado por la norma, mientras que los agregados de 20% y 30% muestran cambios significativos directamente sobre la resistencia del hormigón. Finalmente se concluye que la adición de metacaolín mejoró significativamente las propiedades de durabilidad de las muestras de hormigón, por otro lado a mayor contenido de metacaolín puede inducir a una baja resistencia y el coeficiente de difusión de cloruros del material evaluado.

Parrales y Quirumbay (2022) en este trabajo de investigación se diseñaron distintas mezclas de hormigón usando porcentajes del 5%, 10%, 15% y 20% de metacaolín como reemplazo del cemento con el objetivo de dar a conocer el porcentaje óptimo a emplearse con la cual se alcanzó una resistencia mayor a 210 kg/cm<sup>2</sup>, de tal forma se realizaron ensayos a los agregados siguiendo las normas NEC NTE y ASTM; también se fabricaron probetas de hormigón siguiendo el método ACI 211 y ensayadas a compresión mediante la rotura de cilindros de hormigón, dando como resultado que las dosificaciones con 5% y 10% de metacaolín se obtuvo un incremento a los 28 días de resistencia a compresión del 4.18% y 2.04% respectivamente en relación al hormigón patrón mientras que las dosificaciones con 15% y 20% obtuvieron pérdida de

resistencia de 2.61% y 6.34% respectivamente, para lo cual se concluye que la dosificación que muestra una resistencia a la compresión mayor a 210 kg/cm<sup>2</sup> es la que contiene 5% de metacaolín obteniendo una resistencia a la compresión de 224.67 kg/cm<sup>2</sup> . Además, se realizó un análisis de precios de modo que el uso de metacaolín resulta costoso con relación al hormigón convencional.

Hernández (2018) sostiene en su tesis que el clínker no hidratado aún proporciona buenas propiedades en la matriz de unión en una relación agua-cemento (a/c) baja, además explica el mecanismo por el cual el metacaolín y el humo de sílice mejoran las propiedades del UHPC (Hormigón de ultra alta resistencia). Con base en sus conclusiones, mencionó que los hormigones de ultra alto rendimiento UHPC, que mostraron el mejor desempeño en términos de resistencia a la compresión y sustentabilidad fueron los cementos sustituido por metacaolín con hasta un 15% de adición en masa y un 37,5% de reemplazo del volumen de cemento por relleno de piedra caliza o cuarzo por otro lado menciona que las adiciones más altas de metacaolín son ineficaces. Como indicador de durabilidad, la resistividad volumétrica muestra que la adición de metacaolín entre el 10 % y el 20 % de la masa de cemento puede mejorar significativamente la capacidad de estos hormigones para resistir la penetración de iones de cloruro y alcanzar los más altos niveles de impermeabilidad considerada en AASHTO-T358. Por otro lado, los resultados de TGA revelaron que la hidratación tanto del cemento como del metacaolín es muy activa entre los 7 y 28 días, y latente a posteriores edades. Como recomendaciones proponen estudiar la reacción puzolánica con la técnica de difracción de rayos x para ver si es posible una separación de materiales puzolánicos que permita reemplazar metacaolín por arcillas menos reactivas.

Arias y Becerra (2018) explican en su tesis un análisis considerando el comportamiento de la resistencia en relación con la compresión y flexión del mortero adicionados con geopolímeros, considerando para las pruebas la sustitución de cenizas volantes y metacaolín como sustituto del cemento Portland, según sus resultados el porcentaje de comportamiento óptimo de CV-MK, es decir metacaolín y ceniza volante, fue de una concentración del 12%, además hacen énfasis que la resistencia mecánica del mortero tiende a

disminuir al sobrepasar mencionado porcentaje, por lo tanto la mezcla óptima establecida no es recomendable para fines estructurales, en comparación con el valor establecido por la norma NTC 121, estos resultados no cumplen con la resistencia mínima determinada, pues establece que a los 28 días debe tener un valor mínimo de 24 MPa, mientras que el valor obtenido en su investigación fue de 13,79 MPa, que es un 43% inferior al valor establecido por la norma.

Faqih (2020) expone en su tesis los resultados obtenidos sobre el hormigón autocompactante de alta resistencia sustituyendo al cemento por metacaolín al 17.5% y fibra de acero de 0 kg/m<sup>3</sup>, 10 kg/m<sup>3</sup>, 15 kg/m<sup>3</sup>, 20 kg/m<sup>3</sup>, 25 kg/m<sup>3</sup> y 30 kg/m<sup>3</sup>, de los resultados obtenidos en síntesis la adición de metacaolín y la adición de fibras de acero en el hormigón reducen la trabajabilidad del hormigón fresco autocompactante de alta resistencia (HSSCC). Sin embargo, la prueba cumple con los requisitos mínimos de la prueba del medidor de flujo y la prueba de caja en L, pero no cumple con los parámetros de la prueba de embudo tipo V requerida por el hormigón autocompactante de alta resistencia (HSSCC), porque la relación de aspecto de la fibra es demasiado grande, por lo que el hormigón no fluye adecuadamente en la mezcla. Entre sus conclusiones resalta sobre la resistencia a la compresión máxima alcanzable del hormigón que fue de 67,87 MPa con un 17,5 % de metacaolín y un contenido de fibra de acero de 20 kg/m<sup>3</sup> en la mezcla, y el módulo de elasticidad máximo se produce en un hormigón con un contenido de fibra de 20 kg/m<sup>3</sup>, obteniendo resultados entre los, 38226,18 MPa y 47886,27 MPa. Finalmente, afirma que la adición de fibras de acero y metacaolín puede contribuir positivamente a la resistencia a la compresión y módulo elástico del hormigón estructural.

### 2.2.2. Investigaciones nacionales

Torres (2018) en la presente investigación tuvo por objetivo determinar las propiedades físicas, químicas y mecánicas del hormigón, adicionando 5% ,10% y 15 % del total del cemento con ladrillo de arcilla pulverizado respetando el diseño del hormigón con una resistencia de  $f'c=210\text{kg/cm}^2$ . Para determinar las propiedades químicas del hormigón, se analizan de acuerdo al análisis químico de los componentes de la mezcla (agua, agregados y ladrillos de arcilla en

polvo) para garantizar la efectividad de la mezcla, de acuerdo con las normas técnicas peruanas, sobre los 7 días, Se realizaron pruebas mecánicas, de compresión, tracción indirecta y flexión a los 14 y 28 días . Con base en los resultados, se concluyó que: La sustitución de los ladrillos de arcilla en polvo por cemento al 5% mejoró las propiedades mecánicas del hormigón; nuevamente, a mayor tiempo, mayor resistencia, lo que puede explicarse por la presencia de material cementoso (metacaolín) en los ladrillos de arcilla en polvo (debido a la deshidroxilación de minerales arcillosos), sus óxidos ácidos como sílice amorfa ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), incluidos los óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), al reaccionar con el hidróxido de calcio producido en la hidratación del cemento, dan lugar a la formación del silicato de calcio hidratado (CSH) y aluminato de calcio hidratado ( $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ), siendo dichos compuestos los que generarían la alta resistencia.

Sicha (2019) explica la necesidad de conocer las mejoras que puede producir el uso de la adición de metacaolín en la permeabilidad del cemento portland para el proyecto del túnel Gambetta, en donde se buscaba confirmar la disminución de la permeabilidad del hormigón vaciado en obra. Dado que este aditivo mineral no ha sido comercializado en nuestro país, se requiere una pequeña cantidad de experimentos en este trabajo. Para lograr esto, se planea un estudio para reemplazar 2 porcentajes de metacaolín al 10% y 15%, para los 28 y 56 días de curado. Como base para esta investigación se utilizaron diferentes normas para la medición de la permeabilidad del hormigón, de las cuales la norma colombiana NTC 4483 es la más destacada. Aplicar agua a una presión de 0,5 MPa durante 4 días en un dispositivo de medición de permeabilidad. Como resultado de los ensayos realizados se observó que utilizando metacaolín como aditivo mineral para el hormigón Portland, el uso de metacaolín al 15% mejoraba en mayor medida su impermeabilidad respecto al hormigón sin adicionar, en mayor proporción con el 15% de metacaolín. Por otro lado, también se observa que el uso de metacaolín mejora la resistencia a la compresión del hormigón con cemento portland.

Lopez, y Tufino (2020) mencionan el estudio de la relación agua/cemento para mejorar las propiedades de los hormigóns fluidos premezclados de alta resistencia. El objetivo principal es determinar el efecto de la relación agua/cemento en la obtención de hormigones de alta resistencia y así optimizar el diseño de futuras mezclas para obtener hormigones en óptimas condiciones mecánicas tanto en estado fresco como endurecido. Mientras realizaban las pruebas, confirmaron que a medida que disminuía la relación agua-cemento del hormigón, la resistencia a la compresión aumentaba significativamente, lo que de otro modo ocurría con un aumento en la trabajabilidad. Para estas mezclas de hormigón, los superplastificantes aumentaron la trabajabilidad y la cantidad óptima de reductor de agua para los más altos la trabajabilidad y la resistencia están en el rango de 2% - 2.5% en peso del material cementoso. En cuanto a la adición de materiales cementicios complementarios, las mezclas de humo de sílice (SF) y metacaolín (MK) tuvieron la mayor resistencia a la compresión, y las proporciones óptimas para el reemplazo del cemento fueron 25% y 20%, respectivamente.

Rodriguez y Vasquez (2019) mediante esta investigación determinaron las propiedades físicas y mecánicas del hormigón estructural  $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$  el cual el cemento fue reemplazado en porcentajes por la mezcla de metacaolín y ceniza volante. Para lograr esto primero se realizó un diseño de la mezcla inicial para obtener los parámetros de los materiales para una resistencia de  $f'_c=210\text{kg/cm}^2$  y esto lo llamaron hormigón patrón, luego calcularon las propiedades físicas del hormigón estructural  $f'_c=210\text{kg/cm}^2$  (Asentamiento y temperatura) y las propiedades mecánicas del hormigón estructural  $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$  (resistencia a la compresión y flexión) tanto como para un hormigón patrón y un hormigón con sustitución porcentual del cemento por metacaolín y cenizas volantes. El metacaolín y las cenizas volantes se mezclaron en una proporción de 1:1 al 5 %, 10 % y 15 %, respectivamente; y una comparación de hormigón estándar con el porcentaje óptimo de una mezcla de metacaolín y cenizas volantes. Los resultados obtenidos nos llevaron a concluir que la temperatura del 5%, 10% y 15%, respectivamente, fue la óptima para el hormigón estándar y el hormigón en el que se sustituyó el cemento por una

mezcla de metacaolín (MK) y ceniza volante (CV). El reemplazo del cemento por una mezcla de metacaolín y cenizas volantes al 5%, 10% y 15% mejoró significativamente la resistencia a la compresión de la muestra y la resistencia a la flexión de la viga después de 28 días de curado, siendo el reemplazo del 10% el más favorable. Finalmente, cuando se reemplazó la mezcla de metacaolín (MK) y ceniza volante (CV) por 10% de cemento, hubo un 99,7% de probabilidad de obtener una resistencia a compresión superior a la de diseño en el intervalo de 268,4 kg/cm<sup>2</sup>, y 330,6 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días.

### 2.2.3. Artículos relacionados con el tema

Jin et al. (2021) en la presente investigación se diseñaron un total de 30 mezclas de hormigón mediante la inclusión de 25%, 50%, 75% y 100% de ganga de carbón como agregados gruesos y sustituciones del 10% y 20% de metacaolín como ligante en reemplazo del cemento, a una relación a/c de 0.45 y 0.55, respecto a una mezcla patrón. Los ensayos de resistencia a la compresión de determino a los 3, 7 y 28 días de curado para un total de 90 muestras. Por otro lado, se estudiaron las influencias de la ganga de carbón y el metacaolín en el módulo elástico, la velocidad del pulso ultrasónico, el número de rebote y la porosidad. Luego, la relación entre las propiedades físicas y mecánicas (Ensayo de resistencia a la compresión) fue evaluada por parámetros definidos en norma y modelos empíricos. Además, se desarrolló una máquina de aprendizaje extremo para predecir la resistencia a la compresión de las mezclas de hormigón. Los resultados muestran que la inclusión de ganga de carbón resulta en un pobre desempeño en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón a comparación del metacaolín donde se observó beneficios si se incorporan en el hormigón en porcentajes óptimos del 15% al 21%.

Monadiri et al. (2022) proponen en su investigación los efectos del humo de sílice (SF) y las propiedades del metacaolín (MK) en el agua accesible porosidad, difusión de iones de cloruro, permeabilidad a los gases y resistividad eléctrica. Los hormigones se ensayan con proporciones separadas de 15% y 20% de MK y 5% y 10% de SF respecto a los hormigones sin adición. La incorporación se basa en una reposición parcial de arena fina. Se realizan un

total de quince mezclas según tres relaciones agua/cemento diferentes: 0,50, 0,46 y 0,40. Los indicadores de durabilidad se evalúan por edades de 7, 28, 56 y 90 días. La incorporación de SF o MK a las matrices de cemento tiene por objeto estudiar la de 7, 28, 56 y 90 días. La incorporación de SF o MK a las matrices de cemento tiene por objeto estudiar la microestructura en comparación con los hormigones de control. Por lo tanto, la comparación de los hormigones ensayados se concluye que la porosidad para sustituciones con humo de sílice fue del 1% a 11% y para sustituciones con metacaolín del 55% al 86%, con respecto a la permeabilidad al gas, para adiciones con humo de sílice fue del 6% al 22% y del 5% al 28% para sustituciones con metacaolín. La resistividad eléctrica también muestra un aumento en comparación con la mezcla de control de 64% a 163% para el humo de sílice y de 50% al 104% para metacaolín. Además, observó una buena correlación entre la resistencia a la compresión y los indicadores de durabilidad ensayados de los diferentes hormigones.

Asadollahfardi et al. (2019) sostienen en su investigación que los materiales puzolánicos son uno de los principales sustitutos del cemento en el hormigón. En este estudio, se reemplazó el cemento por metacaolín (puzolana) mientras que el agua para la mezcla de hormigón se enriqueció con micro-nano burbujas para disminuir el consumo de agua potable. Se midieron las resistencias a la compresión, la flexión y la tracción, la resistividad del hormigón y la absorción de agua. Se llevó a cabo una prueba rápida de permeabilidad al cloruro (RCPT) y microscopía electrónica de barrido (SEM) de muestras de hormigón para tener una idea de la microestructura del hormigón. Entre sus principales conclusiones, la adición de un 10 % (p/p) de metacaolín como reemplazo del cemento, después de 28 días, aumenta la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción, la resistividad del hormigón y la absorción de agua de las muestras de hormigón hasta en un 4,75 %, 25 % y 123 %. 52%, 7,82%, respectivamente, en comparación con las muestras de control. Además, la sustitución del 100 % del agua potable por agua que contiene micro-nano burbujas en las muestras de hormigón aumentó la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción, la resistividad del hormigón y la absorción de agua

de las muestras de hormigón hasta un 13,2 %, 19,64 %, 164,7 % y 66,95 %, respectivamente, en comparación con las muestras de control de la misma edad, 28 días. La aplicación simultánea de metacaolín y micro-nano burbujas de agua en el hormigón mejoró las propiedades mecánicas de las muestras de hormigón, resistencia a la compresión y a la tracción, en un 15 % y un 39,28 %, respectivamente. La durabilidad de las muestras de hormigón, incluida la resistividad del hormigón, la absorción de agua y los resultados RCPT a la edad de 28 días, mejoraron hasta un 194,11 %, 84,75 % y 25,21 %, respectivamente, en comparación con las muestras de control.

Sullivan et al. (2018) en su investigación mencionan que el metacaolín es la única puzolana natural y libre para su uso como suplemento en el diseño de mezcla de hormigones y morteros, en esta investigación se proponen usar tres tipos de productos de metacaolín comercialmente disponibles en Estados Unidos, reemplazando el 10%, 15% y 20% del contenido de cemento en las mezclas de hormigón y mortero. Entre su desarrollo de muestreo las mezclas de hormigón contenían cemento en peso por metro cubico de 422 kg/m<sup>3</sup>, una fracción de agregado grueso de 985 kg/m<sup>3</sup> y una relación agua/cemento igual a 0,43. Cada mezcla fue sometida a los siguientes ensayos: compresión, tensión de cilindro partido, módulo de ruptura, elástico dinámico módulo, penetración rápida de iones de cloruro, reactividad de álcali-sílice, resistencia a sulfatos, el coeficiente de dilatación térmica y contracción por secado. Los beneficios del metacaolín dependen en gran medida del producto usado ya que cada uno presenta características particulares en sus propiedades físicas y químicas, pero todos beneficiaron en una mayor resistencia mecánica. Todas las mezclas de hormigón con la adición de metacaolín se beneficiaron de una menor permeabilidad, mejor durabilidad, retracción reducida y mayor resistencia al ataque químico, excepto los morteros que contenían productos de metacaolín de alta finura que eran resistentes a los sulfatos. Finalmente, resaltan que el reemplazo óptimo de metacaolín en el hormigón está entre los 15% y 20%, este rango puede extender la vida útil de la infraestructura de transporte bajo condiciones de exposición severas.

Bakera y Alexander (2019) sostienen en su investigación, que la industria debería considerar invertir en la producción y aplicación de metacaolín en proyectos de hormigón apropiados, especialmente en entornos hostiles donde el cemento Portland común puede no ser adecuado y otros materiales suplementarios cementosos (SCM) pueden no estar fácilmente disponibles. Una contribución importante de este artículo es una revisión exhaustiva de investigaciones recientes sobre el uso de metacaolín en diferentes tipos de hormigón. Esta investigación realiza una comparación con los resultados de desempeño respecto a la durabilidad del hormigón metacaolín en el Cabo Occidental de Sudáfrica, utilizando materiales locales para mejorar el desempeño del hormigón. Estudiaron las propiedades de durabilidad del hormigón: (absorción, permeabilidad, conductividad y difusión), mitigación de la reacción álcali-sílice (ASR) y resistencia a la carbonatación. Los hormigones se diseñados con tres relaciones agua-cemento (0,4, 0,5 y 0,6), y con niveles de sustitución de metacaolín del 0%. (Muestra de Control), 10%, 15% y 20%, muestra variable con MK. Los resultados de rendimiento demuestran que con el aumento gradual de metacaolín, las propiedades de trabajabilidad del hormigón van paulatinamente mejorando, la expansión de ASR debido a un agregado local altamente reactivo decrece a niveles no perjudiciales, mientras que no se observa ningún efecto negativo sobre la carbonatación. Por lo tanto, el metacaolín podría servir como un material suplementario cementosos (SCM) valioso para mejorar el desempeño y la durabilidad del hormigón en ambientes muy agresivos.

Sharma et al. (2019) proponen en su investigación la idoneidad de los residuos de lechada de granito y metacaolín para la producción de hormigón. La piedra de granito es famosa por su resistencia, elegancia y durabilidad, material que genera residuos durante el procesamiento de bloques de piedra de granito, que afectan negativamente a la fertilidad de la tierra, el medio ambiente y la sociedad, por otro lado, el metacaolín es una alternativa puzolónica ultrafina y económica al humo de sílice, tiene influencia positiva sobre las propiedades del hormigón debido al efecto de relleno y la reacción puzolánica adicional. En este nivel de reemplazo de investigación experimental de residuos de lodo de

granito y el metacaolín se toma un 5% y 10% como reemplazo parcial del cemento. Se han evaluado las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón modificado. Se ha demostrado que el nivel óptimo de reemplazo de ambos materiales mejora la resistencia a la compresión y la flexión del hormigón. Además, se mejora en la permeabilidad al agua y la resistencia al ataque ácido ha sido favorable y beneficiosa, por otro lado, el asentamiento del hormigón disminuye con la incorporación progresiva del metacaolín y lechada de granito, por lo que se requiere usar aditivos para hacer más fluida la mezcla. Este estudio demuestra que la utilización de residuos de lodos de granito y metacaolín como reemplazo parcial del cemento reducirá el consumo de cemento, que conservará el recurso natural, reduce las emisiones de CO<sub>2</sub>, la demanda de energía y acumulación de desechos. Por lo tanto, la producción de nuevo hormigón compuesto será sostenible y ventajoso para el medio ambiente y la sociedad.

Reddy y Karthik (2019) el motivo de su investigación fue reemplazar parcialmente la arena natural y el cemento por arena de cuarzo (arena de sílice) y metacaolín respectivamente por problemas de escasez y el cuidado del medio ambiente. Para lograr esto emplearon ensayos como la resistencia a la compresión, flexión y tracción con el fin de demostrar que tendrían igual o mejores propiedades que una mezcla convencional. Se prepararon 6 diferentes tipos de mezclas para los ensayos de resistencia a la compresión como MQ0 = mezcla patrón, MQ1 = 10% metacaolín + 40% arena cuarzo, MQ2 = 20% metacaolín + 40% arena cuarzo, MQ3 = 30% metacaolín + 40% arena cuarzo, MQ4 = 40% metacaolín + 40% arena cuarzo, MQ5 = 50% metacaolín + 40% arena cuarzo los cuales tuvieron 7,14 y 28 días de curado con una relación a/c = 0.43 constante para todos los diferentes tipos de mezclas. Para los ensayos de resistencia de flexión las muestras tendrán la misma dosificación y relación a/c que las muestras de resistencia a la flexión y tendrá como nombre de probetas K0, K1, K2, K3 y K5. Los resultados del ensayo de resistencia a la compresión fueron 265 kg/cm<sup>2</sup>, 288 kg/cm<sup>2</sup>, 311 kg/cm<sup>2</sup>, 238 kg/cm<sup>2</sup>, 195 kg/cm<sup>2</sup> y 172 kg/cm<sup>2</sup> a los 7 días de curado, para los 14 días de curado fueron 367 kg/cm<sup>2</sup>, 398 kg/cm<sup>2</sup>, 430 kg/cm<sup>2</sup>, 329 kg/cm<sup>2</sup>, 270 kg/cm<sup>2</sup> y 239 kg/cm<sup>2</sup> y

finalmente a los 28 días fueron 398 kg/cm<sup>2</sup>, 419 kg/cm<sup>2</sup>, 447 kg/cm<sup>2</sup>, 368 kg/cm<sup>2</sup>, 329 kg/cm<sup>2</sup> y 310 kg/cm<sup>2</sup>. Los resultados del ensayo de resistencia a la flexión fueron 30 kg/cm<sup>2</sup>, 32 kg/cm<sup>2</sup>, 33 kg/cm<sup>2</sup>, 30 kg/cm<sup>2</sup>, 29 kg/cm<sup>2</sup> y 25 kg/cm<sup>2</sup> a los 7 días de curado, para los 14 días de curado fueron 42 kg/cm<sup>2</sup>, 44 kg/cm<sup>2</sup>, 46 kg/cm<sup>2</sup>, 41 kg/cm<sup>2</sup>, 40 kg/cm<sup>2</sup> y 36 kg/cm<sup>2</sup> y finalmente a los 28 días fueron 46 kg/cm<sup>2</sup>, 48 kg/cm<sup>2</sup>, 51 kg/cm<sup>2</sup>, 45 kg/cm<sup>2</sup>, 44 kg/cm<sup>2</sup> y 40 kg/cm<sup>2</sup>. En conclusión, es más beneficioso usar 20% de metacaolín y 40% de arena de cuarzo (K2) como sustituto del cemento y arena convencional respectivamente tomando como referencia a los 28 días de curado. La mezcla K2 mejoro un 12 % de resistencia a la flexión en comparación con la mezcla patrón por ende es la mejor opción.

Olewi et al. (2021) con este artículo demostró que el metacaolín (MK) se puede aplicar como un aglutinante adicional al cemento y que ciertos polímeros pueden mejorar las propiedades básicas del hormigón. Estudios previos han demostrado que cuando se usan en combinación, MK y el polímero pueden complementarse y mejorar aún más las propiedades mecánicas y físicas del hormigón, ya que no mejoran las propiedades por separado. Con el fin de tener una observación y comprensión profunda este estudio investiga los cambios en la microestructura basados en el sistema estructural combinado con tecnología de escaneo de análisis de tomografía computarizada. Los resultados muestran que la microestructura de poros del hormigón endurecido modificado con los polímeros combinados y la mezcla MK mejora significativamente en comparación con las muestras con MK o los polímeros combinados por separado.

Choi et al. (2022) En el presente artículo los autores trataron de investigar la efectividad de los diferentes materiales cementicios suplementarios (SCM) para el mejoramiento de las propiedades del hormigón estructural bajo los efectos del agua de mar ya que al usar los SCM como sustitutos parciales del cemento portland podrían retardar la descalcificación del gel CSH y la propagación de los iones cloruros. El metacaolín es un aditivo esperanzador debido a su alta reactividad y efectos de reducción de los diámetros de los poros en el hormigón en estado sólido. Mejora propiedades mecánicas, resistencia a

la carbonatación al combinar el cemento con el metacaolín expuesto al entorno compuesto por agua de mar. Los iones del mar influyen significativamente en la resistencia y durabilidad de las estructuras hechos por cemento y son más afectados cuando son estructuras marinas de hormigón propenso a mareas y salpicaduras. Teniendo este problema, se investigó los efectos de las condiciones de exposición al agua de mar sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad durante períodos a corto plazo que abarcaron entre 1 y 90 días con sustitución en porcentaje de metacaolín en peso de cemento portland. Se midieron y compararon las resistencias a la compresión, flexión, tracción, cambio de masa, absorción de agua y la resistencia a la penetración de cloruro de las muestras con cemento portland curadas en el entorno marino real con las de las muestras de cemento portland curadas en condiciones constantes de laboratorio. Además, la porosidad interna, se consideró una señal importante para hallar las propiedades mecánicas y de durabilidad., se midió de forma no destructiva utilizando microtomografía de rayos x (CT) para investigar rigurosamente la variación de la estructura de los poros de estructuras hechos por cemento portland curado bajo el agua de mar. Se realizaron dos diferentes tipos de curado, un grupo fue curado con agua potable y el otro grupo con agua de mar durante 7 días y 28 días con 5% y 10% de sustitución de metacaolín del peso total de cemento portland utilizado respectivamente.

Sangsuwan y Sujjavanich (2020) con esta investigación comprobaron el impacto de diferentes puzolanas de origen local como componente cementicio suplementario (SCM) en la expansión de barras de mortero a causa a la reacción del álcali-sílice. Se empleó una prueba acelerada en muestras con agregados volcánicos locales y riolita con el fin de experimentar y comparar los efectos de las cenizas volantes (FA) y el metacaolín (MK) para evitar la expansión y posteriormente rajadura de las muestras de hormigón. Se utilizaron diferentes porcentajes de cenizas volantes (20%,35% y 50%) y tres sustituciones de metacaolín de 10%,15% y 20% en peso del cemento. Los resultados a los 14 días mostraron expansiones levemente decrecientes (0.073%) al reemplazar 20 % de cenizas volantes de peso del cemento portland, pero las expansiones más bajas fueron 0.025 % y 0.001 %, respectivamente

para 35 % de ceniza volante y 10 % de metacaolín, en comparación con 0.176 % de la mezcla patrón. Al incrementar la cantidad de material cementicio suplementario con 50% ceniza volante y 15 a 20% de metacaolín ocasiono una reducción de la expansión a un nivel inocuo. Los resultados de la aceleración de 28 días registraron un ligero incremento en la expansión para las mezclas de cenizas volantes de 35% y 50 % de sustitución incluido todas las mezclas de metacaolín. El análisis de la composición química reveló una disminución de  $\text{CaO/SiO}_2$  y  $\text{CaO/Al}_2\text{O}_3$  a proporción de los sistemas cementosos. Esto se correlacionó con la disminución de la expansión. Pero la alúmina en  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  de proporción mostró el efecto dominante en la disminución de la reacción del álcali-sílice. También se estudiaron en detalle las microestructuras de todos los materiales y especímenes colados. Teniendo en cuenta todos los aspectos, estos materiales cementicios suplementarios, utilizados en cantidades adecuadas, se consideraron buenos aditivos para la prevención de la reacción álcali-sílice en nuevas estructuras de hormigón estructural tanto a corto como a largo plazo.

Adebanjo et al. (2021) tuvieron como razón de investigación mejorar las propiedades físicas y mecánicas usando metacaolín (MK) de producción local como aditivo para sustituirlo parcialmente por el peso del cemento con agregados reciclados de grados M25 y M30. El porcentaje de metacaolín fue de 5% y 10%. Las propiedades físicas y mecánicas que estudiaron fueron densidad aparente, gravedad específica, absorción de agua, valor de trituración de agregados, valor de impacto de agregados, trabajabilidad, resistencia a la compresión, y tracción dividida en estado fresco y endurecido. Los resultados de los ensayos de gravedad específica, absorción de agua y el valor de impacto de agregado reciclados (RAC) fueron 2.23%, 5.35% y 32% respectivamente a una temperatura de 660 °C. Los resultados de asentamiento para las muestras de control M 25 y M 30 fueron de 72 mm y 65 mm, respectivamente, mientras que los valores de asentamiento del RAC modificado con MK disminuyeron de 67 a 45 mm para grado M 25 y de 55 a 35 mm para grado M 30 a medida que MK aumentó de 5% a 10%. La resistencia a la compresión al día 56 de las muestras de control fue de 21,73 N/mm<sup>2</sup> para grado M25 y 26,8 N/mm<sup>2</sup> para

M 30, respectivamente, mientras que las muestras de RAC oscilaron entre 14,96 y 17,04 N/mm<sup>2</sup> para M 25 y 20,55 - 22,67 N/mm<sup>2</sup> para M 30 mientras que la resistencia a la tracción dividida para las muestras de control fue de 2,71 N/mm<sup>2</sup> y 3,06 N/mm<sup>2</sup> para los dos grados en esa secuencia, mientras que los de RAC oscilaron entre 2,26 y 2,49 N/mm<sup>2</sup> para M 25 y 2,62 y 2,84 N/mm<sup>2</sup> para M 30. A pesar de que el RAC. Se concluye que las mezclas con agregados reciclados con metacaolín tiene resistencias tanto compresión y tracción más bajas que la muestra patrón. Se recomienda el uso del 10% de metacaolín como sustituto parcial del cemento portland en el diseño de mezcla con agregados reciclados.

## 2.3. Estructura teórica y científica que sustenta el estudio

### 2.3.1. Puzolanas

Las puzolanas son materiales con alto contenido de sílice y alúmina, que carecen de propiedades hidráulicas, pero (en condiciones de finura) reaccionan con la cal en presencia de agua y a temperatura ambiente, por lo que se utilizan para formar productos estables con propiedades hidráulicas, además de tener la capacidad para formar productos de hidratación con propiedades cohesivas. Los materiales puzolánicos pueden estar presentes en proporciones variables de sílice y alúmina, en estado vítreo, y en ocasiones también están compuestos por minerales inactivos como feldespato, cuarzo, magnetita entre otros (Gómez, 2013).

La puzolana consiste en una fase activa capaz de reaccionar con la cal procedente de la hidratación del cemento Portland. Esto da como resultado la integración de la puzolana en el proceso de hidratación, un menor contenido de silicato y un aumento en el silicato de calcio hidratado. Todas estas fases activas son termodinámicamente inestables y generalmente consisten en materiales amorfos.

### 2.3.2. Metacaolín

El metacaolín es una puzolana natural aluminica y sílicea conforme a la norma ASTM C618, originado por la activación térmica o mecánica del caolín. Generalmente, el caolín utilizado para producir metacaolín contiene un alto

porcentaje (40-70%) del mineral arcilloso caolinita  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ . La forma deshidroxilada de metacaolín se puede utilizar en el hormigón para mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad, al mismo tiempo que mejora la apariencia estética a través de su color blanco. El metacaolín promueve propiedades específicas de tres maneras. El primero es el efecto de relleno. Como el humo de sílice, la finura del metacaolín densifica la matriz pastosa. La segunda se debe al hecho de que el metacaolín fino proporciona un área de superficie adicional para la nucleación de hidratos, acelerando así la hidratación del cemento (Sullivan et al., 2018). En síntesis, el metacaolín es una puzolana producto de la activación térmica o mecánica del caolín, donde su forma deshidroxilada se puede utilizar en el hormigón para mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad promoviendo propiedades específicas de relleno, la hidratación acelerada e hidratos estructurales adicional a la mezcla.

En general, el metacaolín reacciona con el hidróxido de calcio libre  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  durante la hidratación del cemento para formar C2S secundario, seguido de la formación de gel de silicato de calcio hidratado o gel de tobermorita, y el aluminosilicato de calcio hidratado ayuda a mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla (Sullivan et al., 2018).

Bakera y Alexander (2019) afirman que el metacaolín, también conocido como arcilla calcinada altamente reactiva, se produce al calcinar arcillas de caolinita de alta calidad a temperaturas entre aproximadamente 600 y 900 °C. Durante la calcinación, el agua ligada es expulsada y la estructura del material colapsa, formando una fase amorfa (metacaolín).

### 2.3.3. Propiedades del metacaolín

#### Propiedades físicas:

Las propiedades físicas del metacaolín son de textura arenosa, polvo muy fino, suave al tacto, de color blanquecino y 45% de consistencia. Además, sus propiedades físicas y su comportamiento dependen de una serie de factores, siendo los más relevantes la composición química de los componentes no combustibles, el grado de pulverización, la temperatura de combustión, etc. El

tamaño medio de partícula es de aproximadamente (3,71-11,50)  $\mu\text{m}$  y su peso específico es de aproximadamente (2,42 - 2,60)  $\text{gr}/\text{cm}^3$  (Sharma et al., 2019). Se puede observar en la Figura N 2 y Figura N 3, la estructura puzolanica cristalina amorfa, característica principal del metacaolín calcinado en hornos a temperaturas altas.

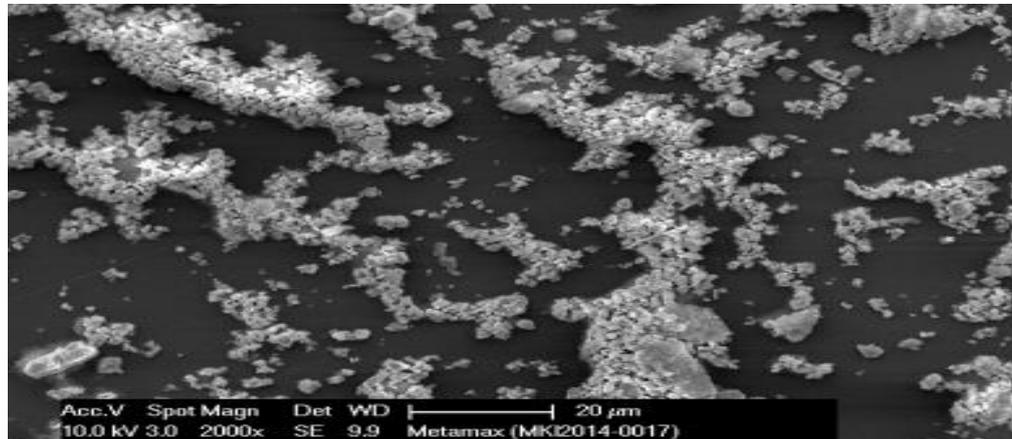


Figura N 2: Fotografía del metacaolín a 2,000 aumentos.  
Fuente: Sullivan et al. (2018).

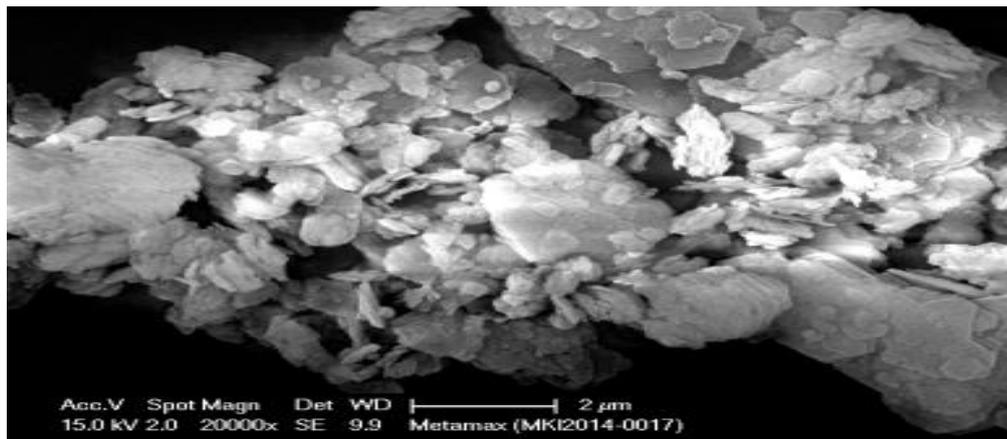


Figura N 3: Fotografía del metacaolín a 20,000 aumentos.  
Fuente: Sullivan et al. (2018).

#### Propiedades químicas:

El metacaolín (MK) es la fase intermedia después de la calcinación de la caolinita de filosilicato. La temperatura de calcinación se selecciona de acuerdo con la temperatura de deshidroxilación de la caolinita. La caolinita es un silicato en capas 1:1 compuesto de láminas tetraédricas ( $\text{SiO}_2$ ) y octaédricas ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) unidas por grupos (-OH), enlaces de van der Waals y cationes de aluminio. Por deshidroxilación, la estructura del metacaolín se vuelve altamente desordenada y amorfa (Muhammad et al. 2021).

Tabla N°1  
Composición química general en porcentaje del metacaolín.

Constituyente	Metacaolín (%)
SiO <sub>2</sub>	62.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.67
CaO	3.01
MgO	3.41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.01
K <sub>2</sub> O	1.85
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.03
TiO <sub>2</sub>	1.03
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.80

Fuente: Keerio et al. (2021).

Según la Tabla N°1, se puede observar que el metacaolín es rico en sílice con un valor de 62.18% seguido en porcentaje por el óxido de aluminio que representa el 21.67 % y en pequeñas cantidades cantidad otros óxidos químicos como se muestra en la Tabla N°1, estos porcentajes pueden variar un poco respecto al tipo de metacaolín calcinado, por lo tanto, su composición química hace que sea un material puzolánico cementante.

#### 2.3.4. Componentes de hormigón

##### Cemento Portland

Barrera et al. (2021) mencionan que, para la producción de cemento, el material principal es la piedra caliza, la cual se extrae en canteras, ya sea arrancando el material con maquinaria pesada o explotándolo con pólvora; luego de esto, las rocas son cargadas por grandes camiones y transportadas a la planta de trituración primaria. En este punto se tritura la caliza, reduciendo su tamaño de mayor de 700 mm a menos de 60 mm, luego la trituración secundaria vuelve a reducir su tamaño, de partículas de hasta 60 mm de diámetro a partículas de entre 0,02 mm y 0,006 mm de diámetro; luego se inicia la preparación del crudo a partir de una serie de materias primas previamente seleccionadas. Entre ellos se encuentran las calizas margas o arcillas. Estos van acompañados de otros modificadores de módulos como ceniza de piritita y arena, etc. Todo esto constituye el crudo de cemento el cual luego es incorporado en un pre

calcinador de manera continua que es una especie de horno cilíndrico giratorio en su eje, allí puede reposar entre 20 y 30 minutos a temperaturas que pueden variar entre los 850 °C y 1500 °C. Como resultado se forma el mineral determinado como clinker. Luego este material se enfría progresivamente, se tritura con un regulador de fraguado, para lo cual, generalmente, se usa yeso y otros materiales calizos, con adiciones, dando como resultado final el cemento.

De lo expuesto anteriormente se puede decir que el cemento es una mezcla de piedra caliza, arenisca y arcilla, que cuando se somete a altas temperaturas en un horno rotatorio a altas temperaturas, forma escoria, posteriormente se agrega yeso durante la etapa de molienda para controlar el tiempo de fraguado, De esta manera se obtiene cemento tipo Portland. En el Perú existen diferentes tipos de cemento Portland que a continuación se mencionan.

- Tipo I: Uso General
- Tipo II y Tipo II (MH): Moderada resistencia a sulfatos y al calor de hidratación.
- Tipo III: Altas resistencias iniciales.
- Tipo IV: Para lograr bajo calor de hidratación.
- Tipo V: Alta resistencia a sulfatos.

#### Agregado fino

Según la norma NTP 400.037 (2018), define como agregado fino al material de roca natural o desintegrado artificialmente que pasa a través de un tamiz de 9,5 mm (3/8 pulg.) y cumple con los límites especificados por la norma vigente. Además, para hormigón no abrasivo, el límite para materiales más finos que las mallas de 75 mm (N°200) será de un máximo de 5%, para agregados finos artificiales y otros agregados reciclados, si el material es más fino que 75 mm (N°200) tamices que incluyan polvo de molienda, esencialmente exento de arcilla o esquisto, este límite deberá estar entre el 5% y el 7%, si se utiliza en hormigones sujetos a abrasión, respectivamente.

Tabla N°2  
Requerimiento de granulometría del 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 $\mu$ m (No.30)	25 a 60
300 $\mu$ m (No.50)	5 a 30
150 $\mu$ m (No.100)	0 a 10
75 $\mu$ m (No.200)	0 a 3.0

Fuente: NTP 400.037 (2018).

De Acuerdo a la Tabla N°2, el porcentaje retenido en dos mallas sucesivas no excederá del 45%, el porcentaje indicado para las mallas N° 50 y N° 100 podrá ser reducido a 5% y 0% respectivamente. El módulo de fineza no deberá ser menor de 2,3 ni mayor de 3,1. Debemos considerar que los agregados pueden constituir hasta las tres cuartas partes en volumen, de una mezcla típica de hormigón.

#### Agregado grueso

Según la Norma Técnica Peruana NTP 400.037 (2018), el agregado grueso es un material derivado de la descomposición natural o artificial de roca, retenida en un tamiz de 4,75 mm (No. 4), dentro de los límites especificados en la normativa vigente. Se ha demostrado que los agregados de tamaño máximo nominal más pequeño proporcionan una mayor resistencia potencial en el hormigón. Ello se debe, a que se aumenta la superficie de contacto entre la zona de transición interfacial de la pasta y los agregados. Por ese motivo, se recomienda que para obtener resistencia a la compresión elevada se utilice agregados de tamaño máximo nominal pequeños.

### 2.3.5. Métodos Experimentales

#### Resistencia a la compresión axial

Según la Norma Técnica Peruana NTP 339.034 (2015) sostiene que el método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del hormigón es en muestras cilíndricas que puede ser de diferentes dimensiones. El método consiste en aplicar una carga de compresión axial a los cilindros moldeados o extracciones diamantinas a una velocidad que se encuentra en un rango que se encuentra en la norma hasta la falla. La resistencia a la compresión de los especímenes resulta de la división de la carga máxima alcanzada durante el ensayo entre el área de la sección transversal del espécimen.

Tabla N°3

Tabla de rango aceptable de compresión axial.

Tamaño y tipo de probeta	Coefficiente de variación (%)	Rango Aceptable 2 Cilindros (%)	Rango Aceptable 3 Cilindros (%)	Condición
Cilindro de 150mm.	2.40	6.60	7.80	Laboratorio
x 300mm	2.90	8.00	9.50	Obras
Cilindro de 100mm x 200mm	3.20	9.00	10.60	Laboratorio

Fuente: NTP 339.034 (2015).

#### Resistencia a la flexión

Según la Norma Técnica Peruana NTP 339.078 (2012) menciona que el método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del hormigón en vigas simplemente apoyadas con carga a los tercios de la luz, consiste en doblar a una probeta recta de sección plana, circular o poligonal, mediante el pliegue de ésta a una deformación plástica, sin alteración de su sentido de flexión, sobre un radio especificado al que se le aplica una presión constante.

#### Ensayo de Ión Cloruro

Según Norma ASTM C-1202 explica el método de ensayo para determinar la penetración de los iones de cloruro en el hormigón endurecido por exposición

de una solución salina. Entre más permeable sea el hormigón, más iones de cloruro pasaran a través de sus poros por ende una mayor carga eléctrica (coulomb) tendrá.

Tabla N°4  
Clasificación de la permeabilidad al ion cloruro según la carga en coulomb.

Carga (Coulomb)	Permeabilidad del ion Cloruro
> 4000	Alta
2000-4000	Moderado
1000-2000	Baja
100-1000	Muy baja
<1000	Despreciables

Fuente: ASTM C1202.

#### Ensayo de asentamiento (Cono de Abrams)

Según la Norma Técnica Peruana 339.035 (2022) describe el método de ensayo para la medición del asentamiento del hormigón con el Cono de Abrams, en este ensayo el hormigón se coloca en un molde metálico troncocónico de 30 cm de altura y de 10 y 20 cm de diámetro, superior e inferior respectivamente. Al molde metálico se le agrega en 3 capas la mezcla fresca. La compactación por capa se hace con 25 golpes de la varilla, con el extremo semiesférico impactando al hormigón. Los golpes deben repartirse uniformemente en toda la superficie y penetrando la varilla en el espesor de la capa, pero sin golpear la base de apoyo.

Tabla N°5  
Consistencia del hormigón según su asentamiento.

Consistencia en Cono	
Consistencia	Asentamiento en (cm)
Seca	0 a 2
Plástica	3 a 5
Blanda	6 a 9
Fluida	10 a 15
Líquida	>16

Fuente: NTP 339.035 (2022).

#### Ensayo de porosidad

Según la norma ASTM C-642 una probeta de 100mmx200mm será cortado por la parte central y luego 5cm a sus lados opuestos y se usará el de la zona central por ser más homogéneo. Posteriormente dichas muestras se ingresarán a un horno para obtener sus pesos secos para luego sumergirlos en agua por 48 horas con la finalidad de pesarlos y obtener el peso de agua absorbido.

#### Ensayo de álcalí-sílice

Según la norma ASTM C-1567 este método de prueba ha sido desarrollado para evaluar combinaciones de ciertos materiales cementosos con una sola fuente de agregado en un mortero de proporciones estándar. Los diferentes niveles de puzolana y escoria de alto horno granulada molida pueden requerir pruebas para determinar la cantidad requerida para reducir la expansión a un nivel aceptable. Las puzolanas y la escoria de alto horno granulada molida pueden ensayarse por separado o en combinación. Se puede determinar un nivel de expansión a los 14 días de la siguiente manera, si el resultado es  $< 0,10\%$  = Inocuo, si se encuentra entre el  $0,1\% < x < 0,2\%$  = Inconcluso y si  $> 0,2\%$  = Reactiva.

### 2.4. Definición de términos básicos

#### Metacaolín

La caolinita es un mineral tipo silicato con composición química  $Al_2 Si_2 O_4$  que consiste en una lámina de tetraedros de silicato unida a una lámina de octaedros de alúmina. Cuando se aplica un tratamiento térmico a  $700\text{ }^\circ\text{C}$  su composición química es la siguiente: 45.5%  $SiO_2$ , 1.30%  $Fe_2 O_3$ , 38.9%  $Al_2O_3$  y 14.05% de pérdidas por calcinación, se considera entonces metacaolín (Gallegos, 2019).

#### Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se define como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de hormigón. Expresado en kilogramos por centímetros cuadrados ( $kg/cm^2$ ), megapascuales (MPa) o en libras por pulgadas cuadradas ( $lb/pulg^2$  o PSI) a una edad de 28 días (Feijoo y Sánchez, 2020).

#### Resistencia a la flexión

La porosidad del hormigón es la cantidad de espacios vacíos que posee la mezcla,

ésta determinará la absorción del mismo, dado que mientras más cantidad de espacios vacíos tenga el hormigón más agua podrá ocupar dichos espacios por lo tanto la absorción estará directamente relacionada con la porosidad del hormigón (Masías, 2018).

#### Porosidad

La porosidad del hormigón es la cantidad de espacios vacíos que posee la mezcla, ésta determinará la absorción del mismo, dado que mientras más cantidad de espacios vacíos tenga el hormigón más agua podrá ocupar dichos espacios por lo tanto la absorción estará directamente relacionada con la porosidad del hormigón (Masías, 2018).

#### Ion cloruro

La penetración de iones de cloruro en el hormigón está directamente relacionada con el volumen de poros en el hormigón. Entre más permeable sea el hormigón, más iones cloruro viajarán a través del espécimen, y una mayor corriente será medida (Asadollahfardi et al. 2019).

#### Álcali - Sílice

Son reacciones expansivas internas del hormigón, se definen como la reacción entre la solución alcalina y algunos minerales de sílice que, en presencia de agua, genera un gel expansivo. Para que la RAS ocurra es necesaria la presencia en simultáneo en el hormigón de contenidos suficientes en humedad, álcalis y áridos reactivos (Fernandes, 2005).

#### Asentamiento

Mide la trabajabilidad del concreto cuán fácilmente se puede mezclar, colocar, consolidar y terminar el hormigón recién mezclado con una mínima pérdida de homogeneidad y la facilidad de colocación, consolidación y acabado del concreto fresco y el grado que resiste a la segregación (Camac, 2018).

#### Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese, sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e

impermeable o no permeable si la cantidad de fluido es baja (Cabrera y Ramirez, 2019).

## 2.5. Fundamentos teóricos que sustentan las tesis

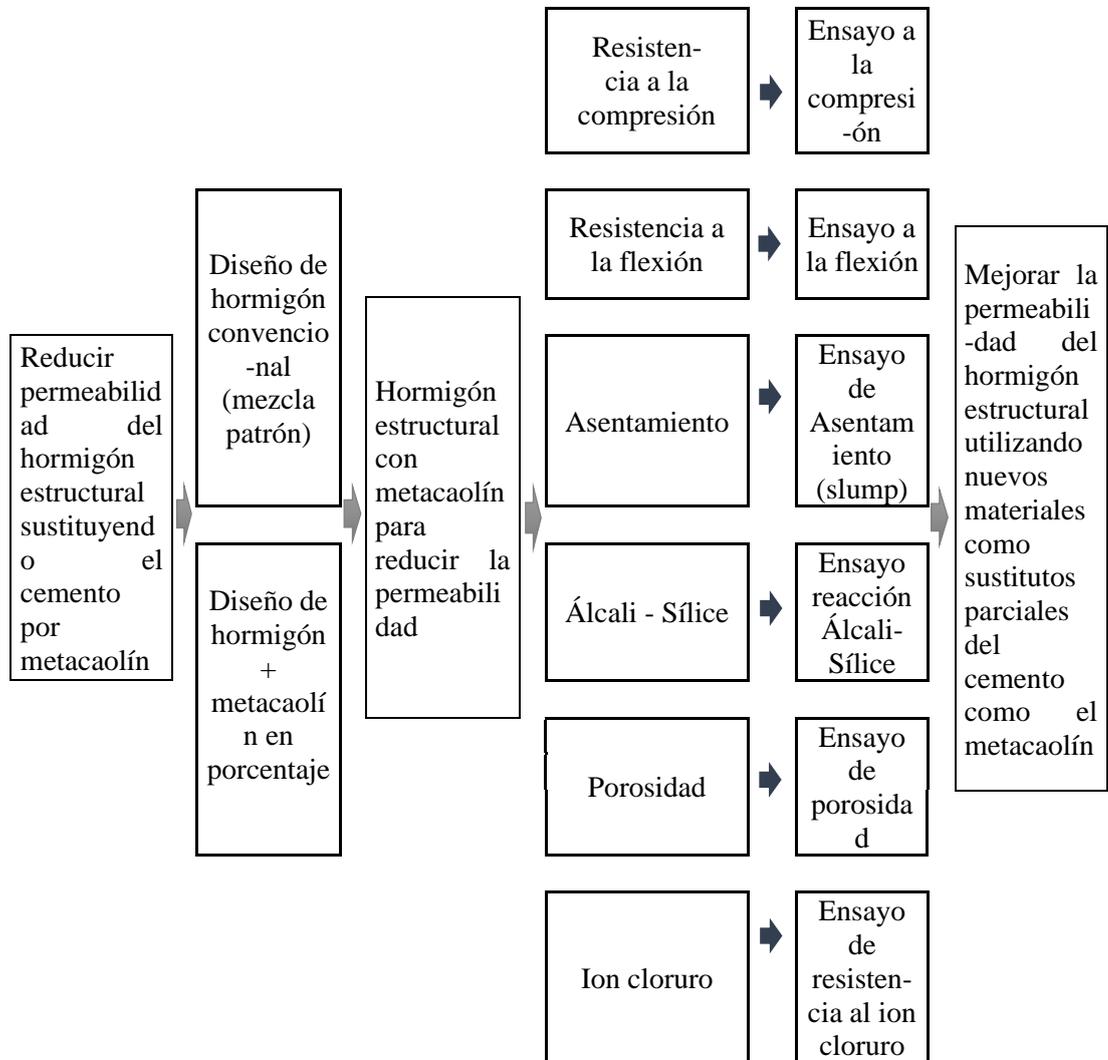


Figura N 4: Mapa conceptual  
Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

### 3.1. Hipótesis

#### 3.1.1. Hipótesis general

Al determinar el metacaolín como sustituto del cemento se reduce la permeabilidad del hormigón estructural.

#### 3.1.2. Hipótesis específicas

- a) Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se incrementa la resistencia a la compresión del hormigón estructural.
- b) Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se incrementa la resistencia a la flexión del hormigón estructural.
- c) Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se reduce la porosidad del hormigón estructural.
- d) Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se reduce la penetración del ion cloruro del hormigón estructural.
- e) Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se reduce la expansión álcali-sílice del hormigón estructural.
- f) Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se incrementa el asentamiento del hormigón estructural.

### 3.2. Variables

#### 3.1.3. Variables independientes

Metacaolín como sustituto del cemento

Indicador:

- Porcentaje de metacaolín.

#### 3.1.4. Variables dependientes

Permeabilidad del hormigón estructural.

Indicador:

- Resistencia a la compresión.
- Resistencia a la flexión.
- Porosidad.
- Permeabilidad al ion cloruro.

- Reacción al álcali-sílice.
- Asentamiento.

### 3.3. Sistema de variables

#### 3.1.5. Variable independiente

##### Metacaolín

El metacaolín, también conocido como arcilla calcinada altamente reactiva, se produce al calcinar arcillas de caolinita de alta calidad a temperaturas entre aproximadamente 600 °C y 900 °C. Durante la calcinación, el agua atrapada es expulsada y la estructura del material colapsa, formando una fase amorfa. (Bakera y Alexander, 2019).

#### 3.1.6. Variable dependiente

##### Permeabilidad

“Es la capacidad que tiene un material de permitirle a un fluido atravesarlo sin alterar su composición. Es permeable si deja pasar a través de él una cantidad considerable de fluido en un tiempo dado” (Cabrera y Ramirez, 2019, p.11).

#### 3.1.7. Operacionalización de variables

Según la recopilación de fuentes con sustituciones en porcentaje de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, se procede a evaluar las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido, con el fin de determinar la influencia de este material en el hormigón y determinar si es favorable o no el reemplazo.

Tabla N°6  
Operacionalización de variables.

Variable independiente	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Índices	Unidad de medida	Escala	Instrumento	Herramienta	Ítems
Metacaolín	El metacaolín se produce al calcinar arcillas de caolinita de alta calidad a temperaturas 600 <sup>o</sup> C a 900 <sup>o</sup> C. Durante la calcinación, el agua atrapada es expulsada y la estructura del material colapsa, formando una fase amorfa. (Bakera y Alexander).	La arcilla después de ser calcinada adquiere propiedades cementante para sustituir al cemento en el diseño de mezcla del hormigón.	Química	Porcentaje de metacaolín	Porcentaje	Porcentaje (%)	Cuantitativo discreta	Formato de laboratorio	Norma ASTM C-618-19	Indicado en los formatos
Variable dependiente										
Permeabilidad	Es la capacidad de un material de permitirle a un fluido atravesarlo sin alterar su composición. Es permeable si deja pasar a través de él una cantidad considerable de fluido en un tiempo dado. (Cabrera y Ramirez, 2019).	El hormigón en un estado inicial muestra trabajabilidad para ser colocada en un molde o encofrado.	Estado fresco	Asentamiento	Manejabilidad Trabajabilidad	Slump (mm)	Cuantitativo continuo	Formato de laboratorio	NTP 339.035	Indicado en los formatos
			Estado endurecido	Resistencia	Compresión	Kg/cm2	Cuantitativo continuo	Maquina ensayo a compresión	NTP 339.034	Indicado en los formatos
				Resistencia	Flexión	Kg/cm2	Cuantitativo continuo	Maquina ensayo a flexión	NTP 339.078	Indicado en los formatos
				Permeabilidad	Ion cloruro	Coulumb (C)	Cuantitativo continuo	ASTM C-1202	Indicado en los formatos	
					Porosidad	Porcentaje (%)	Cuantitativo continuo	Formato de laboratorio	ASTM C-642	Indicado en los formatos
Reacción álcali-sílice	Porcentaje (%)	Cuantitativo continuo	ASTM C1567/C1260	Indicado en los formatos						

Fuente: Elaboración propia.

## **CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **4.1. Método de la investigación**

El método que fue aplicado fue el deductivo, de orientación aplicada con un enfoque cuantitativo y como instrumento de recolección de datos retrolectivo ya que se usaron datos de normas internacionales, nacionales e información precedente del tema de estudio, de tipo descriptivo, correlacional y explicativo. Fue una investigación causal (causa - efecto) dado que se estudió la relación entre la variable independiente incorporación de metacaolín (causa) y variable dependiente permeabilidad del hormigón estructural (efecto). Su objetivo fue conocer el efecto positivo o negativo lo cual produjo un cambio inesperado entre las variables.

### **4.2. Tipo de investigación**

Fue descriptivo ya que busco reducir la permeabilidad con el fin de evitar el ingreso de agentes nocivos al hormigón, además de mejorar otras propiedades del mismo, explicativa ya que se hizo un cuadro explicando las causas los cuales fueron el motivo de la elaboración de las tesis investigadas y consecuencias que con la ayuda del metacaolín se mitigo y correlacional ya que la variante independiente tuvo influencia a las variables dependientes.

### **4.3. Nivel de investigación**

El nivel de investigación fue descriptivo ya que se investigó los resultados recopilados de tesis, ensayos, artículos y libros, se determinó un porcentaje óptimo de metacaolín que sustituyo al cemento en el diseño de mezcla que favoreció la permeabilidad y propiedades físico-mecánicas del hormigón estructural.

### **4.4. Diseño de la investigación**

De acuerdo a la información recopilada (tesis y artículos) de los autores citados, son del tipo experimental, debido a que se manipulo la variable independiente para observar su efecto y relación con una o más variables dependientes. De acuerdo a la direccionalidad de la investigación es longitudinal y retrospectiva, longitudinal porque se buscó obtener información de un proceso de cambio en un tiempo prolongado y retrospectivo por que se cuenta datos ya recogidos con anterioridad, como se puede constatar en la Tabla N°7.

## 4.5. Población y muestra

### 4.5.1. Población

La presente tesis fue de nivel descriptiva, por lo tanto, Se consideró como población a las investigaciones nacionales e internacionales recopiladas como artículos, tesis y revistas científicas, de base de datos confiables relacionadas con la aplicación del metacaolín como sustituto del cemento en el hormigón estructural. Lo descrito anteriormente se puede apreciar en la Tabla N°8.

### 4.5.2. Muestra

Se consideró como muestra al número de unidades de ensayos realizados en las investigaciones nacionales e internacionales recopiladas, que tuvieron como sustituto parcial del cemento al metacaolín en su diseño de mezcla del hormigón estructural, tanto en estado fresco y endurecido. Esto se puede evidenciar en la Tabla N°9.

Tabla N°7

Cuadro comparativo de tipología.

Autor	Rodríguez, L y Vázquez, D	Gachas, Y. y Velasco, C.	Zamudio, P y Quiroga, J	Ahmed, F.	Younis, K. Et al.
Título	Propiedades físicas - Comportamiento mecánicas del hormigón estructural con sustitución de cemento metacaolín y ceniza volante		Evaluación de material cementante basado en metacaolín con activación alcalina	Pruebas de factibilidad de mezcla metacaolín ladrillo en hormigón que incorpora ladrillo y plástico como agregado	Estudio experimental de propiedades mecánicas de hormigón permeable con agregado reciclado
Método de investigación			Deductivo		
Orientación de la investigación			Aplicada		
Enfoque de la investigación			Cuantitativo		
Instrumento de recolección de datos			Retrolectivo		
Tipo de investigación			Descriptiva, explicativa y correlacional		
Nivel de investigación			Explicativo		
Diseño de investigación	Experimental, longitudinal y retrospectiva	Experimental, longitudinal y retrospectiva	Experimental, longitudinal y prospectiva	Experimental, longitudinal y retrospectiva	Experimental, longitudinal y retrospectiva

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°8

Cuadro comparativo de población de diferentes investigaciones.

Autor	Rodríguez, L y Vázquez, D	Gachas, Y. y Velasco, C.	Zamudio, P y Quiroga, J	Sullivan, M, Chorzepa, M, Hamid, H, Durham, S y Kim, S	Bakera, A y Alexander, M
Titulo	Propiedades físicas y mecánicas del hormigón estructural con sustitución del cemento por metacaolín y ceniza volante	Comportamiento físico mecánico y a permeabilidad a cloruros en el hormigón hidráulico con adiciones de metacaolín.	Evaluación de material cementante basado en metacaolín con activación alcalina	Materiales sostenibles para infraestructuras de transporte: comparación de tres productos de metacaolín disponibles en el mercado en sistemas cementantes binarios	Uso del metacaolín como material cementante suplementario en el hormigón. Con especial atención a las propiedades de durabilidad
Población	La población estuvo formada por todas las probetas de hormigón y vigas de hormigón seleccionadas para la investigación	No indica	La población estuvo formada por todas las probetas, vigas de hormigón y cubos de mortero con y sin adición de metacaolín	No indica	No indica

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°9

Cuadro comparativo de muestra de diferentes investigaciones.

Autor	Rodríguez, L y Vázquez, D	Gachas, Y y Velasco, C	Zamudio, P y Quiroga, J	Sullivan, M, Chorzepa, M, Hamid, H, Durham, S y Kim, S	Bakera, A y Alexander, M
Titulo	Propiedades físicas - mecánicas del hormigón estructural con sustitución del cemento por metacaolín y ceniza volante	Comportamiento físico-mecánico y permeabilidad a cloruros en el hormigón hidráulico con adiciones de metacaolín.	Evaluación de material cementante basado en metacaolín con activación de alcalina	Materiales sostenibles para infraestructuras de transporte: comparación de tres productos de metacaolín disponibles en el mercado en sistemas cementantes binarios	Uso del metacaolín como material cementante suplementario en el hormigón. Con especial atención a las propiedades de durabilidad
Muestra	Consideran una muestra conformada por un total de 90 probetas cilíndricas y vigas de hormigón seleccionadas y adicionadas con metacaolín y ceniza volante en un 0%, 5 %, 10% y 15% de sustitución por cemento.	Consideran una muestra de 145 dados de hormigón de (50 mm x 50 mm x 50 mm), adicionadas con metacaolín a razón del 10%, 20% y 30% de reemplazo de cemento hidráulico por metacaolín y dados de hormigón con 0% de adición. Para ensayos a los 7, 14 y 28 días.	Consideran una total de 45 muestras, las cuales 18 probetas son de hormigón de 20 cm x 10 cm de hormigón, 18 vigas de hormigón de 15 cm x 15 cm x 52 cm y 9 cubos de mortero de 5 cm x 5 cm x 5 cm, ensayados a las edades de 7, 14, 28 días, el metacaolín sustituyo al cemento en peso en el diseño de mezcla.	Consideran un total de 80 muestras, las cuales 12 pertenecen probetas cilíndricas de hormigón de 200 mm x 100 mm de hormigón para ensayo a compresión y tracción 1, 7, y 28 días, 60 cubos de mortero de 50 mm x 50 mm x 50 mm, ensayados a las edades de 1,14,21,28,56,91,105,112,126 y 168 días y 9 barras de mortero de 25 mm x 25 mm x 280 mm a las edades de 1,5 y 9 días. El porcentaje de sustitución fue del 10%, 15% y 20%.	Considera un total de 60 muestras elaboradas con 0%, 10%, 15%, 20% de metacaolín y 50% GGCS a diferentes relaciones (agua/ cemento) de 0.4, 0.5 y 0.6 respectivamente par a ensayos de probetas cilíndricas y prismáticas a la a los 28, 56 y 90 días.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

##### 4.6.1. Técnicas de investigación

Los procedimientos a emplear para la investigación fueron a través de una previa recolección de datos confiables de pruebas y ensayos realizados por los autores citados y sus respectivas normas nacionales e internacionales, esta información recolectada permitió evaluar y analizar las condiciones del hormigón dosificado con metacaolín.

##### 4.6.2. Descripción de instrumentos

Se realizó un análisis documental por lo tanto los instrumentos de recolección de datos fueron los formatos de las diferentes pruebas físicas realizados en laboratorios de los autores citados.

##### 4.6.3. Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos utilizados son los ensayos y formatos de tablas donde se analizó la influencia del metacaolín como sustituto del cemento en los hormigones hechos por los autores citados.

##### 4.6.4. Procesamiento y análisis de los resultados

Para el procesamiento de los datos se usó el software Microsoft Office, para la interpretación de datos obtenidos se dispuso de tablas personalizadas y gráficos estadísticos de barras horizontales y verticales.

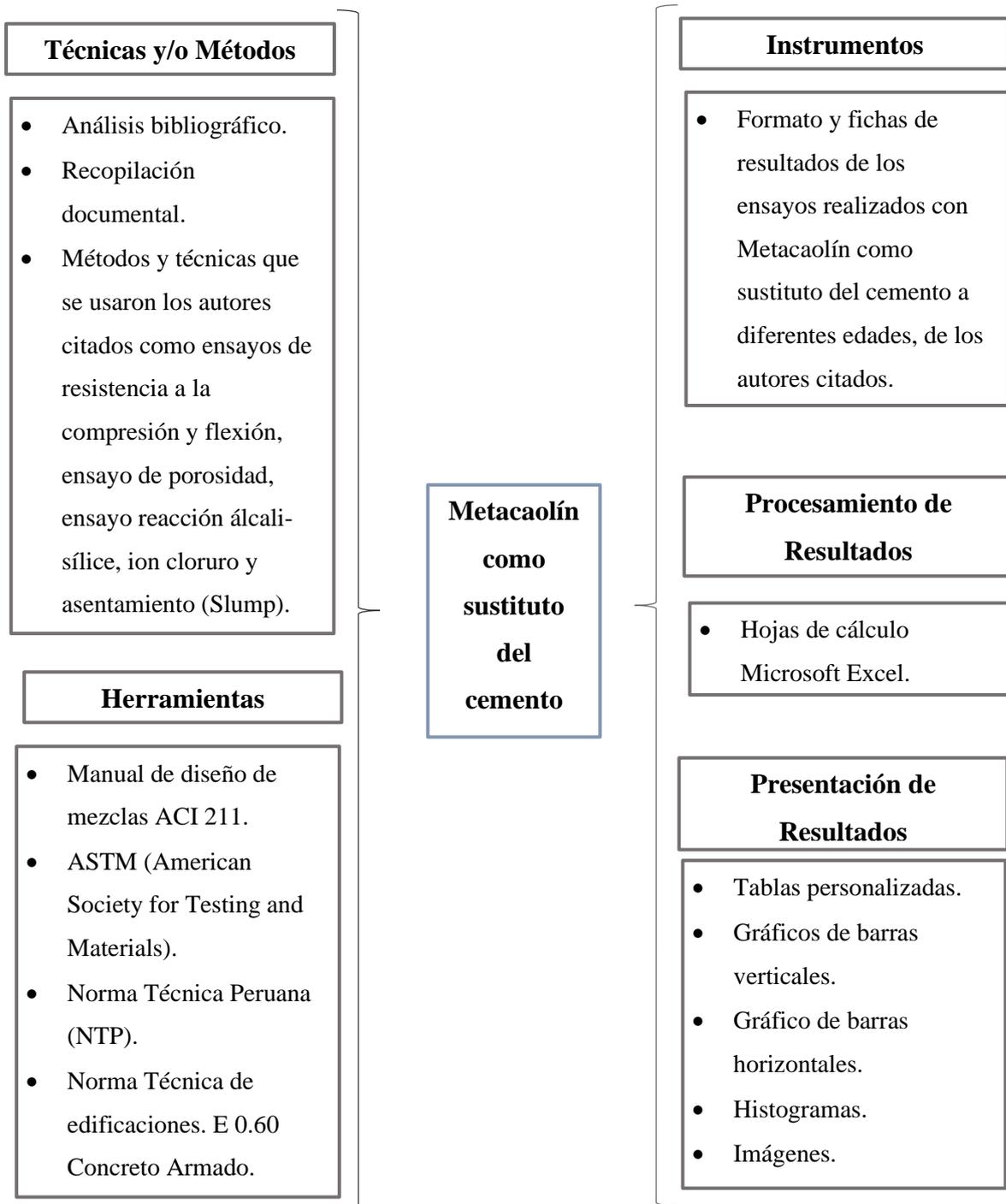


Figura N 5: Métodos y técnicas de investigación.  
Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO V: ASPECTOS ADMINISTRATIVOS

### 5.1. Cronograma de actividades

A Continuación, se muestra en la Tabla N°10, el cronograma de actividades que se desarrollaron durante todo el trabajo de investigación, el cual inició el mes de mayo y término con la sustentación el mes de noviembre.

Tabla N°10  
Cronograma de actividades para la elaboración de tesis.

ACTIVIDADES	SEMANA S	MESES
1 Elección del tema	1	
2 Definición del problema	1	
4 Corrección del proyecto	2	
5 Aprobación del proyecto	2	
6 elaboración del capítulo I, II, III, IV y V	3 al 7	
12 Revisión de bibliografía y capítulos I-V	8	
14 1era. revisión Turnitin	9	
13 1era. corrección de tesis	9 y 10	
15 Elaboración del capítulo VI	11 al 15	
16 Elaboración de conclusiones, recomendaciones y discusiones	16 y 17	
11 Revisión de los capítulos I al VI	17	
17 2da. revisión Turnitin	18	
18 2da. corrección de tesis	19 y 20	
19 Aprobación de tesis	21 y 22	
20 Sustentación	23 al 28	

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2. Asignación de recursos

Las siguientes Tabla N°11 y Tabla N°12 contienen los elementos más importantes, ya que son los recursos necesarios para que todo el componente indicado en la metodología de investigación se lleve a buen culmino y replicado si es necesario para futuras investigaciones.

Tabla N°11  
Talento humano.

Apellidos y Nombre	Título	Función
Dr. Ing. Chavarry Vallejos, Carlo Magno	Metodólogo	Dar las pautas correctas mediante sus conocimientos y experiencia para la elaboración de un plan de tesis de forma exitosa.
Mg. Ing. Chavarría Reyes, Liliana `Janet.	Asesora	Dar las pautas correctas mediante sus conocimientos y experiencia para la finalización de la tesis de forma exitosa.
Apaza Palacios, Crhistian Enrique.	Bachiller	Autor de la tesis
Mallqui Ramírez, Cesar Enrique.	Bachiller	Autor de la tesis

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°12  
Recursos, materiales y equipos.

Ítem	Unidad	Cantidad
Computadora	und	2
Impresora	und	1

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3. Presupuesto

A continuación, se muestra el presupuesto que se implementó durante el desarrollo de la investigación como se indica en la Tabla N°13.

Tabla N°13  
Presupuesto de la investigación.

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
<b>1</b>	<b>trabajos</b>				
1.01	Materiales de oficina				
1.01.01	Hojas Bond A4	Paquete	2	16.00	32.00
1.01.02	Files	Unidad	10	1.00	100.00
1.01.03	Faster	Unidad	10	0.80	8.00
1.01.04	Correctores, lapiceros	Unidad	4	100	400.00
1.02	Materiales de impresión				
1.02.01	Fotocopias	Global	1	800.00	800.00
1.02.01	Impresiones y escaneos	Global	1	1000.00	1000.00
1.02.01	Anillados	Unidad	6	50.00	300.00
<b>2</b>	<b>trabajos en gabinete</b>				
2.01	Movilidad Carnet visitante	Mes	7	300.00	2100.00
2.02	biblioteca	Unidad	2	350.00	700.00
				<b>Total</b>	<b>5800.00</b>

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4. Financiamiento

El financiamiento fue cubierto totalmente por parte de los integrantes que desarrollaron esta investigación.

## **CAPÍTULO VI: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### 6.1. Presentación de resultados

El metacaolín como sustituto porcentual cemento, presenta diferentes comportamientos, que dependen de diferentes factores: el tipo de metacaolín utilizado, el tipo de cemento, relación a/c, tipo de agregados, entre otros, por ellos, en esta investigación presentamos una recopilación de artículos científicos y tesis que evidencian diferentes comportamientos ante la variación en porcentaje de metacaolín en la mezcla. Los ensayos realizados por las diferentes investigaciones con las cuales se va a desarrollar este capítulo son tanto de carácter nacional, como internacional, con el fin de mostrar resultados significativos y así poder tener una información más confiable ante las diferentes situaciones en las que son efectuados estos ensayos.

Sharma et al. (2019)

- Tipo de cemento: Cemento Portland Ordinario, según la Norma IS8112 (2013).
- Agregado fino: Arena del rio Kharka-India, según la IS383 (2016).
- Agregado grueso: Proveedor local gradación según la Norma IS383 (2016).
- Tipo de Metacaolín: El metacaolín es del proveedor local de Kharka-India.
- Tipo de Lodo de Granito: Del vertedero de Udupair y Rajasthan- India.
- Contenido de mezcla: Se llevó a cabo la preparación de mezclas de hormigón con dos tipos de sustitutos (metacaolín y lodo de granito), el cemento, agregado fino, agregado grueso, metacaolín y lodo de granito con una gravedad específica de 3.12, 2.71, 2.80, 2.42 y 2.35 respectivamente, con una relación agua/c de 0.40 para todas las mezclas.
- Ensayo de resistencia a la compresión: Para este ensayo se elaboraron varias muestras cubicas de hormigón normal de 150 mm x 150 mm x 150 mm, según Norma IS 516 (1959), al 5 % y 10% de metacaolín como sustituto del cemento para roturas a los 7,14 y 28 días de curado, como se observa en la Tabla N° 14.

Tabla N°14

Ensayo de resistencia a la compresión a los 7,14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5% y 10% con relación a/c 0.40.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de Metacaolín	Ensayo de resistencia a la compresión (Kg/cm <sup>2</sup> )		
		7 días	14 días	28 días
CC	0	237	275	304
GOM5	5	277	325	355
GOM10	10	307	357	394

Fuente: Elaboración propia.

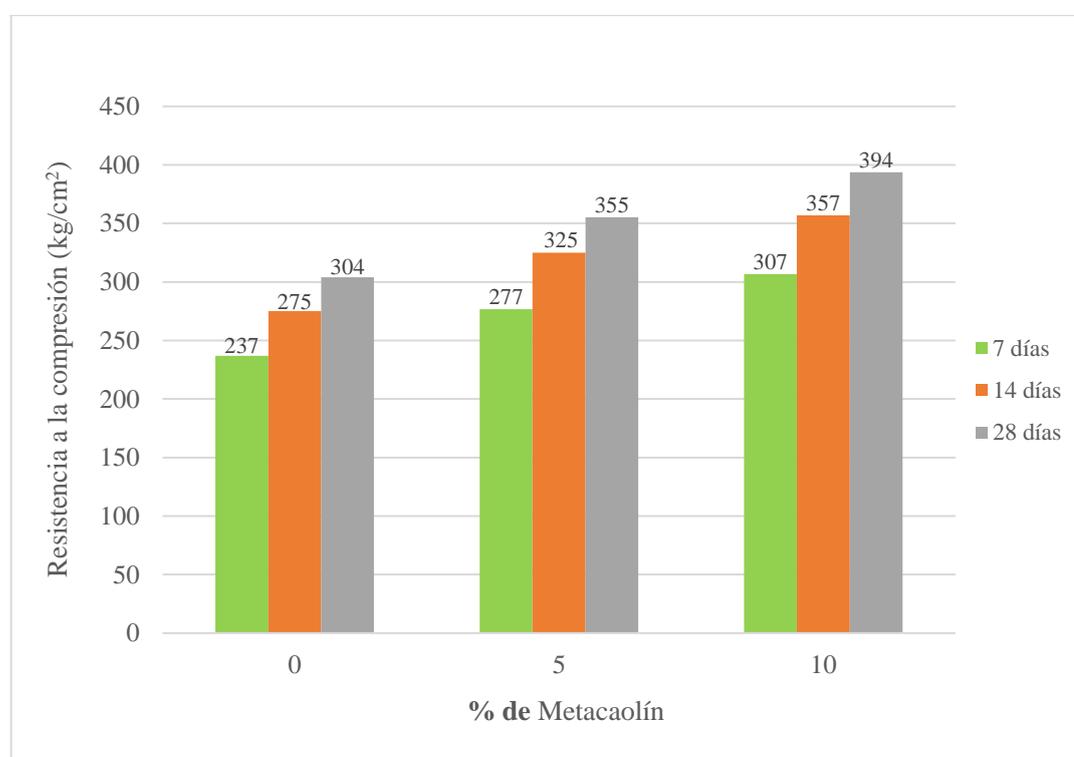


Figura N 6: Resultado del ensayo a la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.40.

Fuente: Elaboración propia.

- Ensayo de resistencia a la flexión: Para este ensayo se elaboraron vigas de hormigón normal (mezcla patrón) de 100 mm x 100 mm x 500 mm, según Norma IS 516 (1959), al 5% y 10% de metacaolín como sustituto en peso del cemento para roturas a los 7,14 y 28 días para el ensayo a la flexión. Los resultados de los ensayos experimentales se muestran en la Tabla N°15.

Tabla N°15

Ensayo de resistencia a la flexión a los 7,14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5% y 10% con relación a/c de 0.40.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de Metacaolín	Ensayo de resistencia a la flexión (Kg/cm <sup>2</sup> )		
		7 días	14 días	28 días
CC	0	36	37	46
G0M5	5	39	41	50
G0M10	10	50	53	64

Fuente: Elaboración propia.

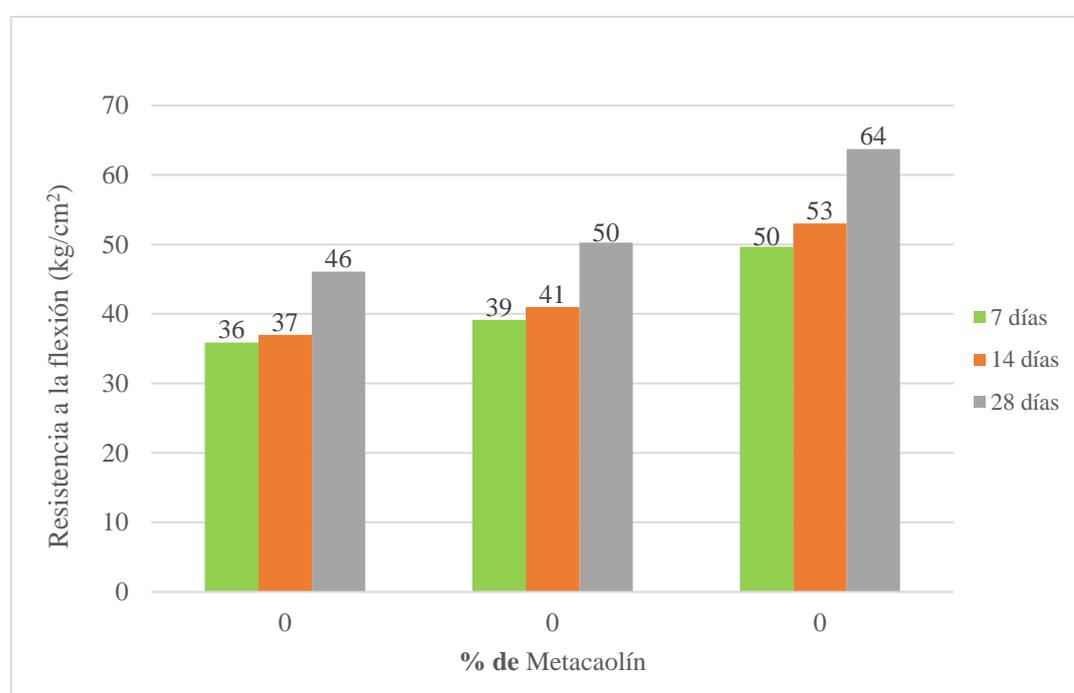


Figura N 7: Resultados del ensayo de resistencia a la flexión a los 7, 14 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.40

Fuente: Elaboración propia.

- Prueba de asentamiento: En esta prueba se determinó la trabajabilidad del hormigón, según la norma IS 1199 (1959). Para diferentes mezclas sin sustitución (Mezcla patrón) y con sustitución al 5% y 10% de metacaolín y lechada de granito como sustituto en peso del cemento junto y por separado para ver la influencia de estos materiales en el comportamiento de la trabajabilidad del hormigón. Los resultados de los ensayos experimentales se muestran en la Tabla N°16.

Tabla N°16

Ensayo de asentamiento para medir la trabajabilidad del hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5% y 10% con una relación a/c de 0.40.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de metacaolín	Asentamiento (mm)	Relación (a/c)
CC	0	60	
G0M5	5	55	0.40
G0M10	10	45	

Fuente: Elaboración propia.

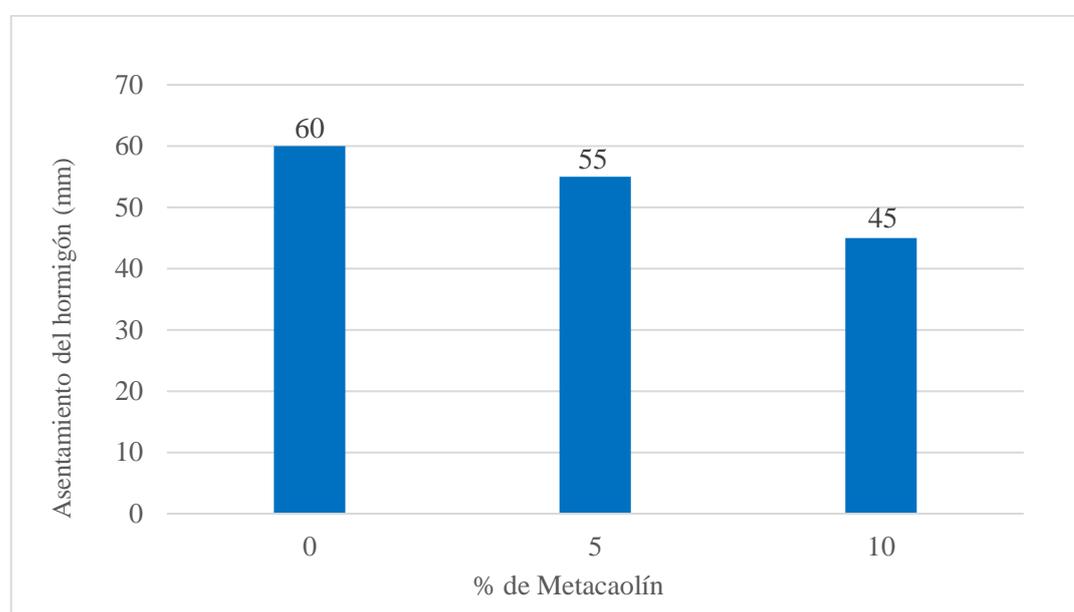


Figura N 8: Resultados del ensayo de asentamiento vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.40.

Fuente: Elaboración propia.

Jin et al. (2017)

- Tipo de cemento: Cemento Portland Ordinario, según la Norma GB175 (2017).
- Agregado fino: Arena natural del rio Jaipur Banas, según la IS 383 (2016).
- Agregado grueso: Piedra local natural de canteras, Norma IS383 (2016).
- Tipo de Metacaolín: El metacaolín es del proveedor local.
- Tipo de Ganga de Carbón: Se recogieron de la mina de carbón de Fuxin.
- Contenido de mezcla: Se llevó a cabo la preparación de mezclas de hormigón con dos tipos de sustitutos (metacaolín y ganga de carbón), el cemento, agregado fino, agregado grueso, metacaolín y la ganga de carbón con una

densidad de 3.18, 2.86, 2.66, 2.67 y 2.35 respectivamente, con una relación agua/cemento de 0.40 y 0.55 para todas las mezclas.

- Ensayo de resistencia a la compresión: Para este ensayo se elaboraron varias muestras de hormigón normal según Norma GB/T50081 (2019), al 5%, 10% y 20% de metacaolín como sustituto del peso del cemento para roturas a los 3,7, 14 y 28 días para el ensayo a la compresión. a continuación, se presentan los resultados de los ensayos experimentales, se muestra en la Tabla N°17.

Tabla N°17

Ensayo de resistencia a la compresión a los 3, 7, 14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%,10% y 20% con relación a/c de 0.55.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de Metacaolín	Ensayo de resistencia a la compresión (Kg/cm <sup>2</sup> )			
		3 días	7 días	14 días	28 días
CG0MK0	0	188	271	307	361
CG0MK5	5	206	291	331	393
CG0MK10	10	219	308	350	424
CG0MK20	20	225	315	361	431

Fuente: Elaboración propia.

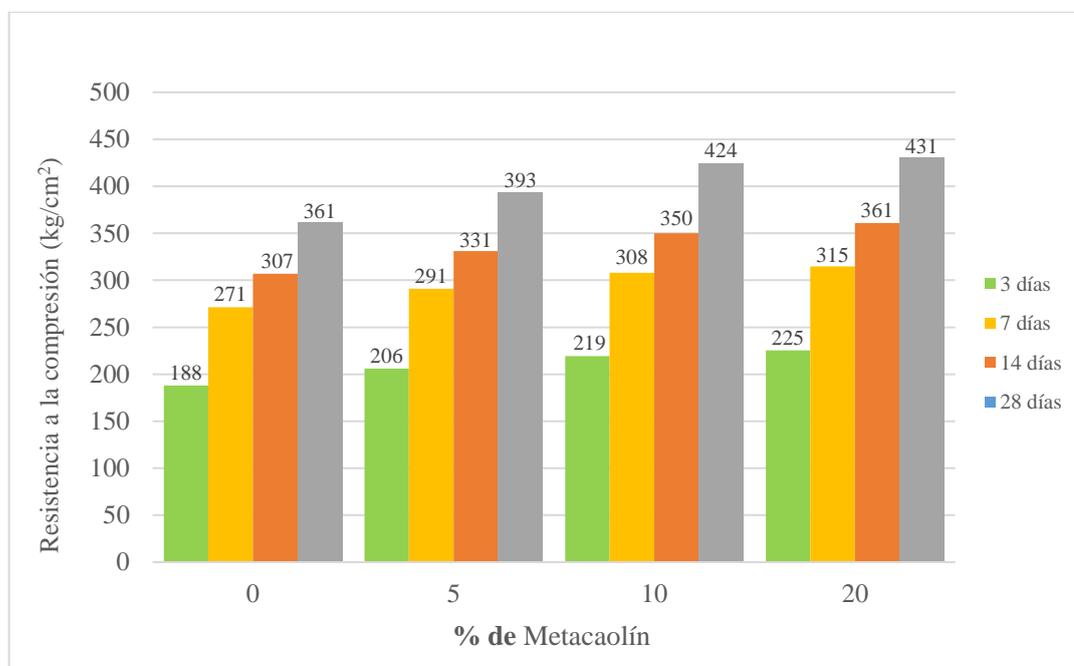


Figura N 9: Resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 3, 7, 14 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.55.

Fuente: Elaboración propia.

- Ensayo de índice de porosidad: Ensayo para determinar la porosidad libre del hormigón, según Norma ASTM C642 (2013), se tuvo una mezcla patrón y otras mezclas al 10% y 20% de metacaolín como sustituto en peso del cemento para ensayos a los 56 días de curado, para una relación constante de a/c de 0.45 y 0.55, adicionalmente se calcularon la porosidad penetrable correspondiente al 5% y 15 % de sustitución de cemento por metacaolín. con el fin de lograr tener una mayor densidad de datos, para lo cual se elaboraron graficas en Excel para este fin, finalmente las sustituciones finales fueron de 5%,10% 15% y 20%, a continuación, se presentan el resultado de los ensayos experimentales en la Tabla N°18.

Tabla N°18

Ensayo de porosidad penetrable a los 56 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10%, 15% y 20% con relación a/c de 0.45 y 0.55.

Nomenclatura de la muestra	% de Metacaolín	Porosidad penetrable (%)	Relación a/c
CG0MK0	0	7.84	
CG0MK5	5	7.50	
CG0MK10	10	7.04	0.45
CG0MK15	15	7.20	
CG0MK20	20	7.43	
CG0MK0	0	16.12	
CG0MK5	5	15.00	
CG0MK10	10	14.09	0.55
CG0MK15	15	14.20	
CG0MK20	20	14.64	

Fuente: Elaboración propia.

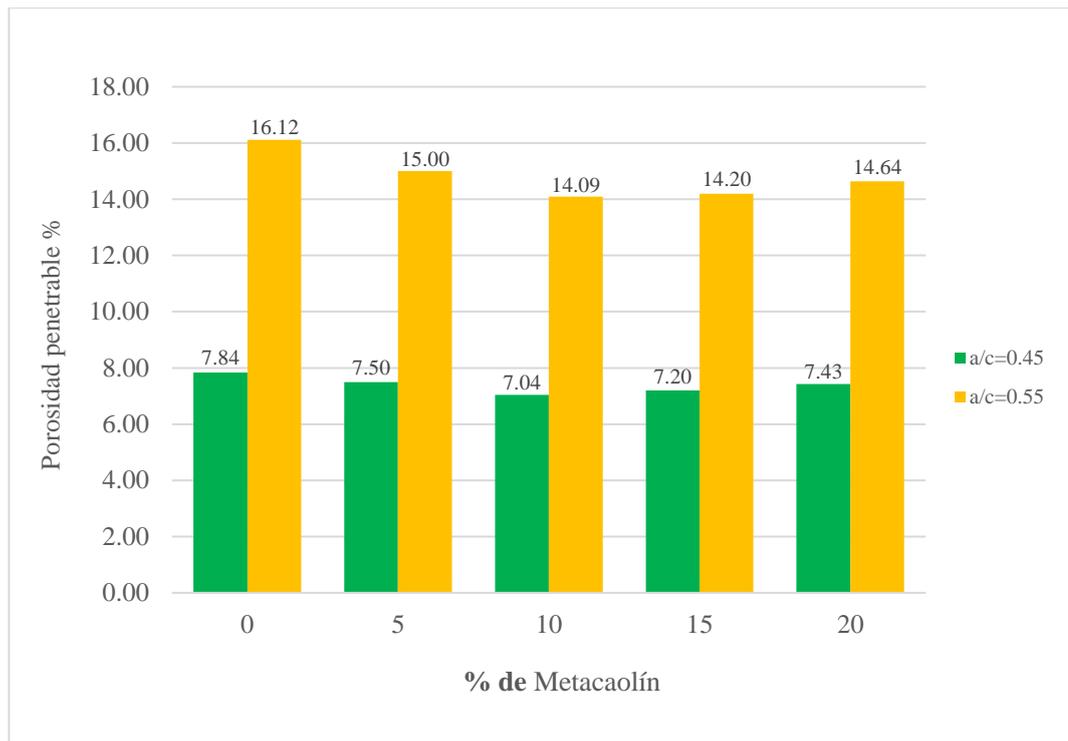


Figura N 10: Resultados de la porosidad penetrable a los 56 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.45 y 0.55.

Fuente: Elaboración propia.

Singh et al. (2022).

- Tipo de cemento: Cemento Portland Ordinario, Marca Ultratec, según la Norma IS269 (2015).
- Agregado fino: Arena natural del rio Jaipur Banas, según la IS 383 (2016).
- Agregado grueso: Piedra local natural de canteras, según la Norma IS383 (2016).
- Tipo de Metacaolín: El metacaolín es del proveedor local.
- Tipo de residuo de construcción (RCA) y destrucción (CYD): Se recogieron de la estación del tren de Ganghinagar y Jaipur.
- Contenido de mezcla: Se llevó a cabo la preparación de mezclas de hormigón con dos tipos de sustitutos (metacaolín, residuos de construcción y destrucción), el cemento, agregado fino, agregado grueso, metacaolín y los residuos de construcción con una gravedad específica 3.11, 2.61, 2.66, 2.67 y 2.48 respectivamente, con una relación a/c de 0.40 para todas las mezclas.
- Ensayo de resistencia a la flexión: Para este ensayo se elaboraron varias vigas de 100 mm x 100 mm x 500 mm de hormigón normal según Norma IS 516 (1959), al 0% y 10% de metacaolín como sustituto al peso del cemento para

roturas a los 7 y 28 días a una relación a/c de 0.4. A continuación se muestra en la Tabla N°19 los resultados del ensayo experimental.

Tabla N°19

Ensayo de resistencia a la flexión a los 7, 14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5% y 10% con relación a/c de 0.40.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de Metacaolín	Ensayo de resistencia a la flexión (Kg/cm <sup>2</sup> )		
		7 días	14 días	28 días
M011	0	34	36	43
M015	5	35	37	45
M021	10	36	39	47

Fuente: Elaboración propia.

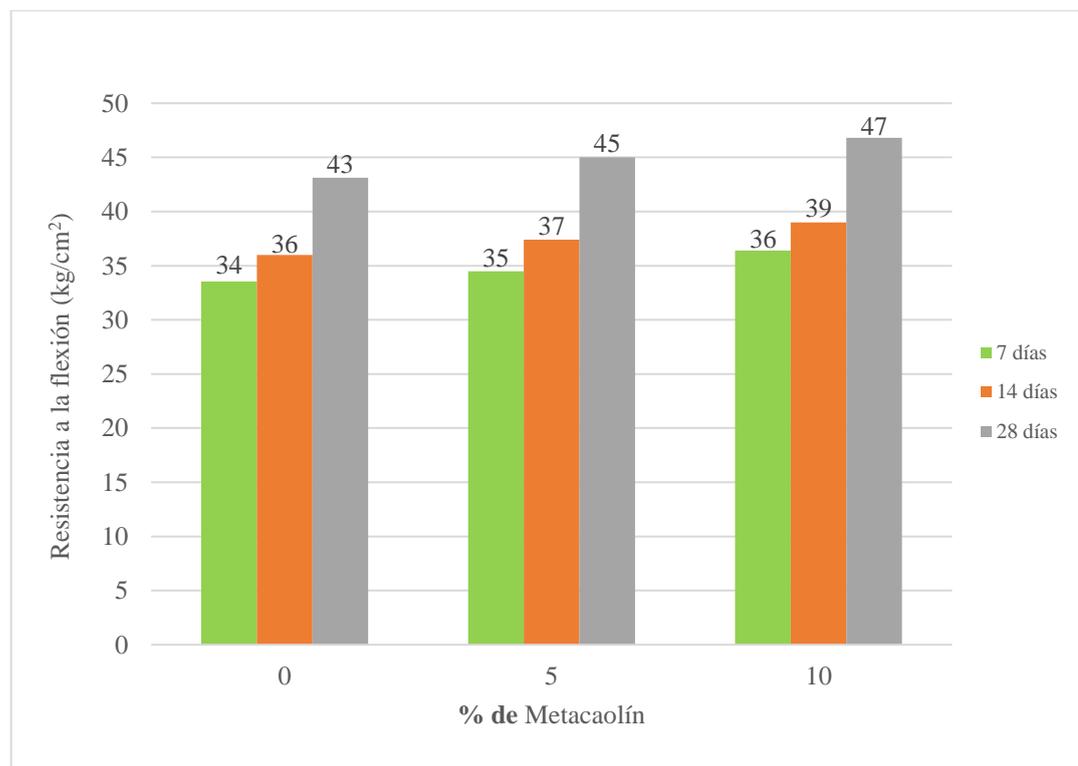


Figura N 11: Resultados del ensayo de resistencia a la flexión a los 7,14 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.40.

Fuente: Elaboración propia.

Menhosh et al. (2019).

- Tipo de cemento: Cemento Portland Calizo CEMII A-LL, 32.5R-EN 197-1 2011.
- Agregado fino: Proveedor Local-TMN 4.57 mm, BS 882-1992.
- Agregado grueso: Piedra Caliza Triturada TMN 14 mm, BS 882-1992.
- Tipo de Metacaolín: Suministrado por IMERYS Performance Mineral.
- Tipo de sustituto Caucho de Estireno Butadieno (SBR): Cementon SBR comercial que fue suministrado por Bostik Limited.
- Contenido de mezcla: Se llevó a cabo la preparación de mezclas de hormigón con dos tipos de sustitutos (metacaolín, caucho de estireno butadieno), el cemento, agregado fino, agregado grueso, metacaolín y los residuos de construcción, con una relación a/c de 0.45 para todas las mezclas.
- Ensayo de resistencia a la flexión: Para este ensayo se diseñaron vigas de 100 mm x 100 mm x 500 mm de hormigón normal según Norma BS EN 12390-5 (2009), al 5%, 10% y 15% de metacaolín como sustituto al peso del cemento para roturas a los 7, 14, 28, 56, 90 y 180 días a una relación a/c de 0.45. A continuación se muestra en la Tabla N°20 los resultados del ensayo experimental:

Tabla N°20

Ensayo de resistencia a la flexión a los 7, 14, 28, 56, 90 y 180 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de metacaolín por cemento al 5%, 10% y 15% con relación a/c de 0.45.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de Metacaolín	Resistencia a la flexión (Kg/cm <sup>2</sup> )					
		7 días	14 días	28 días	56 días	90 días	180 días
Mezcla 1	0	6	15	30	33	41	48
Mezcla 2	5	7	16	31	34	41	49
Mezcla 3	10	7	16	32	35	42	50
Mezcla 4	15	8	17	33	36	42	51

Fuente: Elaboración propia.

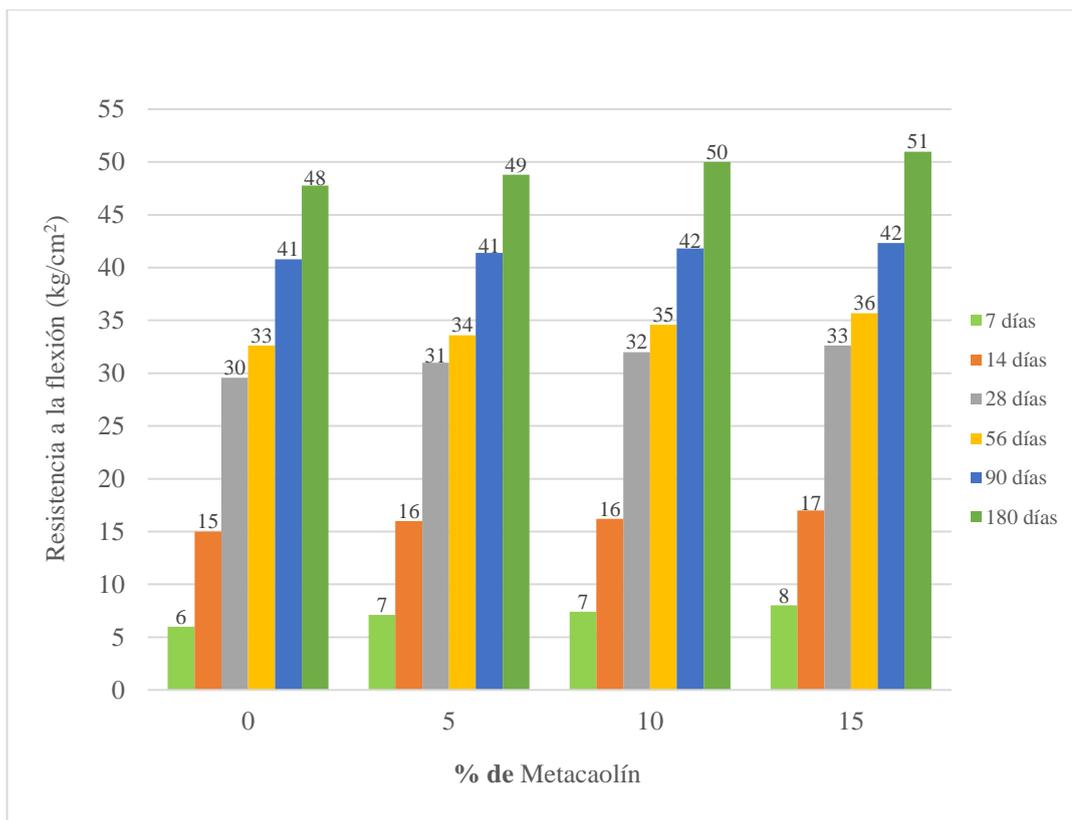


Figura N 12: Resultados del ensayo de resistencia a la flexión a los 7, 14, 28, 56, 90 y 180 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.45.

Fuente: Elaboración propia.

Bakera et al. (2019).

- Tipo de cemento: Cemento Portland Ordinario CEM II/A-L 52,2N y GGCS de PPC cement.
- Agregado fino: Proveedor Local proveniente de arena de duna y arenas de trituración de grava en una proporción de 3:2.
- Ensayos: Sortividad, Permeabilidad, Conductividad y Difusión, mitigación de la ASR y la resistencia a la carbonatación, propiedades que miden la durabilidad del hormigón, adicionalmente se realizaron ensayos de resistencia a la compresión.
- Agregado grueso: Proveedor local (Potencialmente reactivo a los álcalis y a la sílice), se usó agregado grueso de grava con un tamaño máximo de 19 mm.
- Tipo de Metacaolín: Suministrado por IMERYS Performance Mineral.
- Tipo de sustituto Escoria Granulada de núcleo (GGCS): Proveedor local de PPC Cement, la sustitución de este material en las mezclas llego al 50%.
- Contenido de mezcla: Se llevó a cabo la preparación de mezclas de hormigón con dos tipos de sustitutos (metacaolín y escoria granulada de núcleo), el

cemento, agregado fino, agregado grueso, metacaolín y escoria granulada, con una relación a/c de 0.40, 0.50 y 0.6 para todas las mezclas. Los diseños de las mezclas de hormigón y la resistencia a la compresión fueron a los 28 días de curado.

- Ensayo de índice de porosidad permeable: Ensayo para determinar la porosidad del hormigón según Norma SANS 3001 CO-1-2 y el Manual UCT DI (63-65), al 10%,15% y 20% de metacaolín como sustituto en peso del cemento para ensayos a los 56 días de curado, para una relación constante de a/c de 0.40, 0.50 y 0.60, adicionalmente se calcularon la porosidad penetrable al agua correspondiente al 5% de sustitución de cemento por metacaolín, con el fin de lograr tener una mayor densidad de datos y poder correlacionarlos con los demás autores citados en esta investigación, los cálculos fueron realizados en el programa Excel, para finalmente obtener sustituciones al 5%,10% 15%, 20%. A continuación, se muestra en la Tabla N°21 los resultados del ensayo experimental.

Tabla N°21

Ensayo de porosidad penetrable al agua a los 56 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%,10%15% y 20% con una relación a/c de 0.40, 0.50 y 0.60.

Nomenclatura de la muestra	% de Metacaolín	Ensayo de porosidad penetrable (%)		
		a/c=0.40	a/c=0.50	a/c=0.60
0% mk	0	5.20	9.20	10.50
5% mk	5	5.50	8.75	9.80
10% mk	10	5.60	8.30	9.20
15% mk	15	4.23	7.90	8.00
20% mk	20	4.88	6.62	6.40

Fuente: Elaboración propia.

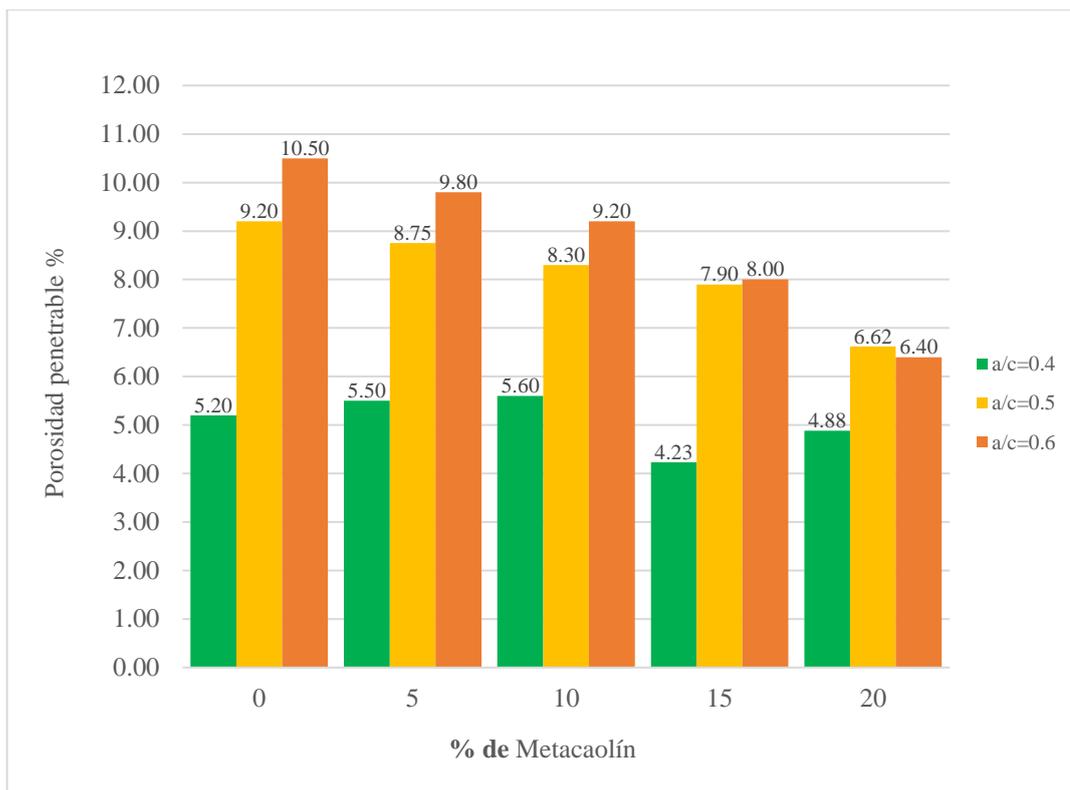


Figura N 13: Resultados de la porosidad penetrable a los 56 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.40, 0.50 y 0.60.

Fuente: Elaboración propia.

- Ensayo de barra de mortero acelerado ASR: Ensayo para determinar la reacción álcali-sílice (ASR) con la barra de mortero acelerado, Norma ASTM C1567-13 y ASTM C1260 se utilizó para determinar el potencial del metacaolín para suprimir la expansión ASR de los áridos de grava, al 10%,15%y 20% de metacaolín como sustituto en peso del cemento para ensayos a los 14 días de curado, para una relación constante de a/c de 0.5, adicionalmente se calcularon la expansión álcali-sílice correspondiente al 5% de sustitución de cemento por metacaolín, con el fin de lograr mayor densidad de datos, los cálculos fueron realizados en el programa Excel, para finalmente obtener sustituciones al 5%,10% 15% y 20%. Donde se observó que la expansión de álcali-sílice disminuyo con el aumento del contenido del metacaolín. A continuación, se muestra en la Tabla N°22, los resultados del ensayo experimental.

Tabla N°22

Prueba de expansión álcali-sílice a los 14 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10%, 15% y 20% con una relación a/c de 0.50.

Nomenclatura de la muestra	% de Metacaolín	Expansión Álcali - Sílice ASR (%)	Relación (a/c)
		14 días	
0% mk	0	0.270	0.50
5% mk	5	0.185	
10% mk	10	0.110	
15% mk	15	0.070	
20% mk	20	0.030	

Fuente: Elaboración propia.

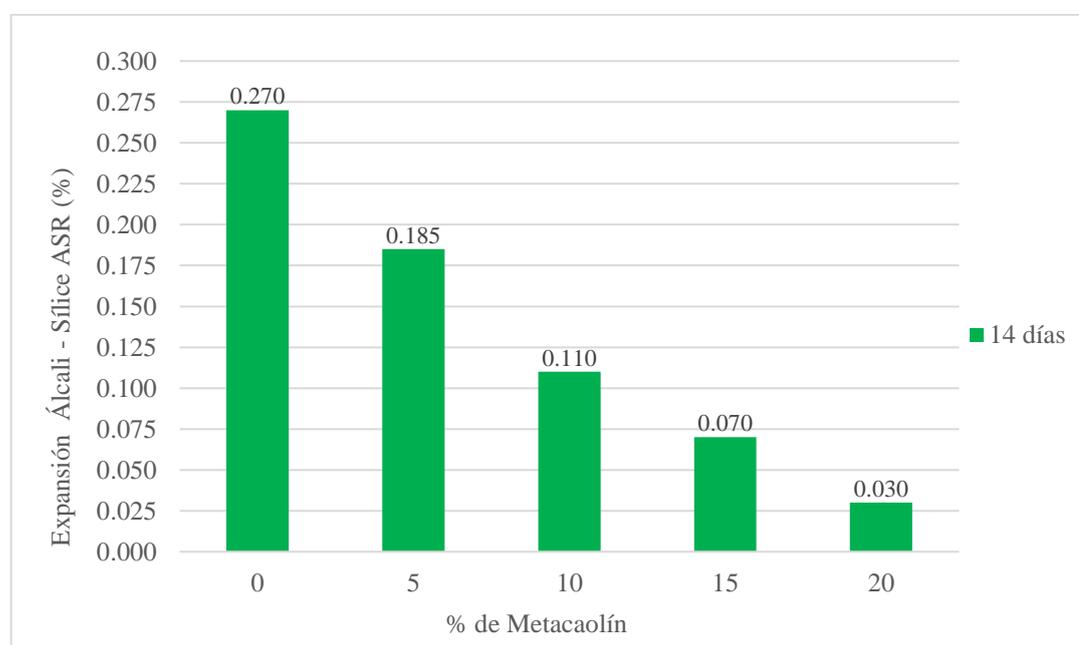


Figura N 14: Resultados de la expansión álcali-sílice a los 14 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.50.

Fuente: Elaboración propia.

Torres (2018).

- Tipo de cemento: Cemento Portland Tipo 1.
- Agregado fino: Arena fina cantera La Carbonera.
- Agregado grueso: Piedra chancada ½". Cantera San Pedrito
- Tipo de Metacaolín: El metacaolín es del proveedor local.
- Tipo de residuo de ladrillo de construcciones.
- Contenido de mezcla: Se llevó a cabo la preparación de mezclas de hormigón con un tipo de sustituto (metacaolín), el cemento, agregado fino, agregado

grueso y con una relación agua/cemento de 0.56 para todas las mezclas.

- Ensayo de resistencia a la compresión: Para este ensayo se elaboraron varias muestras de hormigón mediante probetas con las medidas 150mmx300mm según Norma NTP 339.034 al 5%, 10% y 15% de metacaolín como sustituto del peso del cemento para roturas a los 7,14 y 28 días para el ensayo para todos los ensayos.

Tabla N°23

Ensayo de resistencia a la compresión a los 7,14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%,10 % y 15% con relación a/c de 0.56.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de metacaolín	Ensayo de resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )		
		7 días	14 días	28 días
MK0	0	140	193	219
MK5	5	194	220	222
MK10	10	204	231	232
MK15	15	211	224	224

Fuente: Elaboración propia.

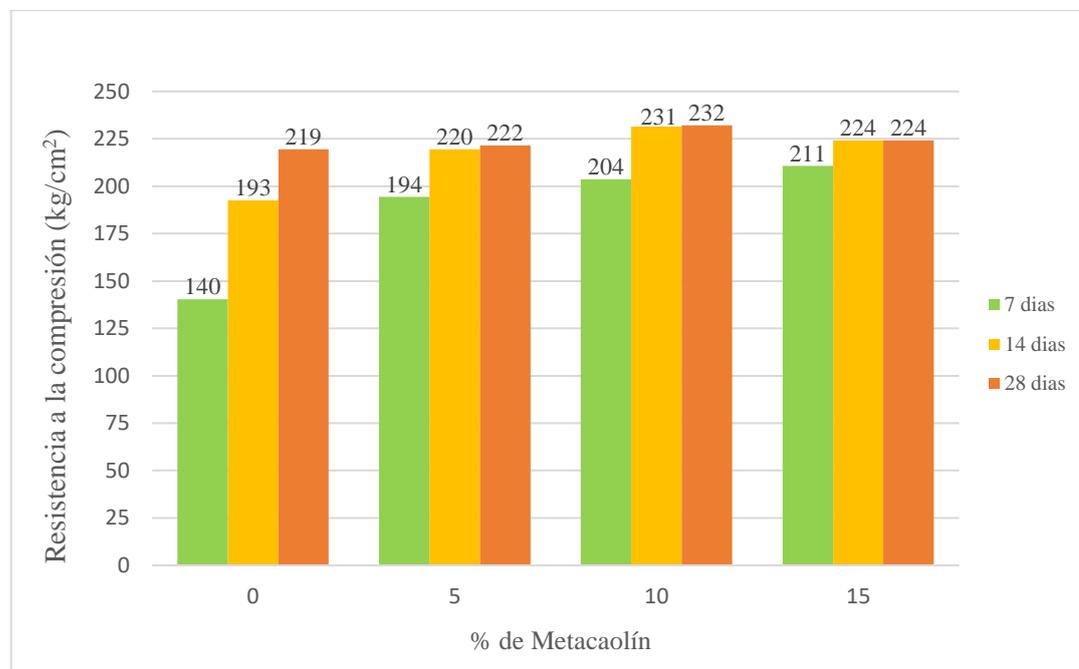


Figura N 15: Resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 7,14 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.56.

Fuente: Elaboración propia.

- Ensayo de resistencia a la flexión: Para este ensayo se elaboraron vigas de hormigón normal de 150 mm x 150 mm x 500 mm, según Norma NTP 339.078 al 5% ,10% y 15% de metacaolín como sustituto en peso del cemento para roturas a los 7,14 y 28 días para el ensayo a la flexión.

Tabla N°24

Ensayo de resistencia a la flexión a los 7,14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%,10 % y 15% con reacción a/c de 0.56.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de metacaolín	Ensayo de resistencia a la flexión (kg/cm <sup>2</sup> )		
		7 días	14 días	28 días
MK0	0	20	21	22
MK5	5	22	23	24
MK10	10	19	21	21
MK15	15	18	20	20

Fuente: Elaboración propia.

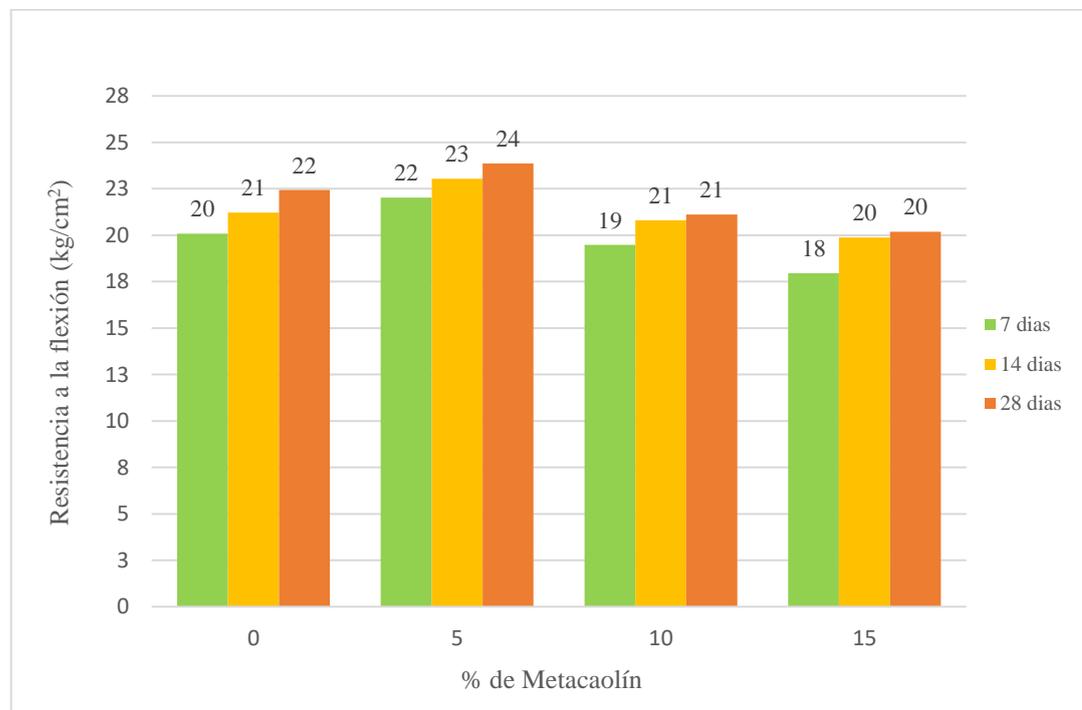


Figura N 16: Resultados del ensayo de resistencia a la flexión a los 7,14 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.56.

Fuente: Elaboración propia.

- Ensayo de asentamiento para el hormigón portland: Para este ensayo se tomó una muestra representativa del hormigón en estado fresco colocándolo en el cono de Abrams, según Norma NTP 339.035 al 5% ,10% y 15% de metacaolín como sustituto en peso del cemento.

Tabla N°25

Ensayo de asentamiento para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%,10 % y 15% con relación a/c de 0.56.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de metacaolín	Asentamiento (mm)	Relación a/c
MK0	0	109	0.56
MK5	5	94	
MK10	10	84	
MK15	15	71	

Fuente: Elaboración propia.

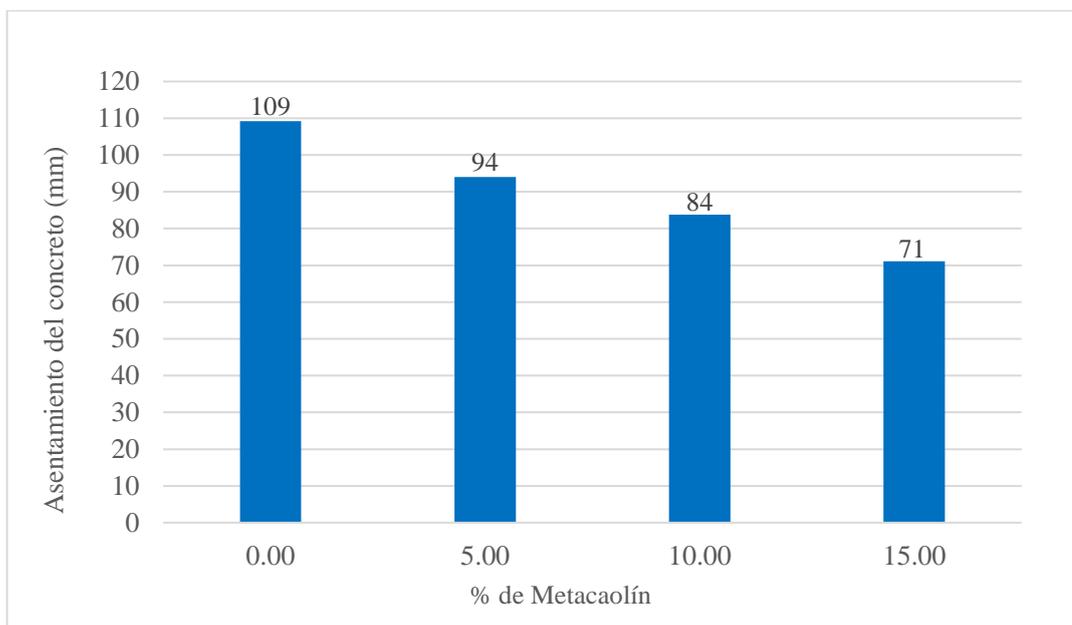


Figura N 17: Resultados del ensayo de asentamiento vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c 0.56.

Fuente: Elaboración propia.

Parrales y Quirumbay (2022)

- Tipo de cemento: Cemento Portland Ordinario HOLCIM GU / NTE INEN 2380.

- Agregado fino: Arena natural extraída del Cantón Milagro.
- Agregado grueso: Proveedor local de la cantera Calizas huayco S.A - Guayaquil-TMN 25.4 (mm).
- Tipo de Metacaolín: KaMin® 70C de uso industrial, procedencia de EE.UU.
- Contenido de mezcla: Se llevó a cabo la preparación de mezclas de hormigón con sustituciones porcentuales de cemento por metacaolín al 5%, 10%, 15% y 20%, según la norma.
- Ensayo de resistencia a la compresión: Para este ensayo se elaboraron varias muestras de hormigón normal, forma tipo cilíndrica de dimensiones 150 mm x 300 mm, al 5%, 10%, 15% y 20% de metacaolín como sustituto del peso del cemento para roturas a los 7, 14, 21 y 28 días para el ensayo a la compresión según norma NTE INEN 1573 para el diseño de mezcla se empleó el ACI-211.1, la relación a/c fue de 0.59, constante en todas la mezclas de hormigón para un diseño patrón de 210 kg/cm<sup>2</sup>. como se muestra en la Tabla N° 26.

Tabla N°26

Ensayo de resistencia a la compresión a los 7,14, 21 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10%, 15% y 20% con relación a/c de 0.59.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de Metacaolín	Ensayo de resistencia a la compresión (Kg/cm <sup>2</sup> )			
		7 días	14 días	21 días	28 días
0%MK	0	141	195	205	216
5%MK	5	148	210	217	225
10%MK	10	144	204	212	220
15%MK	15	135	183	197	210
20%MK	20	127	174	188	203

Fuente: Elaboración propia.

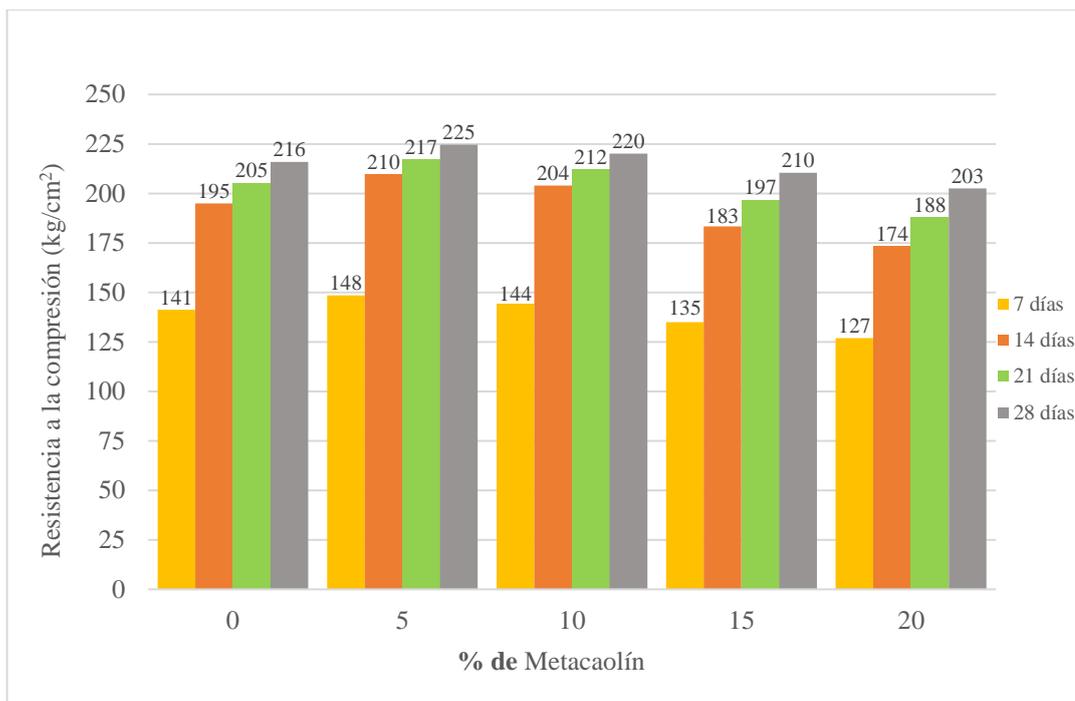


Figura N 18: Resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 7, 14, 21 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.59. Fuente: Elaboración propia.

Chand et al. (2022).

- Tipo de cemento: Cemento Portland Ordinario grado 43.
- Agregado fino: Arena natural de río.
- Agregado grueso: Caliza triturada.
- Tipo de Metacaolín: El metacaolín es del proveedor local.
- Contenido de mezcla: Se llevó a cabo la preparación de mezclas de hormigón con varios tipos de sustituto del cemento como metacaolín (15%), humo de sílice (10%) y piedra pómez (30%). El agregado fino y grueso tienen una gravedad específica de 2.64 y 2.3 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. Las sustituciones como el metacaolín, humo de sílice y polvo de piedra pómez tienen una gravedad específica de 2.54, 2.31 y 2.7 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. La relación agua/cemento fue de 0.44 para todas las mezclas.
- Ensayo de asentamiento para el hormigón portland: Para este ensayo se tomó una muestra representativa del hormigón en estado fresco colocándolo en el cono de Abrams, según Norma IS 1199 (1959), al 5%, 10% y 15% de metacaolín como sustituto en peso del cemento, con una relación a/c constante de 0.44.

Tabla N°27

Ensayo de asentamiento para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%,10 % y 15% con relación a/c de 0.44.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de Metacaolín	Asentamiento	Relación (a/c)
		(mm)	
CM	0	106	0.44
MK5	5	95	
MK10	10	82	
TRAMC	15	72	

Fuente: Elaboración propia.

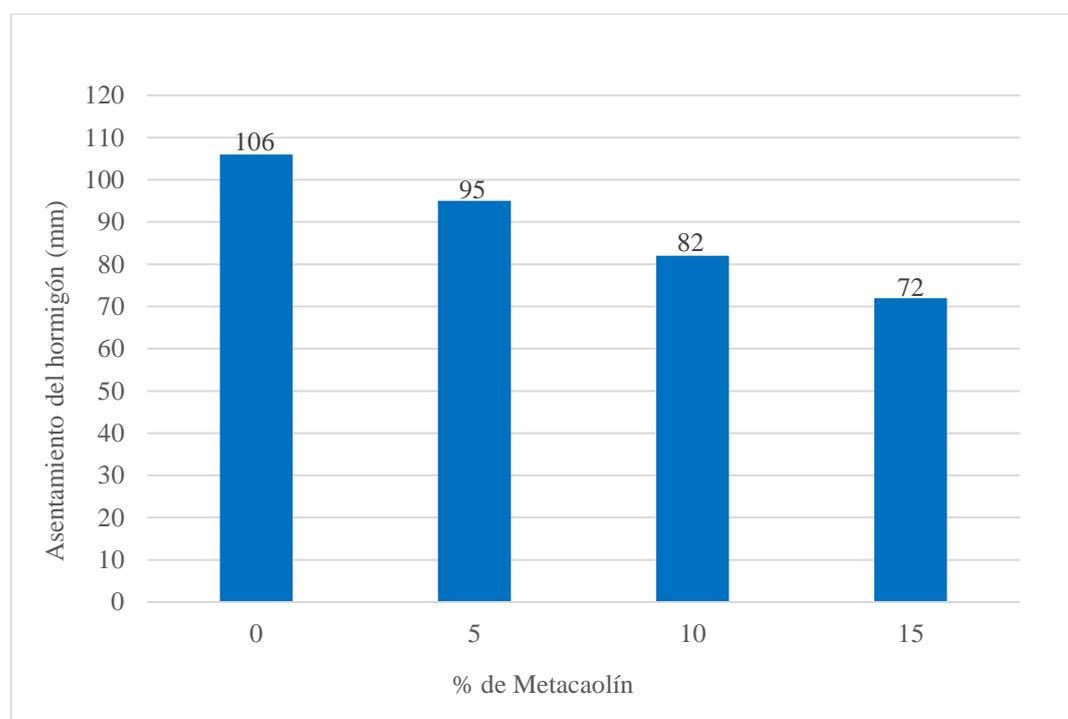


Figura N 19: Resultados del ensayo de asentamiento vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.44.

Fuente: Elaboración propia.

Reddy y Karthik (2019).

- Tipo de cemento: Cemento Portland Ordinario grado 53.
- Agregado fino: Arena natural de río.
- Agregado grueso: Piedra triturada.
- Tipo de Metacaolín: El metacaolín es del proveedor ASTRA CHEMICALS.

- Contenido de mezcla: Se llevó a cabo la preparación de mezclas de hormigón con un tipo de sustituto del cemento como metacaolín. El agregado fino y grueso tienen una gravedad específica de  $2.63 \text{ kg/m}^3$  y  $2.60 \text{ kg/m}^3$  respectivamente. Las sustituciones como el metacaolín tiene una gravedad específica de  $2.5 \text{ kg/m}^3$ , la relación a/c fue de 0.43 para todas las mezclas de hormigón.
- Método de ensayo de resistencia a la compresión: Para este ensayo se elaboraron varias muestras de hormigón sin adición y al 10%,20%,30%,40% y 50% de metacaolín como sustituto del peso del cemento para roturas a los 7,14 y 28 días para el ensayo a la compresión según la norma IS 516-1959. Adicionalmente se calculó el 5% de sustitución de cemento por metacaolín con la finalidad de obtener una mayor densidad de toma de datos, los cálculos fueron realizados en el programa Excel, para finalmente obtener sustituciones al 5%,10%,20%,30%,40% y 50%.

Tabla N°28

Ensayo de resistencia a la compresión a los 7,14 y 28 días para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%,10%,20%,30%,40% y 50% con relación a/c de 0.43.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de Metacaolín	Ensayo de resistencia a la compresión (Kg/cm <sup>2</sup> )		
		7 días	14días	28 días
MQ0	0	265	367	398
MQ05	5	278	382	410
MQ1	10	288	398	419
MQ2	20	311	430	447
MQ3	30	238	329	368
MQ4	40	195	270	329
MQ5	50	172	239	310

Fuente: Elaboración propia.

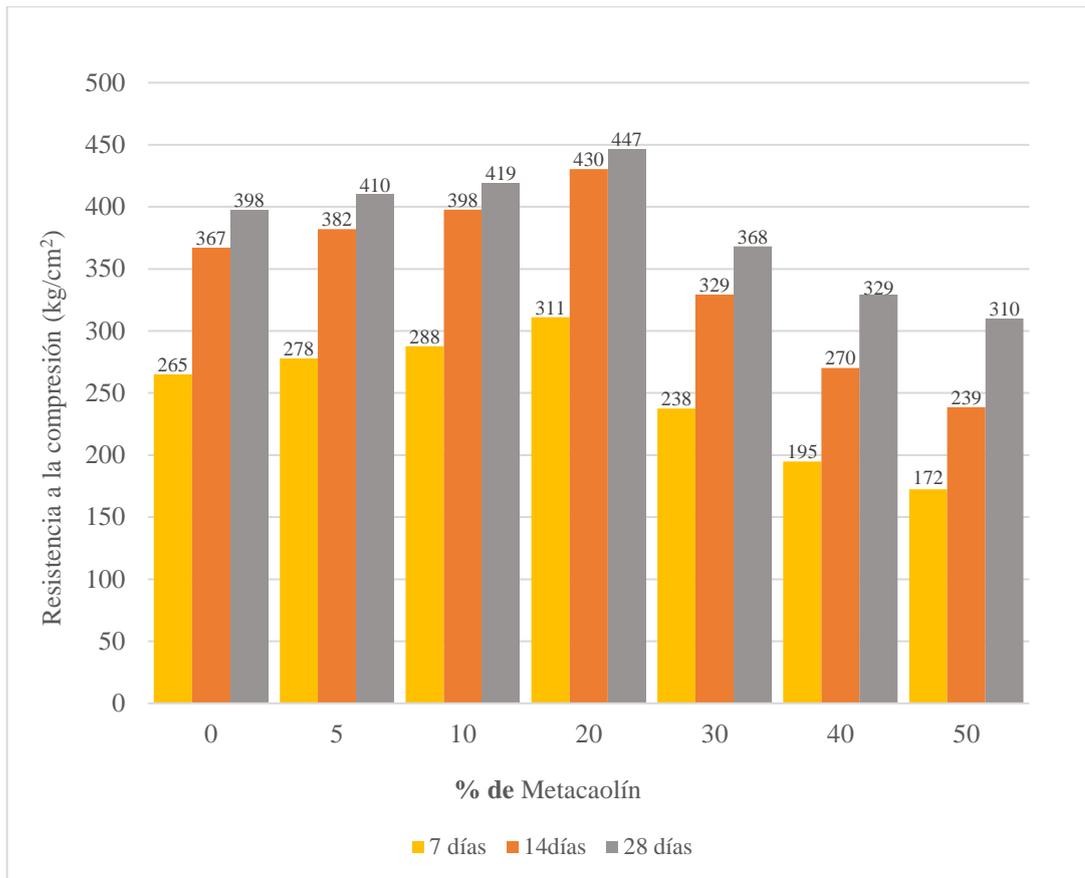


Figura N 20: Resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 7,14 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.43.  
Fuente: Elaboración propia.

- Ensayo de resistencia a la flexión: Para este ensayo se elaboraron muestras, según Norma IS 516 (1959), al 10%, 20%, 30%, 40% y 50% de metacaolín como sustituto en peso del cemento para roturas a los 7,14 y 28 días de curado para el ensayo de resistencia a la flexión. Adicionalmente con los datos obtenidos en esta investigación, se calculó la resistencia a la flexión el 5% de sustitución de cemento por metacaolín a los 7, 14 y 28 días de curado, con la finalidad de obtener una mayor densidad de toma de datos, los cálculos fueron realizados en el programa Excel, finalmente se trabajó con sustituciones del 5%,10%,20%,30%,40% y 50%, para una relación a/c constante de 0.43, como se observar en la Tabla N° 29

Tabla N° 29

Ensayo de resistencia a la flexión a los 7,14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%,10%,20%,30%,40% y 50% con relación a/c de 0.43.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de Metacaolín	Ensayo de resistencia a la flexión (Kg/cm <sup>2</sup> )		
		7 días	14 días	28 días
K0	0	30	42	46
K05	5	31	43	47
K1	10	32	44	48
K2	20	33	46	51
K3	30	30	41	45
K4	40	29	40	44
K5	50	25	36	40

Fuente: Elaboración propia.

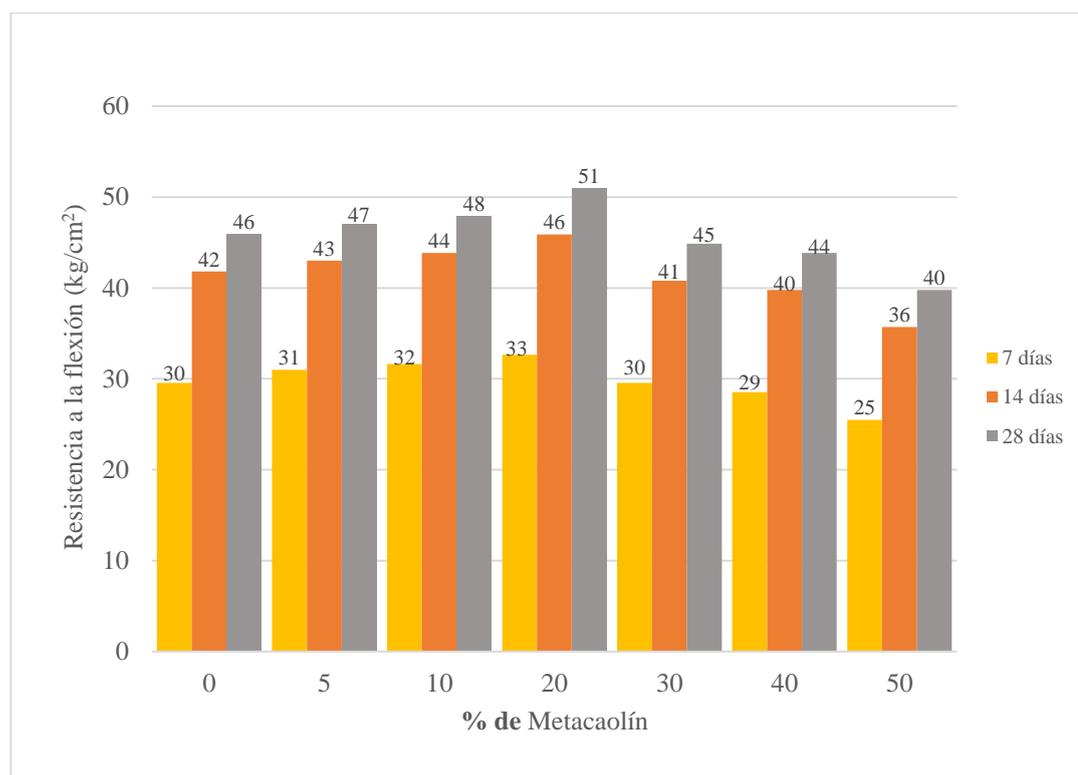


Figura N 21: Resultados del ensayo de resistencia a la flexión a los 7,14 y 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.43.

Fuente: Elaboración propia.

Oleiwi et al. (2021).

- Tipo de cemento: Cemento Portland Tipo 1.
- Agregado fino: Arena natural de río.
- Agregado grueso: Piedra triturada
- Tipo de Metacaolín: Suministrado por proveedor local.
- Tipo de sustituto Resina de estireno butadieno: Proveedor local
- Tipo de sustituto Acetato de polivinilo: Proveedor local
- Contenido de mezcla: Se llevó a cabo la preparación de mezclas de hormigón con tres tipos de sustitutos (metacaolín, resina de estireno butadieno y acetato de polivinilo), el cemento, agregado fino, agregado grueso, metacaolín y escoria granulada, con una relación a/c de 0.45 para todas las mezclas.
- Ensayo de índice de vacíos: Para este ensayo se diseñaron cubos de 100 mm x 100 mm x 100 mm de hormigón normal según Norma ASTM C642 (2013) al 5%, 10% y 15% de metacaolín como sustituto al peso del cemento para roturas a los 56 días con una relación a/c de 0.45 para todas las mezclas.

Tabla N°30

Ensayo de porosidad al agua a los 56 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10% y 15% con una relación a/c de 0.45.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de Metacaolín	Porosidad penetrable (%)
		56 días
Mezcla 1	0	2.95
Mezcla 1A	5	2.90
Mezcla 1B	10	2.85
Mezcla 2	15	2.80

Fuente: Elaboración propia.

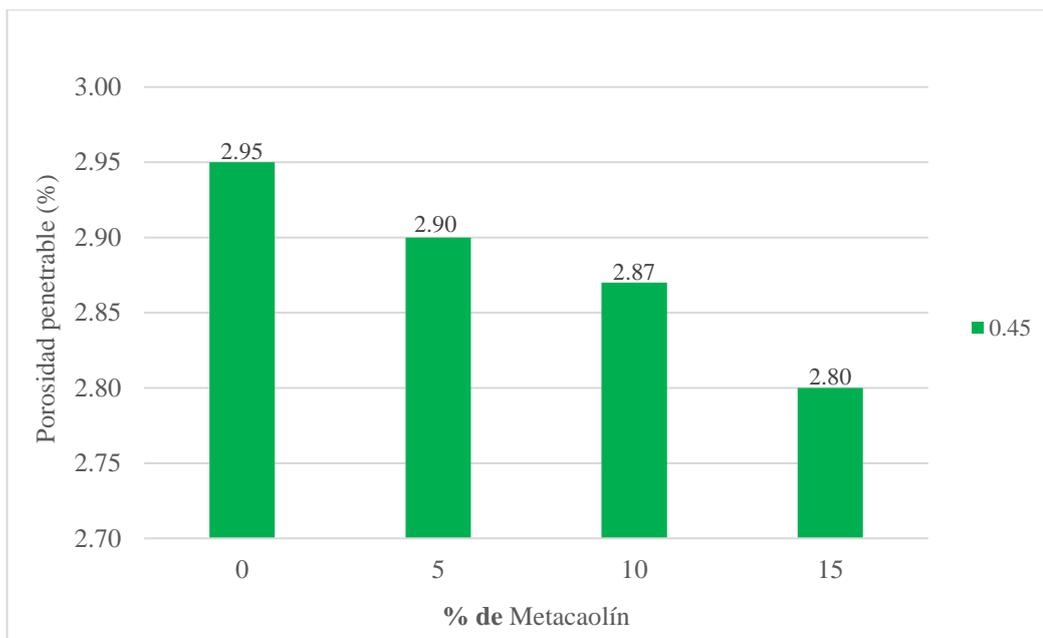


Figura N 22: Resultados de la porosidad penetrable a los 56 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.45.

Fuente: Elaboración propia.

Sullivan et al. (2018)

- Tipo de cemento: Cemento Portland Ordinario tipo 1 y II.
- Agregado fino: Arena del río aluvial procedente de Watkinville, Georgia.
- Agregado grueso: Piedra de granito con un TMN de 25 mm, procedente de Athens, Georgia.
- Tipo de Metacaolín: Producto disponible en el mercado, de Georgia y Carolina del Sur.
- Contenido de mezcla: Se llevó a cabo la elaboración de mezclas de hormigón con sustituciones de cemento por metacaolín al 10%, 15% y 20%. Se verificó la influencia en las propiedades físico-mecánicas del hormigón y de durabilidad, se estableció una relación a/c de 0.43 para todas las mezclas.
- Ensayo de prueba rápida de permeabilidad a los cloruros (RCPT): para este ensayo se elaboraron varias muestras cilíndricas que fueron cortadas en 100 mm x 50 mm de la parte superior, sección más permeable de cilindros de 100 mm x 200 mm con una sierra de punta de diamante, se realizó de acuerdo a la norma ASTM C1202 durante 6 horas, se midió la carga total Coulomb (C), que pasó a través de las muestras, se utilizó la media de los dos como resultado de la permeabilidad, a una edad de 28 días de curado y una relación a/c de 0.43 constante en todas las mezclas, como se muestra en la Tabla N°31.

Tabla N° 31

Prueba de penetrabilidad rápida de iones cloruros (RCPT) a los 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10%, 15% y 20% con una relación a/c de 0.43.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de Metacaolín	Penetrabilidad rápida de iones cloruros (Coulomb)
		28 días
Control	0	2775
MK1-5	5	1800
MK1-10	10	910
MK1-15	15	594
MK1-20	20	879

Fuente: Elaboración propia.

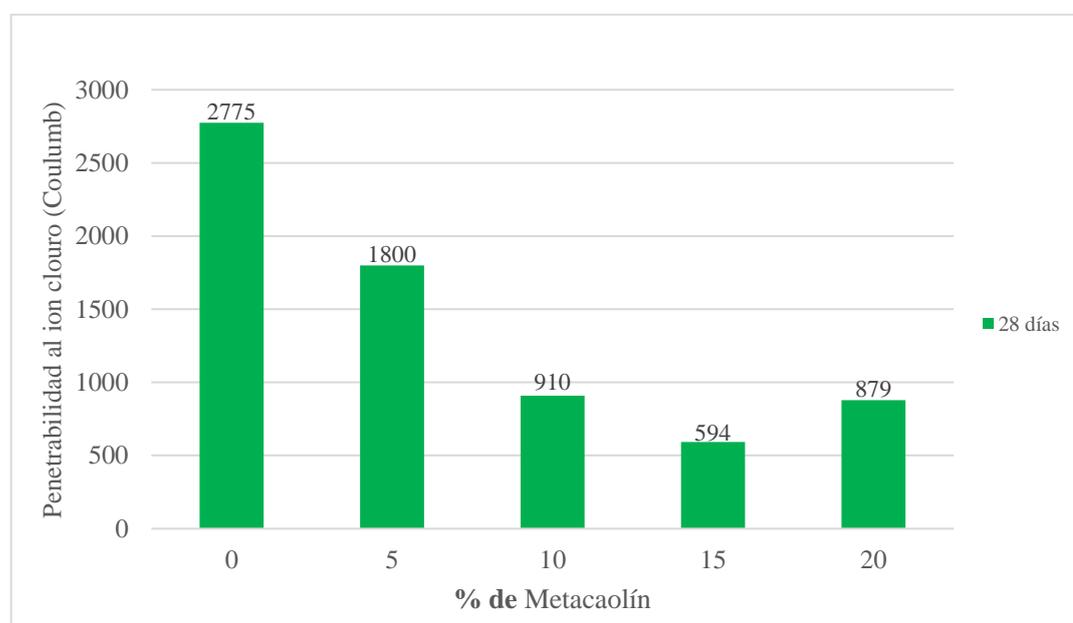


Figura N 23: Resultados de la permeabilidad a iones cloruros a los 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.43.

Fuente: Elaboración propia.

- Ensayo de barra de mortero acelerado ASR: En esta investigación se realizó la prueba rápida de expansión álcali-sílice (ASR) con muestras de mortero, según la Norma ASTM C1567/C1260, se utilizó para determinar el potencial del metacaolín para suprimir la expansión debida a la (ASR), al 10%, 15% y 20% de metacaolín como sustituto porcentual del cemento, para ensayos a los 14 días de curado, para una relación constante de a/c de 0.43, adicionalmente se calcularon la expansión álcali-sílice al 5% de sustitución de cemento por

metacaolín, para obtener mayor densidad de datos, finalmente se trabajó con sustituciones al 5%, 10%, 15%, 20%. Donde se observó una tendencia consistente y sistemática de aumento de la resistividad de la ASR a medida que se aumenta los niveles de sustitución del metacaolín. A continuación, se muestra en la Tabla N°32, los resultados del ensayo experimental

Tabla N° 32

Prueba de expansión álcali-sílice a los 14 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10%, 15% y 20% con relación a/c de 0.43.

Nomenclatura de la muestra	% de Metacaolín	Expansión de Álcali - Sílice ASR (%)	Relación (a/c)
		14 días	
Control	0	0.168	
MK1-5	5	0.145	
MK1-10	10	0.118	0.43
MK1-15	15	0.040	
MK1-20	20	0.018	

Fuente: Elaboración propia.

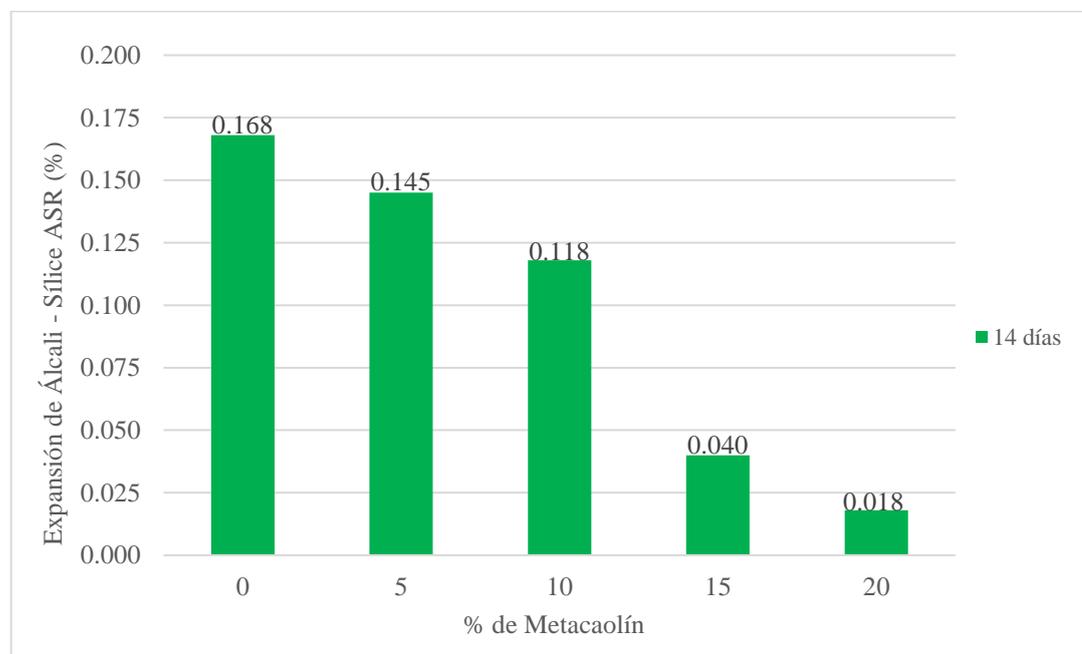


Figura N 24: Resultados de la expansión álcali-sílice a los 14 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.43.

Fuente: Elaboración propia.

Wang (2017).

- Tipo de cemento: Cemento Portland Tipo 1.
- Agregado fino: Arena natural de río.
- Agregado grueso: Piedra triturada
- Tipo de Metacaolín: Suministrado por proveedor local.
- Contenido de mezcla: Se llevó a cabo la preparación de 2 diferentes mezclas de hormigón con un tipo de sustitutos (metacaolín), el cemento, agregado fino, agregado grueso con una relación a/c de 0.30 y 0.5 para cada mezcla respectivamente.
- Ensayo de penetrabilidad ion cloruro: Para este ensayo se diseñaron cubos de 100 mm x 100 mm x 100 mm de hormigón normal según Norma ASTM C1202, 2017 al 5% ,10% y 20% de metacaolín como sustituto al peso del cemento para roturas a los 7 y 28 días con una relación a/c de 0.30 y 0.50. Adicionalmente se calculó a los 14 días de curado con el programa Excel para así tener mayor densidad de datos.

Tabla N°33

Prueba de penetrabilidad rápida de iones cloruros (RCPT) a los 7,14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%,10% y 20% con una relación a/c de 0.30.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de Metacaolín	Penetrabilidad rápida de iones cloruros (Coulomb)		
		7 días	14 días	28 días
MK0	0	2200	2050	1200
MK5	5	1300	1290	900
MK10	10	300	290	150
MK20	20	350	310	200

Fuente: Elaboración propia.

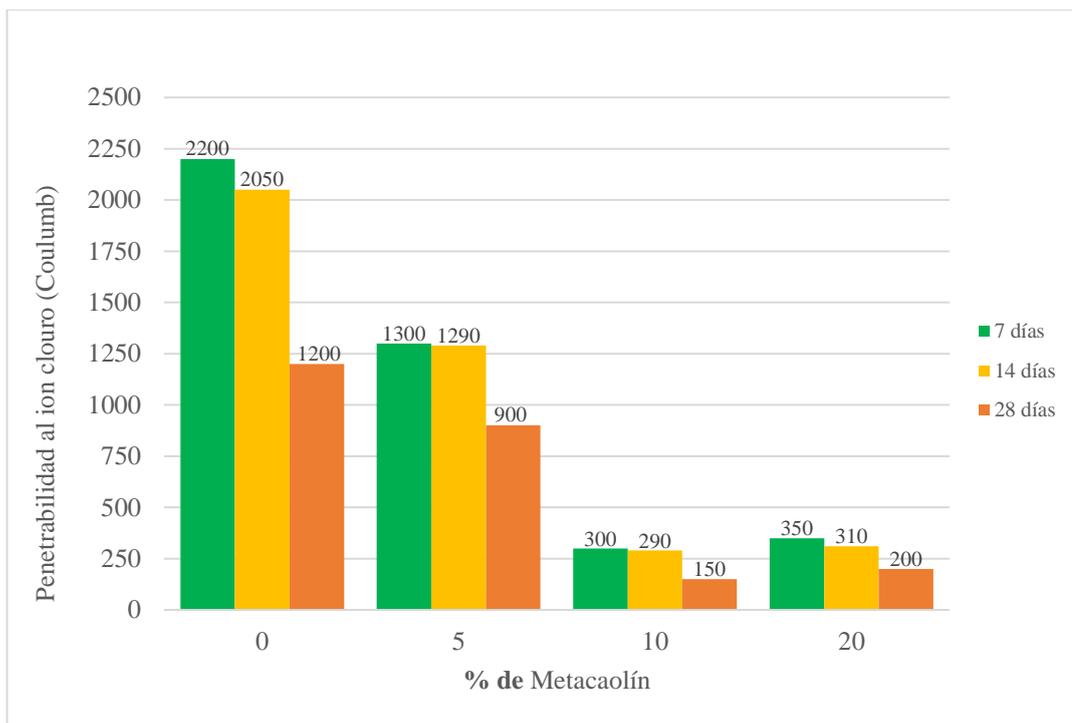


Figura N 25: Resultados de la permeabilidad a iones cloruros a los 7, 14, 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.30.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°34

Prueba de penetrabilidad rápida de iones cloruros (RCPT) a los 7,14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%,10% y 20% con una relación a/c de 0.50.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de Metacaolín	Penetrabilidad rápida de iones cloruros (Coulomb)		
		7 días	14 días	28 días
MK0	0	4000	4000	3000
MK5	5	3700	3500	2200
MK10	10	1400	1400	1000
MK20	20	800	800	700

Fuente: Elaboración propia.

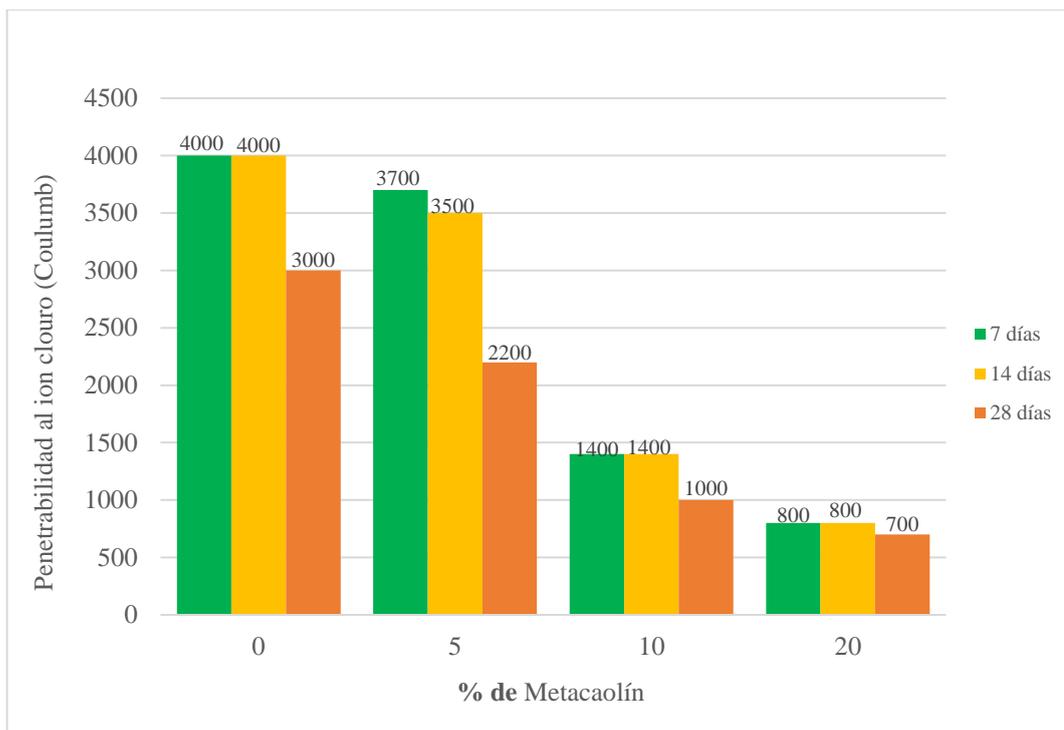


Figura N 26: Resultados de la permeabilidad a iones cloruros a los 7, 14, 28 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.50.

Fuente: Elaboración propia.

Choi et al. (2022).

- Tipo de cemento: Cemento Portland Tipo 1.
- Agregado fino: Arena natural de río.
- Agregado grueso: Piedra triturada
- Tipo de Metacaolín: Suministrado por proveedor local.
- Contenido de mezcla: Se llevó a cabo la preparación de 2 diferentes mezclas de hormigón con diferentes tipos de agua de curado y elaboración con unos tres tipos de sustituto (metacaolín, humo de sílice y polvo de vidrio), el cemento, agregado fino, agregado grueso con una relación a/c de 0.5 para cada mezcla respectivamente.
- Ensayo de penetrabilidad ion cloruro: Para este ensayo se diseñaron cilindros de 100 mm de diámetro x 50 mm de altura de hormigón normal según Norma ASTM C1202 (2017) al 5% y 10% de metacaolín como sustituto al peso del cemento para roturas a los 7, 28,56 y 90 días con una relación a/c de 0.50.

Tabla N°35

Prueba de penetrabilidad rápida de iones cloruros (RCPT) a los 7,14 y 28 días de curado con agua potable para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, y 10% con una relación a/c de 0.50.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de Metacaolín	Penetrabilidad rápida de iones cloruros (Coulomb)		
		7 días	14 días	28 días
MK0	0	21000	21600	18000
MK5	5	16000	14800	8000
MK10	10	6550	5900	2600

Fuente: Elaboración propia.

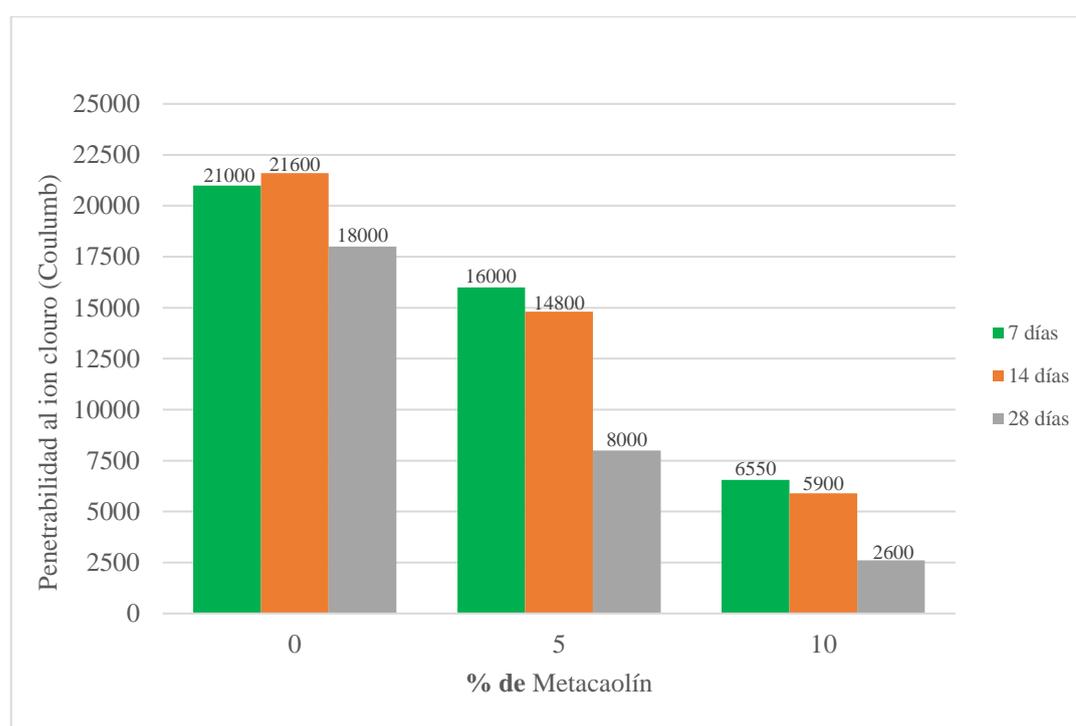


Figura N 27: Resultados de la permeabilidad a iones cloruros a los 7, 14, 28 días con agua potable vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.50.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°36

Prueba de penetrabilidad rápida de iones cloruros (RCPT) a los 7,14 y 28 días de curado con agua de mar para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, y 10% con una relación a/c de 0.50.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de Metacaolín	Penetrabilidad rápida de iones cloruros (Coulomb)		
		7 días	14 días	28 días
MK0	0	21000	21400	17000
MK5	5	16000	14500	7500
MK10	10	6000	5600	3500

Fuente: Elaboración propia.

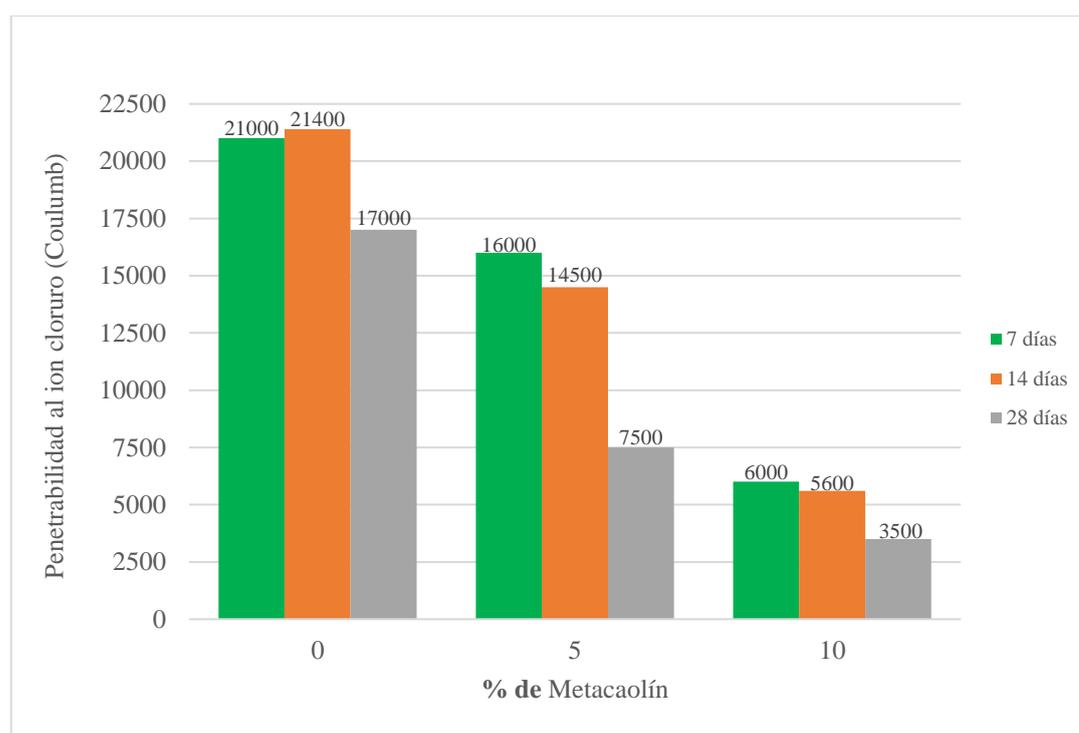


Figura N 28: Resultados de la permeabilidad a iones cloruros a los 7, 14, 28 días con agua de mar vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.50.

Fuente: Elaboración propia.

Adebanjo et al. (2021).

- Tipo de cemento: Cemento Portland Calizo grado 32.
- Agregado fino: Arena natural de río Aboyomi.
- Agregado grueso: Piedra triturada.
- Agregado reciclado de hormigón: Residuos de construcción.
- Tipo de Metacaolín: Cantera de caolín, Ijero.
- Contenido de mezcla: Se llevó a cabo la preparación de 2 diferentes mezclas de hormigón con diferentes relaciones agua/cemento y elaboración con un sustituto (metacaolín), el cemento, agregado fino, agregado grueso como agregado de hormigón reciclado con una relación agua/cemento de 0.45 y 0.55 para cada mezcla respectivamente.
- Ensayo de asentamiento para el hormigón de cemento portland: Para este ensayo se tomó una muestra representativa del hormigón en estado fresco y se usó el cono de Abrams según la norma ASTM C143 al 5%, 10% y 15% de metacaolín como sustituto al peso del cemento con una relación agua/cemento de 0.45 y 0.55.

Tabla N°37

Ensayo de asentamiento para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10 % y 15% con una relación a/c de 0.45.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de metacaolín	Asentamiento (mm)	Relación a/c
MK0	0	55	
MK5	5	47	
MK10	10	43	0.45
MK15	15	35	

Fuente: Elaboración propia.

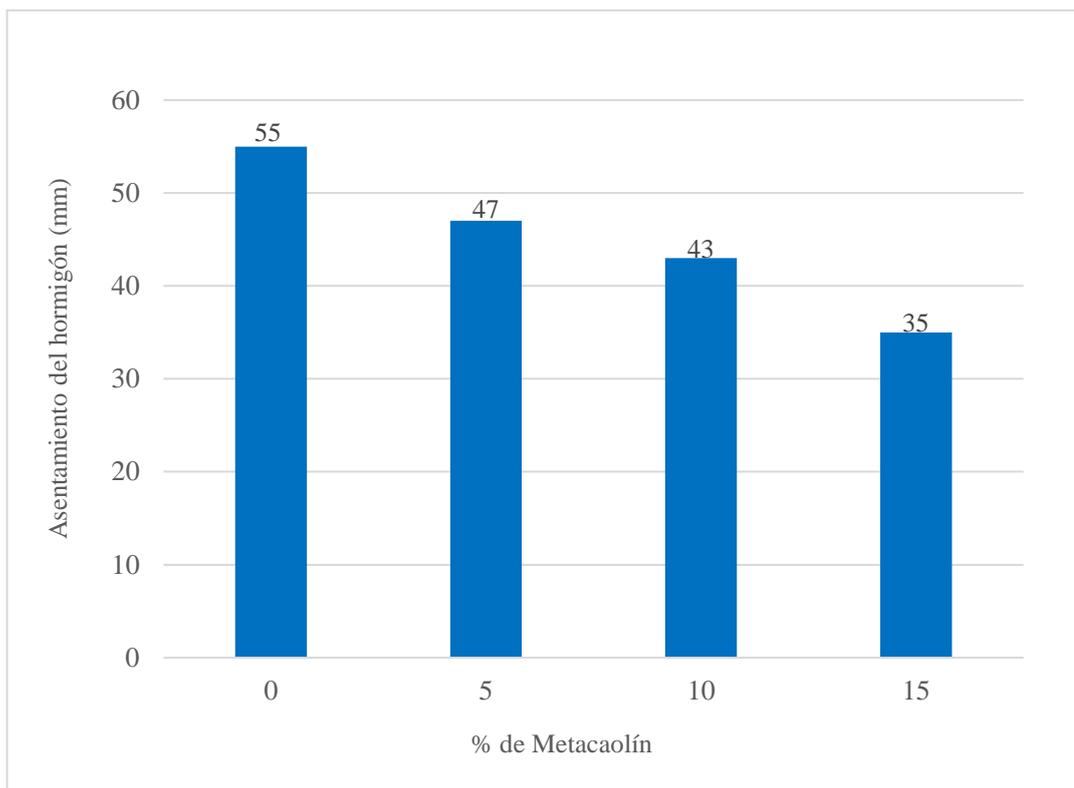


Figura N 29: Resultados del ensayo de asentamiento vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.45.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°38

Ensayo de asentamiento para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10 % y 15% con una relación a/c de 0.55.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de metacaolín	Asentamiento (mm)	Relación a/c
MK0	0	67	0.55
MK5	5	59	
MK10	10	41	
MK15	15	45	

Fuente: Elaboración propia.

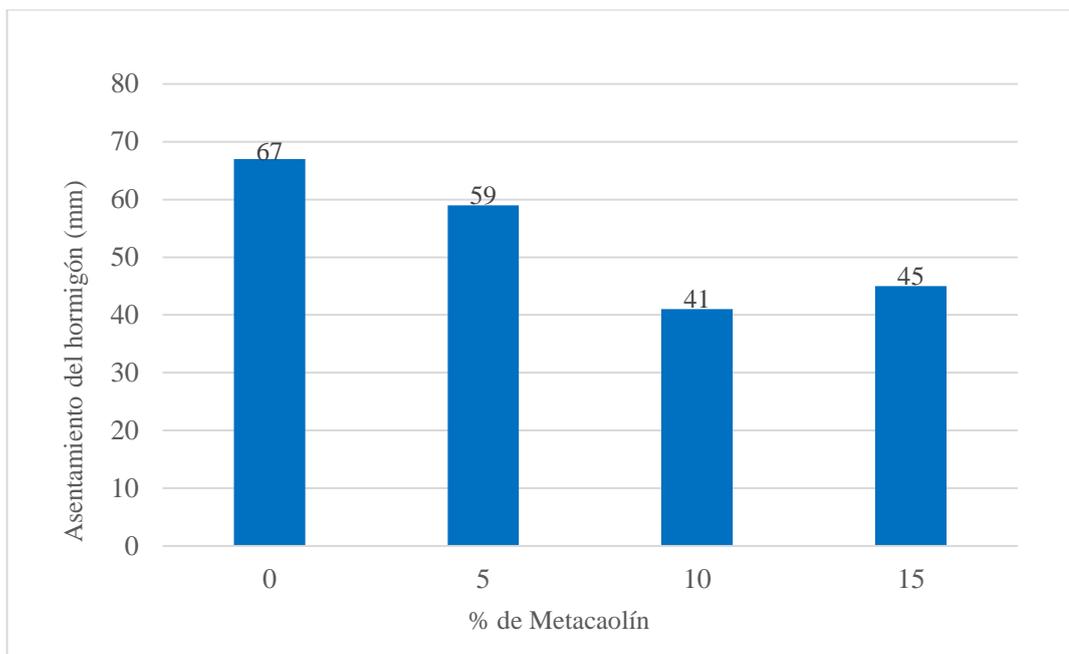


Figura N 30: Resultados del ensayo de asentamiento vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.55.

Fuente: Elaboración propia.

Sangsuwan y Sujjavanich (2020)

- Tipo de cemento: Cemento Portland Tipo 1
- Agregado fino: Arena de riolita (Tailandia).
- Agregado grueso: Piedra de riolita (Tailandia).
- Tipo de Metacaolín: Importado de Engelhard Metamax (Tailandia).
- Ceniza volante: Proveedor local.
- Contenido de mezcla: Se llevó a cabo la preparación de mezclas de hormigón con dos tipos de sustitutos (metacaolín y cenizas volantes), por separado para verificar su influencia en las propiedades del hormigón en estado endurecido, la mezcla compuesta por, cemento, arena de riolita (agregado fino), piedra de riolita (agregado grueso), metacaolín y ceniza volante con una gravedad específica de 3.12, 2.71, 2.80, 2.50 y 2.34 respectivamente, con una relación agua/cemento de 0.47 para todas las mezclas.
- Ensayo de barra de mortero acelerado (AMBT), para este ensayo se elaboraron varias muestras tipo barra de mortero de 25mmx25mmx285mm con una relación agua/cemento de 0.47 constante en todas las mezclas con pernos de calibre ajustado en ambos extremos, se realizó de acuerdo a la norma ASTM C1260 y ASTM C1567 , el primero calcula la reacción álcali-sílice (ASR) del espécimen de control utilizando únicamente cemento Portland y el segundo

investiga el potencial deletéreo de las combinaciones entre materiales suplementarios cementosos (SCM) y agregados. Luego de 24 horas las muestras fueron desmoldadas y se sumergieron en una solución de hidróxido de sodio (NaOH 1N) a 80 °C durante 14 días para acelerar la reacción de álcali-sílice.

Tabla N°39

Prueba de expansión de álcali-sílice a los 14 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%,10%,15% y 20% con relación a/c de 0.47.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de Metacaolín	Expansión de Álcali - Sílice ASR (%)	
		14 días	
M/MK0	0	0.298	
M/MK5	5	0.178	
M/MK10	10	0.063	0.47
M/MK15	15	0.001	
M/MK20	20	0.002	

Fuente: Elaboración propia.

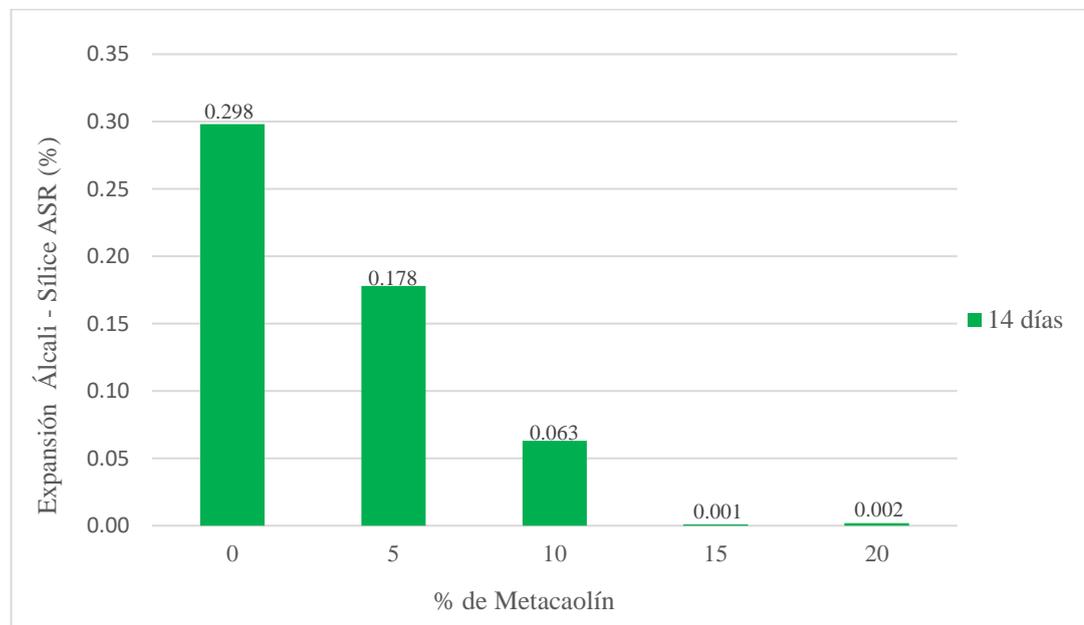


Figura N 31: Resultados de la expansión álcali-sílice a los 14 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.47.

Fuente: Elaboración propia.

Asadollahfardi et al. (2019)

- Tipo de cemento: Cemento Portland Ordinario de proveedor local.
- Agregado fino: Proveedor local según norma ASTM C192 (2002), con un peso específico de 2620 kg/m<sup>3</sup>.
- Agregado grueso: Proveedor local gradación controlada, tamaño máximo de 19 mm, según norma ASTM C192 (2002), con un peso específico de 2680 kg/m<sup>3</sup>.
- Tipo de Metacaolín: El metacaolín es del proveedor local.
- Contenido de mezcla: Se llevó a cabo la preparación de mezclas de hormigón con metacaolín y agua enriquecida con micronanoborbulas, se determinó las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido, la mezcla estuvo compuesta por, cemento, agregado fino, agregado grueso, metacaolín, agua que se enriqueció con micronanoburbulas (MNB), con una relación a/c de 0.45 para todas las mezclas.
- Ensayo de prueba rápida de permeabilidad al cloruro (RCPT): Se realizó según la norma ASTM C1202, 2017, para este ensayo se elaboraron varias muestras cilíndricas que fueron cortadas como especifica la norma, se mido la carga total Coulomb (C), que paso a través de las mezclas, a una edad de 28 días y 90 días de curado y una relación a/c de 0.45.

Tabla N°40

Prueba de penetrabilidad rápida de iones cloruros (RCPT) a los 28 y 90 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, y 10% con relación a/c de 0.45.

Nomenclatura de la muestra	% de sustitución de Metacaolín	Penetrabilidad rápida de iones cloruros (Coulomb)	
		28 días	90 días
MK0	0	4135	2481
MK5	5	1975	1025
MK10	10	1817	725

Fuente: Elaboración propia.

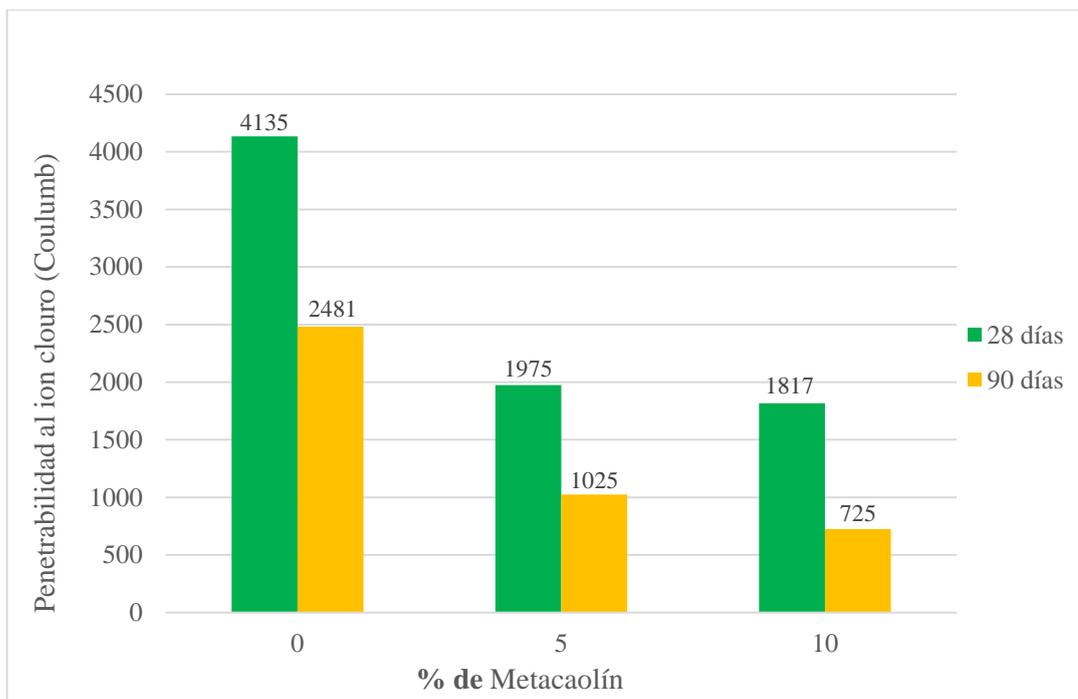


Figura N 32: Resultados de la permeabilidad a iones cloruros a los 28 y 90 días vs. Porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín con una relación a/c de 0.45.  
Fuente: Elaboración propia.

## 6.2. Análisis e interpretación de los resultados

### 6.2.1. Analizando los resultados del porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para aumentar la resistencia a la compresión del hormigón estructural.

Sharma et al. (2019)

En el presente artículo, se observó que los resultados de las resistencias a la compresión a los 7, 14 y 28 días de curado aumenta progresivamente, para mezclas de hormigón con una relación a/c constante de 0.40 y una sustitución porcentual al 5% y 10% de cemento por metacaolín, previamente se calcularon los resultados correspondientes a los 14 días de curado, para poder obtener una mayor data. Para sustituciones al 5% y 10% a los 28 días, se obtuvo una resistencia a la compresión del 16.83% y 29.48% respectivamente, para los 14 días un aumento del 18.18% y 29.82% y finalmente para los 7 días de curado un aumento del 16.84% y 29.50%, respecto a la mezcla patrón. Esto nos lleva a deducir que el metacaolín puede sustituir al cemento aportándole al hormigón una mayor resistencia a la compresión con sustituciones del 10%.

Jin et al. (2017)

En este artículo se observó los resultados correspondientes a la resistencia a la compresión del hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10%, y 20%, para una relación a/c de 0.45 y 0.55. Los resultados obtenidos fueron favorables para una relación a/c de 0.45 y una sustitución al 5%, 10% y 20% de cemento por metacaolín a los 3 días de curado la resistencia a la compresión aumento en un 7.82%, 16.68% y 15.36% , a los 7 días del 10.62%, 20.14% y 24.73%, a los 14 días al 9.37%, 16.71% y 19.48% y finalmente para los 28 días de curado un aumento del 6.66%, 13.38% y 13.86% respectivamente. En la mayoría de las mezclas de hormigón ensayadas se observa un aumento progresivo de la resistencia a la compresión, obteniendo mejores y más altos resultados al 20% de sustitución.

Parrales y Quirumbay (2022)

En este artículo, se evaluó la resistencia a la compresión a los 7,14. 21 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de cemento por metacaolín al 5%, 10%, 15% y 20%, con una relación a/c constante de 0.59, Según los resultados obtenidos para el ensayo de resistencia a la compresión, este mejoro notoriamente para sustituciones del 5% y 10%, a los 3 días de curado se llegó al 5.16% y 2.17% de aumento de la resistencia, a los 7 días se elevó en un 7.60% y 4.67%, a los 14 días un crecimiento del 5.74% y 3.26% y finalmente a los 28 días de curado aumento máximo del 4.06% y 1.99%, respecto a la mezcla patrón, comportamiento contrario se observó en sustituciones superiores al 15% y 20%, donde a los 7 días de curado decayó en un 4.43% y 10.14%, a los 14 días decreció en un 5.9% y 10.99%, a los 21 días volvió a disminuir la resistencia en un 4.16% y 8.49%, finalmente a los 28 días curado decreció en un 2.53% y 6.17% respecto a la mezcla base de diseño. Finalmente se deduce que el porcentaje óptimo se obtiene al reemplazar en un 5% en peso del cemento por metacaolín, debido a que se obtuvo un máximo valor de la resistencia a la compresión para luego decaer gradualmente con sustituciones del 10%,15% y 20%.

Torres (2018)

En la presente tesis, se realizó el ensayo de la resistencia a la compresión a los 7 , 14 y 28 días para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de metacaolín de 5%,10% y 15% con una relación a/c de 0.56. Analizando los resultados obtenidos por las sustituciones del 5% y 10%, se determinó una mejora a los 7 días de curado en un 38.49% y 45.03% y a los 14 días un 14.04% y 20.23% respecto a la mezcla patrón, Pero disminuyó a los 14 y 28 días de curado cuando se sustituyó un 15% de metacaolín en un 3.03% y 3.45% respecto a la mezcla con sustitución del 10% de metacaolín. Se concluye que el porcentaje óptimo de sustitución es del 10% de cemento.

Reddy y Karthik (2019)

En dicho artículo, se observó que los resultados de la resistencia a la compresión a los 7 , 14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de metacaolín del 5%,10% y 20% con una relación a/c de 0.43 aumento a los 7 días en un 4.86%,8.46% y 17.31%, a los 14 días aumento un 4.06%,8.33% y 17.22% y a los 28 días aumento un 3.10%,5.38% y 12.31% respecto a la mezcla patrón pero empezó a disminuir cuando se sustituyó un 30%,40% y 50% manteniendo la relación a/c de 0.43,disminuyó a los 7 días un 10.38%,26.54% y 35.00%,a los 14 días disminuyó 10.28%,26.39% y 35.00% lo mismo paso a los 28 días en un 7.44%,17.18% y 22.05% respecto a la mezcla patrón. Por lo tanto, se determina como el 20% como porcentaje óptimo de sustitución de cemento en peso.

6.2.2. Analizando los resultados del porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para aumentar la resistencia a la flexión del hormigón estructural.

Sharma et al. (2019)

En el presente artículo, se observó que los resultados de la resistencia a la flexión para mezclas de concreto con una relación a/c de 0.40 y una sustitución porcentual de metacaolín del 5% y 10%, aumentan progresivamente con la incorporación de metacaolín en el diseño de mezcla, para los 7 días de curado se obtuvo un aumento de la resistencia a la flexión del 9.09 % y 38.35%, a los 14 días un incremento del 10.81% y 43.24% y finalmente a los 28 días de

curado se logró alcanzar un aumento del 9.07% y 38.27% de la resistencia a la flexión, respectivamente. Esto nos lleva a deducir que sustituciones al 10% de cemento por metacaolín en la mezcla se logran resistencias a la flexión altas respecto a la muestra patrón.

Singh et al. (2022)

En el presente artículo, se observó los resultados de la resistencia a la flexión para mezclas de concreto con sustituciones porcentuales de metacaolín del 5% y 10%, con una relación a/c constante de 0.4. Para el 5% de sustitución a los 7, 14 y 28 días de curado la resistencia a la flexión aumento respecto a la muestra patrón en un 2.84%, 3.89% y 4.33%, respectivamente, mientras que para sustituciones del 10% se evidencio un mayor rango de aumento de la resistencia a la flexión, este se elevó hasta en un 8.51%, 8.33% y 8.51% respectivamente. Los resultados indicaron que la sustitución al 10% de metacaolín en las mezclas de hormigón benefició en un mayor aumento de la resistencia a la flexión respecto al 5% de sustitución.

Menhosh et al. (2019)

En esta investigación se observó que los resultados correspondientes a los ensayos de resistencia a la flexión de concreto con sustituciones porcentuales de cemento por metacaolín al 5% 10% y 15%, para una relación a/c 0.45 constante a los 7, 14, 28, 56, 90 y 180 días de curado, Los resultados obtenidos fueron los siguientes, para una sustitución del 5%, se elevó la resistencia a la flexión a los 7, 14 y 28 días de curado en un 18.33%, 6.67% y 4.83%, para una sustitución del 10% a los 7, 14 y 28 días de curado se evidencio un aumento del 23.33%, 8.00% y 8.21%, mientras que para sustituciones al 15% se obtuvo un mayor aumento de la resistencia al compresión llegando alcanzar respecto a la muestra patrón un 33.33%, 13.33% y 10.34%, respectivamente, mediante estos resultados se puede deducir claramente que las mezclas que contenían metacaolín en sus diseños de mezcla, aumentaron la resistencia a la flexión, pero con sustituciones del 15% se lograron mayores resultados.

Torres (2018)

En la presente tesis, se realizó el ensayo de la resistencia a la flexión a los 7 ,

14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de metacaolín de 5%,10% y 15% con una relación a/c de 0.56. Analizando el resultado obtenido por la sustitución del 5%, se determinó una mejora a los 7 días en un 9.64% ,a los 14 días un 8.65% y a los 28 días un 6.36% respecto a la mezcla patrón pero empezó a disminuir cuando se sustituyó un 10% y 15% manteniendo la relación a/c de 0.56,disminuyo a los 7 días un 10.38%,26.54% y 35.00%,a los 14 días disminuyo 10.28%,26.39% y 35.00% lo mismo paso a los 28 días en un 7.44%,17.18% y 22.05% respecto a la mezcla patrón. Por lo tanto se determina como el 20% como porcentaje óptimo de sustitución de cemento en peso.

Reddy y Karthik (2019)

En el presente artículo, se realizó el ensayo de la resistencia a la flexión a los 7, 14 y 28 días de curado para mezclas de hormigón con sustitución porcentual de metacaolín de 5%,10%,20%,30%,40% y 50% con una relación a/c de 0.43. Para el 5% de sustitución a los 7,14 y 28 días de curado la resistencia a la flexión aumento respecto a la muestra patrón en un 4.83%, 2.85% y 2.42% respectivamente, para sustituciones del 10% respecto a la muestra patrón aumento en un 6.9%, 4.88% y 4.44% respectivamente, para sustituciones del 20% respecto a la muestra patrón aumento en un 10.34%, 9.76% y 11.11% respectivamente. En cambio al aumentar a mayores sustituciones de metacaolín empezó a disminuir progresivamente como al sustituir al 30% disminuyo en un 0.00%,2.44% y 2.22% respectivamente, para 40% de sustitución respecto a la muestra patrón disminuyo en un 3.45%, 4.88% y 4.44% respectivamente y al 50% de sustitución respecto a la muestra patrón disminuyo en un 13.79%, 14.63% y 13.33% respectivamente. Por lo tanto, se determina como el 20% como porcentaje óptimo de sustitución de cemento en peso.

6.2.3. Analizando los resultados del porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir la porosidad del hormigón estructural.

Bakera et al. (2019)

En esta investigación se realizaron estudios principalmente referente a la durabilidad del hormigón, entre ellas destaca el ensayo de porosidad penetrable

del hormigón, cuyas sustituciones porcentuales de cemento por metacaolín en todas las mezclas fueron favorables a los 56 días de curado, para la mezcla base se obtuvo una porosidad del 5.20%, 9.20% y 10.50%, mientras que para sustituciones del 5% se evidenció una porosidad del 5.50%, 8.75% y 9.80%, para sustituciones del 10% la porosidad fue de 5.60%, 8.30% y 9.20%, para sustituciones del 15% en todas las mezclas se evidenció una reducción del 4.23%, 7.90% y 8.00%, por otro lado una sustitución del 20% de cemento por metacaolín la porosidad decreció hasta un 4.88%, 6.62% y 6.40%, bajo una relación a/c de 0.40, 0.50 y 0.60, respectivamente. Se puede concluir que las mezclas que contenía metacaolín redujeron su porosidad considerablemente al brindarle una mejor microestructura al hormigón obteniendo mejores resultados al 20% de sustitución, para una relación a/c de 0.4, 0.5 y 0.6, respecto a la prueba patrón, se logró una reducción de la porosidad del 6.15% y 28.04% y 39.05% respectivamente.

Jin et al. (2022)

En esta investigación se estudió la porosidad abierta del hormigón con sustituciones parciales de metacaolín en porcentajes del 10%, 20 % de sustitución, adicionalmente se calcularon los valores de porosidad abierta pertenecientes al 5% y 15% de sustitución para obtener mayor densidad de datos, los ensayos fueron elaborados según la norma ASTM C642 (2013), para mezclas con relaciones de a/c de 0.55 y 0.45 y tiempo de curado de 56 días, los resultados obtenidos fueron favorables con una notoria disminución de la porosidad en las mezclas, para la mezcla patrón se obtuvo una porosidad del 7.84% y 16.12%, para el 5% de sustitución una porosidad del 7.50% y 15.00% , para el 10% de sustitución se alcanzó la porosidad más baja del 7.04% y 14.09%, para el 15% de sustitución la porosidad aumento en un 7.20% y 14.20% y finalmente para un reemplazo del 20% la porosidad alcanzo un valor del 7.43% y 14.63%, para relaciones a/c de 0.45 y 0.55, respectivamente. Por otro lado se obtuvo excelentes resultados de disminución de la porosidad al 10% de sustitución, llegando a obtener una disminución máxima del 10.20% y 12.59%, respecto a la prueba patrón. Se puede deducir que el óptimo porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín es al 10%.

Oleiwi et al. (2021)

En este artículo se estudia la porosidad abierta del hormigón con sustituciones parciales de metacaolín en porcentajes del 0% (mezcla patrón) y 15%, adicionalmente se calcularon los valores de porosidad abierta pertenecientes al 5% y 10% de sustitución para obtener mayor cantidad de datos, los ensayos fueron elaborados según la norma ASTM C642 (2013), para mezclas con relaciones de a/c de 0.45 y tiempo de curado de 56 días, los resultados obtenidos fueron alentadores ya que a mayor sustitución de metacaolín menor porosidad, por ejemplo para sustituciones del 5% se evidencio una disminución de la porosidad del 1.69%, para sustituciones del 10% la porosidad disminuyo en un 2.71% y para sustituciones del 15% disminuyo un 5.08% respecto a la muestra patrón. Se concluye que el óptimo porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín es al 15%, este comportamiento se debe a que el metacaolín disminuye la porosidad del hormigón ya que al ser más fino que los agregados cubren los orificios de los poros.

#### 6.2.4. Analizando los resultados del porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir penetrabilidad del ion cloruro del hormigón estructural.

Sullivan et al. (2018)

En el presente artículo, se realizó la prueba rápida de permeabilidad al cloruro (RCPT), para una relación a/c de 0.43 y a los 28 días de curado, con sustituciones del 5%, 10%, 15% y 20%, sobre los resultados obtenidos, los datos con el 5% de sustitución se calcularon previamente, la mezcla patrón inicialmente pertenecía a la clase de permeabilidad moderada (menos de 4000 coulomb), mientras que la mezcla con nomenclatura MK1-5 pertenecía a la clase de permeabilidad "baja", mientras que las mezclas con MK1-10, MK1-15 Y MK1-20 pertenecía a la categoría de permeabilidad "Muy baja" (menos de 1000 coulomb), con MK1-15 se logró la permeabilidad más baja a 594 C, se clasificó en una clase de permeabilidad más baja que el control. En general, todos los hormigones de metacaolín se clasificaron como de permeabilidad "muy baja", excluyendo la mezcla MK1-5 antes mencionada. De los resultados se puede concluir que el óptimo porcentaje de sustitución es al 15%, correspondiente a la mezcla MK1-15, logrando reducir su permeabilidad en un

78.60% respecto a la mezcla patrón.

Asadollahfardi et al. (2019)

En esta investigación se enfocó en la permeabilidad mediante la prueba rápida al ion cloruro según la norma ASTM C1202, las muestras fueron ensayadas a los 28 y 90 días de curado, estas fueron sustituidas en porcentaje al peso de cemento por metacaolín al 5% y 10%, los resultados obtenidos para la muestra control MK0 fue de 4132 C y 2481 C, inicialmente con una permeabilidad de clase "alta" a "moderada", para las muestras que contenían 5% de metacaolín fue de 1975 y 1025 C, encontrándose en el rango de una permeabilidad "baja", a los 28 y 90 días, respectivamente y para un 10% de sustitución fue de 1817 C, este logro una permeabilidad "baja" a los 28 días, mientras que a los 90 días de curado logro un valor de 725 C, se clasifico como una permeabilidad "muy baja". Se obtuvieron valores favorables de la reducción de la permeabilidad al 10% de sustitución, logrando alcanzar un 56.06% y 26.76% de reducción de la permeabilidad a los 28 y 90 días, respectivamente, por lo que se concluye que la mayor reducción en la penetración de iones cloruros estaba relacionado con la muestra de hormigón que contenía 10% de metacaolín

Wang. (2017)

En esta investigación se enfocó en la permeabilidad mediante la prueba al ion cloruro según la norma ASTM C1202 (2017), considerando las muestras ensayadas a los 3,7 y 28 días de curado, además fueron sustituidas en porcentaje al peso de cemento por metacaolín del 5%,10% y 20% con una relación a/c de 0.3 pero se halló con la elaboración de gráficos a los 14 días de curado teniendo las mismas sustituciones de metacaolín que las anteriores muestras. La mezcla patrón inicialmente pertenecía a la clase de permeabilidad moderada (menos de 4000 C), mientras que las mezcla con nomenclatura MK5 pertenecían a la clase de permeabilidad "baja", mientras que las mezclas con MK10 y MK15 pertenecía a la categoría de permeabilidad "muy baja" (menos de 1000 C), con MK20 se logró la permeabilidad más baja tanto para 7,14 y 28 días de curado fueron 350 C, 310 C y 200 C. En general, todos los hormigones de metacaolín se clasificaron como de permeabilidad "muy baja", excluyendo la mezcla MK5 y MK0 antes mencionada. Por lo que se concluye que la mayor

reducción en la penetración de iones cloruros estaba relacionado con la muestra de hormigón que contenía 20% de metacaolín como sustituto.

Choi et al. (2022)

En esta investigación se enfocó en la permeabilidad mediante la prueba al ion cloruro según la norma ASTM C1202 (2017), considerando las muestras ensayadas a los 7 y 28 días de curado, además fueron sustituidas en porcentaje al peso de cemento por metacaolín del 5% y 10% con relación a/c = 0.5 pero se halló con la elaboración de gráficos a los 14 días de curado teniendo las mismas sustituciones de metacaolín que las anteriores muestras. La mezcla patrón, MK5 y MK10 pertenece a la clase de permeabilidad alta (más de 4000 coulomb), con MK10 se logró la permeabilidad más baja tanto para 7,14 y 28 días de curado fueron 6550 coulomb, 5900 coulomb y 2600 coulomb. En general, todos los hormigones de metacaolín se clasificaron como de permeabilidad "alta. Por lo que se concluye que la mayor reducción en la penetración de iones cloruros estaba relacionado con la muestra de hormigón que contenía 10% de metacaolín como sustituto.

#### 6.2.5. Analizando los resultados del porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir la reacción álcali-sílice del hormigón estructural.

Sangsuwan y Sujjavanich (2020)

En esta investigación se focalizo la reacción álcali-sílice mediante el ensayo de barra de mortero acelerado (AMBT) según la norma ASTM C1260, considerando las muestras ensayadas a los 14 y 28 días de curado, además fueron sustituidas en porcentaje al peso de cemento por metacaolín del 10%,15% y 20% pero se halló con la elaboración de gráficos a los 7 días de curado y 5% de reemplazo al peso del cemento teniendo como datos las mismas sustituciones de metacaolín que las anteriores muestras. Los resultados de expansión obtenidos para la muestra control a los 14 días fueron 0.298%, mientras que para las muestras que contenían 5% de sustitución de metacaolín fueron del 0.178%, para una sustitución del 10% a los 14 días fueron de 0.063%, para muestras con sustitución del 15% fueron del 0.001% pero aumento cuando se sustituyó un 20% de metacaolín en un 0.002%.La menor

expansión lograda fue cuando se incorporó un 15% de cemento por metacaolín. En síntesis, se pudo constatar que mientras se iba aumentando el porcentaje de sustitución de metacaolín la expansión disminuyó, obteniendo mejores resultados al 15% de sustitución, logrando alcanzar una reducción del 99.66% respecto a la mezcla patrón.

Bakera et al. (2019)

Este estudio se enfocó en el ensayo de barra de mortero acelerado, específicamente para medir la expansión debido a la reacción álcali-sílice (ASR), para mezclas a los 14 días curados y una relación a/c constante de 0.5. Todas las mezclas diseñadas fueron sustituidas en porcentaje al peso de cemento por metacaolín al 10%, 15% y 20%, posteriormente se calcularon los valores al 5% de sustitución para tener mayor densidad de datos. Los resultados de expansión obtenidos para la muestra control a los 14 días fueron 0.270%, mientras que para las muestras que contenían 5% de sustitución de metacaolín fueron del 0.185%, para una sustitución del 10% a los 14 días fueron de 0.110%, valor que siguió decreciendo al 15% y 20% llegando alcanzar un 0.070% y 0.030%, respectivamente, La menor expansión lograda fue cuando se incorporó un 20% de cemento por metacaolín. En síntesis, se pudo constatar que mientras se iba aumentando el porcentaje de sustitución de metacaolín la expansión disminuyó, obteniendo mejores resultados al 20% de sustitución, logrando alcanzar una reducción del 88.97% respecto a la mezcla patrón.

Sullivan et al. (2018)

Esta investigación realizó ensayos de reacción álcali-sílice (ASR), en barra de mortero acelerado, para medir la expansión en todas las mezclas a los 14 días curados y una relación a/c de 0.43, las mezclas diseñadas fueron sustituidas en 10%, 15% y 20% de cemento por metacaolín, posteriormente se calcularon los valores al 5% de sustitución. Los resultados de expansión obtenidos para la muestra control a los 14 días fueron 0.168%, mientras que para la mezcla MK1-5 que contenían 5% de sustitución de metacaolín fueron del 0.145%, para la mezcla MK1-10 con una sustitución del 10% a los 14 días fueron de 0.118%, estos valores fueron decreciendo para las mezclas MK1-15 y MK1-20 al 15% y 20% de sustitución, llegando alcanzar un 0.040% y 0.018%, respectivamente,

La menor expansión alcanzada fue cuando se sustituyó en un 20% de cemento por metacaolín en la mezcla. En conclusión, para este estudio, sustituciones del 5%,10%,15 y 20% de cemento por metacaolín la expansión disminuyó gradualmente, obteniendo mejores resultados al 20% de sustitución, logrando alcanzar una reducción del 89.29% respecto a la mezcla patrón.

#### 6.2.6. Analizando los resultados del porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para aumentar el asentamiento del hormigón estructural.

Torres (2018)

El autor presenta los resultados correspondientes a los ensayos de asentamiento para el hormigón de cemento portland con sustituciones porcentuales de cemento por metacaolín del 5% y 10%, para una relación a/c igual a 0.56 constante en cada una de sus mezclas de hormigón ensayadas con la ayuda del cono de Abrams. Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes, para la mezcla patrón MK0, se obtuvo un asentamiento de 109 mm, con una consistencia tipo fluido, mientras que la mezcla MK5 con 5% de sustitución se obtuvo un valor de 94 mm, por otro lado la mezcla MK10 con 10% de sustitución obtuvo un valor de 84 mm y la mezcla MK15 bajo a 71 mm siendo este valor el más bajo de todos, llegando a tener para las dos últimas sustituciones una consistencia tipo blanda, Según los resultados obtenidos en todas las muestras se puede deducir que el metacaolín redujo el asentamiento del hormigón en estado fresco cada vez que se aumentaba el porcentaje de sustitución, quitándole trabajabilidad a la mezcla, por lo que sustituciones superiores al 15% son desfavorables ya que pasaría a ser mezcla seca.

Chand (2018)

En relación al citado artículo se apreció los resultados correspondientes a los ensayos de asentamiento para el hormigón de cemento portland con sustituciones porcentuales de cemento por metacaolín del 5%,10% y 15% para una relación a/c igual a 0.44 constante en cada una de sus mezclas de hormigón ensayadas con la ayuda del cono de Abrams. Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes, para la mezcla patrón CM, se obtuvo un asentamiento de 106 mm, con una consistencia tipo fluido, mientras que la mezcla MK5 con 5%

de sustitución se obtuvo un valor de 95 mm , por otro lado la mezcla MK10 con 10% de sustitución obtuvo un valor de 82 mm y la mezcla TRAMC con 15% de sustitución bajo a 72 mm siendo este valor el más bajo de todos, llegando a tener para las dos últimas sustituciones una consistencia tipo blanda. Según lo ensayado en todas las muestras se puede deducir que el metacaolín redujo el asentamiento del hormigón en estado fresco cada vez que se aumentaba el porcentaje de sustitución, quitándole trabajabilidad a la mezcla, por lo que superar el 15% de sustitución sería desfavorable para el hormigón.

Adebanjo et al. (2021)

En el presente artículo se apreció los resultados obtenidos correspondientes a los ensayos de asentamiento para el hormigón de cemento portland con sustituciones porcentuales de cemento por metacaolín del 5%,10% y 15% para una relación a/c igual a 0.45 constante en cada una de sus mezclas de hormigón ensayadas con la ayuda del cono de Abrams. Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes, para la mezcla patrón MK0, se obtuvo un asentamiento de 55 mm, con una consistencia tipo blanda, mientras que la mezcla Mk5 con 5% de sustitución se obtuvo un valor de 47 mm , por otro lado la mezcla MK10 con 10% de sustitución obtuvo un valor de 43 mm y la mezcla MK15 con 15% de sustitución bajo a 35 mm siendo este valor el más bajo de todos, llegando a tener para las dos últimas sustituciones una consistencia tipo plástico. Según lo ensayado en todas las muestras se puede deducir que el metacaolín redujo el asentamiento del hormigón en estado fresco cada vez que se aumentaba el porcentaje de sustitución, quitándole trabajabilidad a la mezcla, por lo que sustituciones superiores al 15% son desfavorables ya que pasaría a ser mezcla seca.

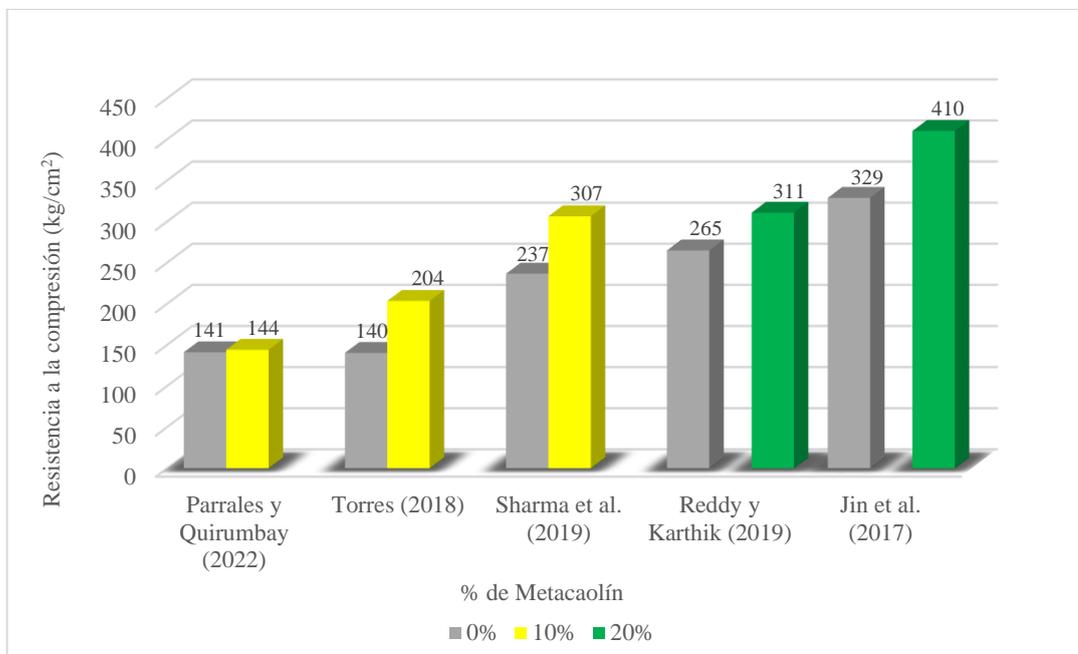
Sharma et al. (2019)

Se evaluaron en todas las mezclas ensayos de asentamiento para el hormigón de cemento portland ordinario, con sustituciones porcentuales de cemento por metacaolín del 5% y 10%, para una relación a/c igual a 0.40 constante en todas sus mezclas, Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes, para la mezcla patrón CC, se obtuvo un asentamiento de 60 mm, con una consistencia tipo blanda, mientras que la mezcla G0M5 con 5% de sustitución se obtuvo un

valor de 55 mm , por otro lado la mezcla GOM10 con 10% de sustitución, el valor decayó a 45 mm siendo este valor el más bajo de todos, llegando a tener para las dos últimas sustituciones una consistencia tipo plástica, Según los resultados obtenidos en todas las muestras se puede deducir que el metacaolín redujo el asentamiento del hormigón en estado fresco cada vez que se aumentaba el porcentaje de sustitución, quitándole trabajabilidad a la mezcla, por lo que sustituciones superiores al 10% son desfavorables.

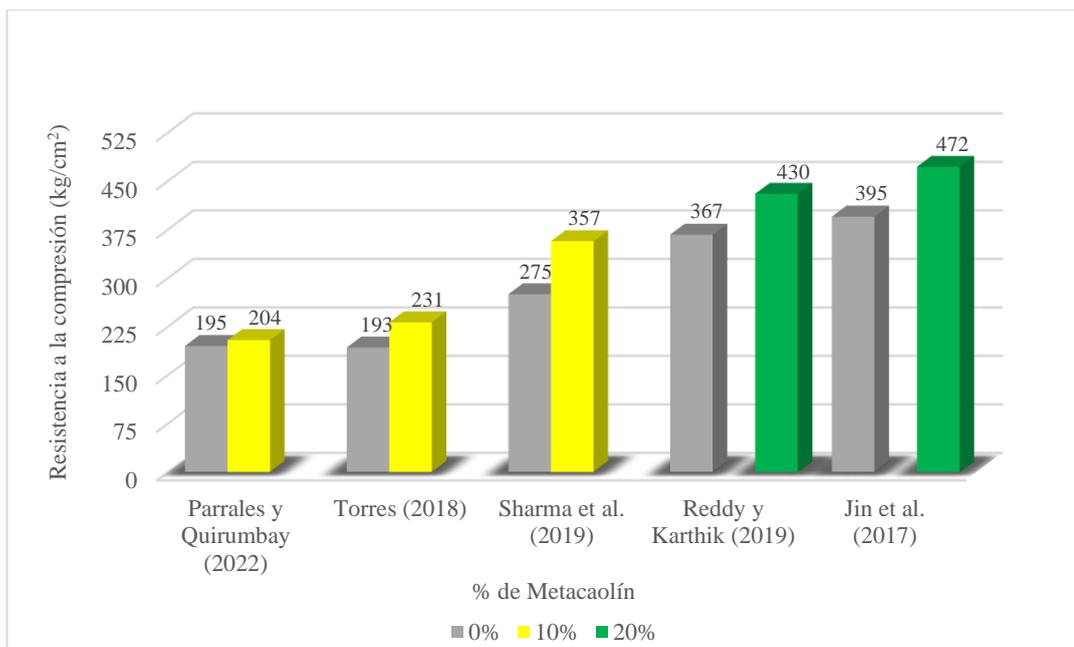
### 6.3. Contratación de hipótesis

**Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se incrementa la resistencia a la compresión del hormigón estructural.**



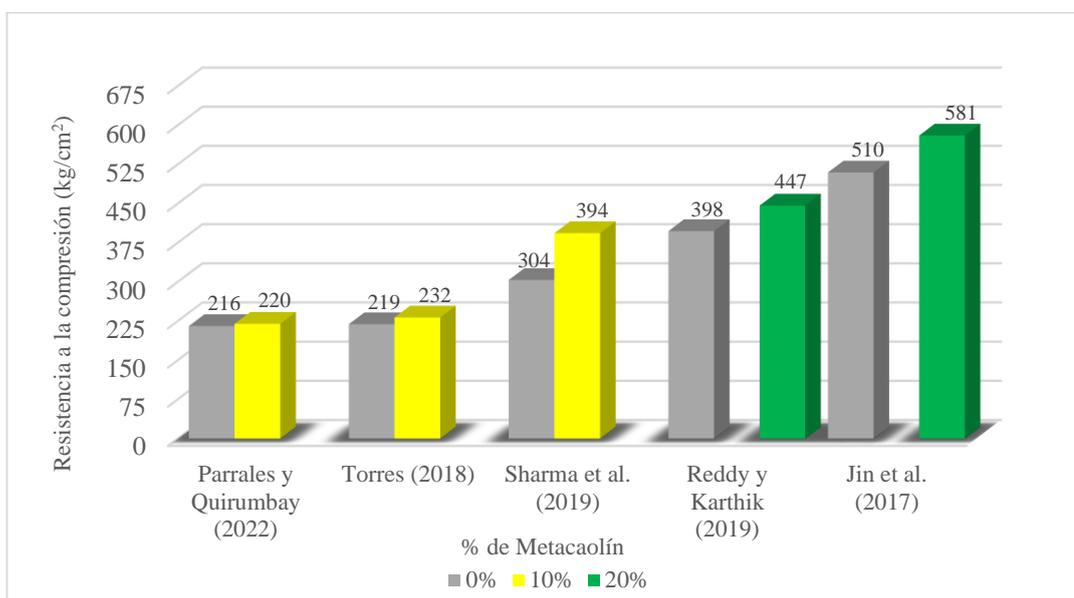
*Figura N 33:* Resultados del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 7 días de curado. Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura N 33, se muestran los porcentajes óptimos de cada autor, donde se observa el aumento progresivo de la resistencia a la compresión al 10% y 20% de sustitución de cemento por metacaolín a los 7 días de curado.



**Figura N 34:** Resultados del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 14 días de curado. Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura N 34, se muestran los porcentajes óptimos de cada autor, donde se contempla el aumento progresivo de la resistencia a la compresión al 10% y 20% de sustitución de cemento por metacaolín a los 14 días de curado.



**Figura N 35:** Resultados del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 28 días de curado. Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura N 35, se muestran los porcentajes óptimos de cada autor, donde se evidencia el aumento de la resistencia a la compresión al 10% y 20% de sustitución

de cemento por metacaolín a los 28 días de curado.

Como se puede apreciar en las Figuras N 33, N 34 y N 35, los resultados para Sharma et al. (2019), se tiene que la sustitución de cemento por metacaolín en la mezcla mejora la resistencia a la compresión a los 7,14 y 28 días, siendo la sustitución optima del 10%, obteniendo resistencias a la compresión de 307 kg/cm<sup>2</sup>, 357 kg/cm<sup>2</sup> y 394 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente, logrando aumentar respecto a la muestra patrón en un 29.50%, 29.82% y 29.48%, con una relación a/c constante de 0.40. Para Jin et al. (2017), la resistencia a la compresión aumenta con la sustitución optima de cemento por metacaolín del 20%, alcanzando para los 7,14 y 28 días de curado, una resistencia a la compresión de 410 kg/cm<sup>2</sup>, 472 kg/cm<sup>2</sup> y 581 kg/cm<sup>2</sup>, que es un 24.73%, 19.49% y 13.86% mayor respecto a la muestra de control con una relación a/c constante de 0.45. Para Torres (2018), a los 7,14 y 28 días, el mejor porcentaje de sustitución en aumentar la resistencia a la compresión fue del 10%, obteniendo los valores de 144 kg/cm<sup>2</sup>, 231 kg/cm<sup>2</sup>, y 232 kg/cm<sup>2</sup> logrando superar en 45.30%, 20.23% y 5.81% a la muestra patrón respectivamente, con una relación a/c de 0.56. Para Parrales y Quirumba (2022), el porcentaje optimo fue del 10%, alcanzando resistencias máximas de 144 kg/cm<sup>2</sup>, 204 kg/cm<sup>2</sup> y 220 kg/cm<sup>2</sup>, logrando superar a la muestra control en 2.17%, 4.67% y 1.99% a los 7, 14 y 28 días de curado, respectivamente. Para Reddy y Karthik (2019) con una relación a/c constante de 0.43 y una sustitución optima del 20%, a los 7,14 y 28 días, obtuvo resistencias máximas de 311 kg/cm<sup>2</sup>, 430 kg/cm<sup>2</sup> y 447 kg/cm<sup>2</sup>, superando a la muestra base en 17.31%, 17.22% y 12.31%, respectivamente.

Para todos los casos se observa que los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión que, a mayor porcentaje de reemplazo de cemento por metacaolín, la resistencia a la compresión aumenta progresivamente, a los 7, 14 y 28 días de curado con sustituciones optimas del 10% y 20%, sin embargo, en la mayoría de los autores se concuerda que la sustitución porcentual optima es al 10%, debido a que se mejora en un mayor rango la resistencia a la compresión respecto a la muestra patrón. Además, sustituciones superiores al 20% con lleva a una disminución progresiva de la resistencia a la compresión del hormigón.

- Hipótesis Auxiliar

H0: Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento no incrementa la resistencia a la compresión del hormigón estructural.

H1: Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se incrementa la resistencia a la compresión del hormigón estructural.

Se rechaza la hipótesis nula H0 y se acepta la hipótesis alterna H1 puesto que en todos los casos el uso de metacaolín como sustituto porcentual del cemento se incrementa la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de curado.

**Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se incrementa la resistencia a la flexión del hormigón estructural.**

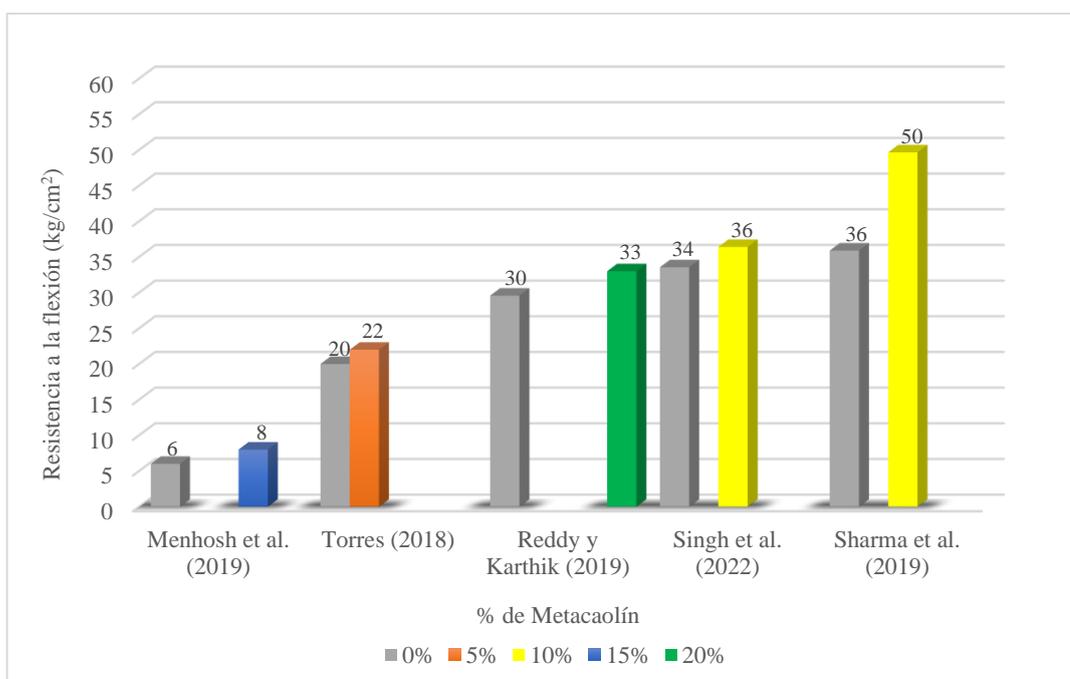
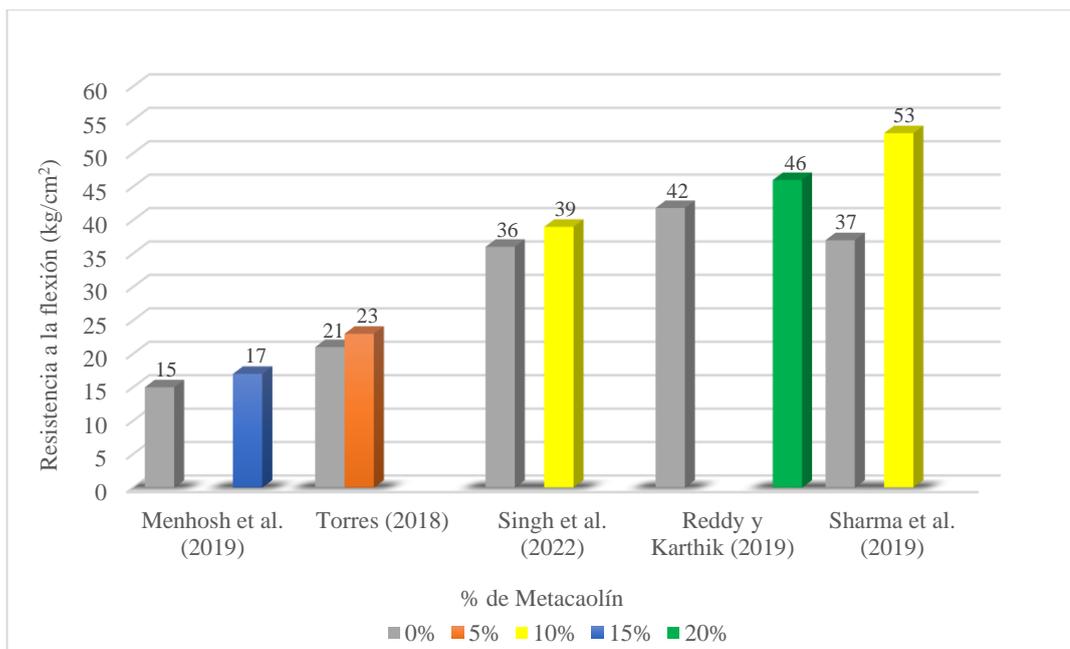


Figura N 36: Resultados del ensayo de resistencia a la flexión del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 7 días de curado.

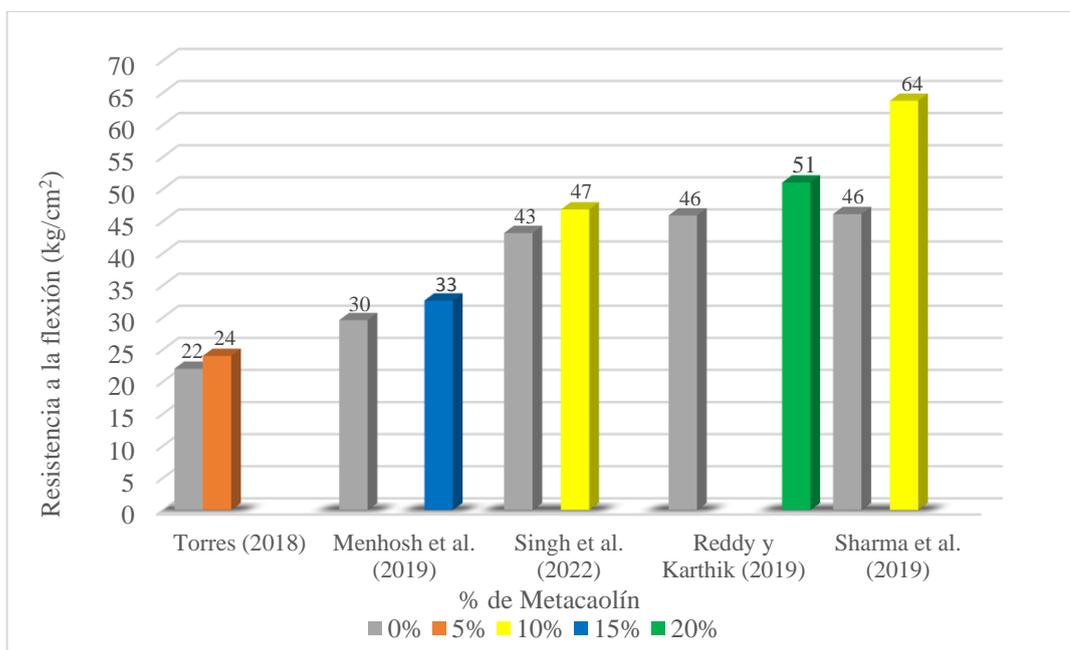
Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura N 36, se muestra los porcentajes óptimos de cada autor, donde se observa el aumento de la resistencia con valores máximos de resistencia a la flexión al 10% de sustitución a los 7 días de curado.



*Figura N 37:* Resultados del ensayo de resistencia a la flexión del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 14 días de curado.  
Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura N 37, se muestra los porcentajes óptimos de cada autor, donde se observa el aumento de la resistencia con valores máximos de resistencia a la flexión al 10% de sustitución a los 14 días de curado.



*Figura N 38:* Resultados del ensayo de resistencia a la flexión del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 28 días de curado.  
Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura N°38, se muestra los porcentajes óptimos de cada autor, donde se observa el aumento de la resistencia con valores máximos de resistencia a la flexión al 10% de sustitución a los 28 días de curado.

Como se puede apreciar en las Figuras N 36, N 37 y N 38, sobre los resultados de la resistencia la flexión para Sharma et al. (2019), a los 7, 14 y 28 días fue de 50 kg/cm<sup>2</sup>, 53 kg/cm<sup>2</sup> y 64 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente logrando aumentar respecto a la muestra patrón en 38.35 %, 43.24% y 38.27% con una relación a/c constante de 0.40. Para Singh et al. (2022), se observa que la resistencia a la flexión para los 7, 14 y 28 días fue de 36 kg/cm<sup>2</sup>, 39 kg/cm<sup>2</sup> y 47 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente, logrando aumentar respecto a la muestra patrón en 8.51%, 8.33% y 8.51% con una relación a/c constante de 0.40. Para Menhosh et al. (2019) a los 7, 14 y 28 días fue de 8 kg/cm<sup>2</sup>, 17 kg/cm<sup>2</sup> y 33 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente logrando aumentar respecto a la muestra patrón un 33.33 %, 13.13% y 10.34% con una relación a/c constante de 0.45. Para Torres (2018), se observa que la resistencia a la flexión para los 7,14 y 28 días fue de 22 kg/cm<sup>2</sup>, 23 kg/cm<sup>2</sup> y 24 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente, logrando aumentar respecto a la muestra patrón en 10%,9.52% y 9.09% con una relación a/c constante de 0.56. Para Reddy y Karthik (2019) a los 7, 14 y 28 días fue de 33 kg/cm<sup>2</sup>, 46 kg/cm<sup>2</sup> y 51 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente logrando aumentar respecto a la muestra patrón en 11.59%, 10.03% y 11.14% con una relación a/c constante de 0.43.

Para todos los casos se observa que la resistencia a la flexión aumenta con la incorporación en porcentaje de metacaolín como sustituto parcial del cemento en el hormigón a los 7, 14 y 28 días de curado con sustituciones del 5%,10%,15% y 20% de metacaolín, sin embargo, en la mayoría de los autores citados se contrasta que la sustitución porcentual optima es al 10%, debido a que se mejora la resistencia a la flexión en un rango optimo respecto a la muestra patrón. No obstante, si se sobrepasa el límite de sustitución de metacaolín, la resistencia a la flexión empieza a decaer progresivamente, con sustituciones mayores al 20%.

- Hipótesis Auxiliar

H0: Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento no incrementa la resistencia a la flexión del hormigón estructural.

H1: Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se incrementa la resistencia a la flexión del hormigón estructural.

Se rechaza la hipótesis nula H0 y se acepta la hipótesis alterna H1 puesto que en todos los casos el uso de metacaolín como sustituto porcentual del cemento se incrementa la resistencia a la flexión a los 7, 14 y 28 días.

**Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se reduce la porosidad del hormigón estructural.**

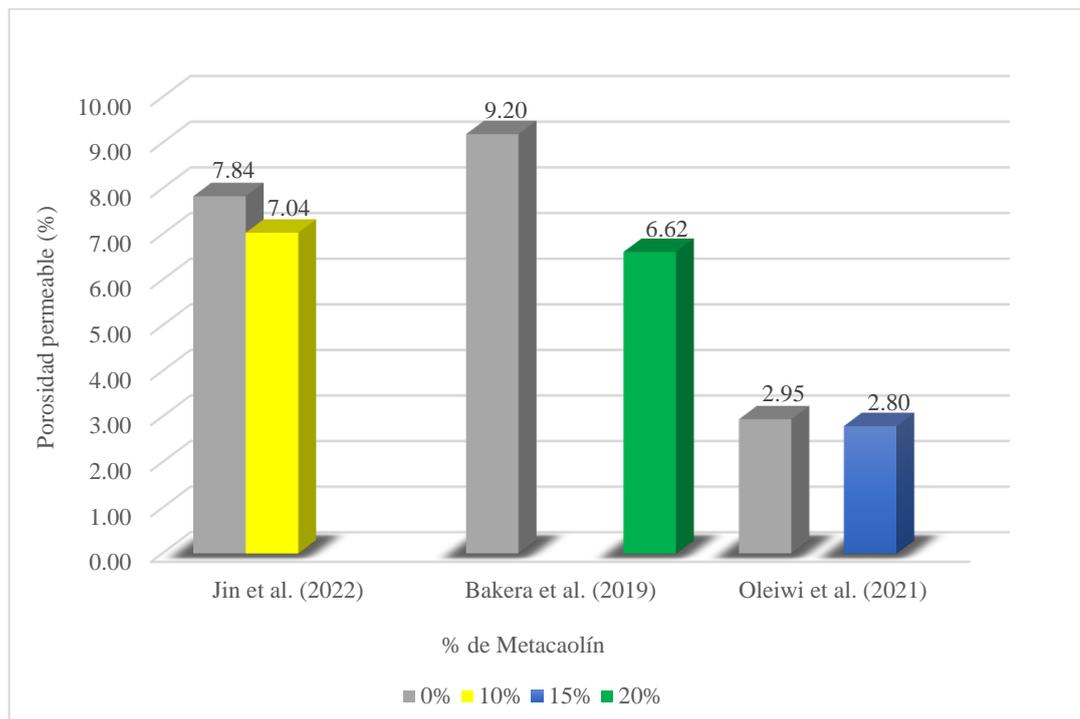


Figura N 39: Resultados de la porosidad del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 56 días de curado. Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura N°39, se observan los resultados de los ensayos de la porosidad del hormigón, que a mayor porcentaje de reemplazo de cemento por metacaolín, mayor es la reducción de la porosidad a los 56 días de curado, con sustituciones del 10%, 15% y 20% de metacaolín. No obstante, para sustituciones mayores al 20% de metacaolín el porcentaje de porosidad en el hormigón empieza a aumentar progresivamente.

Se observó que según Bakera et al. (2019), tuvo una reducción alcanzando una porosidad del 6.62% respecto a la prueba patrón reflejándose en una disminución del 28.04% con una sustitución del 20% de metacaolín en peso del cemento, con una

relación a/c de 0.50 a los 56 días de curado. Para Jin et al (2022), tuvo una reducción alcanzando el 7.04% respecto a la prueba patrón reflejándose en una disminución del 10.20% con una sustitución del 10% de metacaolín en peso del cemento, con una relación a/c de 0.45 a los 56 días de curado. Para Oleiwi et al. (2021), a los 56 días de curado y una relación a/c de 0.45, sus resultados con respecto a la porosidad se obtiene una reducción del 2.80% respecto a la mezcla patrón reflejándose en una disminución del 5.08% con una sustitución del 15% de metacaolín en peso del cemento.

En todas las investigaciones tomadas para este específico se llega a la misma conclusión, que la porosidad permeable se reduce con la sustitución de cemento por metacaolín con sustituciones del 10%, 15% y 20% en el hormigón, No obstante los resultados nos indican que, a mayor porcentaje de reemplazo de cemento por metacaolín, menor es la porosidad, además cabe resaltar que en la mayoría de los autores citados se concuerda que la sustitución porcentual optima es al 20%, debido a que reduce en un mayor rango la porosidad en el hormigón.

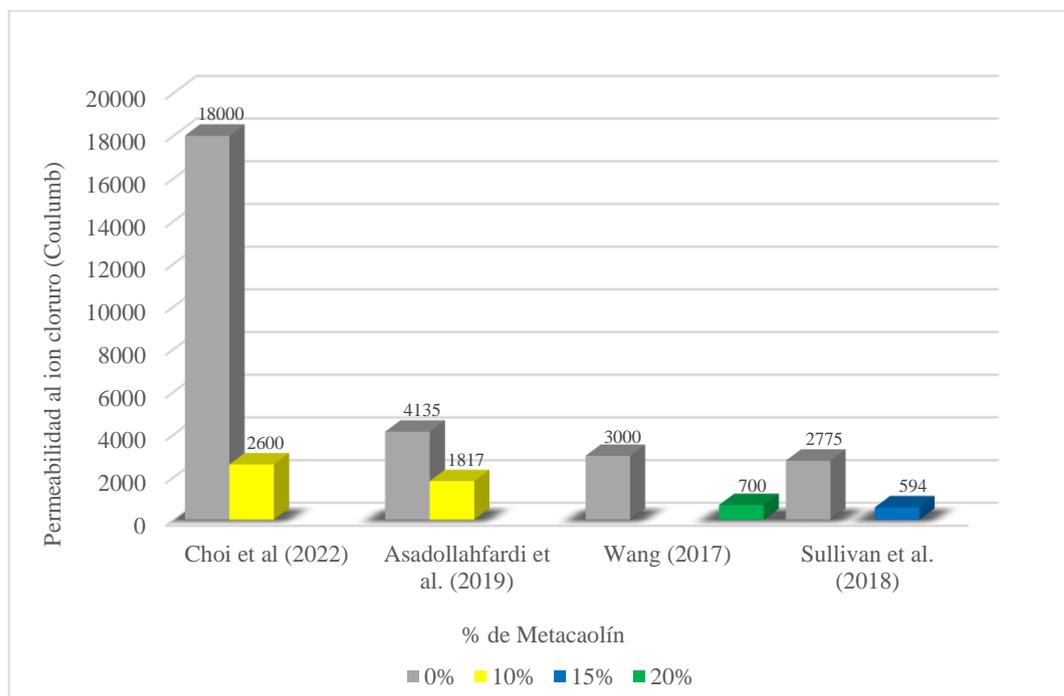
- Hipótesis Auxiliar

H0: Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento no reduce la porosidad del hormigón estructural.

H1: Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se reduce la porosidad del hormigón estructural.

Se rechaza la hipótesis nula H0 y se acepta la hipótesis alterna H1 puesto que en todos los casos el uso de metacaolín como sustituto porcentual del cemento, se reduce la porosidad a los 56 días de curado.

**Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se reduce la penetración de iones cloruros del hormigón estructural.**



*Figura N 40:* Resultados de la permeabilidad de iones cloruros del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 28 días de curado.

Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura N 40, La penetración a iones cloruros (Coulomb) disminuye, conforme se va aumentando el % de metacaolín, donde se observa que entre el 10% y 20% de sustitución la mayoría de los autores tienen una reducción óptima de la permeabilidad a los iones cloruros. Además, se observa que según Wang (2017), los resultados de los ensayos que, a mayor porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín, menor es la permeabilidad a los iones cloruros, siendo la sustitución óptima la del 20%, cuyo valor es 700 C, logrando una reducción del 76.67% respecto a la muestra patrón, con una relación a/c de 0.50, a los 28 días de curado. Para Choi et al (2022), se observa que para mayores sustituciones de cemento por metacaolín la permeabilidad a los iones cloruro disminuye notoriamente, siendo la sustitución óptima la del 10%, cuyo valor es de 2600 C, alcanzando una reducción del 85.56% respecto a la muestra patrón frente a los iones cloruros a una relación a/c del 0.5. Para Asadollahfardi et al. (2019), a los 28 días de curado y una relación a/c de 0.45, sus resultados con respecto a la prueba rápida de iones cloruros se observa un decrecimiento de la permeabilidad a los cloruros, siendo el óptimo porcentaje de

sustitución la del 10%, cuya carga es de 1817 C, alcanzando un 56.06% de disminución respecto a la muestra control. Según Sullivan et al. (2018), para sustituciones del 15% de cemento por metacaolín la permeabilidad es notoriamente más baja, siendo este resultado el óptimo porcentaje de sustitución cuyo valor carga es de 594 C, llegando a obtener una reducción del 78.60% respecto a la muestra patrón.

En todas las investigaciones tomadas para este específico se llega a la misma conclusión, que la permeabilidad a los iones cloruros disminuye notoriamente, ya que en los resultados nos indican que, a mayor porcentaje de reemplazo de cemento por metacaolín al 10%, 15% y 20%, menor es la permeabilidad a los iones cloruros, además cabe resaltar que la reducción máxima de la penetrabilidad de iones cloruros se obtuvo al 15% sustitución en el hormigón, alcanzando una categoría de permeabilidad, muy baja. Sin embargo, según los datos obtenidos, para algunos autores, sustituciones mayores al 20% tienden a aumentar la permeabilidad a los iones cloruros en el hormigón si sobrepasa este límite de sustitución.

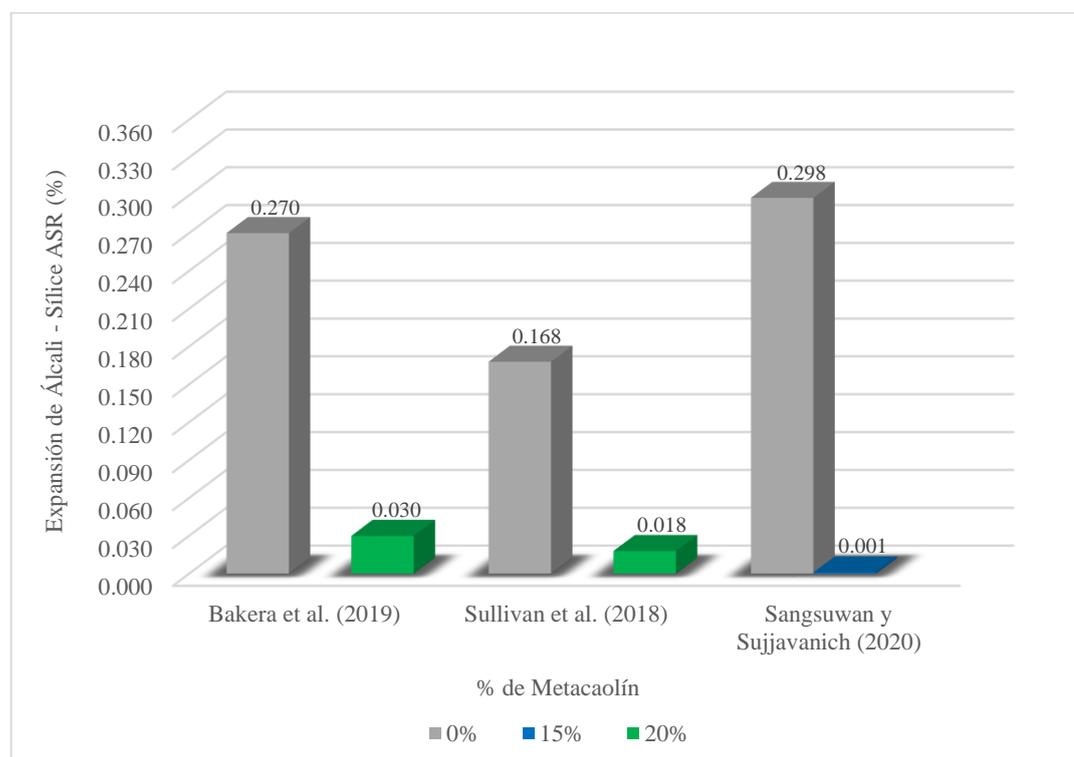
- Hipótesis Auxiliar

H0: Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento no reduce la penetración del ion cloruro del hormigón estructural.

H1: Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se reduce la penetración del a ion cloruro del hormigón estructural.

Se rechaza la hipótesis nula H0 y se acepta la hipótesis alterna H1 puesto que en todos los casos el uso de metacaolín como sustituto porcentual del cemento, reduce la permeabilidad de iones cloruro en el hormigón estructural a los 28 días de curado.

**Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se reduce la expansión álcali-sílice del hormigón estructural.**



*Figura N 41:* Resultados de la prueba de expansión de álcali – sílice (ASR) del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento, a los 14 días de curado. Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura N 41, La expansión álcali – sílice (ASR) en el hormigón disminuye significativamente, conforme se va aumentando el % de metacaolín como sustituto del cemento, donde se observa que entre el 15% y 20% la mayoría de los autores tienen una reducción óptima de la expansión álcali – sílice en el hormigón. Además, se observa que según Sangsuwan y Sujjavanich (2020), los resultados muestran que, a mayor porcentaje de sustitución de cemento por metacaolín, menor es la expansión álcali – sílice en el hormigón, siendo la sustitución óptima del 15%, cuyo valor es 0.001%, que representa una reducción del 99.66% respecto a la muestra patrón, con una relación a/c de 0.47, para los 14 días de curado. Para Bakera et al. (2019), se observa que para mayores sustituciones de cemento por metacaolín la expansión álcali – sílice, disminuye notoriamente, siendo la sustitución óptima la del 20%, obteniendo un valor de 0.030%, alcanzando una disminución del 88.89% frente a la muestra patrón, para una relación a/c constante de 0.50. Para Sullivan et al. (2018), a los 14 días de curado y una relación a/c de 0.43, sus resultados con respecto a la prueba de reacción álcali – sílice, se observa una disminución de la expansión, siendo

el óptimo porcentaje de sustitución la del 20%, cuyo valor es de 0.018%, logrando obtener una reducción del 89.29% respecto a la muestra patrón.

Finalmente, en todas las investigaciones tomadas para este específico se llega a la misma conclusión, que la expansión álcali – sílice disminuye notoriamente, ya que en la mayoría de los resultados nos indican que, a mayor porcentaje de reemplazo de cemento por metacaolín, menor es la expansión (ASR) respecto a la muestra patrón, además cabe resaltar que, según los autores citados, que la reducción máxima de la expansión (ASR), se obtuvo al 15% de sustitución. No obstante superar el 20% de sustitución genera un impacto negativo en la expansión álcali –sílice.

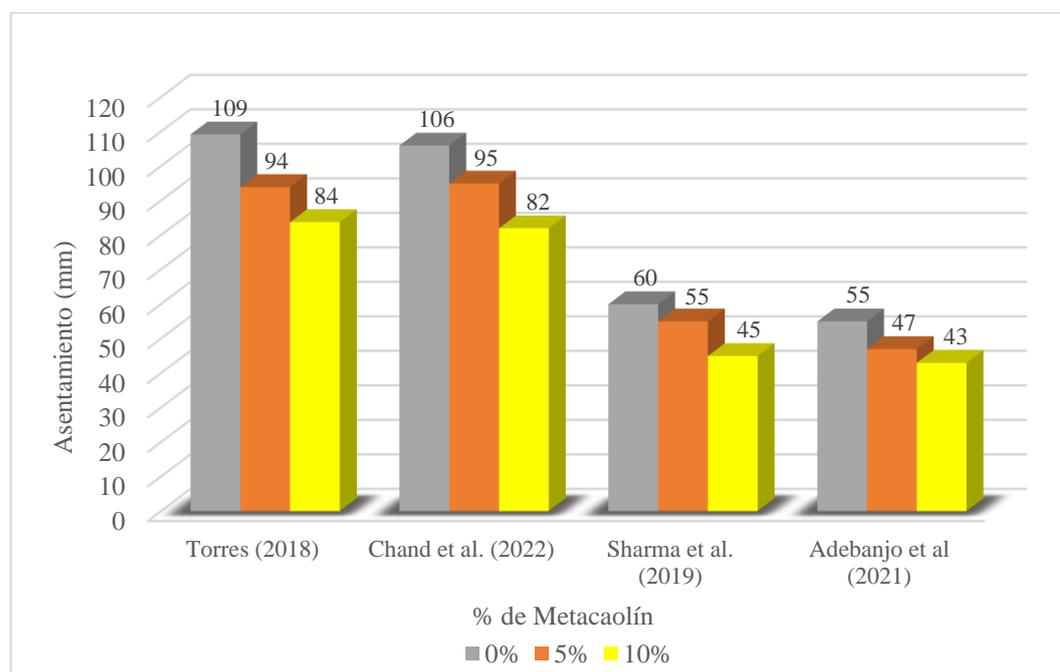
- Hipótesis Auxiliar

H0: Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento no reduce la expansión álcali – sílice del hormigón estructural.

H1: Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se reduce la expansión álcali – sílice del hormigón estructural.

Se rechaza la hipótesis nula H0 y se acepta la hipótesis alterna H1 puesto que en todos los casos el uso de metacaolín como sustituto porcentual del cemento, reduce la expansión álcali – sílice del hormigón estructural a los 14 días de curado.

**Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se incrementa el asentamiento del hormigón estructural.**



*Figura N 42:* Resultados de la prueba de asentamiento del hormigón vs. Autores con óptimos porcentajes de metacaolín como reemplazo parcial del cemento.  
Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura N°42, Se pudo observar que las cantidades en milímetros de las barras muestran la variación de disminución del asentamiento del hormigón en estado fresco conforme se va aumentando el porcentaje de metacaolín, por consiguiente, el asentamiento y la trabajabilidad también se ve afectada en todos los autores citados.

Según los resultados del asentamiento del hormigón para Torres (2018), desde la muestra patrón y al sustituir el porcentaje de metacaolín al 5% y 10% respecto al peso del cemento fue de 109 mm, 94 mm y 84 mm respectivamente con una relación a/c constante de 0.56. Para Chand et al. (2022), se observa que el asentamiento del hormigón también disminuye con la sustitución de cemento por metacaolín (5%, 10% y 15%) tomando como referencia la mezcla patrón fueron 106 mm, 95 mm, 82 mm y 72 mm, respectivamente para una relación a/c constante de 0.44. Para Adebajo et al. (2021) presento el mismo comportamiento cuando se va incrementando el porcentaje de metacaolín. Para la mezcla patrón fue de 55 mm y tanto para el 5% y 10% de sustitución al peso de cemento fue de 47 mm y 43 mm respectivamente. Para finalizar el asentamiento del hormigón según Sharma et al. (2019) también se va disminuyendo el asentamiento cada vez que se incrementa el porcentaje de

sustitución del metacaolín cuyos valores son 60 mm, 55 mm y 45 mm respecto a su muestra patrón y con adición del 5% y 10% respectivamente.

Para todos los casos el asentamiento del hormigón en estado fresco decrece conforme se incrementa la sustitución de cemento por metacaolín al 5% y 10% siendo estos valores menores a la mezcla patrón, Por lo tanto, en la mayoría de los autores citados se concuerda que tanto como el 5% y 10% de sustitución de metacaolín no mejora el asentamiento del hormigón.

- Hipótesis Auxiliar

H0: Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento no incrementa el asentamiento del hormigón estructural.

H1: Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se incrementa el asentamiento del hormigón estructural.

Se rechaza la hipótesis alterna H1 y se acepta la hipótesis nula H0 puesto que en todos los casos el uso de metacaolín como sustituto porcentual de cemento disminuye el asentamiento del hormigón en estado fresco perjudicando la trabajabilidad del mismo.

#### 6.4. Comparación de resultados

A continuación, se presenta, un resumen con los mejores resultados obtenidos para cada propiedad estudiada en el hormigón, con la finalidad de determinar el mejor porcentaje que puede beneficiar al hormigón sin comprometer otras propiedades tanto en estado fresco y endurecido.

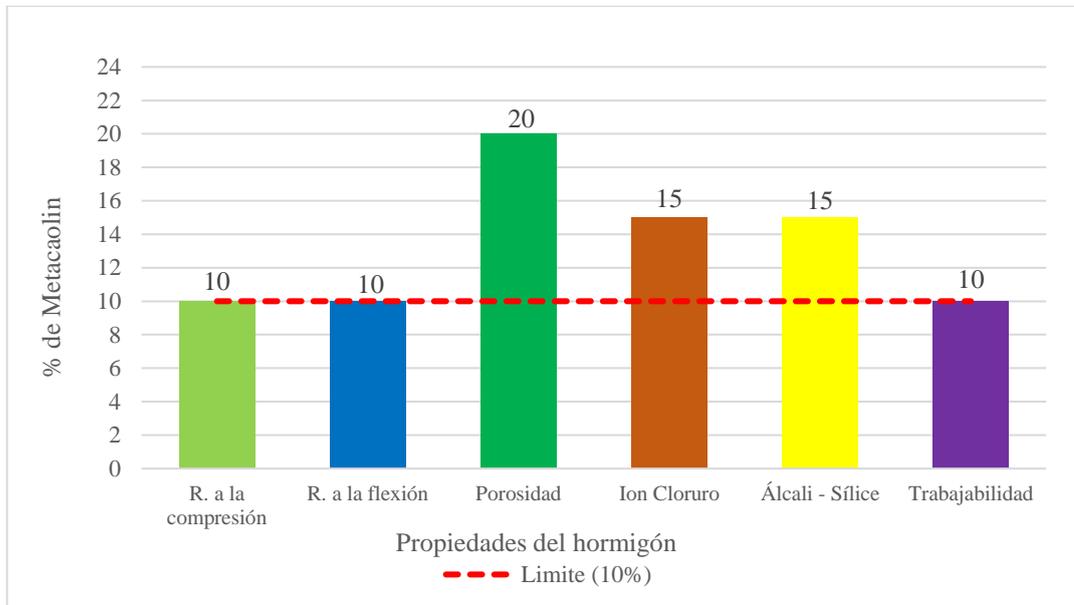


Figura N 43: Porcentaje de metacaolín óptimos vs propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido.

Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura N 43, los resultados obtenidos muestran con respecto a las propiedades mecánicas del hormigón, que para el ensayo de resistencia a la compresión y flexión, aumenta con el 10% de sustitución de cemento por metacaolín, mientras que para las propiedades de durabilidad del hormigón correspondientes a la permeabilidad, la porosidad se reduce a su máximo valor con el 20% de sustitución, mientras que para la permeabilidad de iones cloruro y la expansión álcali-sílice una sustitución del 15% fue suficiente para mejorar estas propiedades, no obstante el asentamiento hormigón en estado fresco sugieren que con un 10% de sustitución se logra obtener una consistencia entre plástica a blanda y una trabajabilidad aceptable. Finalmente, la sustitución óptima en porcentaje de metacaolín para poder mejorar la permeabilidad del hormigón sin descuidar otras propiedades en esta fresco y endurecido, es más conveniente una sustitución del 10% de cemento por metacaolín en las mezclas.

## DISCUSIÓN

De acuerdo con los artículos y tesis relacionados con el tema de nuestra investigación de la presente tesis, se analizaron cada uno de ellos y se seleccionaron los artículos cuyos resultados y datos se correlacionaban mejor con nuestros objetivos de nuestra investigación, En un primer grupo se presentan los artículos relacionados con la compresión, un segundo grupo relacionado con la flexión, un tercer grupo relacionado con la porosidad, un cuarto grupo relacionado con la penetración de iones cloruros, un quinto grupo relacionado con la reacción álcali-sílice y finalmente un sexto grupo relacionado con el asentamiento. Todos los grupos analizan su influencia en las propiedades físico-mecánicas en estado fresco y endurecido del hormigón estructural con la sustitución en porcentaje de cemento por metacaolín.

Según Parrales y Quirumbay (2022), Torres (2018), Sharma et al. (2019), Reddy y Karthik (2019) y Jin et al. (2017), los resultados recopilados reportan una notable mejora de la resistencia a la compresión del hormigón, con la sustitución de cemento por metacaolín en sus diseños de mezclas a los 7,14 y 28 días de curado, como se observan en las Figuras N 33, Figura N 34 y Figura N 35, aceptando la hipótesis 1. La resistencia a la edad de 28 días que se alcanzó fue de 220 kg/cm<sup>2</sup>, 232 kg/cm<sup>2</sup> y 394 kg/cm<sup>2</sup> con una sustitución del 10%, mientras que con un reemplazo del 20%, se obtuvieron 447 kg/cm<sup>2</sup> y 581 kg/cm<sup>2</sup>, en un rango de relación a/c de 0.40 a 0.56. Las diferencias de resultados entre resistencias entre los autores se deben principalmente a la variación de la relación a/c, mientras este valor fue menor, mayor fue la influencia que tuvo el metacaolín en aumentar la resistencia a la compresión, no obstante, el tipo metacaolín local, cemento y agregados usados, contienen diferentes características que también pueden variar los resultados en pequeña o gran medida

Para los siguientes artículos que tuvieron como objetivo medir la influencia del metacaolín sobre la resistencia a la flexión como Menhosh et al. (2019), Singh et al. (2022), Torres (2018), Reddy y Karthik (2019) y Sharma et al. (2019) se pudo contrastar lo ya aceptado en la hipótesis 2, de la resistencia a la flexión a los 7, 14 y 28 días de curado, como se observan en la Figura N 36, Figura N 37 y Figura N 38. Los autores citados sustituyeron 5%, 10%, 15% y 20% de metacaolín respecto al peso del cemento ayudando a aumentar la resistencia a la flexión a los 28 días obteniendo un valor de 24

kg/cm<sup>2</sup> con el 5%, al 10% de se obtuvo 64 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que al 15% de se obtuvo 33 kg/cm<sup>2</sup> y con un 20% sustitución un valor de 51 kg/cm<sup>2</sup>, respecto a la muestra patrón, manteniendo una relación a/c entre 0.40 a 0.56. Los resultados concuerdan que la sustitución en porcentaje de metacaolín tiene un límite del 20%.

Para los siguientes artículos que tuvo como objetivo calcular la porosidad penetrable como Bakera et al. (2019), Jin et al. (2022) y Oleiwi et al. (2021) se comparó con lo ya aceptado en la hipótesis de cantidad de porosidad penetrable. Como se observa en la Figura N 39, los autores sustituyeron 10% ,15% y 20% de metacaolín respecto al peso del cemento ayudando a reducir el volumen de poros hasta un 10.20%, 28.04% y 5.08% respecto a la muestra patrón manteniendo una relación a/c entre 0.45 a 0.50 a los 56 días de curado. La mayor reducción de la porosidad en el hormigón fue de 6.62% con un 20% de sustitución, representando una reducción del 28.04% respecto a la muestra patrón, siendo superior a los demás ensayos realizados, lo cual indica que el metacaolín favorece al refinamiento de poros del hormigón por su propiedad puzolánica aceptando la hipótesis 3.

Sobre los resultados recopilados sobre la penetrabilidad de iones cloruros del hormigón, Según Choi et al (2022), Asadollahfardi et al. (2019), Wang (2017) y Sullivan et al. (2018), reportaron resultados significativos en la reducción de la permeabilidad del hormigón, con la sustitución gradual de cemento por metacaolín, a la edad de 28 días de curado, como se observa en la Figura N 40, se lograron resultados óptimos con una sustitución del 10%, los valores fueron 2600 C y 1817 C, mientras que con el 15% se obtuvo 594 C y 700 C con el 20% de sustitución, No obstante en la mayoría de los ensayos realizados en un rango de relación a/c variable de 0.43 a 0.50, se obtuvo una reducción de la permeabilidad mayor del 55%, lo cual indica que el metacaolín favorece en la impermeabilización del hormigón, aceptando la hipótesis 4. Este comportamiento se debe a que el metacaolín mejora la densidad del hormigón por la reorganización de la microestructura.

Según Sangsuwan y Sujjavanich (2020), Bakera et al. (2019) y Sullivan et al. (2018), los autores obtuvieron buenos resultados, con la sustitución progresiva de cemento por metacaolín en el hormigón a la edad de 14 días de curado. Los resultados más favorables fueron al 15% y 20% de sustitución, sin embargo, la mayor reducción de la expansión

álcali-sílice se obtuvo con una sustitución del 15%, obteniendo una reducción del 0.001%, mientras que con el 20%, se obtuvo una expansión del 0.018% y 0.030%, como se puede constatar en la Figura N 41. No obstante la relación a/c fue variable entre 0.43 a 0.50. Pero aun así en todos los casos se llegó a alcanzar una reducción de la expansión mayor al 85%, aceptando la hipótesis 5. Esta reducción se debe principalmente a la acción química y física que presenta el metacaolín en el hormigón.

Para los siguientes artículos que tuvieron como objetivo hallar la influencia positiva o negativa del metacaolín sobre el asentamiento del hormigón en estado fresco, como Sharma et al. (2019), Torres (2018), Chand et al. (2022) y Adebajo et al. (2021) se pudo confrontar lo ya aceptado en la hipótesis 6, referente al asentamiento del hormigón estructural. Como se observó en la Figura N 42, los autores citados sustituyeron 5% y 10% de metacaolín respecto al peso del cemento, reduciendo el asentamiento hasta 8 mm y 15 mm respectivamente pasando de un estado fluido a blando manteniendo una relación a/c entre 0.40 y 0.56. Sin importar la relación a/c igual tuvo una disminución de la trabajabilidad del hormigón estructural.

## CONCLUSIONES

1. El uso de metacaolín como sustituto del cemento tiene un alto potencial para reducir la permeabilidad del hormigón estructural, se obtuvo los mejores resultados de la resistencia a la compresión con una sustitución del 10%, logrando alcanzar a los 28 días de curado una resistencia máxima del 394 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que para el ensayo de resistencia a la flexión a los 28 días de curado se llega a una resistencia máxima de 64 kg/cm<sup>2</sup>, sustituyendo el 10% de metacaolín, la porosidad presenta buenos resultados con el 20% de sustitución, obteniendo una porosidad de 6.62% a los 56 días de curado, la sustitución del 15% de metacaolín, es beneficiosa en reducir la permeabilidad al cloruro en el hormigón, llegando a los 594 C a los 28 días de curado, para la expansión álcali-sílice se alcanza su máxima reducción con el 15% de sustitución cuyo valor obtenido es del 0.001%, a los 14 días de curado, sin embargo el asentamiento disminuye conforme se incrementaba el porcentaje de sustitución del 5% y 10% de metacaolín, por lo cual no es recomendable sustituir más del 10% de metacaolín para no perjudicar la trabajabilidad del hormigón. Finalmente, la sustitución del 10% de metacaolín es beneficiosa si se requiere obtener un hormigón menos permeable, con excelentes propiedades físico – mecánicas y un asentamiento dentro de los rangos permitidos.
2. La resistencia a la compresión aumenta progresivamente para dosis de sustitución entre el 5% y 20%, de metacaolín por cemento a los 7,14 y 28 días, obteniendo valores óptimos de resistencias a la compresión respecto la prueba patrón en el rango del 10% y 20% de sustitución. Los mejores resultados se logran al 10% de sustitución, cuyo valor alcanzado fue de 307 kg/cm<sup>2</sup>, 357 kg/cm<sup>2</sup> y 394 kg/cm<sup>2</sup>, para los 7,14 y 28 días de curado, mejorando respectivamente en un 29.50%, 29.82% y 29.48% respecto a la mezcla patrón, superando a los demás ensayos, como se observan en la Figura N 33, Figura N 34 y Figura N 35, por lo tanto, el metacaolín como sustituto de cemento alcanza buenas resistencias con sustituciones óptimas del 10%.
3. La resistencia a la flexión aumenta a los 7,14 y 28 días de curado progresivamente para dosis de sustitución de cemento por metacaolín entre el 5% al 20%, como se observan en la Figura N 36, Figura N 37 y Figura N 38. Se obtuvo un óptimo resultado con el 10% de sustitución, cuyas resistencias obtenidas son 50 kg/cm<sup>2</sup>, 53 kg/cm<sup>2</sup> y 64 kg/cm<sup>2</sup> para los

7,14 y 28 días de curado, las cuales superan en un 38.35%, 43.24% y 38.27% respecto al ensayo control, respectivamente. Por lo tanto, estos resultados permiten determinar que al sustituir un 10% de cemento por metacaolín se consigue mejores resultados sobre la resistencia a la flexión del hormigón estructural.

4. La porosidad del hormigón decrece cuando se sustituye cemento por metacaolín al 10%, 15% y 20% a los 56 días de curado, se obtienen los siguientes resultados cuyos valores son 7.04%, 2.80% y 6.62% alcanzando reducir en un 10.20%, 5.08% y 28.04% respecto al ensayo control, respectivamente. Estos resultados permiten determinar que el 6.62% de porosidad, representa una reducción del 28.04%, porcentaje que se obtuvo con una sustitución óptima del 20% de metacaolín.
5. La penetrabilidad de iones cloruros decrece conforme se sustituye en porcentaje el peso del cemento por metacaolín en el hormigón, obteniendo una menor penetrabilidad a iones cloruros con sustituciones de entre el 10%, 15% y 20% de metacaolín, como se muestra en la Figura N 40. Logrando un resultado óptimo con el 15% de sustitución a la edad de 28 días de curado, cuyo valor es de 594 C, alcanzando reducir en un 78.60% la permeabilidad, respecto a la mezcla patrón. Además, la influencia del metacaolín en el hormigón logro alcanzar una clasificación de permeabilidad al ion cloruro de “alta” a “muy baja”. Esto se debe que el metacaolín tiene un evidente potencial para reducir la entrada de iones cloruros, densificando la matriz por su alto contenido de alúmina como se puede observar en la Tabla N 1.
6. La expansión Álcali-Sílice a los 14 días de curado, disminuye con la incorporación progresiva de metacaolín en la mezcla. Se alcanzó una reducción máxima de la expansión Álcali - Sílice al 15% y 20% de sustitución, logrado obtener óptimos resultados con el 15% de sustitución como se puede observar en la Figura N 41, cuyo valor obtenido es de 0.001% alcanzando una reducción del 99.66% respecto la mezcla patrón, no obstante en la mayoría de resultados pasaron de una clasificación de expansión “reactiva” a “inocua”, evidenciando que el metacaolín tiene un gran potencial de mitigar la expansión álcali-sílice.

7. La disminución paulatina del asentamiento al sustituir tanto un 5% o 10% de metacaolín respecto al peso del cemento con cualquier relación a/c es inevitable. Sin embargo, se obtuvo el siguiente comportamiento en todas las mezclas patrón con una consistencia entre blanda a fluida según la Tabla No 5, al sustituir un 5% de metacaolín este decrece hasta un 14.55%, partiendo de un asentamiento inicial de 55 mm se redujo hasta los 47 mm, mientras que con una sustitución del 10%, teniendo inicialmente un asentamiento de 109 mm, decrece hasta un 23.26%, cuyo valor es de 84 mm, representando para ambos casos una reducción de 8 mm y 25 mm, respectivamente. Por lo tanto, estos valores se encuentran dentro de los límites de trabajabilidad hasta con un 10% de sustitución al tener una consistencia final de entre plástica a blanda.

## RECOMENDACIONES

1. No sobrepasar la dosis óptima del 10% de metacaolín debido a que genera un impacto negativo en la resistencia a la compresión del hormigón, no obstante, se debería realizar ensayos previos al diseño final, teniendo en cuenta un enfoque químico idóneo entre el cemento y metacaolín para mejorar las propiedades físico-mecánicas.
2. Tener en cuenta el uso del 10% de metacaolín ya que cumple de forma óptima el objetivo de aumentar la resistencia a la flexión del hormigón con cemento Portland Tipo I, sin embargo, se recomienda realizar ensayos con diferentes tipos de cementos disponibles en el mercado actual, con la finalidad de saber el comportamiento positivo o negativo en la resistencia a la flexión con la influencia del metacaolín.
3. Se sugiere la sustitución del 20% de metacaolín ya que cumple de forma óptima el objetivo de reducir el volumen de poros y específicamente con mezclas que tengan una relación a/c mayor, ya que generaría un impacto negativo en el volumen de poros del hormigón estructural. Además, sería conveniente elaborar muestras de concreto sustituidas con metacaolín aumentando a razón del 1%, para encontrar con mayor precisión el porcentaje que disminuya mejor la porosidad.
4. Se sugiere una sustitución máxima del 15% y una relación a/c baja en el diseño de mezcla si se requiere reducir en un mayor rango la permeabilidad de iones cloruros en el hormigón, no obstante, se recomienda que se realicen ensayos de barrido microscópico “Análisis de difracción de Rayos X (DRX)” para conocer la estructura cristalográfica del metacaolín y su influencia con la permeabilidad.
5. Para tener mejores resultados para suprimir la expansión Álcali-Sílice no exceder la sustitución del 15% de metacaolín, sin embargo, se debe establecer un nivel de sustitución eficaz teniendo en cuenta los agregados utilizados en el diseño de mezcla respecto a su naturaleza química por lo que es importante saber si los agregados son reactivos o no. Además, sería propicio reducir el contenido de álcalis en el hormigón.

Se enfatiza si se desea usar algún porcentaje de metacaolín para mejorar alguna otra propiedad del hormigón, es conveniente realizar ensayos en estado fresco previos al diseño final para asegurar que la consistencia se encuentre entre fluida o blanda, con la finalidad que al agregar tanto un 5% o 10% de metacaolín, la consistencia baje máximo a estado plástico. Además, se sugiere realizar estudios con aditivos plastificantes o superplastificante para contrarrestar el efecto del metacaolín en la consistencia y trabajabilidad del hormigón.

6. Se recomienda a futuras investigaciones ligadas al tema de fondo de la presente tesis, orientar su investigación a un desarrollo más tecnológico, con respecto a los nuevos sustitutos para hormigones estructurales como el metacaolín, de tal manera que permitan la actualización y capacitación del entorno ligado a la industria de la construcción en el Perú y se impulse la fabricación de este material en el mercado de la construcción, ya que actualmente no hay industrias productoras de este material por lo que su costo es elevado y de difícil accesibilidad. Se deben valorar las propiedades que este material confiere al hormigón pudiéndose utilizar en estructuras de retención de aguas, ya que no es tóxico y reduce la permeabilidad, en lugares donde los áridos no reactivos son escasos ya que puede suprimir la reacción álcali-sílice y donde se requiera mejorar el desempeño estructural y reducir el impacto ambiental que produce el cemento al medio ambiente. Además, se sugiere realizar un análisis comparativo de los costos por la incorporación de este material en el diseño de mezcla y con diferentes tipos de aditivos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adebanjo, A. U., Dahunsi, B. I. O., y Labiran, J. O. (2021). Effects of concrete grades on strength characteristics of metakaolin modified recycled aggregate concrete. *Nigerian Journal of Technological Development*, 18(3), 184-193.  
doi:10.4314/njtd.v18i3.3
- Ahmed, M. F. (2021). Feasibility tests of high volume blended metakaolin-brick powder concrete incorporating wastes of crushed brick and plastic as aggregate. *Civil Engineering and Architecture*, 9(6), 1837-1845. doi:10.13189/cea.2021.090616
- Arana, M. A. (2018). El hormigón, material fundamental para la infraestructura. *Centro de Innovación Tecnológica para la Construcción*.
- Arias, A. y Becerra, J. (2017). *Análisis de la resistencia a compresión y a flexión en morteros elaborados con geopolímeros a base de ceniza volante y metacaolín activados alcalinamente* [Tesis de postgrado]. Universidad La gran Colombia, Bogotá, Colombia.
- Asadollahfardi, G., MohsenZadeh, P., Saghravani, S. F., y Mohamadzadeh, N. (2019). The effects of using metakaolin and micro-nanobubble water on concrete properties. *Journal of Building Engineering*, 25  
doi:https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100781
- Ayobami, B., Josep, A., y Bamidele, D. (2019). Response Surface Analysis of the Compressive Strength of Metakoalin Self-Compacting Concrete. *Advances in Science and Technology Research Journal*, Vol. 13(2), 7-13.  
doi:https://doi.org/10.12913/22998624/105608
- Bakera, A. T., y Alexander, M. G. (2019). Use of metakaolin as a supplementary cementitious material in concrete, with a focus on durability properties. *RILEM Technical Letters*, 4, 89-102. doi:10.21809/rilemtechlett.2019.94
- Balykov, A. S., Nizina, T. A., Volodin, V. V., y Kyashkin, V. M. (2021). Effects of calcination temperature and time on the physical-chemical efficiency of thermally activated clays in cement systems. *Materials Science Forum*, 1017.61-

70. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1017.61

Cabrera, B., y Ramirez, C. (2019). *Evaluación de la resistencia, permeabilidad y absorción capilar de bloques de hormigón elaborados con adición de emulsión de parafina en la ciudad de Abancay* [Tesis de maestría]. Universidad Tecnológica de los Andes, Abancay, Perú.

Camac, J. (2018). *Influencia al incorporar vidrio de sosa, cal y sílice en la resistencia del concreto  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup>* [Tesis de pregrado]. Universidad Peruana Los Andes, Huancayo, Perú.

Cappelleso, V. G., Petry, N. S., Longhi, M. A., Masuero, A. B., y Dal Molin, D. C. C. (2022). Reduction of concrete permeability using admixtures or surface treatments. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 7(1) doi: 10.1007/s41024-022-00176-z

Chand, G., Kumar, A., y Ram, S. (2022). Comparative study of metakaolin, pumice powder and silica fume in producing treated sustainable recycled coarse aggregate concrete by adopting two-stage mixing. *Cleaner Engineering and Technology*, 9. doi:10.1016/j.clet.2022.100528

Chen, Y., Romero Rodriguez, C., Li, Z., Chen, B., Çopuroğlu, O., y Schlangen, E. (2020). Effect of different grade levels of calcined clays on fresh and hardened properties of ternary-blended cementitious materials for 3D printing. *Cement and Concrete Composites*, 114 doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103708

Choi, S. I., Park, J. K., Han, T. H., Pae, J., Moon, J., y Kim, M. O. (2022). Early-age mechanical properties and microstructures of Portland cement mortars containing different admixtures exposed to seawater. *Case Studies in Construction Materials*, 16 doi:10.1016/j.cscm.2022.e01041

Feijoo, J. y Sánchez, L. (2020). *Características físico-mecánicas de los agregados con adición de policarboxilato para mejorar las propiedades del hormigón* [Tesis de pregrado]. Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Fernandes M. I. G. (2005), *Caracterización petrográfica, química y física de los agregados de granito en el hormigón. Estudios de casos de construcción*, [Tesis

de Doctorado en Geología], Universidad de Porto, Porto, Portugal.

- Gallegos,G. (2019) *.Estudio comparativo de las propiedades físico-mecánicas de compositos elaborados a partir de matrices de cenizas de bagazo de caña y madera con poliestireno expandido* [ Tesis de maestría],Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,México.
- Gómez, A. (2013). *Caracterización y utilización de puzolanas como aditivos minerales activos en cementos. Aplicación en viviendas de bajo coste* [Tesis de pregrado].Universitat Politecnica de Valencia,Valencia,España.
- Keerio M., Abdullah S., Kumar A., Naraindas B. y Karm A. (2021). Effect of local metakaolin developed from natural material soorh and coal bottom ash on fresh, hardened properties and embodied carbon of self-compacting concrete. *Environmental Science and Pollution Research International*, 28(42), 60000-60018. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-021-14960-w>.
- Lopez,J. y Tufino,W.(2020).*Relación agua/cementante para mejorar las propiedades de los hormigón fluidos premezclados de alta resistencia* [ Tesis de pregrado].Universidad Ricardo Palma,Lima,Perú.
- Masías,K. (2018).*Resistencia a la flexión y tracción en el hormigón usando ladrillo triturado como agregado grueso* [ Tesis de pregrado ], Universidad de Piura,Piura,Perú.
- Mejía-Barrera, C. A., Sierra-Arango, L., Sergio Andrés Arboleda, y Ubany de Jesús Zuluaga-de los Ríos. (2021). Evaluación técnica del potencial cementante de arcillas provenientes de los residuos de la construcción y la demolición. *TecnoLogicas*, 24(52).doi:<https://doi.org/10.22430/22565337.2038>
- Muhammad A., Thienel K. y Sposito R. (2021). Suitability of blending rice husk ash and calcined clay for the production of self-compacting concrete: A review. *Materials*, 14(21), 6252. doi:<https://doi.org/10.3390/ma14216252>
- Norma ASTM C642 (2021). *Método de prueba estándar para absorción en hormigón endurecido*. Obtenido de: <https://www.astm.org/c0642-21.html>

- Norma técnica peruana 339.034 (2015). *Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del hormigón en muestras cilíndricas*, 4º Edición. Obtenido de: <https://pdfcoffee.com/ntp-339034-metodo-de-ensayo-normalizado-para-la-determinacion-de-la-resistencia-a-la-compresion-del-hormigon-en-muestras-cilindricas-2-pdf-free.html>
- Norma técnica peruana 339.035 (2022). *Medición del asentamiento del hormigón de cemento hidráulico*. Método de ensayo, 5º Edición. Obtenido de: <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/aprueban-normas-tecnicas-peruanas-y-textos-afines-referentes-resolucion-directoral-no-002-2022-inacaldn-2050811-1/>
- Norma técnica peruana 339.078 (2012). *Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del hormigón en vigas simplemente apoyadas con cargas a lo tercios del tramo.*, 3º Edición. Obtenido de: <https://sni.org.pe/aprueban-normas-tecnicas-peruanas-version-2017-referentes-a-fertilizantes-liquidados-hormigon-cales-cementos-y-otros/>
- Norma técnica peruana 339.234 (2017). *Método de ensayo para determinar la penetración de iones de cloruro en el hormigón por exposición a solución salina*, 2º Edición. Obtenido de: <https://www.deperu.com/normas-tecnicas/NTP-339-234.html>
- Norma Técnica Peruana 400.037, 2018. (08 de febrero 2018). *Agregados para el hormigón*. Requisitos, 4º Edición. Obtenido de: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/521995/109798624273699467520200213-14458-13b4ep7.pdf>
- Oleiwi, H., Wang, Y., Augustus-Nelson, L., Wang, Y., Whittleston, G., & Muttashar, M. (2021). The effect of metakaolin and hybrid polymers on the microstructure of concrete. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 9(1), 162-173. doi:10.21533/pen.v9i1.1782
- Parrales, E. G., y Quirumbay, M. D. (2022). *Diseño de mezcla de hormigón utilizando Metacaolin para obtener una resistencia a la compresión mayor a 210 Kg/cm<sup>2</sup>* [Tesis de pregrado]. Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad,

Ecuador.

- Reddy, S. S., y Reddy, M. A. K. (2021). LIME CALCINED CLAY CEMENT (LC3): A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 796(1) doi:10.1088/1755-1315/796/1/012037.
- Reddy, V. M., y Karthik, T. S. (2019). Pcc constituent's quantification through partial replacement of fine aggregate and cement. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(3), 6426-6429. doi:10.35940/ijrte.C5705.098319
- Rodriguez,L. y Vasquez,D.(2019).*Propiedades físicas-mecánicas del hormigón estructural con sustitución del cemento por metacaolín y ceniza volante, Nuevo Chimbote* [Tesis de pregrado], Universidad Nacional del Santa,Chimbote,Perú.
- Rodriguez,R.(2018).*Comportamiento del hormigón añadido metacaolín como sustituto del cemento, utilizando los agregados existentes en la provincia de Paztaza* [ Tesis de pregrado], Universidad técnica de Ambato,Ambato,Ecuador.
- Sangsuwan, C., y Sujjavanich, S. (2020). Influence of type and compositions of SCMs on expansion of mortar bars from alkali silica reaction. *Engineering Journal*, 24(1), 1-10. doi:10.4186/ej.2020.24.1.1
- Sicha,G.(2019).*Influencia de la adición del metacaolín en la permeabilidad del hormigón de cemento Portland* [Tesis de pregrado], Universidad Nacional de Ingeniería,Lima,Perú.
- Sullivan, M. S., Chorzepa, M. G., Hamid, H., Durham, S. A., y Sonny Kim, S. (2018). Sustainable materials for transportation infrastructures: Comparison of three commercially-available metakaolin products in binary cementitious systems. *Infrastructures*, 3(3) doi: 10.3390/infrastructures3030017
- Torres,E.(2018).*Determinación de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de un hormigón  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup> con sustitución al cemento con ladrillo de arcilla pulverizado, Nuevo Chimbote 2018*. [Tesis de pregrado]. Universidad Cesar Vallejo,Lima,Perú.
- Wang, X. (2017). Analysis of hydration-mechanical-durability properties of metakaolin

blended concrete. *Applied Sciences (Switzerland)*, 7(10).doi:  
10.3390/app7101087

Younis, K. H., Amin, A. A., Ahmed, H. G., y Maruf, S. M. (2020). Recycled aggregate concrete including various contents of metakaolin: Mechanical behavior. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 0-17.  
doi:10.1155/2020/8829713

## ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia de la investigación.

### METACAOLIN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO PARA REDUCIR LA PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Índice	Método
Problema principal	Objetivo General	Hipótesis General	Independiente	Indicadores	
<p>¿En qué medida el metacaolín como sustituto del cemento influye en la permeabilidad del hormigón estructural?</p>	<p>Determinar el metacaolín como sustituto del cemento para reducir la permeabilidad del hormigón estructural según las fuentes consultadas y normas nacionales e internacionales.</p>	<p>Al determinar el metacaolín como sustituto del cemento se reduce la permeabilidad del hormigón estructural.</p>	<p>Metacaolín como sustituto del cemento</p>	<p>Porcentaje de metacaolín</p>	<p>El nivel de investigación es descriptivo ya que se investigan los resultados recopilados de tesis, ensayos, artículos y libros para determinar un porcentaje óptimo de metacaolín que sustituirá al cemento en el diseño de mezcla que favorezca la permeabilidad</p>
<p><b>Problemas Específicos</b>                      a) ¿En qué medida el porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento influye en la resistencia a la compresión del hormigón estructural?                       b) ¿En qué medida el porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento influye en la</p>	<p><b>Objetivo Específicos</b>                      a) Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para incrementar la resistencia a la compresión del hormigón estructural.                      b) Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para incrementar la resistencia a la flexión del hormigón estructural.</p>	<p><b>Hipótesis Especificas</b>                      a) Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se incrementa la resistencia a la compresión del hormigón estructural.                      b) Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se incrementa la resistencia a la flexión del hormigón estructural.</p>	<p><b>Dependiente</b>                       Permeabilidad del hormigón estructural</p>	<p>Resistencia a la compresión                       Resistencia a la flexión</p>	

resistencia a la flexión del hormigón estructural?

del hormigón estructural.

Problemas Específicos	Objetivo Específicos	Hipótesis Especificas	Dependiente	Indicadores
c) ¿En qué medida el porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento influye en la porosidad del hormigón estructural?	c) Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir la porosidad del hormigón estructural.	c) Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se reduce la porosidad del hormigón estructural.	Permeabilidad del hormigón estructural	Permeabilidad
d) ¿En qué medida el porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento influye en la penetración del ion cloruro del hormigón estructural?	d) Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir la penetración del ion cloruro del hormigón estructural.	d) Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se reduce la penetración del ion cloruro del hormigón estructural.		
e) ¿En qué medida el porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento influye en la expansión álcali-sílice del hormigón estructural?	e) Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir la expansión álcali-sílice del hormigón estructural.	e) Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se reduce la expansión álcali-sílice del hormigón estructural.		

El método aplicado fue el deductivo, orientado a un enfoque cuantitativo y como instrumento de recolección de datos retro lectivo ya que se usan tablas, de tipo descriptivo, correlacional y explicativo. Es una investigación causal (causa - efecto)

f) ¿En qué medida el porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento influye en el asentamiento del hormigón estructural?

f) Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para incrementar el asentamiento del hormigón estructural.

f) Al determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento se incrementa el asentamiento del hormigón estructural.

Asentamiento

Fuente: Elaboración propia.

## Anexo 2: Subtemas – Selección documental: Referencias - Resúmenes - Subtemas identificados

Nº	Autor	Título	Método	Resumen	ipo	ño
1	Bakera, A. T., & Alexander, M. G.	Use of metakaolin as a supplementary cementitious material in concrete, with a focus on durability properties.	Experimental	Aplicación de metacaolín en diferentes tipos de hormigones para mejorar el rendimiento del hormigón y sus propiedades de durabilidad y resistencia.	Artículo	2017
2	Sullivan, M. S., Chorzepa, M. G., Hamid, H., Durham, S. A., & Sonny Kim, S.	Sustainable materials for transportation infrastructures: Comparison of three commercially-available metakaolin products in binary cementitious systems. Infrastructures.	Experimental	Uso de diferentes tipos de materiales cementante suplementarios: metacaolín del mercado estadounidense para la fabricación de morteros y hormigones para ensayos de resistencia y durabilidad.	Artículo	2018
3	Asadollahfardi, G., MohsenZadeh, P., Saghravani, S. F., & mohamadzadeh, N.	The effects of using metakaolin and micro-nanobubble water on concrete properties.	Experimental	Reemplazado parcialmente del cemento por metacaolín y aplicación de agua enriquecida con micro-nano burbujas, se midieron las resistencias a la compresión, la flexión y la tracción, la resistividad del concreto y la absorción de agua.	Artículo	2018
4	Sharma, R. K., Gupta, T., & Chouhan, D. S.	Potential utilization of granite waste with metakaolin in sustainable concrete.	Experimental	Incorpora lechada de granito y metacaolín como reemplazo parcial del cemento. Se han evaluado las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón modificado para mejora la resistencia a la compresión y la flexión. La producción de nuevo hormigón compuesto será sostenible y ventajosa para el medio ambiente y la sociedad.	Artículo	2019

5	Olewi, H., Wang, Y., Augustus-Nelson, L., Wang, Y., Whittleston, G., & Muttashar, M	The effect of metakaolin and hybrid polymers on the microstructure of concrete. Periodicals of Engineering and Natural Sciences.	Experimental	El objetivo es producir un hormigón duradero, endurecido con distribuciones impermeables o de tamaño de poro pequeño, por lo que reducirían el flujo inherente. - Las imágenes en 3D de la mezcla de cemento con metacaolín (15%) tienen un bajo número de huecos y la forma parece circular ya que el diámetro y el área superficial de los poros a disminuido en comparación con la mezcla patrón.-	Articulo	2019
6	Torres,E.	Determinación de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de un concreto f'c=210 kg/cm2 con sustitución al cemento con ladrillo de arcilla pulverizado, Nuevo Chimbote 2018.	Experimental	La tesis tuvo por objetivo determinar las propiedades físicas, químicas y mecánicas del concreto, sustituyendo porcentajes de cemento con ladrillo de arcilla pulverizado al 5%, 10% y 15% de un concreto f'c=210kg/cm2. - Se concluye que la adición de 5% de ladrillo arcilla calcinada mejora las propiedades mecánicas. En compresión mejor es el 10%MK. Para flexión el ideal es de 5% MK .Para tracción el ideal es de 5% MK	Tesis	2019
7	Adebanjo, A. U., Dahunsi, B. I. O., & Labiran, J. O.	Effects of concrete grades on strength characteristics of metakaolin modified recycled aggregate concrete. Nigerian Journal of Technological Development,	Experimental	Este artículo describe el cómo se utilizó metacaolín (MK) de producción local como aditivo en concreto con agregados reciclados de grados M 25 y M 30. El contenido de MK varió de 0 a 15 % en intervalos de 5 % para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del hormigón estructural.	Articulo	2019
8	Singh O., Kr S. & Pareek R.	Estudio de propiedades mecánicas del hormigón mediante sustitución de árido grueso natural por árido grueso reciclado con metacaolín. Serie de conferencias de la IOP.	Experimental	Estudio las propiedades frescas del concreto, se realizó la prueba de asentamiento y analizar las propiedades de endurecimiento de MK con reciclado concreto de mezcla base de agregado grueso (RCA).	Articulo	2019
9	Jin J., Yuan S., Lv Z. & Sun Q.	Development of backfill concrete including coal gangue and metakaolin and prediction of compressive strength by extreme learning machine.	Experimental	El objetivo principal de esta investigación es desarrollar hormigón de relleno que incluya ganga de carbón y metacaolín para reducir los residuos sólidos.	Articulo	2020

10	Al Menhosh, A. A., Wang, Y., Augustus Nelson, L., Dakhil, A. J., & Matoq, J. A.	Sustainable high-performance concrete using metakaolin additive and polymer admixture: mechanical properties, durability and microstructure.	Experimental	El artículo muestra los resultados de un estudio sobre el efecto de la mezcla de metacaolín y polímero en el comportamiento mecánico y las propiedades de durabilidad, como la permeabilidad, la carbonatación y la penetración de cloruro, el ataque químico, la tasa de absorción de agua y la tasa de corrosión del acero de refuerzo en el hormigón.	Artículo	2021
11	Parrales Plua, E. G., & Quirumbay Vera, M. D.	Diseño de mezcla de hormigón utilizando Metacaolín para obtener una resistencia a la compresión mayor a 210 Kg/cm <sup>2</sup> .	Experimental	El presente trabajo de investigación plantea obtener la dosificación de mezcla de hormigón óptima que supere una resistencia a la compresión de f'c 210 kg/cm <sup>2</sup> , en las cuales se diseñaran dosificaciones con diferentes porcentajes de puzolana natural como el metacaolín reemplazando parcialmente el cemento mediante probetas de concreto. Adicionalmente se realizará el análisis de precios entre el hormigón simple y el hormigón con metacaolín para dar a conocer su factibilidad económica El concreto mezclado con MK tenía un asentamiento más bajo que el concreto de control porque el MK tiene una superficie específica más alta que el cemento. Realizaron estudios experimentales sobre el grado de reacción de MK para mezcla de pasta de cemento MK y demostraron que a edades tempranas de curado, la velocidad de reacción de MK en mezclas de cemento-MK era más alta que la de humo de sílice en mezclas de humo de sílice-cemento. Los aspectos de durabilidad, como las resistencias a la sorción, penetración de agua, encharcamiento de sal y carbonatación, mejoraron debido a las adiciones	Tesis	2021
12	Wang, X. -.	Análisis de las propiedades de hidratación-mecánica-durabilidad del hormigón adicionado con metacaolín	Experimental	El presente trabajo de investigación plantea obtener la dosificación de mezcla de hormigón óptima que supere una resistencia a la compresión de f'c 210 kg/cm <sup>2</sup> , en las cuales se diseñaran dosificaciones con diferentes porcentajes de puzolana natural como el metacaolín reemplazando parcialmente el cemento mediante probetas de concreto. Adicionalmente se realizará el análisis de precios entre el hormigón simple y el hormigón con metacaolín para dar a conocer su factibilidad económica El concreto mezclado con MK tenía un asentamiento más bajo que el concreto de control porque el MK tiene una superficie específica más alta que el cemento. Realizaron estudios experimentales sobre el grado de reacción de MK para mezcla de pasta de cemento MK y demostraron que a edades tempranas de curado, la velocidad de reacción de MK en mezclas de cemento-MK era más alta que la de humo de sílice en mezclas de humo de sílice-cemento. Los aspectos de durabilidad, como las resistencias a la sorción, penetración de agua, encharcamiento de sal y carbonatación, mejoraron debido a las adiciones	Artículo	2021

---

13	Chand, G., Kumar, A., & Ram, S.	Estudio comparativo de metacaolín, polvo de piedra pómez y humo de sílice en la. Producción de hormigón de árido grueso reciclado sostenible tratado mediante la. Adopción De Mezcla en dos etapas	Experimental	El estudio se concentró en el llenado de poros con diferentes materiales de recubrimiento se puede adoptar siguiendo diferentes enfoques de mezcla. Durante la primera etapa de premezclado, el RCA y el agregado fino se mezclan con la mitad del agua y el agua restante se mezcla con cemento en la mezcla en la segunda etapa. Los estudios micro estructurales realizados revelan que el premezclado ayuda a rellenar los poros y grietas de RCA.	Articulo	2022
14	Reddy, V. M., & Karthik, T. S.	Cuantificación de constituyentes de PCC mediante reposición parcial de árido fino y cemento	Experimental	Se observó que la resistencia a la tracción dividida y el desarrollo de la resistencia a la flexión en el hormigón tenían una tendencia similar con la resistencia a la compresión, es decir, las resistencias son directamente proporcionales entre sí. Las diversas características de resistencia del hormigón se mejoraron añadiendo un 2% de nano sílice y un 5% de metacaolín.	Articulo	2022

---

---

15	Sangsuwan, C., & Sujjavanich, S.	Influencia del tipo y la composición de los SCM en la expansión de las barras de mortero de la reacción de sílice alcalina	Experimental	<p>El análisis de la composición química reveló una disminución de CaO/SiO<sub>2</sub> y CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> proporción de los sistemas cementosos. Esto se correlacionó con la reducción de la expansión. Pero la alúmina en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> La proporción mostró el efecto dominante en la supresión de ASR. También se estudiaron en detalle las microestructuras de</p> <p>Todos los materiales y especímenes colados. Teniendo en cuenta todos los aspectos, estos SCM, utilizados en cantidades adecuadas, se consideraron buenos candidatos para la prevención de ASR en nuevas estructuras de hormigón tanto a corto como a largo plazo.</p> <p>Se observaron fuertes correlaciones entre la resistencia a la flexión y la durabilidad, y se explicaron por la hidratación adicional (es decir, la densificación de la matriz) de los PCM (excepto el GP) debido al curado con agua de mar que llenó un tamaño específico de poros que oscilaba entre 50 y 200 mientras que el humo de sílice contribuyó a mejorar la durabilidad. Por otro lado, PCM que contenía GP no mostró cambios significativos en resistencia y durabilidad.</p>	Artículo	2022
16	Choi, S. I., Park, J. K., Han, T. H., Pae, J., Moon, J., & Kim, M. Influencia del tipo y la composición de los SCM en la expansión de las barras de mortero de la reacción de sílice alcalina	Propiedades mecánicas y microestructuras en edades tempranas de morteros de cemento portland con diferentes aditivos expuestos al agua de mar	Experimental	<p>Se observaron fuertes correlaciones entre la resistencia a la flexión y la durabilidad, y se explicaron por la hidratación adicional (es decir, la densificación de la matriz) de los PCM (excepto el GP) debido al curado con agua de mar que llenó un tamaño específico de poros que oscilaba entre 50 y 200 mientras que el humo de sílice contribuyó a mejorar la durabilidad. Por otro lado, PCM que contenía GP no mostró cambios significativos en resistencia y durabilidad.</p>	Artículo	2022

---

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3: Subtemas – Justificación – Objetivos específicos

SUBTEMAS (Indicadores)	Definición / Justificación del subtema/ delimitación temporal	Objetivo
Resistencia a la compresión	La resistencia a la compresión se define como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de hormigón. Expresado en kilogramos por centímetros cuadrados (kg/cm <sup>2</sup> ), megapascales (MPa) o en libras por pulgadas cuadradas (lb/pulg <sup>2</sup> o PSI) a una edad de 28 días (Feijoo y Sánchez, 2020).	Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para incrementar la resistencia a la compresión del hormigón estructural.
Resistencia a la flexión	La porosidad del hormigón es la cantidad de espacios vacíos que posee la mezcla, ésta determinará la absorción del mismo, dado que mientras más cantidad de espacios vacíos tenga el hormigón más agua podrá ocupar dichos espacios por lo tanto la absorción estará directamente relacionada con la porosidad del hormigón (Macías, 2018).	Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para incrementar la resistencia a la flexión del hormigón estructural.
Porosidad	La porosidad del hormigón es la cantidad de espacios vacíos que posee la mezcla, ésta determinará la absorción del mismo, dado que mientras más cantidad de espacios vacíos tenga el hormigón más agua podrá ocupar dichos espacios por lo tanto la absorción estará directamente relacionada con la porosidad del hormigón (Macías, 2018).	Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir la porosidad del hormigón estructural.
Ion cloruro	La penetración de iones de cloruro en el hormigón está directamente relacionada con el volumen de poros en el hormigón. Entre más permeable sea el hormigón, más iones cloruro viajaran a través del espécimen, y una mayor corriente será medida (Asadollahfardi et al. 2019).	Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir la penetración de ion cloruro en el hormigón estructural.

---

Álcali - Sílice	<p>Son reacciones expansivas internas del hormigón, se definen como la reacción entre la solución alcalina y algunos minerales de sílice que, en presencia de agua, genera un gel expansivo. Para que la RAS ocurra es necesaria la presencia en simultáneo en el hormigón de contenidos suficientes en humedad, álcalis y áridos reactivos (Fernandes, 2005).</p>	<p>Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para reducir la expansión álcali-sílice del hormigón estructural.</p>
Asentamiento	<p>Mide la trabajabilidad del concreto cuán fácilmente se puede mezclar, colocar, consolidar y terminar el hormigón recién mezclado con una mínima pérdida de homogeneidad y la facilidad de colocación, consolidación y acabado del concreto fresco y el grado que resiste a la segregación (Camac, 2018).</p>	<p>Determinar el óptimo porcentaje de metacaolín como sustituto del cemento para incrementar el asentamiento del hormigón estructural.</p>

---

Fuente: Elaboración propia.