



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Efecto de arcilla blanca (caolín) como reemplazo de
agregado fino en el concreto hidráulico**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Gladys Eritd Valladares Briones

Asesor(es):
Mgtr. Shirley Marina Carrillo Siancas

Piura, noviembre de 2020





A Dios, por la fortaleza brindada y por hacer todo esto posible.

A mis padres, por el apoyo constante e incondicional.



Resumen Analítico-Informativo

Efecto de arcilla blanca (caolín) como reemplazo de agregado fino en el concreto hidráulico.

Gladys Eritd Valladares Briones.

Asesora: Mgtr. Ing. Shirley Marina Carrillo Siancas.

Tesis.

Ingeniero Civil.

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, noviembre de 2020

Palabras claves: Caolín, tamaño de partícula, actividad puzolánica, resistencia, durabilidad.

Introducción: La presente investigación tuvo como finalidad estudiar el comportamiento del caolín como reemplazo de agregado fino, y su efecto en las propiedades físico-mecánicas del concreto hidráulico. Los agregados utilizados, fueron traídos de la cantera Sojo (piedra triturada) y cantera Santa Cruz (arena gruesa). Mientras que, al caolín (procedente de la cantera cerro Vitín), se le caracterizó mediante el análisis granulométrico por hidrómetro, determinación del peso específico y cálculo de los límites de Atterberg.

Metodología: Diseñar una mezcla de concreto patrón siguiendo la norma ACI 211.1, los criterios fueron: slump de 5" a 6" y a/c de 0.5. Después de obtener el diseño de la mezcla patrón se optó por utilizar los porcentajes 5%, 10%, 15%, 25% y 30% de caolín en reemplazo de arena en el diseño de mezcla. Se evaluó la trabajabilidad, peso unitario y el contenido de aire en estado fresco, además de la resistencia a la compresión y tracción indirecta en el concreto endurecido.

Resultados: En el rango de 5% a 10% de reemplazo, las resistencias obtenidas no disminuyen más del 5% respecto al concreto patrón. Además, se observó que las probetas elaboradas con mezclas con reemplazo, sometidas al ensayo de compresión, presentaron falla de forma dúctil, reflejando un menor grado de conservación. Por otro lado, el slump de las mezclas con reemplazo disminuye significativamente en el rango de 15% a 30%; sin embargo, aun con bajos valores de slump, las mezclas exhiben una textura suave y manejable; el contenido de aire y peso unitario de las mezclas, están inversamente relacionadas conforme aumenta el porcentaje de reemplazo, es decir, a mayor contenido de aire menor peso unitario.

Conclusiones: Debido al tamaño no uniforme de las partículas, la composición química y mineralógica del caolín, se ven afectadas las propiedades del concreto hidráulico.

Fecha de elaboración del resumen: 04 de setiembre de 2020.

Analytical - Informative Summary

Efecto de arcilla blanca (caolín) como reemplazo de agregado fino en el concreto hidráulico.

Gladys Eritd Valladares Briones.

Asesora: Mgtr. Ing. Shirley Marina Carrillo Siancas.

Tesis

Ingeniero Civil.

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, noviembre de 2020

Keywords: kaolin, particle size, pozzolanic activity, strength, durability.

Introduction: The purpose of this research was to study the behavior of kaolin as a replacement of fine aggregate, and its effect on the physical-mechanical properties of hydraulic concrete. The aggregates used were brought from Sojo quarry (crushed stone) and Santa Cruz quarry (coarse sand). The kaolin (from Cerro Vitín quarry) was characterized by hydrometer sieve analysis, specific weight determination and Atterberg limits calculation.

Methodology: Design a standard concrete mix following the ACI 211.1 standard, the criteria were: slump of 5" to 6" and a/c of 0.5. After obtaining the design of the standard mix, it was decided to use the percentages of 5%, 10%, 15%, 25% and 30% of kaolin in replacement of sand in the mix design. The workability, unit weight and fresh air content were evaluated, as well as the resistance to compression and indirect traction in the hardened concrete.

Results: In the range of 5% to 10% replacement, the resistances obtained do not diminish more than 5% with respect to the standard concrete. In addition, it was observed that the samples made with replacement mixtures, submitted to the compression test, showed ductile failure, reflecting a lower degree of conservation. On the other hand, the slump of the replacement mixtures decreased significantly in the range of 15% to 30%; however, even with low slump values, the mixtures showed a soft and manageable texture; the air content and unit weight of the mixtures were inversely related as the replacement percentage increased, that is, the higher the air content, the lower the unit weight.

Conclusions: Due to the non-uniform particle size, chemical and mineralogical composition of kaolin, the properties of hydraulic concrete are affected.

Summary date: September 4th, 2020.

Prólogo

En los últimos años, el sector inmobiliario y a su vez el sector construcción, ha experimentado un crecimiento potente y sostenido, lo que significa que todos los materiales necesarios para la construcción se convierten en bien necesario. Dentro de esta lista de materiales destacan: el acero, cemento y agregados, siendo este último el que representa alrededor del 70% del volumen total de la mezcla de concreto. Por ello, se han desarrollado investigaciones que involucran el reemplazo de agregados por otros materiales, sean reusables o de abundancia en el medio ambiente.

El caolín es una de estas alternativas de reemplazo utilizadas a nivel mundial. Al ser una arcilla producto de feldspatos, que contiene alto porcentaje de sílice y alúmina, cumple los requisitos de un agregado común; a su vez puede considerarse como material puzolánico. Además, es uno de los recursos minerales con alta probabilidad de mayor producción en el Perú. Actualmente se registran 54 canteras en todo el país. El último estudio de INGEMMET ha determinado la existencia de ocurrencias y canteras en el norte y sur del país. Piura es una de las regiones descubiertas con presencia de ocurrencias de arcilla caolinítica, con una estimación de 84 millones de toneladas métricas (INGEMMET, 2017).

Esta investigación propone el uso de la arcilla blanca caolín como reemplazo de agregado fino y determinar el efecto en las propiedades del concreto hidráulico.

Por último, brindar un especial agradecimiento a mi asesora Mgtr. Shirley Carrillo Siancas por el apoyo brindado en el proceso de esta investigación y también al personal técnico del laboratorio de Suelos de la Universidad de Piura por el apoyo en cada momento de la investigación.



Tabla de contenido

Introducción.....	1
Capítulo 1 Problemática de la investigación	3
1.1. Realidad problemática	3
Capítulo 2 Marco teórico.....	9
2.1. Efecto de las características de los agregados en las propiedades del concreto	9
2.1.1. Efecto de la forma y textura de los agregados	9
2.1.2. Efecto de la granulometría, tamaño máximo del agregado y contenido de finos	10
2.2. Plasticidad y cohesión de las arcillas	10
2.3. Caolín	12
2.3.1. Definición	12
2.3.2. Mineralogía y química	13
2.3.2.1. Acción meteórica	13
2.3.2.2. Acción hidrotermal	14
2.3.3. Antecedentes	15
2.3.4. Yacimientos mineros en el Perú para la obtención de caolín	16
2.3.5. Aplicaciones	23
2.4. Caolín y cemento portland ordinario (CPO)	24
2.5. Hipótesis	27
2.6. Objetivos de la investigación	27
2.6.1. Objetivo general	27
2.6.2. Objetivos específicos	27
Capítulo 3 Caracterización de materiales	29
3.1. Materiales	29

3.1.1. Cemento Portland	29
3.1.2. Agregado grueso	30
3.1.3. Agregado fino	33
3.1.4. Caolín	37
3.1.4.1. Análisis químico (FRX)	41
3.1.4.2. Análisis mineralógico (DRX)	43
Capítulo 4 Programa experimental	45
4.1. Diseño de mezcla patrón	45
4.2. Diseño de mezcla de concreto parcialmente reemplazado (ACI 211.1)	46
4.3. Propiedades por evaluar en el concreto	46
4.3.1. Temperatura	46
4.3.2. Contenido de aire	47
4.3.3. Peso unitario y rendimiento	47
4.3.4. Trabajabilidad	47
4.3.5. Resistencia a la compresión	47
4.3.6. Resistencia a la tracción	48
Capítulo 5 Resultados y discusión	49
5.1. Concreto en estado fresco	50
5.1.1. Temperatura	50
5.1.2. Contenido de aire	51
5.1.3. Peso unitario	53
5.1.4. Slump	55
5.1.5. Relación entre las propiedades del concreto en estado fresco	58
5.2. Concreto en estado endurecido	60
5.2.1. Resistencia a la compresión	60
5.2.2. Patrones de falla de las probetas tras el ensayo de compresión	63
5.2.3. Resistencia a la tracción por compresión diametral	66
Conclusiones	69
Recomendaciones	71
Referencias bibliográficas	73
Anexos	77
Anexo A: Mapa de yacimientos de caolín en el Perú	79

Anexo B: Mapa de yacimientos de caolín en el departamento de La Libertad	80
Anexo C: Curvas granulométricas de los agregados	81
Anexo D: Resultados en el concreto endurecido	84
Anexo E: DRX y FRX del caolín	93





Lista de tablas

Tabla 1. Evolución de la producción peruana de rocas ornamentales y minerales industriales (TM).	5
Tabla 2. Composición mineralógica y química del caolín.	15
Tabla 3. Composición química de muestras obtenidas de las ocurrencias de arcilla caolinítica en La Libertad.	17
Tabla 4. Composición mineralógica de arcilla caolinítica en La Libertad.	18
Tabla 5. Composición química de muestras obtenidas de las ocurrencias de arcilla caolinítica en Piura.	20
Tabla 6. Composición mineralógica de arcilla caolinítica en Piura.	21
Tabla 7. Estimación de caolinita en la región Piura.	23
Tabla 8. Composición química de CPO y caolín.	27
Tabla 9. Análisis granulométrico del agregado grueso.	31
Tabla 10. Caracterización del agregado grueso.	33
Tabla 11. Análisis granulométrico del agregado fino.	35
Tabla 12. Caracterización del agregado fino.	37
Tabla 13. Análisis granulométrico del caolín.	39
Tabla 14. Caracterización del caolín.	41
Tabla 15. Composición química del caolín.	42
Tabla 16. Composición mineralógica del caolín.	43
Tabla 17. Nomenclatura utilizada para las mezclas con reemplazos de agregado fino por caolín.	46
Tabla 18. Diseño de mezcla en peso (SSS).	49
Tabla 19. Diseño de mezcla de concreto patrón y con reemplazos.	50
Tabla 20. Temperatura ambiente y del concreto correspondiente a todos los reemplazos.	51

Tabla 21. Contenido de aire de mezcla patrón y reemplazos.	51
Tabla 22. Peso unitario y rendimiento de las mezclas elaboradas.	53
Tabla 23. Slump para mezcla patrón y con reemplazos.	57
Tabla 24. Resistencia a la compresión (kg/cm^2) de la mezcla patrón y reemplazos a los 7 y 28 días.	60
Tabla 25. Resistencia a la tracción y relación con la resistencia a la compresión del concreto, a los 28 días.	66



Lista de figuras

Figura 1. PBI global y PBI de la construcción en el Perú: 2013-2017.	4
Figura 2. Distribución de caolín por las regiones del Perú.	7
Figura 3. Líneas de la composición química de la arcilla caolinítica de la región Piura.	22
Figura 4. Partículas bajo microscopio de CPO.	25
Figura 5. Partículas de caolín bajo microscopio.	25
Figura 6. Ubicación de la cantera Sojo.	30
Figura 7. Muestra de agregado grueso triturado.	31
Figura 8. Curva granulométrica del agregado grueso.	32
Figura 9. Ubicación geográfica de la cantera Santa Cruz.	34
Figura 10. Muestra de agregado fino.	34
Figura 11. Curva granulométrica del agregado fino.	36
Figura 12. Ubicación geográfica de cerro Vitín.	38
Figura 13. Muestra de caolín.	38
Figura 14. Curva granulométrica del caolín.	40
Figura 15. Difractograma del caolín con sus fases identificadas.	44
Figura 16. Contenido de aire en concreto patrón y reemplazos.	53
Figura 17. Variación del peso unitario con respecto a los porcentajes de reemplazo.	54
Figura 18. Variación del volumen producido de concreto respecto a los reemplazos.	55
Figura 19. Variación del slump con respecto a los porcentajes de reemplazo.	56
Figura 20. Resultado de ensayo de cono de Abrams	58
Figura 21. Slump vs contenido de aire en mezclas con reemplazo.	59
Figura 22. Peso unitario vs slump en mezclas con reemplazo.	60
Figura 23. Variación de la resistencia a la compresión del concreto patrón y reemplazos.	62

Figura 24. Distribución de agregados en disco de probeta de concreto con reemplazos de caolín. 63

Figura 25. Esquema de los patrones de tipos de fractura. 64

Figura 26. Patrón de falla en probetas de concreto patrón y reemplazos. 65

Figura 27. Probeta después del ensayo a la compresión. 66

Figura 28. Variación de resistencia a la tracción en concreto patrón y reemplazos. 67

Figura 29. Rotura de probeta de diseño MA-15%. 68



Introducción

El concreto es un material que ha estado presente en la historia de la construcción desde los inicios del imperio romano hasta la actualidad. El desarrollo de la construcción ha estado ligado a la disponibilidad de materiales presentes en el concreto y de las técnicas para determinar las características de estos; de esta forma intentar mejorar sus propiedades.

El cemento portland, el agregado grueso, el agregado fino y el agua son los componentes básicos en la fabricación de concreto hidráulico (C^oH). Cada año, debido al boom del sector inmobiliario, hay grandes demandas en los componentes de materias primas para la producción de C^oH, convirtiéndose en una exploración exhaustiva de los recursos naturales.

El acrecentamiento de la producción de las RMI (rocas y minerales industriales) está vinculado con la evolución del sector construcción (áridos, caliza, arcilla, puzolana, yeso, rocas ornamentales) y con los procesos industriales (boratos, baritina, bentonita, caolín, diatomita, feldespato, florita, fosfatos, mica, sal, sílice, talco, yeso, entre otros). Se estima que, en el Perú, de una producción de alrededor de 5 a 20 millones de TM (toneladas métricas) anuales en las décadas de los 70, 80 y 90, se ha incrementado en promedio de 25 a 100 millones de TM anuales en el presente milenio, como respuesta al gran dinamismo mostrado por el sector construcción durante este periodo, constituyendo, sin duda, una de las razones que justifican el aumento de la producción y demanda interna de RMI (Díaz & Rodríguez , 2018).

Las nuevas tecnologías para la elaboración del concreto han sido tema de gran impacto por parte de empresas de la industria de materiales de construcción y universidades que buscan alternativas para un concreto de igual o mejor desempeño, utilizando materiales sustentables, reciclados, más baratos y respetuosos con el medio ambiente. Siempre se recomienda que podamos encontrar nuevas tecnologías para la industria del concreto.

Por ello, esta investigación propone usar caolín como reemplazado de agregado fino, no solo como alternativa a dicha demanda de agregados sino también porque podría mejorar las propiedades del concreto hidráulico. Puesto que, el caolín puede actuar como agente de relleno en la microestructura de la zona interfacial entre la pasta de cemento y el agregado, generando efectos positivos en la resistencia mecánica (Fadzil et al., 2017).



Capítulo 1

Problemática de la investigación

1.1. Realidad problemática

La industria productora de áridos, es decir pequeños trozos de roca, arena y gravas, actualmente es uno de los subsectores básicos de la minería. Estos minerales granulares son utilizados en la construcción y en muchas aplicaciones industriales. Sin embargo, la explotación irracional de los recursos naturales perjudica el ambiente y a largo plazo su sostenibilidad.

Los agregados, tanto gruesos como finos, son conocidos por representar un promedio del 70% del volumen total de la mezcla de concreto. Existe una gran variedad de fuentes de agregados, incluyendo canteras, aluviales como arenas de grava y de río, o agregados reciclados de diferentes materiales de desecho industrial, principalmente desechos de construcción y demolición. Actualmente y en la mayoría de los países, los agregados de recursos vírgenes naturales no procesados, tales como grava y arenas o rocas trituradas de canteras, constituyen las principales fuentes de materias primas y agregados utilizados en la producción de concreto (Freedonia Group, 2016).

El estudio realizado por Freedonia Group¹ analiza la industria mundial de agregados de la construcción utilizando datos históricos de los años 2004, 2009 y 2014. Muestra que la demanda mundial de agregados de construcción aumentará un 5,2 por ciento anual a 51,7 mil millones de toneladas en 2019. Un pronóstico interesante de Freedonia es el movimiento constante de la región hacia agregados alternativos, secundarios y reciclados; no solo porque las reservas de agregados naturales se están agotando en algunas áreas, sino también por su precio y costos de transporte más bajos.

¹Compañía internacional de investigación comercial líder, fundada en 1985.

En Perú, según la información que mensualmente publica el INEI², en diciembre de 2017, el sector construcción registró un aumento de 10.3% respecto al mismo mes del año anterior (**Figura 1**). Este incremento es el segundo más alto alcanzado en los últimos cinco años y cercano al obtenido en diciembre de 2014. Cabe señalar, además, que es la primera vez desde el año 2013, que el desempeño del PBI de la construcción de este mes supera al del PBI global; en este caso por una proporción de 5 a 1. Con este resultado, la construcción sumó un periodo de siete meses consecutivos en crecimiento, que se inició en junio de 2017, luego de haber presentado caídas sucesivas durante tres trimestres consecutivos (Instituto de la Construcción y el Desarrollo-IDC de la Cámara Peruana de la Construcción, 2018).



Figura 1. PBI global y PBI de la construcción en el Perú: 2013-2017.

Fuente: (Instituto de la Construcción y el Desarrollo-IDC de la Cámara Peruana de la Construcción, 2018)

Se estima que, de una producción de RMI de alrededor de 5 a 20 millones de TM (toneladas métricas) anuales en las décadas de los 70, 80 y 90, se incrementa en promedio de 25 a 100 millones de TM anuales en el presente milenio, como respuesta al gran dinamismo mostrado por la construcción durante este periodo (**Tabla 1**) (Díaz & Rodríguez, 2018).

² Instituto Nacional de Estadística e Informática

Tabla 1. Evolución de la producción peruana de rocas ornamentales y minerales industriales (TM).

RMI/Años	1970	1980	1990	2000	2010	2017ep.
Andalucita	0	0	0	0	262,868	561,045
Andesita	0	3,150	5,100	55,048	84,717	23,807
Arcilla común	61,658	268,103	133,420	6,898,322	16,857,787	17,259,110
Arcilla refractaria	32,245	16,920	6,114	5,927	15,382	25,991
Arcilla caoliníticas	1,549	2,100	3,020	13,793	15,932	24,367
Áridos	2,233,312	1,928,229	1,810,010	10,461,159	17,676,317	23,288,182
Baritina	236,321	137,400	10,505	82,406	21,061	19,182
Bentonita	35,578	32,489	25,205	28,135	64,357	756
Boratos (Ulexita)	0	59,523	17,210	150,669	277,222	0
Diatomita	2,559	0	668,200	132,226	24,598	120,881
Feldespatos	1,035	1,250	3,367	6,105	15,226	18,662
Fosfatos	104	2,360	47,333	11,446	1,134,137	8,450,379
Granito	0	2,100	6,864	61,087	8,682	7,500
Mármol	6,868	6,765	46,981	119,440	48,286	200
Mica	0	210	40	98	192	234
Onix	100	150	450	1,800	2,282	1,000
Piedra laja	0	0	2,988	6,461	16,129	4,044
Piedra pómez	0	0	549	800	1,495	850
Pirofilita	7,291	50	60	18,921	24,935	22,760
Pizarra	0	0	32,415	22,980	23,011	64,295
Puzolana	0	600,000	134,567	229,876	1,568,751	1,902,000
Rocas calcáreas	1,840,890	1,616,123	4,950,200	7,731,606	14,694,015	27,818,519
Sal común	190,577	145,690	980,210	666,149	1,575,630	1,851,747
Sílice	37,603	200,196	20,100	258,931	554,309	1,575,291
Taco	637	15,091	14,566	9,668	12,385	19,363
Travertino	1,460	2,600	12,512	136,593	220,321	162,382
Yeso	89,940	60,973	91,536	181,632.81	391,600.78	358,322

Fuente: (Díaz & Rodríguez , 2018).

Como respuesta a esto, surgen proyectos de investigación donde se evalúan materiales que puedan sustituir a los agregados de construcción para lograr un equilibrio demanda-oferta y hacer del boom de la construcción un ambiente estable y sostenible en el tiempo.

Esta investigación propone usar caolín como reemplazado de agregado fino, no solo como alternativa a dicha demanda de agregados sino también porque podría mejorar las propiedades del concreto hidráulico, puesto que, el caolín puede actuar como agente de relleno en la microestructura de la zona interfacial entre la pasta de cemento y el agregado, generando efectos positivos en la resistencia mecánica (Fadzil et al., 2017).

Los yacimientos identificados y explotados de caolín se localizan principalmente en las franjas de la cordillera Occidental e Interandina. Sin embargo, en la llanura pre-andina también se pueden encontrar algunos depósitos. La explotación del caolín en el Perú es pequeña, siendo actualmente explotada por medianos productores para la industria de la cerámica y ladrillera. No obstante, existen amplias posibilidades que la minería del caolín se incremente aún más, aprovechando la demanda existente (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2009).

Según la información de estadística recopilada del INGEMMET existen en el Perú 54 canteras de caolín que se localizan en: La Libertad 37%, Cajamarca 20%, Lima 18%, Pasco 15% y el 10% en las demás regiones del Perú (**Figura 2**). Existe un interesante potencial de rocas y minerales industriales, que abarca más de 40 sustancias distribuidas a lo largo y ancho del país, entre ellas el caolín (Díaz & Rodríguez, 2018). El Instituto de Geología y Minería desarrolló estudios de prospección por caolines en Ica y Huancayo. Además, en Piura se ha registrado una relación de ocurrencias de arcilla caolinítica, en zonas como: Socchabamba, Llanos Yaragoto, Tunante, Cruz de Chonta, Chilcapampa, Ambasal, ubicadas en la provincia de Ayabaca. Teniendo como base el número de ocurrencias y canteras de los depósitos de RMI registradas en INGEMMET, se puede hablar de un potencial caolinífero con amplias posibilidades de desarrollo en distintas industrias.

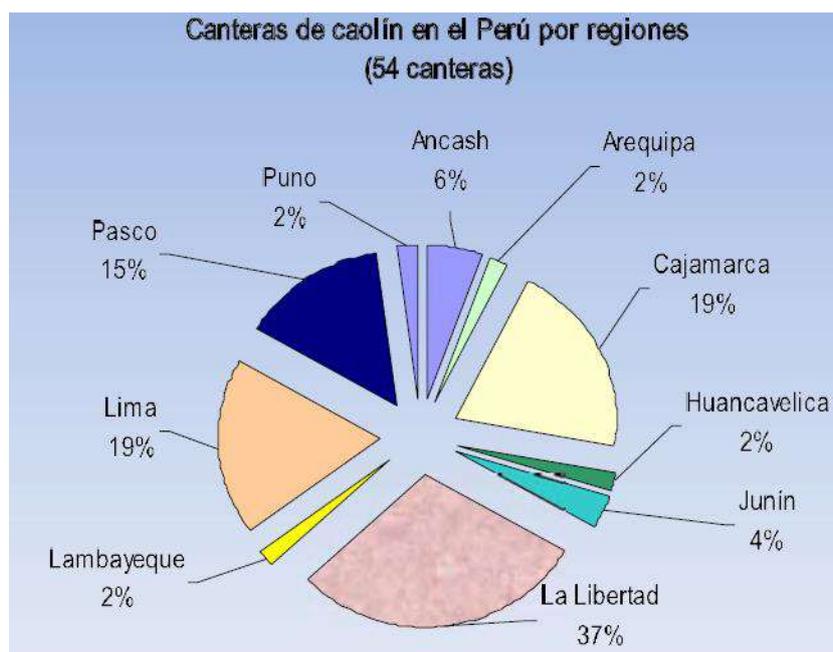
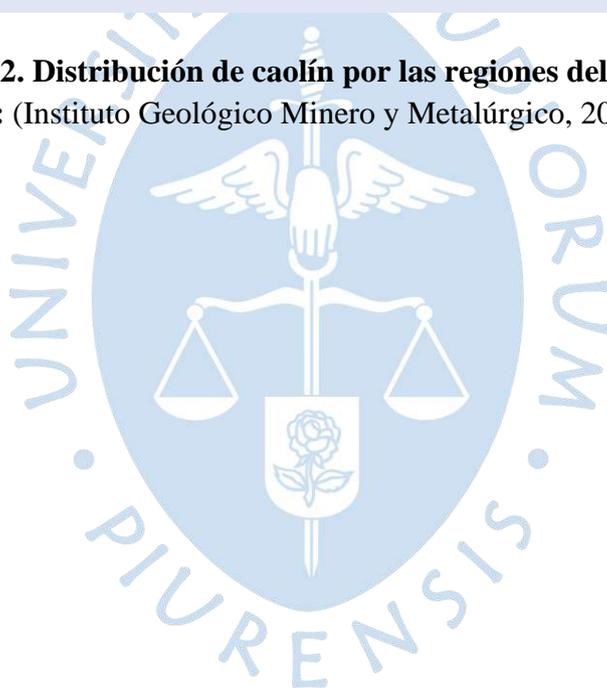


Figura 2. Distribución de caolín por las regiones del Perú.

Fuente: (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2009)





Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Efecto de las características de los agregados en las propiedades del concreto

Conocer con detalle las características de los agregados (los cuales componen más del 70% del volumen de la mezcla de concreto) es imprescindible para poder elaborar un concreto de calidad, ya que tanto la resistencia como la durabilidad se ven directamente influenciadas. Entre las características primordiales de los agregados que influyen en las propiedades del concreto están la forma y textura, granulometría y absorción.

2.1.1. Efecto de la forma y textura de los agregados

La forma de los agregados afecta directamente la trabajabilidad de la mezcla de concreto en estado fresco; por otro lado, la textura afecta la unión entre las partículas gruesas y la matriz de mortero.

Los agregados angulares y ásperos tienen una proporción más alta de superficie/volumen que los agregados lisos y redondeados, disminuyendo la trabajabilidad por lo que requieren más pasta de cemento para producir una mezcla viable. Sin embargo, estos tienen mejores características de enlace.

Las que mayor problema pueden ocasionar para la trabajabilidad son los agregados alargados y aplanados, puesto que fácilmente pueden ordenarse de forma preferente en un solo plano, ocasionando una posible segregación de partículas en la pasta de concreto producto de la pérdida de trabajabilidad. Asimismo, este tipo de gravas provocan mayores demandas de arena, haciendo necesario que el volumen de agua para la mezcla aumente, lo que puede causar una disminución en la resistencia mecánica del concreto.

La forma esférica (bien redondeada y compacta) y con una superficie lisa es la forma y textura de partícula ideal para lograr una buena trabajabilidad con la menor cantidad de pasta posible (Cham et al., 2003).

2.1.2. Efecto de la granulometría, tamaño máximo del agregado y contenido de finos

La granulometría y el tamaño máximo de las gravas afectan la trabajabilidad y la durabilidad del concreto. Los agregados que generen una curva granulométrica suave, es decir, aquellos que no tengan cantidad insuficiente o exceso de determinado tamaño de partícula, generarán ventajosos resultados en los atributos del concreto fresco debido al ordenamiento de las partículas (Chan et al., 2003).

El módulo de fineza y la continuidad en los tamaños de partículas son los componentes para considerar del agregado fino. Los módulos de fineza admisibles se encuentran en el rango de 2.2 a 3.1. Sin embargo, esto no garantiza que no exista deficiencia de alguna clase granulométrica; si solo tenemos en cuenta el módulo de fineza, pueden presentarse dos situaciones perjudiciales. La primera, cuando el módulo de fineza es superior a 3.1 (arena gruesa), aquí la cohesión entre las partículas de arena no es suficiente por lo que existe mayor requerimiento de cemento para mejorar la trabajabilidad de la mezcla. Y la segunda, es cuando el módulo de fineza es menor a 2.2 (arena fina), aquí es muy probable que los concretos sean pastosos y que, para lograr una resistencia establecida, sean necesarios mayores requerimientos de cemento y agua; además, es muy probable que ocurran agrietamientos de tipo contracción por secado (Uribe, 1991).

2.2. Plasticidad y cohesión de las arcillas

Los materiales de construcción pueden absorber el agua no solo en estado líquido sino también en estado gaseoso. Algunos de estos se caracterizan por retener o atraer el agua, denominándoseles propiamente hidrofílicos, mientras que otros, por el contrario, experimentan cierta repulsión al agua, y son los llamados hidrófobos (Pino et al., 2018).

La porosidad, es la cantidad de poros que se encuentran en una superficie; esta propiedad depende mucho del tamaño de grano que tenga la arcilla. Si la arcilla tiene un tamaño de grano grande la porosidad será mayor que la de una arcilla con un tamaño de grano pequeño, debido a que, al momento de ser moldeada y compactada la mezcla, las arcillas con granos pequeños quedan más unidas unas con otras, no permitiendo que se acumule tanta agua entre ellas y al

momento de que se cueza la pieza no tengan cavidades provocadas por la evaporación del agua (Pino et al., 2018).

El mecanismo de la plasticidad de las arcillas, en principio se puede explicar porque una pasta de arcilla consta de multitud de partículas sólidas rodeadas por delgadas películas de agua que forman una cubierta viscosa. El espesor de la envoltura acuosa debe ser el suficiente para permitir a las partículas deslizarse entre sí cuando se someten a una fuerza de cizalladura (Fernandez, 1962).

Existe una correspondencia entre plasticidad y cohesión (afinidad entre las partículas de sólido y líquido). La plasticidad dependerá de la cohesión y afinidad entre las partículas de sólido y líquido. Como es sabido, los líquidos de naturaleza polar aumentan la plasticidad de las arcillas, porque ejercen una atracción más intensa sobre sus partículas. Las partículas de arcilla, debido a que presentan enlaces rotos y cargas eléctricas negativas sin neutralizar, cuando se suspenden en agua, se rodean de un manto acuoso en cuyo interior existen iones de diferentes cargas. Las cargas negativas, que muestra la partícula en su periferia, tienden a compensarse por un enjambre de cationes que están difusos por toda la película acuosa, cuyo espesor variará según el número, tamaño, carga y grado de hidratación de dichos cationes. Del espesor de la película húmeda dependerá la separación entre las partículas de arcilla y, en consecuencia, su movilidad. Por eso, cuando el contenido de agua es relativamente elevado, la envoltura acuosa es más gruesa y puede haber flujo viscoso. Por el contrario, si la proporción de agua es baja, las partículas de arcilla se encuentran más próximas y aumenta la cohesión entre ellas (Fernandez, 1962). Sin embargo, para explicar el mecanismo de la plasticidad hay que tener en cuenta una serie de factores, estos son:

- Contenido de agua
- Tamaño de partícula
- Forma y estructura de las partículas
- Agregación de las partículas
- Superficie específica de las partículas
- Orientación de las partículas
- Adición de electrolitos y floculantes
- Presencia de materia orgánica

- Influencia de aire ocluido
- Tratamiento térmico

La plasticidad de las arcillas aumenta con el almacenaje, y con el amasamiento. Otra confirmación de la importancia de la forma laminar de las arcillas es que, si se somete un caolín plástico a una molienda larga, lejos de mejorar su plasticidad, como pudiera pensarse a primera vista, se empeora, debido a que se destruye la estructura laminar de las partículas (Fernandez, 1962).

2.3. Caolín

2.3.1. Definición

El caolín es un silicato de aluminio hidratado que procede primordialmente de la descomposición de rocas feldespáticas. El término caolín se refiere a arcillas en las que predomina la mineral caolinita (*kaolinite*) (Jepson, 1984). Este mineral lleva el nombre de una montaña en la provincia de Jiangxi en China, Kao-Ling, donde este mineral era muy conocido desde los primeros tiempos (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2009).

El caolín se caracteriza por ser de color blanco o casi blanco, con matriz amarillo, parduzco, rojizo, a veces verduzco o azulenco, debido a impurezas; de brillo nacarado en escamas y láminas sueltas, terroso mate en masas continuas. Es poroso y tiene capacidad de absorción. Su tamaño de grano es muy fino (alrededor de 63 micras) (Lorenz & Gwosdz, 2005).

La explotación de esta arcilla regularmente se realiza a cielo abierto, empleando medios mecánicos habituales. Si el depósito es sedimentario, la ruta de producción más simple y barata utiliza el proceso de flotación de aire; la matriz se tritura, se seca y se muele, luego pasa por una corriente de aire a velocidad constante. Si el depósito es primario, poderosos chorros de agua son direccionados a las caras de trabajo para romper el granito o matriz caolinizada (Jepson, 1984).

El caolín bruto obtenido de una explotación mineral presenta porcentajes variables de caolinita (en algunos casos menor al 20%), además de cuarzo, feldespatos y micas, dependiendo de la roca granítica madre, con otros minerales complementarios. El mineral se expone a distintos procedimientos mecánicos, para concentrar el mineral y así incrementar el contenido a más del 80% de filosilicatos de caolinita con alúmina. Partículas de tamaño menor a 20 μm , reflejan un caolín de alta calidad, garantizando una concentración de caolinita con alúmina superior al 80% (Gallarday, 2007).

2.3.2. Mineralogía y química

En el sentido mineralógico, el vocablo caolín se emplea para minerales arcillosos del tipo estructural con dos hojas/capas (filosilicatos dioctaédricos), en donde el mineral primordial es la caolinita, cuyas formas polimórficas son la dickita y la nacrita. La dickita tiene una estructura monoclinica ordenada, con dos capas de caolinita en su celdilla, mientras que la nacrita, siendo muy rara, presenta seis capas caoliníticas (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2009).

Generalmente, el caolín se forma debido a la modificación de minerales con alta composición de aluminosilicatos (feldespatos, micas, zeolitas) de rocas ígneas y metamórficas. La creación de caolín indica un ambiente de fuerte lavado y movilización de calcio, sodio, potasio e incluso hierro y sílice en un medio ácido. La formación de un depósito de gran potencial requiere un alto contenido de minerales de alta reactividad ricos en Al y Si (filosilicatos, feldespatos) en la roca que se altera y una gran permeabilidad (fracturación, milonitización³). Para la transformación es necesaria energía, que puede ser exógena (en climas cálidos) o interna (con fluidos hidrotermales de baja temperatura). El agua con pH, al menos ligeramente ácido por la presencia de H_2CO_3 , es siempre el principal agente movilizador y transformador. La alteración puede ser por acción meteórica o hidrotermal (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2009).

2.3.2.1. Acción meteórica

En términos de meteorización, para el proceso de formación del caolín es necesaria la influencia de agentes como el H_2O y CO_2 .

Existen dos tipos de caolín según el tipo de meteorización: primarios y secundarios. Los caolines primarios, son aquellos que han sufrido alteración in situ, manteniendo la forma y textura de la roca de su procedencia. Los depósitos que contienen este tipo de caolín son generalmente formados por la oxidación meteórica de feldespatos en climas cálidos y húmedos. Estos yacimientos pueden estar más desarrollados en sectores fracturados, permitiendo que el agua subterránea ingrese profundamente a la roca. Por otro lado, los caolines secundarios son aquellos que han sido depositados lejos de su zona de formación producto de la sedimentación en sectores tranquilos. Aquellos caolines que han sido transportados a zonas de poca energía contienen poco o nada de arena, micas y otros minerales. A este grupo se incorporan los caolines

³ Tipo de metamorfismo dinámico en el que el tamaño de grano de una roca es disminuido por cizallamiento dúctil.

sedimentarios, arenas caoliníferas, *ball clays*, *fire clays* y *flint clays* (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2009).

Las *ball clays* aluden a arcillas caoliníferas plásticas, son de color gris o negro que al ser cocidas se vuelven blancas, se dispersan fácilmente en agua y presentan un buen módulo de rotura. Las *fire clays* o arcillas refractarias, tienen varias acepciones, la más extensa incluye a las arcillas de cocción y fusión mayor a 1520°C. Por último, los *flint clays* o caolines pétreos son arcillas refractarias de alto grado, duras, masivas, no plásticas y con fractura concoidea; están constituidos por caolinita pura y cristalizada en tamaños de partículas extremadamente pequeñas (Gallarday, 2007).

En la **Tabla 2** se muestran la composición mineralógica y química del caolín según el tipo de yacimiento ocasionado por meteorización.

2.3.2.2. Acción hidrotermal

El caolín sufre meteorización producto de los procesos hidrotermales a bajas temperaturas, asociados a procesos posmagmáticos (neumatolíticos o hidrotermales y actividad posvolcánica), el cual genera la formación de depósitos metálicos, los que se producen muy posiblemente bajo el efecto de aguas ácidas que contienen CO₂ sobre los aluminosilicatos y silicatos de aluminio que no contienen álcalis. Este proceso da lugar a la pseudomorfosis de caolín en sustitución de uno u otros minerales, como por ejemplo la pseudomorfosis de caolín en sustitución de los feldespatos, la muscovita, el topacio, leucita, andalucita, etc. (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2009).

Tabla 2. Composición mineralógica y química del caolín.

Composición mineralógica de fracción arcillosa (%)	Yacimiento Primario (In situ)	Yacimiento Secundario (Redepositado)
Caolinita	40-80	>80
Illita/Mica	3-20	3
Feldespato	1-30	Bajo
Cuarzo	10-45	Bajo
Mineral interestratificado	3-11	Bajo
Composición Química (%)		
SiO ₂	62-87	43.7-44.8
Al ₂ O ₃	12-23	38.4-39.9
TiO ₂	0.1-1.2	1.4-1.8
Fe ₂ O ₃	0.2-4.5	0.2-1.9
MgO	0.1-1.5	-
Na ₂ O	<0.1	-
K ₂ O	0.2-4.7	0.1-0.5

Fuente: (Lorenz & Gwosdz, 2005).

2.3.3. Antecedentes

En la literatura, el caolín ha sido utilizado como reemplazo de cemento, en forma de metacaolín (caolín calcinado a temperaturas entre 600°C y 800°C) y también caolín, sin tratamiento, como reemplazo de agregado fino. Se han encontrado pocos antecedentes de reemplazo de caolín como agregado fino, los cuales se mencionan a continuación:

Se utilizó KaMin 90-filler (caolín de tamaño 1.5 micras) como reemplazo de agregado fino. La mezcla de concreto tenía una textura más espesa y cremosa conforme se incrementa el % de reemplazo de caolín por el agregado fino. El caolín aumentó la viscosidad de la mezcla, lo que resultó en una mejor suspensión del agregado. Además, blanqueó físicamente el color del concreto a un blanco agradable. Cuando se agregan cantidades más altas de caolín (por encima del 3%), los contenidos de vacíos de aire comienzan a estabilizarse. La resistencia a la compresión de las muestras de concreto parcialmente reemplazadas es mayor comparada con la del concreto patrón. Se designó el rango óptimo de reemplazo de agregado fino por caolín, de 1 a 3% puesto que más allá del 3% la resistencia comienza a disminuir (Shen et al., 2012).

Se utilizó los desechos de China Clay Industries, caolín sometido a dos procesos: lavado y pulverización, de tamaño $<4.75\text{mm}$, como reemplazo de agregado fino en la elaboración de la mezcla de concreto. Este residuo contenía 86.1% de sílice. Se obtuvo que la resistencia a la compresión, tracción y flexión a los 3, 7 y 28 días, de las muestras de concreto con reemplazos de agregado fino por caolín, fueron mayores que las muestras de concreto patrón. Se concluyó que el porcentaje máximo de reemplazo en aspectos de resistencia y calidad en el concreto, es de 30% (Qasim et al., 2016).

2.3.4. Yacimientos mineros en el Perú para la obtención de caolín

En las franjas de la cordillera Occidental e Interandina, y en menor cantidad en la llanura pre-andina, se localizan los depósitos registrados y explotados de caolín. En la cordillera Occidental, el caolín está asiduamente relacionado con el vulcanismo cenozoico. Los depósitos de caolín de ascendencia magmática se encuentran localizados cercanos a yacimientos metálicos, debido a que los gases o líquidos procedentes del magma han depositado a los metales pesados (cobre, oro y zinc) por un lado, y por otro han lixiviado los volcánicos ácidos (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2009) (Ver **Anexo A**).

En la Formación Chimú, ubicada en el departamento de La Libertad, cerca de Huamachuco existen considerables yacimientos de caolines redepositados, los cuales constan de una combinación de caolinitas y cuarzo con escasa presencia de impurezas (anastasa). El contenido de aluminio en la mayoría de los casos es superior a 25%, llegando algunas veces a 36% (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2009).

Se encuentran zonas favorables tales como:

- Zona Sunchuquino, ubicada en la parte central de Sanagoran, provincia de Sánchez Carrión. El código de muestra es 16g-RNM-100.
- Zona Puente Piedra, ubicada cerca de la localidad de Puente Piedra, en la parte norte del distrito de Huamachuco, provincia de Sánchez Carrión. El código de muestra es 16h-RNM-109.
- Zona Llamán, ubicado en la parte norte del distrito de Chugay, provincia de Sánchez Carrión. El código de muestra es 16h-RNM-83.

Estos depósitos, estratigráficamente, pertenecen al grupo Goyllarisquiza. El **Anexo B**, muestra el mapa de yacimientos de caolín en La Libertad.

En la **Tabla 3** y **Tabla 4** se muestra la composición química y mineralógica de muestras obtenidas de las ocurrencias en La Libertad.

Tabla 3. Composición química de muestras obtenidas de las ocurrencias de arcilla caolinítica en La Libertad.

Elemento	16g-RNM-100	16h-RNM-109	16h-RNM-83
SiO ₂	62.43%	66.51%	75.61%
Al ₂ O ₃	24.41%	20.09%	15.51%
LOI	7.19%	7.85%	6.20%
Fe ₂ O ₃	0.57%	1.30%	0.32%
TiO ₂	1.51%	1.30%	1.23%
MgO	0.29%	0.30%	0.07%
P ₂ O ₅	0.09%	0.05%	0.11%
Na ₂ O	0.13%	0.02%	0.02%
CaO	0.01%	0.01%	0.01%
K ₂ O	2.57%	2.19%	0.58%
MnO	0.01%	0.01%	0.01%
Otros	0.20%	0.06%	0.11%
Total	99.39%	99.66%	99.76%

Fuente: (INGEMMET, 2017). Elaboración propia.

Tabla 4. Composición mineralógica de arcilla caolinítica en La Libertad.

Mineral	Fórmula	16g-RNM-100	16h-RNM-109	16h-RNM- 83
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	15.96%	19.25%	31.09%
Cuarzo	SiO_2	54.1%	74.52%	62.75%
Muscovita	$\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{IH})_2$	8.98%	3.3%	2.75%
Pirofilita	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	8.1%	-	-
Microlina	TiO_2	2.49%	2.38	-
Tirodita	$(\text{Na}, \text{Ca})_2(\text{Mg}, \text{Mn}, \text{Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	-	0.55%	-
Fluorapatita	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_5\text{CO}_3\text{F}_{1.5}(\text{OH})_{0.5}$	0.75%	-	-
Bustamita	$\text{CaMn}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	0.5%	-	-
Azurita	$\text{Cu}_3 2(\text{CO}_3)2(\text{OH})_2$	-	-	2.25%
Augita	$\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})\text{Si}_2\text{O}_6$	-	-	0.65%
Fosgenita	$\text{Pb}_2(\text{CO}_3)\text{Cl}_2$	-	-	0.29%
Sauconita	$\text{Na}_{0.3}\text{Zn}_3(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.37%	-	-

Fuente: (INGEMMET, 2017). Elaboración propia

Según la información del Catastro Minero Nacional en el año 2013 había 544 concesiones no metálicas en esta región, de las cuales el 15% reportan alguna actividad económica y el 85% faltaba explotar. Esto hace suponer un interesante potencial para el futuro.

Existe una base de datos en INGEMMET, en donde se especifican los nombres de cada una de las sustancias identificadas en la región aun no verificadas y que al año 2012 ascendían a 129 ocurrencias y canteras, pero con la prospección realizada en el año 2013 estas ascienden a 225 ocurrencias y canteras. Entre estas ocurrencias podemos mencionar la cantera “cerro Vitin”, del cual se extraerá el material a utilizar en esta investigación. Actualmente se encuentra en abandono y no está siendo explotada.

En la formación Carhuaz, ubicado en el departamento de Cajamarca se encuentran varios mantos de arcillas caoliníticas que están intercalados con cuarcitas. En la formación Farrat, compuesta por areniscas cuarzosas, también se presentan estratos de caolinita. Y, por último, en la formación Huambos del terciario, también registra depósitos de arcillas caoliníticas (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2009).

En el departamento de Ica también se presentan ocurrencias de caolinitas. En el distrito y provincia de Nazca se encuentran depósitos de caolinitas que son consecuencia de la alteración de rocas volcánicas conglomeráticas ácidas de la formación Copara. En la provincia de Pisco, depósitos de caolín se localizan entre los volcánicos Quilmaná y el intrusivo monzonito-tonalítico del batolito andino (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2009).

Asimismo, en el distrito de Chilca, provincia de Huánuco, departamento de Junín, y en los departamentos de Ancash y Lima se han encontrado canteras de caolín (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2009).

Además, el Instituto de Geología y Minería en 2017 desarrolló estudios de prospección por caolines en otras regiones del Perú, en las cuales destaca Huancayo, Ica y Piura (serie de ocurrencias de arcillas caoliníticas) (Díaz & Rodríguez, 2018).

En la **Tabla 5** y **Tabla 6** se describe la composición química y mineralógica de las muestras de ocurrencias pertenecientes al departamento de Piura. Estas se encontraron en la provincia y distrito de Ayabaca. Se tiene: la ocurrencia Socchabamba, con código de muestra 10d-RNM-057; ocurrencia Llanos Yaragoto, con código de muestra 10d-RNM-058; ocurrencia Tunante, con código de muestra 10d-RNM-060; ocurrencia Cruz de Chonta, con código de muestra 10d-RNM-061; ocurrencia Chilcapampa, con código de muestra y ocurrencia Ambasal, con código de muestra 10d-RNM-062.

Tabla 5. Composición química de muestras obtenidas de las ocurrencias de arcilla caolinítica en Piura.

Elementos	Muestras 10d-RNM					
	057	058	060	061	062	065
SiO ₂	34.91%	41.78%	42.89%	34.93%	48.63%	36.71%
Al ₂ O ₃	29.78%	27.66%	26.53%	29.79%	24.88%	26.99%
LOI	16.73%	14.83%	16.83%	17.71%	13.35%	16.73%
Fe ₂ O ₃	14.92%	11.99%	11.03%	14.60%	9.92%	15.98%
TiO ₂	1.26%	1.22%	1.14%	1.36%	0.87%	1.25%
MgO	0.64%	0.95%	0.34%	0.23%	1.04%	0.65%
P ₂ O ₅	0.33%	0.32%	0.23%	0.27%	0.50%	0.22%
Na ₂ O	0.24%	0.23%	0.25%	0.23%	0.24%	0.25%
CaO	0.40%	0.14%	0.16%	0.08%	0.07%	0.18%
K ₂ O	0.34%	0.03%	0.01%	0.33%	0.01%	0.54%
MnO	0.05%	0.02%	0.04%	0.02%	0.10%	0.19%
Otros	0.07%	0.05%	0.08%	0.06%	0.08%	0.08%
Total	99.66%	99.21%	99.53%	99.63%	99.67%	99.75%

Fuente: (INGEMMET, 2017). Elaboración propia.

Tabla 6. Composición mineralógica de arcilla caolínica en Piura.

Mineral	Fórmula	Muestras 10d-RNM					
		057	058	060	061	062	065
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	37.13%	43.75%	46.38%	44.18%	29.35%	26.42%
Cuarzo	SiO_2	-	20.31%	39.56%	8.84%	26.41%	29.88%
Haloisita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	-	16.25%	-	-	-	-
Amorfo	-	32.18%	-	9.55%	20.88%	31.60%	31.5%
Goetita	$\text{Fe} + 3\text{O}(\text{OH})$	26.73%	10.94%	4.51%	18.88%	8.80%	8.33%
Muscovita	$\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{H})_2$	2.48%	-	-	0.8%	1.35%	2.03%
Hematita	Fe_2O_3	-	6.25%	-	5.22%	-	-
Montomorillonita	$\text{CaO}_2(\text{Al Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-	2.5%	-	-	1.13%	-
Natrosilita	$\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$	1.48%	-	-	-	-	-
Pirofilita	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-	-	-	1.20%	-	-
Microlina	KAlSi_3O_5	-	-	-	-	0.9%	-
Forsterita	$(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$	-	-	-	-	0.45%	-
Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$	-	-	-	-	-	1.02%
Augita	$\text{Ca}(\text{Mg, Fe, Al})(\text{Si, Al})_2\text{O}_6$	-	-	-	-	-	0.82%

Fuente: (INGEMMET, 2017). Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados de los análisis de la composición mineralógica realizados por INGEMMET que se muestran en las tablas, los valores de la caolinítica son altos, y van en el rango de 26 a 46%. El problema es la cantidad de hierro (Fe_2O_3) que se comporta como un contaminante; los que están en el rango de 10 a 15%, por lo que se recomendó para realizar trabajos en cerámica fina y trabajos diversos de alfarería, sobre todo en productos de color rojo. En la **Figura 3** se muestra el resumen de la composición química de las arcillas caoliníticas.

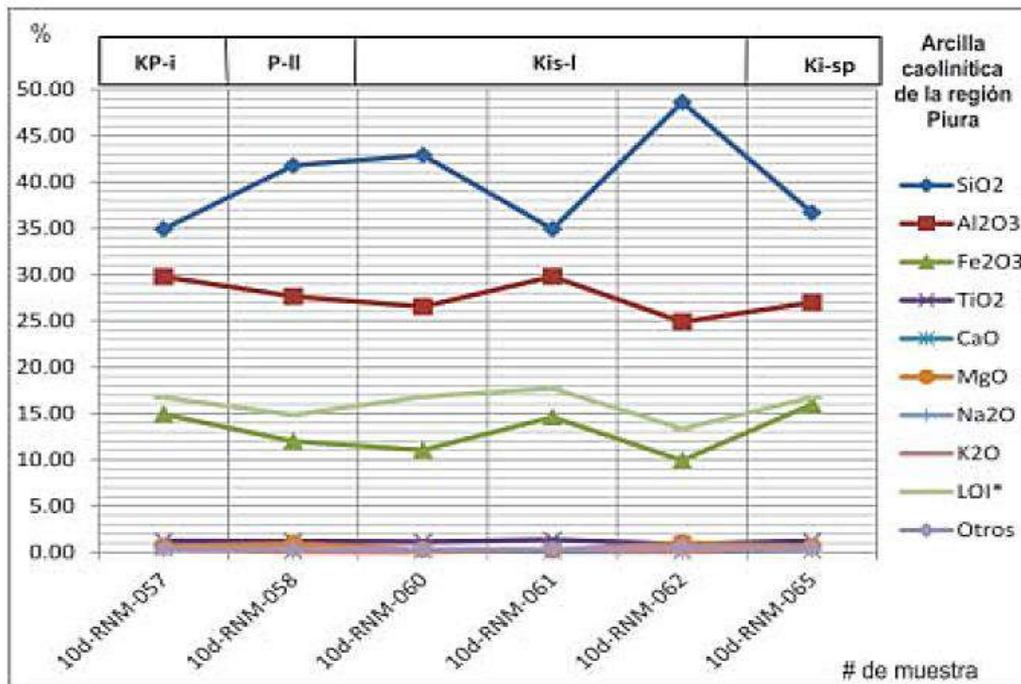


Figura 3. Líneas de la composición química de la arcilla caolinítica de la región Piura.

Fuente: (INGEMMET, 2017).

Conociendo que de la estimación de recursos depende el éxito de cualquier negocio minero y con el fin de potenciar la explotación minera en el Perú, INGEMMET calculó la estimación de caolinita en la región Piura con la información obtenida en la campaña de exploración (ver **Tabla 7**).

Tabla 7. Estimación de caolinita en la región Piura.

Sustancia (RMI)	Unidad estratigráfica	Área (km ²)	Tonelaje (MTM)	Total (MTM)
	Granitoides Indiferenciados	5.00	7.28	
Arcilla caolinítica	Formación Llama	7.50	13.65	84.86
	Formación Lancones	38.75	54.83	
	Grupo San Pedro	10.00	9.10	

Fuente: (INGEMMET, 2017)

*RMI: Rocas y minerales industriales

*MTM: Millones de toneladas métricas

2.3.5. Aplicaciones

El caolín es un material con amplia variedad de aplicaciones en diversas industrias, debido a que posee una serie de características propias a su naturaleza. Entre las principales está esencialmente su blancura, su inercia frente a agentes químicos, su inexistente toxicidad y el tamaño de partícula (Lorenz & Gwosdz, 2005). A continuación, se mencionan sus principales aplicaciones en las distintas industrias:

- Industria del papel

En esta industria se utiliza alta demanda de caolines como carga o relleno, además del acabado del papel. Los estándares de calidad son muy altos, con respecto a pureza, color y tamaño de partícula (Jepson, 1984).

- Productos de caucho/goma y plásticos

En la industria de polietilenos y resinas, se emplea solo caolín calcinado con la finalidad de mejorar la característica de absorción. Además, es usado en revestimientos plásticos para ductos y tejas plásticas, puesto que en esta mezcla mejora la rigidez y dureza de este (Jepson, 1984).

En la industria del caucho, el caolín se usa como arcilla en bruto, lavada en agua y delaminada para mejorar el color, las propiedades físicas, y la resistencia a la abrasión del producto. Asimismo, es utilizado como relleno para dar espesor al producto de los distintos tipos de goma, así como auxiliar en los procesos de filtración (Jepson, 1984).

- Como materia prima para cerámica

La industria de la cerámica no exige cumplir estándares de calidad específicos, debido a que para la producción de cerámica intervienen diversos procesos, tales como, el procedimiento de fabricación, moldeado y prácticas de quemado. Por lo que las especificaciones necesarias estarán bajo criterio de la planta procesadora en específico, además del tipo de cerámica que se desea producir. La variación más resaltante serán las diferentes cantidades de caolín, otras arcillas, sílice y fundentes empleados en elementos cerámicos (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2009).

- Química

La industria química emplea sumas significativas de caolín en la fabricación de sulfato, fosfato y cloruro de aluminio. Del mismo modo para la fabricación de zeolitas, sintéticas, catalizadores, absorbentes; acabados de textiles; jabón, recubrimientos, curtiduría y productos de asbesto. Así también los caolines de alta calidad, ecológicos y naturales, son usados en la fabricación de extractos medicinales, detergentes, etc. (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2009).

- Industria del cemento

Se utiliza caolín como fuente de alúmina y sílice, en la producción de cementos específicos, tales como, cemento blanco, cemento refractario, cemento ácido resistente. (Jepson, 1984)

En el Perú, el caolín se utiliza principalmente en la fabricación de cerámica fina, porcelana y ladrillos, debido a que las arcillas caoliníticas son plásticas cuando se les adiciona agua, logrando adquirir la forma que mantienen después de secarse. Este sector tiene una amplia capacidad instalada, cuya producción compite en el mercado interno con sus similares importados (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2009).

2.4. Caolín y cemento portland ordinario (CPO)

Una investigación en Malasia comparó la partícula de caolín con una muestra de cemento portland ordinario (Fadzil et al., 2017). La **Figura 4** y **Figura 5** muestra las partículas de CPO y caolín bajo microscopio, respectivamente.

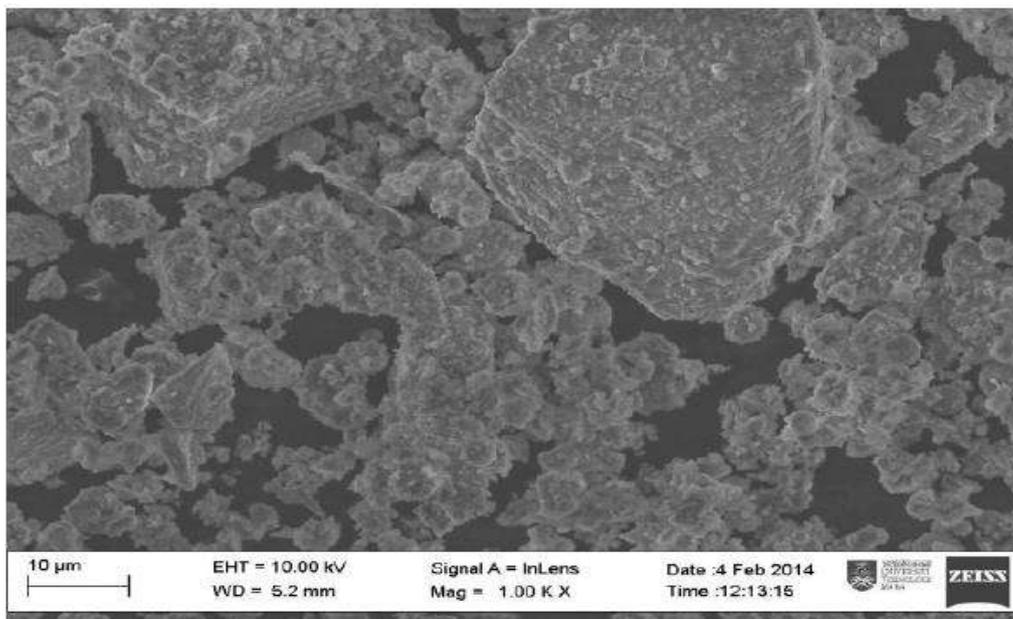


Figura 4. Partículas bajo microscopio de CPO.

Fuente: (Fadzil et al., 2017)

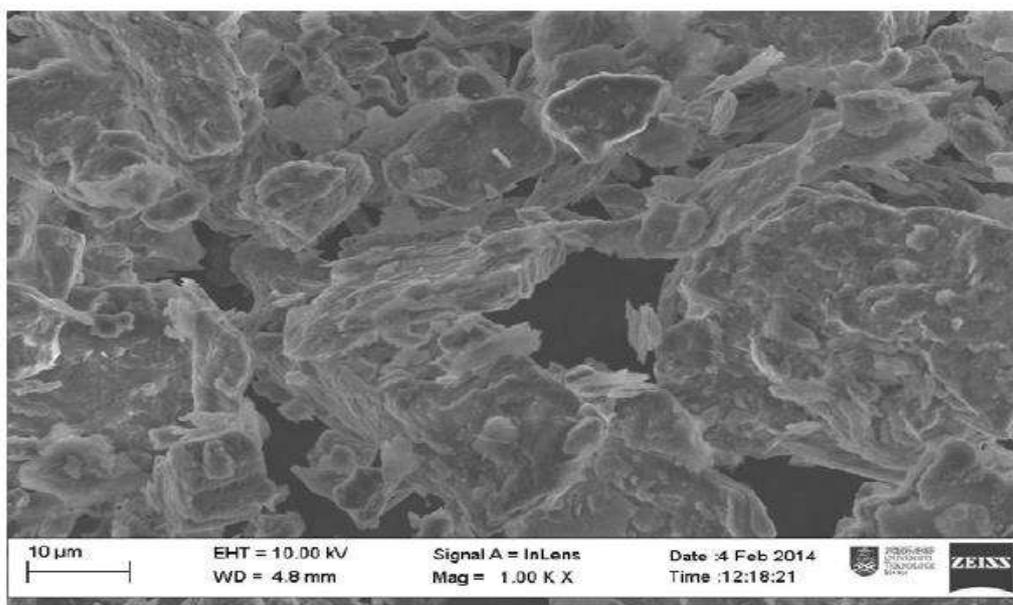


Figura 5. Partículas de caolín bajo microscopio.

Fuente: (Fadzil et al., 2017)

De la **Figura 4** se observa que el CPO es áspero, irregular y angular. Durante la calcinación en la fabricación de CPO, la sílice y la alúmina se combinan y crean: silicato tricálcico (C_3S), que aporta fuerza; aluminato dicálcico (C_2A), que controla las fases de fraguado durante la hidratación y otros compuestos menores. La textura angular e irregular que se puede ver en CPO fue la formación C_3S y C_2A . Se puede ver la formación de capas pequeñas

o texturas de mini islas en la superficie del componente más grande. Esas diminutas capas o formas de mini islas desaparecerán lentamente durante el proceso de hidratación, que incluye agua. Durante la hidratación, los puntos pequeños que contienen C_3S reaccionarán y diluirán la alúmina en el anillo exterior y crearán enlaces entre otras moléculas de CPO. Aunque la unión entre las moléculas aumentará la resistencia, debido a la no uniformidad de las partículas de CPO, se crearán vacíos menores entre las partículas.

Por otro lado, el caolín (arcilla blanca) se considera un alto material puzolánico⁴ debido al alto contenido de sílice y alúmina en comparación con el CPO (ver **Tabla 8**). Sin embargo, la formación de partículas de caolín (**Figura 5**) fue muy diferente y única en comparación con el CPO. La forma del caolín se puede describir como escamosa y laminar, el caolín se forma en sistema de capas o escamas y se cierra de una escama a otra. De esto podemos ver que las diferencias entre las angularidades de los copos de caolín son más uniformes en comparación con los bordes afilados de CPO. Una capa más blanquecina que forma el anillo exterior de las partículas de caolín representa el sistema de protección de alúmina. La línea de alúmina se puede ver claramente en el sistema de copos de partículas de caolín en comparación con el CPO; esta realiza un efecto de unión de una a otra escama. Además, el sistema de protección de alúmina crea y forma más área de superficie entre las partículas de caolín y los huecos más grandes puede ser llenado por otros copos de caolín. Quedó claro que el efecto del caolín basado en micras se puede aplicar como relleno en cualquier materia sólida, como el concreto, el tratamiento del suelo y el sistema de filtrado de agua. En otras palabras, el caolín también puede actuar como agente de relleno micro. Para respaldar esta afirmación, en términos de formación de empaque en caolín, se pueden comparar menos huecos vacíos que en el CPO. La estructura del caolín se muestra estratificada, ordenada y uniforme en comparación con el CPO, debido al efecto de tamaño micro.

⁴Material silíceo o aluminosilíceo que, en estado de elevada finura y con adición de agua, son capaces de fijar hidróxido cálcico para formar hidrato de silicato de calcio y otros compuestos cementosos, mejorando las propiedades mecánicas de este. (Soria Santamaría, 1983)

Tabla 8. Composición química de CPO y caolín.

Componentes	%	
	CPO	Caolín
SiO ₂	11.6	73.3
Al ₂ O ₃	2.2	14.5
CaO	75.17	0.058
TiO ₂	0.4	1.38
Fe ₂ O ₃	5.38	1.99
K ₂ O	0.43	4.86

Fuente: (Fadzil et al., 2017)

2.5. Hipótesis

Al ser el caolín un material puzolánico con un porcentaje alto de sílice y alúmina en su composición, y siendo estos elementos parte de la composición química del cemento; los cuales suministran la microestructura en la zona interfacial entre la pasta de cemento y el agregado, postulo que el caolín generará efectos positivos en las propiedades físico-mecánicas del concreto hidráulico, en particular a la resistencia a la compresión en el concreto en estado endurecido.

2.6. Objetivos de la investigación

Como respuesta a la pregunta: ¿Cómo influye el porcentaje de reemplazo en peso del agregado fino por caolín, sobre las propiedades físico-mecánicas del concreto hidráulico?, surgen los siguientes objetivos.

2.6.1. Objetivo general

Evaluar el efecto del reemplazo de caolín sobre las propiedades del concreto fresco (slump, temperatura, peso unitario, contenido de aire) y concreto endurecido (resistencia a la compresión y tracción).

2.6.2. Objetivos específicos

- Proponer diseños de mezclas para concreto a base de caolín.
- Determinar las propiedades físicas y mecánicas del concreto hidráulico para diferentes porcentajes de reemplazo de caolín por agregado fino.



Capítulo 3

Caracterización de materiales

Los materiales utilizados en la elaboración del concreto hidráulico fueron: el cemento portland tipo MS, agregado grueso proveniente de la cantera Sojo, agregado fino proveniente de la cantera Santa Cruz y caolín proveniente de la cantera cerro Vitín. Los ensayos para caracterizar los agregados se realizaron bajo las siguientes normas técnicas peruanas: NTP 400.012, granulometría; NTP 339.185, contenido de humedad; NTP 400.017, determinación peso unitario y vacío y NTP 400.022, determinación de peso específico y absorción. y para la caracterización del caolín se utilizaron las normas: NTP 339.131, determinación del peso específico en suelos; NTP 400.012 y NTP 339.128, granulometría de agregados y suelos respectivamente; NTP 339.185, contenido de humedad y NTP 399.129, determinación de los límites de Atterberg. Adicionalmente se realizaron ensayos para determinar la composición química y mineralógica del caolín que son fluorescencia de rayos x y difracción de rayos x, respectivamente.

3.1. Materiales

3.1.1. Cemento Portland

Para la elaboración de concreto patrón y concreto con adición de caolín en reemplazo de agregado fino, se utilizó un cemento tipo MS conocido comercialmente como “Cemento Antisulfato con Fortimax 3”. Es un cemento diseñado para estructuras que requieran moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación (Cementos Pacasmayo S.A., 2018).

Este tipo de cemento sigue los requisitos de la Norma Técnica Peruana 334.082 y de la ASTM C1157 (Cementos Pacasmayo S.A., 2018).

3.1.2. Agregado grueso

El agregado grueso utilizado proveniente de la cantera Sojo, es una grava triturada de tamaño 3/4". La cantera está situada en el Km 15+163 con respecto a la carretera Sullana - Paita. Al lado izquierdo de la vía, distanciada de 2 Km del eje de la carretera se encuentra el ingreso a la cantera, la cual es administrada por la municipalidad distrital de Miguel Checa (ver **Figura 6**).

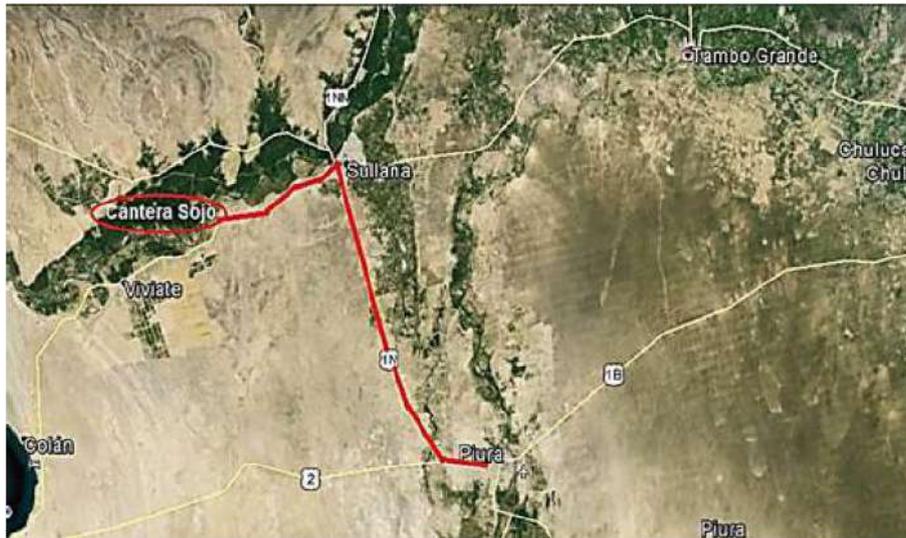


Figura 6. Ubicación de la cantera Sojo.

Fuente: Google earth, 2018.

Según la clasificación SUCS⁵, el agregado grueso triturado empleado es considerado una grava mal graduada (GP), libre de arcillas y materias orgánicas. El agregado exhibe una forma angular y textura rugosa (ver **Figura 7**).

⁵ Sistema Unificado de Clasificación de Suelos



Figura 7. Muestra de agregado grueso triturado.

Fuente: Elaboración propia.

La curva granulométrica del agregado se encuentra dentro del huso N°57 (ver **Tabla 9**), establecido por la NTP 400.037-2002, para agregados gruesos en concreto, como se muestra en la Figura 8. En el **Anexo C** se muestra el certificado de la granulometría del agregado grueso.

Tabla 9. Análisis granulométrico del agregado grueso.

Tamiz ASTM	Abertura (mm)	% Pasa	Límite inferior	Límite superior
1"	25.40	100	100.00	100.00
1/2"	12.70	99	-	-
3/4"	19.05	51	90.00	100.00
3/8"	9.50	27	20.00	55.00
4	4.76	2	0.00	10.00
8	2.38	0	0	5

Fuente: Elaboración propia.

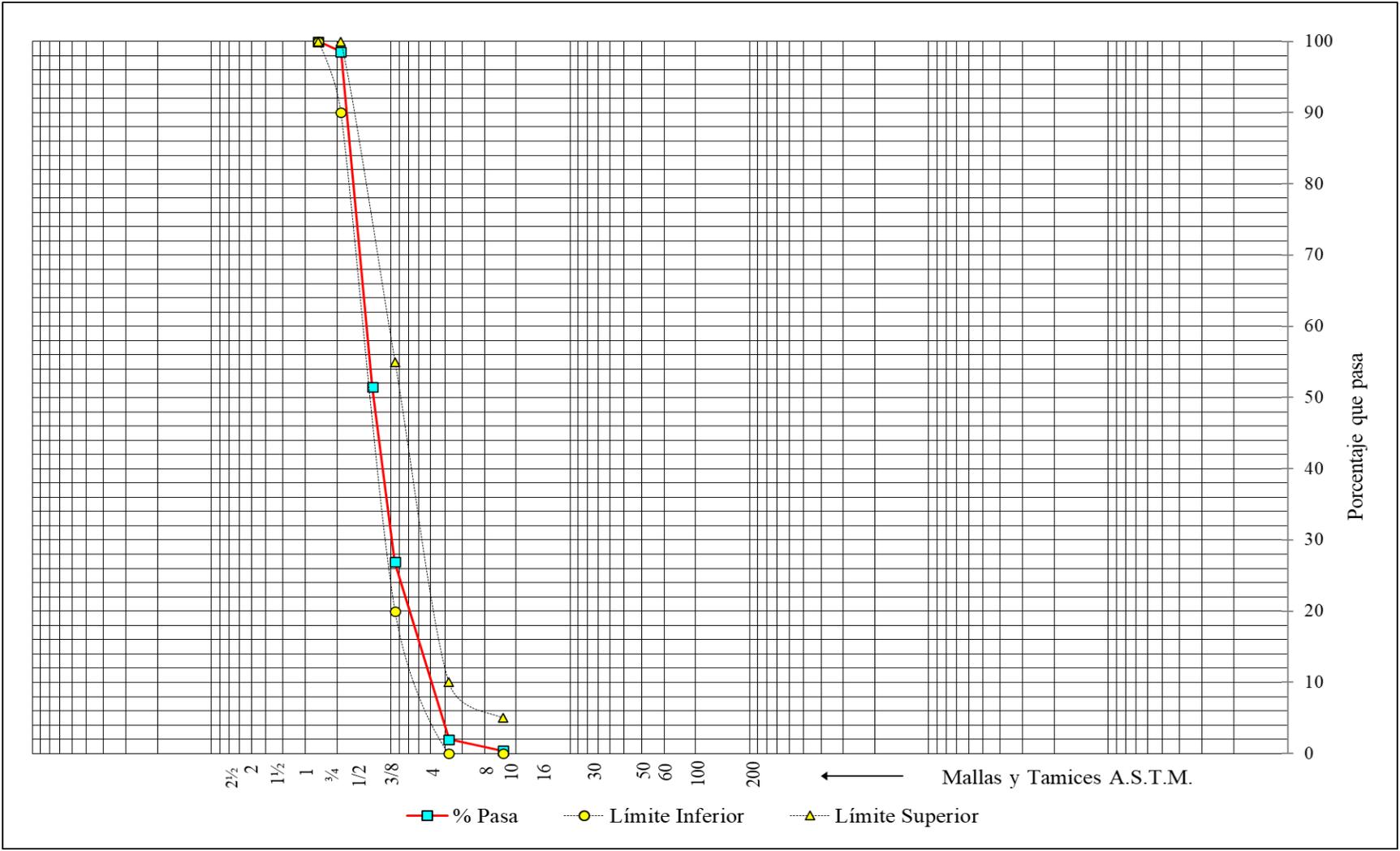


Figura 8. Curva granulométrica del agregado grueso.
Fuente: Elaboración propia.

Se identificó que algunas partículas del agregado no muestran fracturas en todas sus caras, debido a la forma de trituración, por lo que la forma y rugosidad no es homogénea. En cierta forma, la trabajabilidad de la mezcla de concreto podría verse afectada. Los planos de falla de las partículas del agregado grueso hacen que la porosidad sea menor en comparación al de la superficie en estado natural del agregado. Además, disminuye el peso unitario debido a que se dificulta el acomodo de partículas, generando vacíos.

Los parámetros físicos de la grava fueron evaluados en el LEMC de la Universidad de Piura previo a la preparación de mezcla con diversas dosificaciones de caolín. Los resultados se muestran en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Caracterización del agregado grueso.

Parámetro	Valor
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1383
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1519
Peso específico	2.72
Peso específico SSS	2.75
Peso específico Aparente	2.81
Absorción (%)	1.09
Contenido de humedad (%)	0.53
Tamaño máximo	1"
Tamaño máximo nominal	3/4"

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Agregado fino

El agregado fino utilizado es una arena gruesa, procedente de la cantera Santa Cruz, localizada en el distrito de Querecotillo, provincia de Sullana, departamento de Piura. El ingreso a la cantera se encuentra al lado izquierdo de la carretera panamericana Sullana-Lacones y el desvío en el centro poblado a “Puente de los Serranos”. Esta cantera es administrada por la municipalidad distrital de Miguel Checa (ver **Figura 9**).



Figura 9. Ubicación geográfica de la cantera Santa Cruz.

Fuente: Google earth, 2018.

Según la clasificación SUCS, el agregado fino empleado es considerado una arena mal graduada (SP), libre de arcillas y de materia orgánica. En la **Figura 10** se muestra la arena proveniente de la cantera Santa Cruz.



Figura 10. Muestra de agregado fino.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 11 se puede observar que una parte de la curva granulométrica del agregado fino no se encuentra dentro del huso establecido por la NTP 400.037,2002. Esto se debe a que una fracción del material son partículas de tamaño mayor a 2.36mm (tamiz N°8) pero menor a 3/8" (ver **Tabla 11**). En el **Anexo C** se muestra el certificado de la granulometría del agregado fino.

Tabla 11. Análisis granulométrico del agregado fino.

Tamiz ASTM	Abertura (mm)	% Pasa	Límite inferior	Límite superior
3/8 "	9.53	100	100.00	100.00
4	4.76	91	95.00	100.00
8	2.36	72	80.00	100.00
16	1.18	60	50.00	85.00
30	0.59	47	25.00	60.00
50	0.30	22	5.00	30.00
100	0.15	6	0	10
200	0.074	4		

Fuente: Elaboración propia.



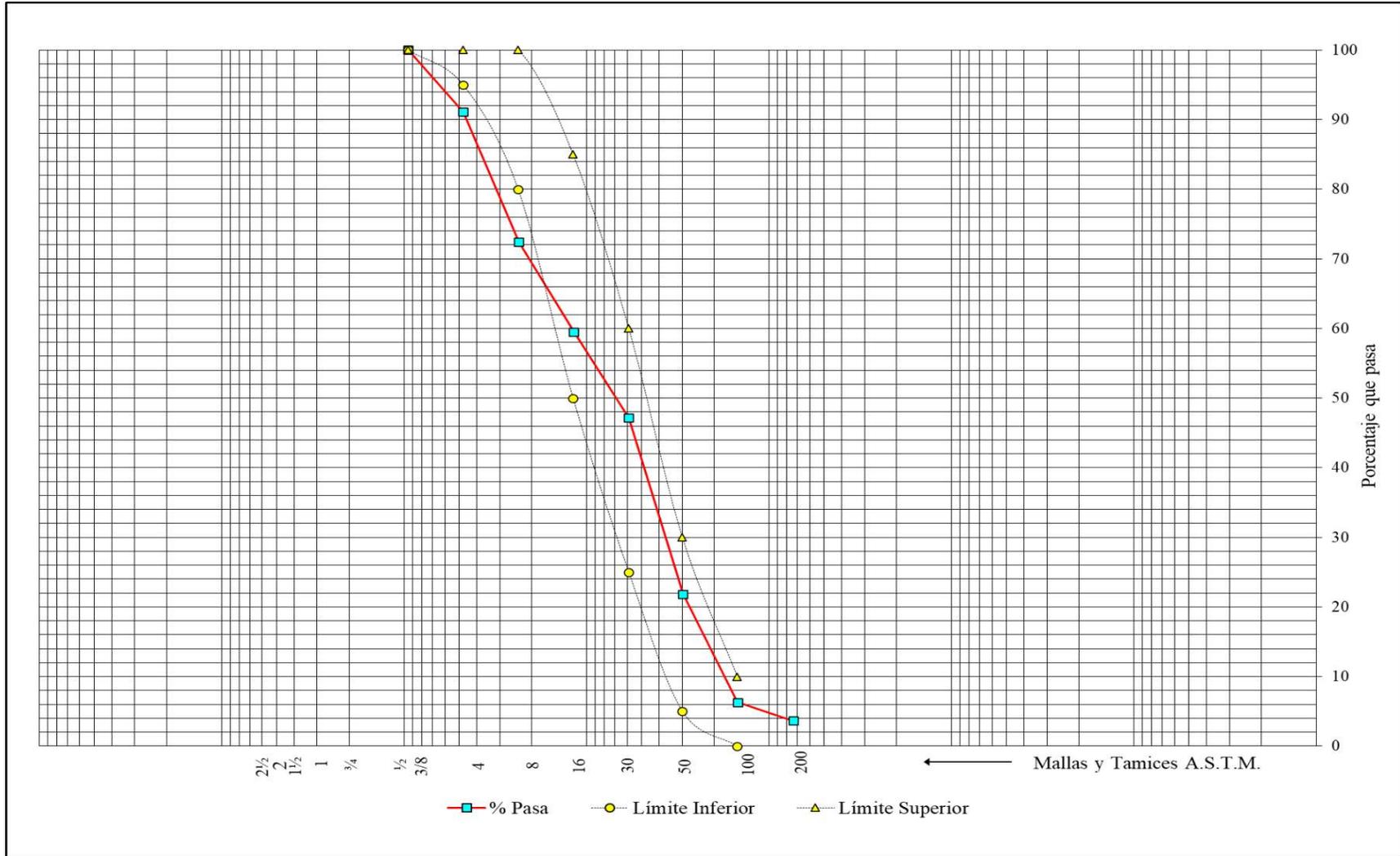


Figura 11. Curva granulométrica del agregado fino.

Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros físicos del agregado fino fueron evaluados en el LEMC de la Universidad de Piura previo a la preparación de mezcla con diversas dosificaciones de caolín. Los resultados se muestran en la **Tabla 12**.

Tabla 12. Caracterización del agregado fino.

Parámetro	Valor
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1742
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1860
Peso específico	2.64
Peso específico SSS	2.67
Peso específico aparente	2.73
Absorción (%)	1.20
Módulo de fineza	3.02
Contenido de humedad (%)	0.66

Fuente: Elaboración propia.

El módulo de finura es un valor que representa el tamaño promedio de las partículas de la muestra. En este caso, el módulo de finura es de 3.02, el cual está dentro del rango 2.4 – 3.1 según NTP 400.0.37 y ASTM C33 y según la clasificación de arenas, la muestra de agregado fino corresponde a una arena gruesa.

3.1.4. Caolín

El material de reemplazo, caolín, empleado en esta investigación proviene de la cantera cerro Vitín, ubicado en el departamento de La Libertad, provincia de Virú, distrito de Chao (**Figura 12**). El ingreso a la cantera se encuentra al lado derecho de la carretera panamericana sur sentido Trujillo-Virú y a una distancia de 3 Km aproximadamente del eje. El material extraído es para uso en la industria de la cerámica y ladrilleras.



Figura 12. Ubicación geográfica de cerro Vitín.

Fuente: Google earth, 2018.

En la **Figura 14** se observa la curva granulométrica del caolín. El material comprende partículas muy pequeñas, con abundantes finos (tamaño menor a 0.0315mm) (ver **Tabla 13**). Sin embargo, presenta algunos terrones deleznable de tamaño mayor a 0.074, lo que podría ser perjudicial en la trabajabilidad de mezcla del concreto fresco (**Figura 13**). En el **Anexo C** se muestra el certificado de la granulometría del caolín.

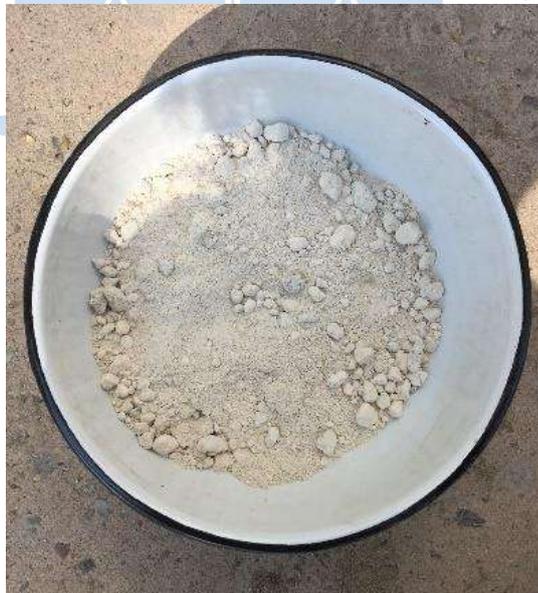


Figura 13. Muestra de caolín.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Análisis granulométrico del caolín.

	Tamiz ASTM	Abertura (mm)	% Pasa
Tamizado	3/8 "	9.53	100
	4	4.76	99
	8	2.36	97
	16	1.18	93
	30	0.59	88
	50	0.30	83
	100	0.15	75
	200	0.074	64
Hidrómetro		0.0315	48
		0.0204	42
		0.0122	30
		0.0087	28
		0.0062	27
		0.0044	21
		0.0032	15
		0.0022	13
	0.0013	9	

Fuente: Elaboración propia.

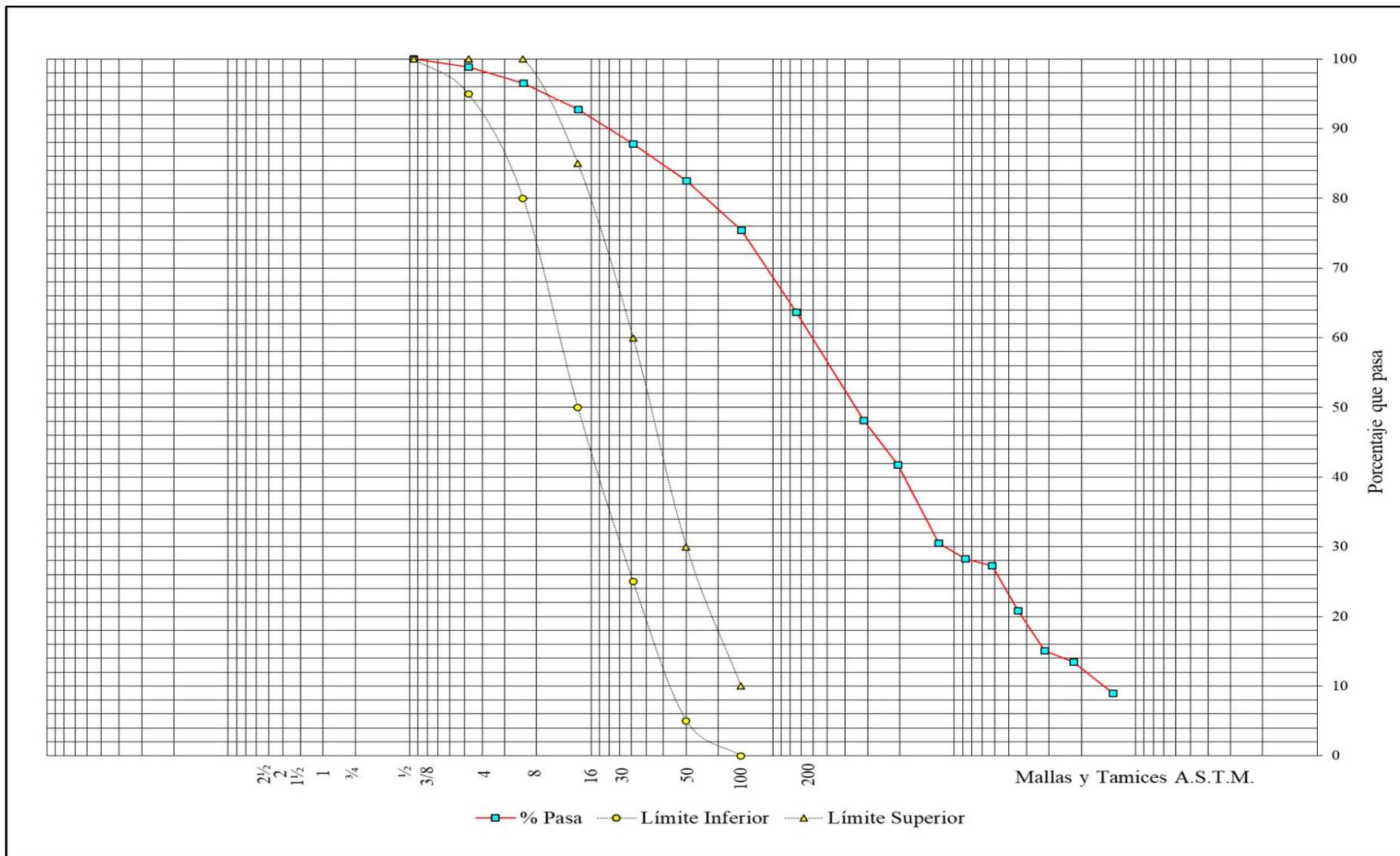


Figura 14. Curva granulométrica del caolín.

Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros físicos del caolín analizados fueron evaluados en el LEMC de la Universidad de Piura, previa preparación de mezcla con diversas dosificaciones de caolín. Los resultados se muestran en la **Tabla 14**. El caolín al ser una arcilla tiene alta cohesión por lo que el contenido de humedad que describe es alto.

Tabla 14. Caracterización del caolín.

Parámetro	Valor
Peso específico	2.68
Contenido de humedad higroscópica (%)	5.66
Módulo de fineza (MF)	0.66
Límite líquido (LL)	34
Límite plástico (LP)	27
Índice de plasticidad (IP)	7

Fuente: Elaboración propia.

*MF determinada del análisis granulométrico por tamizado

*IP = LL – LP

Los límites de Atterberg (límite líquido y plástico) miden la cohesión⁶ y contenido de humedad máximo o mínimo para pasar a ser líquido o semisólido de un suelo. En este caso por el del índice de plasticidad obtenido podemos decir que el caolín a utilizar es medianamente plástico⁷.

3.1.4.1. Análisis químico (FRX)

Se envió a analizar al Centro de Caracterización de Materiales (CAM) de la Pontificia Universidad Católica del Perú una muestra de 40gr de caolín. Como requisito previo, la muestra fue sometida al proceso de pulverización para obtener partículas menores a 40 micras para la realización del ensayo. En el **Anexo E** se muestra el informe técnico de la PUCP del caolín.

Las condiciones de operación y análisis fueron:

- Equipo: Espectrómetro modelo S8 Tiger marca Bruker.
- Tiempo de análisis: 7 minutos.

⁶ La cohesión en un suelo húmedo se genera cuando las moléculas de la fase líquida actúan como puente o membrana entre las diferentes partículas vecinas. La plasticidad dependerá de la cohesión.

⁷ IP = 0, suelo sin plasticidad (arenas); 1<IP<7, suelo débilmente plástico (limos y arcillas) y 7<IP<15, suelo medianamente plástico (arcillas coloidales).

- Método de preparación de la muestra: perla de fusión prensada.

En el análisis químico por fluorescencia de rayos x (FRX) se reportan todos los óxidos presentes en la muestra (**Tabla 15**).

Tabla 15. Composición química del caolín.

Fórmula	% en peso
SiO ₂	37.380
CaO	30.000
Al ₂ O ₃	22.600
MgO	3.700
Fe ₂ O ₃	2.430
Na ₂ O	1.540
Cl	0.835
K ₂ O	0.746
SO ₃	0.732
SrO	0.037
Total	100.00

Fuente: Elaboración propia.

El caolín tiene un alto porcentaje de sílice (SiO₂) y alúmina (Al₂O₃) tal como se esperaba, sin embargo, exhibe mayor contenido de óxido de calcio (CaO) del que normalmente está presente en el caolín de las referencias (<10%). La acción de estos componentes en la pasta de cemento depende, no sólo de dicho contenido, sino de la naturaleza y estado en el que se encuentren, así como del tamaño de grano cristalino (Soria Santamaría, 1983).

El contenido total de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, superior al 70% permite asegurar que los materiales caracterizados cumplen las recomendaciones expresadas en la ASTM C 618-08 para materiales puzolánicos. Los altos valores de SiO₂ y Al₂O₃ se asocian a la presencia de fases arcillosas y el alto contenido de hierro aportado indica la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro (Poll et al., 2016). El material caracterizado en esta investigación contiene un total de 62.41% de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, por debajo de las recomendaciones dadas por la norma.

3.1.4.2. Análisis mineralógico (DRX)

Se envió a analizar al Centro de Caracterización de Materiales (CAM) de la Pontificia Universidad Católica del Perú una muestra de 50gr en estado seco. En el **Anexo E** se muestra el informe técnico de la PUCP del caolín.

Para la evaluación total del espectro de difracción de rayos x (DRX) de la muestra en polvo cristalino, las condiciones de operación y análisis fueron:

- Equipo: Difractómetro modelo D8 Discover marca Bruker.
- Detector: LynxEye.
- Rango de medida: $2\theta = 5^\circ$ hasta $2\theta = 70^\circ$, paso de 0.02° por segundo y tiempo total de análisis 30 minutos.
- Identificación: base de datos del Centro Internacional de Datos para Difracción (ICDD).
- Cuantificación: método Refinamiento Rietveld (TOPAS Structure Database versión 5 y Fiz Karlsruhe ICSD).

La técnica usada para la identificación y cuantificación de las fases minerales presentes en la muestra se basó en la estructura cristalina de sus átomos. El resultado del análisis por DRX se muestra en la **Tabla 16**.

Tabla 16. Composición mineralógica del caolín.

Fase cristalina	Símbolo químico	% en peso
Calcita	CaCO_3	40.3
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	12.5
Albita	$(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$	8.5
Cristobalita	SiO_2	7.1
Hornablenda	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe,Al})_5(\text{Al,Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	5.7
Zeolita	$\text{Ca}_{0.5}(\text{AlSiO}_4)$	0.3
Amorfo	-----	25.6
Total	-----	100

Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje de caolinita en su composición se esperaba que actúe como agente puzolánico en el concreto para así mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Sin embargo, la actividad puzolánica responde a un principio general que se basa en que los

componentes ácidos principales reaccionan con la cal, siempre que sus uniones en dichos materiales sean lábiles⁸. Los casos particulares en que se da esa debilidad en las uniones son las estructuras zeolíticas, los vidrios volcánicos, las estructuras de gel y los minerales activados amorfos (Soria Santamaría, 1983). En este caso, el porcentaje de la fase cristalina zeolita es menor (0.3%).

La caolinita al pertenecer al grupo estructural 1:1 de las arcillas, son la principal fuente de material puzolánico, porque es la que aporta la mayor cantidad de alúmina reactiva (Fernandez, Mrtirena, & Scrivener, 2011). En el difractograma de la **Figura 15** se ilustran las principales fases minerales identificadas en la materia prima. Se reporta como fase principal al carbonato (calcita) y en menor proporción el filosilicato (caolinita).

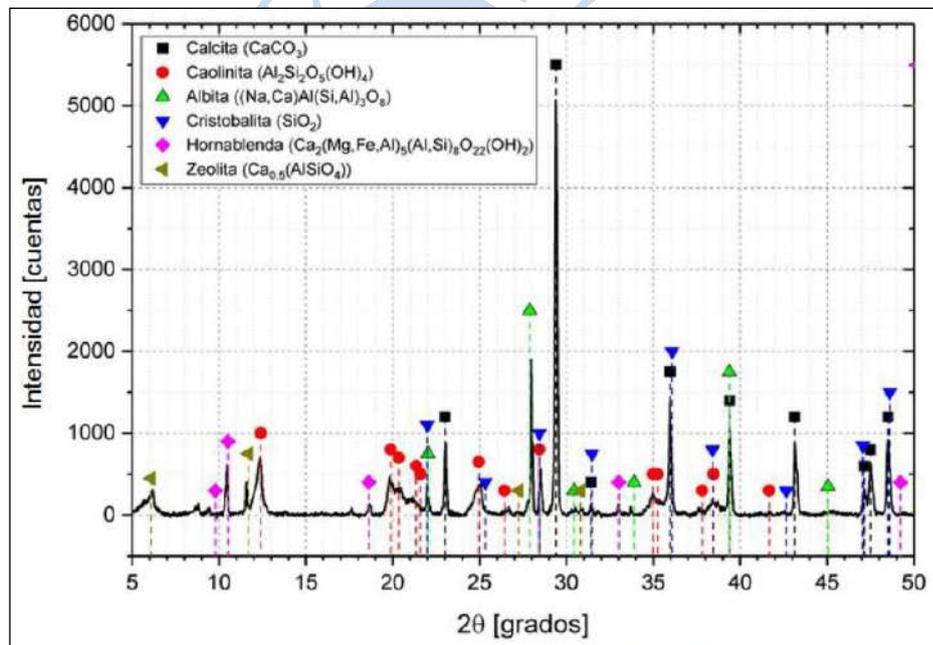


Figura 15. Difractograma del caolín con sus fases identificadas.

Fuente: Elaboración propia.

⁸ Se aplica al compuesto que se transforma con facilidad en otro más estable.

Capítulo 4

Programa experimental

En este capítulo se definió un diseño de mezcla patrón siguiendo la norma ACI 211.1, los criterios para el diseño de mezcla fueron: slump de 5" a 6" y a/c de 0.5. Después de obtener el diseño de la mezcla patrón se utilizó los porcentajes 5%, 10%, 15%, 25% y 30% de caolín en reemplazo de agregado fino en el diseño de mezcla. Las propiedades del concreto analizadas fueron: temperatura, contenido de aire y slump (en estado fresco) y la resistencia a la compresión y tracción (en estado endurecido).

4.1. Diseño de mezcla patrón

Se procedió a diseñar un concreto patrón con los agregados convencionales (cemento, piedra y arena), denominado MPA. El diseño de mezcla se realizó siguiendo el método ACI 211.1.

Para el diseño de mezcla patrón sólo se consideraron los parámetros físicos de los agregados minerales.

Los factores de diseño para el concreto patrón fueron el slump, la relación agua/cemento y el contenido de aire. Se consideró un diseño A con slump en el rango de 5" a 6" para reemplazos de 5%, 10%, 15%, 25% y 30% y un diseño B con slump en el rango de 4" – 5", solo con reemplazo de 5% para observar si se producía variación considerable en la trabajabilidad en comparación al diseño A. En ambos diseños se consideró una relación a/c de 0.5 y contenido de aire de 2%.

Se tomaron en cuenta los parámetros físicos de los agregados obtenidos de los ensayos realizados en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción (LEMC) de la Universidad de Piura (UDEP) (ver **Tabla 10**, **Tabla 12** y **Tabla 14**). El cemento usado fue

Pacasmayo tipo MS y el agua potable se obtuvo del laboratorio de suelos de la Universidad de Piura.

4.2. Diseño de mezcla de concreto parcialmente reemplazado (ACI 211.1)

Habiéndose determinado el diseño de mezcla patrón, se procedió a calcular los pesos de cada porcentaje de reemplazo de caolín, en peso del agregado fino. En la **Tabla 17** se muestra la nomenclatura utilizada en cada mezcla de concreto, según el porcentaje de reemplazo utilizado.

Tabla 17. Nomenclatura utilizada para las mezclas con reemplazos de agregado fino por caolín.

Código	Definición
MPA	Mezcla patrón A, con 0% de reemplazo, slump 5"-6"
MA-5%	Mezcla A, con 5% de reemplazo de caolín
MA-10%	Mezcla A, con 10% de reemplazo de caolín
MA-15%	Mezcla A, con 15% de reemplazo de caolín
MA-25%	Mezcla A, con 25% de reemplazo de caolín
MA-30%	Mezcla A, con 30% de reemplazo de caolín
MPB	Mezcla patrón B, con 0% de reemplazo, slump 4"-5"
MB-5%	Mezcla B, con 5% de reemplazo de caolín

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Propiedades por evaluar en el concreto

Las propiedades que se evaluaron fueron determinadas en la mezcla de concreto patrón y las mezclas con reemplazo de caolín, las cuales se mencionan a continuación.

4.3.1. Temperatura

La temperatura es una de las principales propiedades del concreto que influyen en la calidad, tiempo de fraguado y resistencia del concreto. Se midió siguiendo la NTP 339.184. Se evaluó si la temperatura inicial del concreto es alta o baja con respecto a la del ambiente, con la finalidad de controlar la calidad del concreto a los 7 y 28 días, puesto que las temperaturas ambientales extremas pueden acelerar o retrasar el proceso de calor de hidratación del concreto, generando pérdidas de resistencia mecánica. Se realizó colocando un termómetro digital en la mezcla de concreto por un tiempo mínimo de 2min o hasta que la lectura se estabilice.

4.3.2. Contenido de aire

El contenido de aire en el concreto fresco se determinó siguiendo la norma ASTM C231. Para este ensayo se utilizó la olla de Washington, es un medidor de aire que consiste en un recipiente de medición y una tapa ensamblada. El principio operacional de este medidor consiste en igualar un volumen conocido de aire, a una presión conocida, en una cámara de aire sellada, con el volumen desconocido de aire en la muestra de concreto; el indicador del medidor de presión se calibra en términos del porcentaje de aire para la presión observada. Esta propiedad del concreto se cuantificó con el fin de medir la influencia de la variación del porcentaje de reemplazo de caolín en el porcentaje de contenido de aire de cada mezcla de concreto y, a su vez si esta influye en las propiedades del concreto en estado fresco y/o endurecido.

4.3.3. Peso unitario y rendimiento

El peso unitario se evaluó siguiendo la NTP 339.046. Se determinó el volumen de concreto producido, con la finalidad de cotejar la adecuada dosificación y rendimiento de los materiales. Esto ayudó también a entender la influencia del caolín en las proporciones de diseño. Puesto que los reemplazos de caolín en la mezcla se hicieron en peso.

4.3.4. Trabajabilidad

La trabajabilidad se determinó siguiendo el método de ensayo normalizado para asentamiento del concreto de cemento Portland (NTP 339.035), el cual cuantifica la consistencia del concreto con relación a su fluidez, mediante la medición del slump. Se estudió cual es el impacto que provoca el reemplazo de 5%, 10%, 15%, 25% y 30% de caolín en el concreto en estado fresco, además de cómo trabaja el agregado en la mezcla. Se seleccionó una muestra representativa y se utilizó el cono de Abrams, el cual se llenó de concreto en 3 capas (cada capa será compactada con 25 golpes con una barra compactadora). Por último, se retiró con cuidado el cono y se procedió a medir el slump.

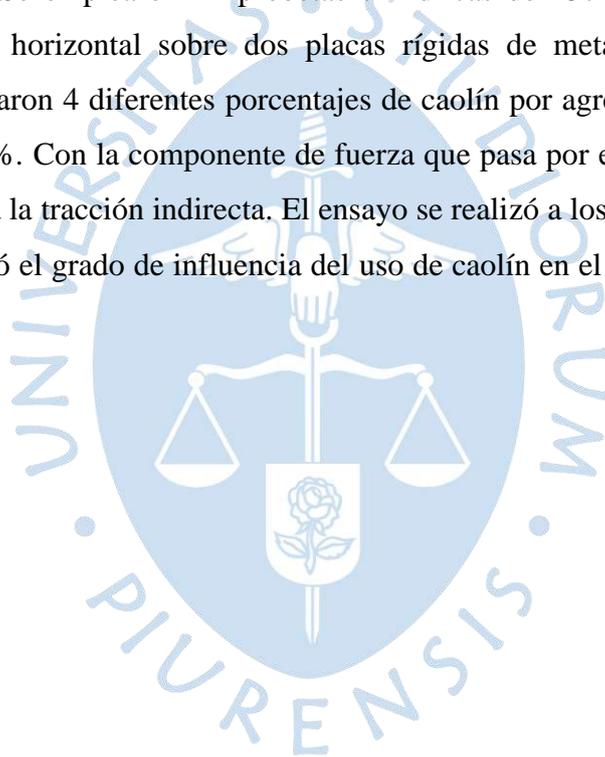
4.3.5. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se determinó siguiendo la NTP 339.034 a la edad de 7 y 28 días. Los ensayos se realizaron en probetas cilíndricas de concreto de 15 cm x 30 cm. Se emplearon 30 probetas cilíndricas de concreto de 15 cm x 30 cm para los diferentes porcentajes de reemplazo de agregado fino por caolín (0%, 5%, 10%, 15%, 25% y 30%). De estas probetas, a 24 de ellas se les realizó el ensayo a compresión a los 7 y 28 días de curado; mientras que, a

las 6 probetas restantes (correspondientes a los reemplazos de 25% y 30%) sólo se les ensayó a los 28 días de curado. Se analizó a los 7 días porque a esta edad el concreto recién comienza a adquirir resistencia y a los 28 días se obtiene una resistencia más estable. Con los valores obtenidos se pudo determinar si el uso de caolín como reemplazo de agregado fino produce un impacto positivo o negativo en la resistencia mecánica del concreto. Además, se identificó el tipo de falla que presentaron las probetas, para así verificar si la interacción del caolín con los demás agregados y la pasta de cemento ocasionan un tipo de falla diferente.

4.3.6. Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción se determinó mediante comprensión diametral, siguiendo la norma ASTM C496. Se emplearon 12 probetas cilíndricas de 15cm x 30cm, las cuales se colocaron de manera horizontal sobre dos placas rígidas de metal para así someterse a compresión. Se analizaron 4 diferentes porcentajes de caolín por agregado fino, estos fueron: al 0%, 5%, 10% y 15%. Con la componente de fuerza que pasa por el centro de la probeta se calculó la resistencia a la tracción indirecta. El ensayo se realizó a los 28 días. Con los valores obtenidos se determinó el grado de influencia del uso de caolín en el concreto con respecto al concreto patrón.



Capítulo 5

Resultados y discusión

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos de los ensayos realizados durante el programa experimental de esta investigación. Se analizaron los resultados de los ensayos mediante la comparación entre el concreto patrón y los concretos con reemplazos de agregado fino por caolín.

En la **Tabla 18** se muestra la comparación entre el diseño de la mezcla patrón A (MPA) y patrón B (MPB), según nomenclatura asignada (ver **Tabla 17**).

Tabla 18. Diseño de mezcla en peso (SSS).

Material	MPA Slump 5" – 6"		MPB Slump 4" – 5"	
	Cantidad (kg/m ³)	Volumen absoluto (m ³ /m ³ C°)	Cantidad (kg/m ³)	Volumen absoluto (m ³ /m ³ C°)
Agua	199.00	0.199	195.00	0.195
Cemento	398.00	0.132	390.00	0.129
Agregado grueso	947.12	0.344	947.12	0.345
Agregado fino	804.68	0.305	822.24	0.311
% Aire	2.0%	0.02	2.0%	0.02
PU	2348.80	-	2354.36	-

Fuente: Elaboración propia.

*a/c = 0.5 para ambos diseños

La **Tabla 19** muestra las cantidades de los materiales, en condición saturado en superficie seca (SSS), a utilizar en la mezcla patrón y reemplazos. Para el diseño de mezcla con reemplazos se mantuvo la $a/c = 0.5$ y el contenido de aire = 2%.

Tabla 19. Diseño de mezcla de concreto patrón y con reemplazos.

Material	MPA	MA-5%	MA-10%	MA-15%	MA-25%	MA-30%	MPB	MB-5%
Agua	199.00	199.00	199.00	199.00	199.00	199.00	195.00	195.00
Cemento	398.00	398.00	398.00	398.00	398.00	398.00	390.00	390.00
Ag. Grueso	947.12	947.12	947.12	947.12	947.12	947.12	947.12	947.12
Ag. Fino	804.68	764.45	724.21	683.98	603.51	563.28	822.24	781.13
Caolín	-	40.23	80.49	120.70	201.17	241.40	-	41.11
PU teórico	2348.80	2348.80	2348.80	2348.80	2348.80	2348.80	2354.36	2354.36

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los materiales están en kg/m^3

5.1. Concreto en estado fresco

5.1.1. Temperatura

La **Tabla 20** muestra la temperatura del concreto obtenida siguiendo la NTP 339.184 y ASTM C1064. De lo observado, se puede decir que el caolín no genera impacto en la temperatura del concreto

Todas las mezclas se realizaron temprano por la mañana con el fin de evitar altas temperaturas, normalmente registradas en Piura. Los valores obtenidos se encuentran en el rango de 10°C a 32°C establecido en la NTP 339.184.

Tabla 20. Temperatura ambiente y del concreto correspondiente a todos los reemplazos.

Diseño	T. del concreto (C°)	Tamb (°C)
MPA	29.3	28.8
MA-5%	24	23.3
MA-10%	25.9	23.5
MA-15%	29.3	28.8
MA-25%	22.8	21.5
MA-30%	25.8	23.6
MPB	26.2	23.4
MB-5%	28.9	26.3

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Contenido de aire

Los resultados obtenidos del ensayo de contenido de aire en el concreto fresco se muestran en la **Tabla 21**. Se realizó para reemplazos del 0%, 5%, 10% y 15% porque se observó que conforme aumentaba el porcentaje de reemplazo, el contenido de aire seguía una tendencia de aumento.

Tabla 21. Contenido de aire de mezcla patrón y reemplazos.

Diseño	Contenido de aire (%)
MPA	2
MA-5%	2
MA-10%	2.05
MA-15%	2.25
MPB	2
MB-5%	2.2

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el contenido de aire en la mezcla de concreto aumenta ligeramente, conforme el porcentaje de reemplazo de caolín es mayor. A medida que aumenta la cohesión de la suspensión, es decir, que las partículas de arcilla se encuentran más próximas, se hace cada vez más difícil que el aire salga de la mezcla durante el mezclado en el trompo, generando vacíos que la pasta no puede llenar.

Si la cantidad de partículas finas crece en la mezcla, se produce un aumento del área superficial para una misma cantidad de pasta (Santos et al., 2011). A diferencia del agregado fino, las partículas predominantes de caolín son menores a 7.4 mm (aprox. 64%, ver **Tabla 13**) y como se vio en la **Tabla 12**, el valor de MF del agregado fino es 3.02, mientras que el MF del caolín es 0.66 (sólo considerando la parte ensayada en el análisis granulométrico por tamizado, ver **Tabla 14**); por lo que, conforme aumenta el porcentaje de reemplazo disminuye el grosor de partículas promedio en la mezcla, generando un requerimiento mayor de pasta; es decir, debido al incremento del área superficial, se produce una escasez de pasta de cemento, aumentando la cantidad de vacíos en la mezcla.

En la **Figura 16** se muestra el contenido de aire para ambas mezclas de diseño. Se puede observar que para el reemplazo de 5% el contenido de aire de la mezcla B es mayor al de la mezcla A. Esto sucede porque para las mezclas MPA y MPB, se consideró, dentro de sus condiciones de diseño, slump deseados diferentes. Provocando una variante en la cantidad de agua necesaria en la mezcla. En consecuencia, para los diseños con reemplazo de la mezcla B (con cantidad de agua menor al de la mezcla A), hace que las partículas de caolín se encuentren más próximas y aumente la cohesión entre ellas dejando a la mezcla con escasez de pasta de cemento siendo incapaz de recubrir todos los agregados, generando más contenido de vacíos.

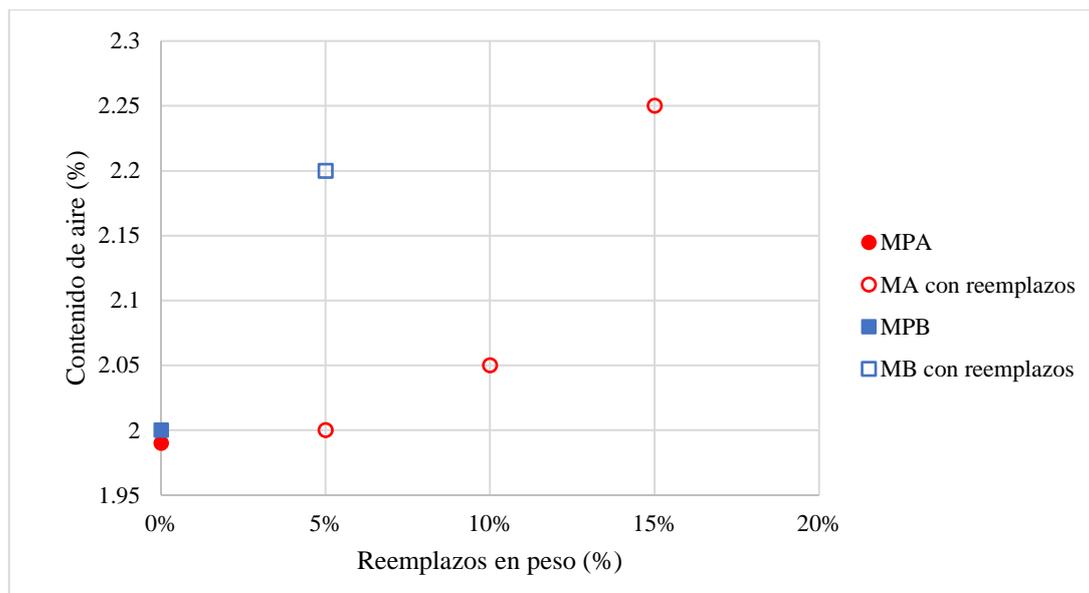


Figura 16. Contenido de aire en concreto patrón y reemplazos.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.3. Peso unitario

En la **Tabla 22** se presentan los valores de peso unitario, rendimiento, volumen producido y factor de rendimiento obtenidos de la realización del ensayo siguiendo la NTP 339.046.

Tabla 22. Peso unitario y rendimiento de las mezclas elaboradas.

	PU teórico (kg/m ³)	PU real (kg/m ³)	Disminución de PU (%)	Vol. producido (m ³)	Rendimiento relativo
MPA	2348.80	2344.26	0	1.002	0.998
MA-5%	2348.80	2337.19	0.301	1.005	0.995
MA-10%	2348.80	2323.07	0.904	1.011	0.989
MA-15%	2348.80	2316.01	1.205	1.014	0.986
MA-25%	2348.80	2280.69	2.712	1.030	0.971
MA-30%	2348.80	2273.63	3.013	1.033	0.968
MPB	2354.36	2351.32	0	1.001	0.999
MB-5%	2354.36	2337.19	0.601	1.007	0.993

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar que, pese a la disminución del peso unitario de los reemplazos, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango 2200 kg/m³ - 2400 kg/m³ perteneciente a un concreto normal.

En los diseños de mezcla, el reemplazo de caolín se realizó en función del peso. El reemplazo en peso de la arena por caolín implica un aumento en el volumen de agregados, debido al menor peso unitario generado. Nuevamente, esto se puede explicar utilizando la curva granulométrica obtenida del caolín, el cual indica que el caolín presenta partículas muy pequeñas (filler < a 0.0315 mm), y partículas deleznable de tamaño > a 0.074 mm. Aquellas que no se integraron por completo en el proceso de mezclado en el trompo, ocupan mayor espacio en la mezcla, incrementando el volumen de concreto producido y, en consecuencia, la disminución del peso unitario. A su vez, el filler en comparación al tamaño del agregado fino, incrementa aún más el área superficial. En consecuencia, el requerimiento de pasta es insuficiente para llenar los espacios vacíos, haciendo la mezcla más liviana, es decir, disminuye el peso unitario conforme aumenta el porcentaje de reemplazo.

Además, se puede apreciar la disminución del rendimiento relativo, debido a que el volumen de concreto producido aumenta conforme aumenta el porcentaje de reemplazo.

La **Figura 17** muestra los resultados del peso unitario del concreto en estado fresco, para el concreto patrón y los reemplazos. Se exhibe la disminución del peso unitario conforme aumenta el porcentaje de reemplazo, con respecto al patrón.

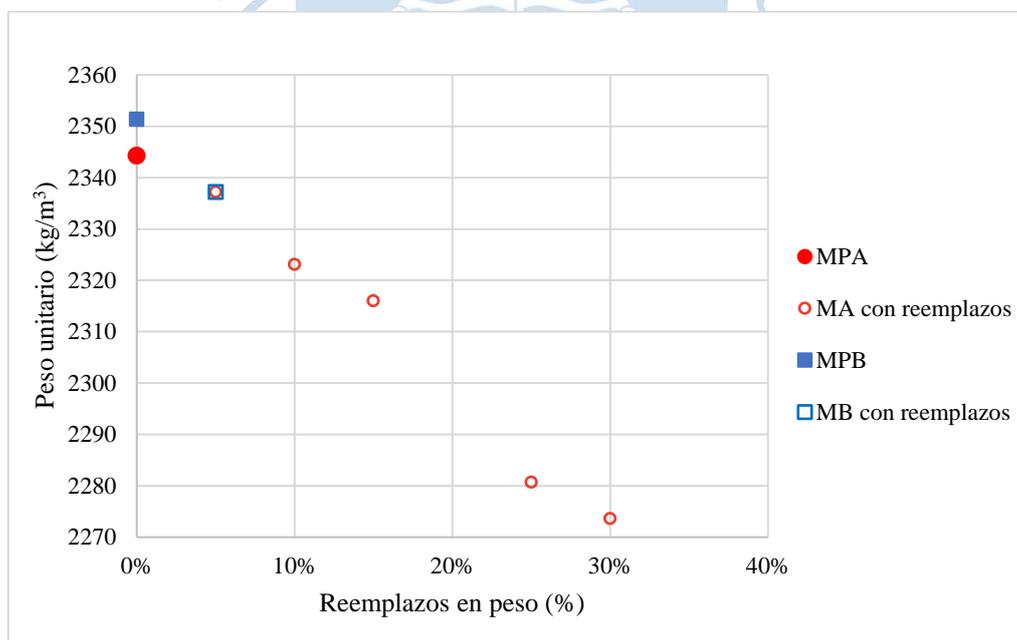


Figura 17. Variación del peso unitario con respecto a los porcentajes de reemplazo.

Fuente: Elaboración propia.

La literatura nos dice que el contenido de agua y el tamaño de partícula son factores que afectan la plasticidad del caolín y a su vez el volumen que ocupa en la mezcla. Las partículas deleznable de caolín (% retenido en tamiz 200), ocupan mayor espacio a diferencia de las partículas de arena; por lo que, al reemplazar los porcentajes en peso, el volumen de concreto aumenta. En la **Tabla 22** se puede observar la disminución del rendimiento relativo, esto se debe a que el volumen de concreto aumenta conforme aumenta el porcentaje de reemplazo; sin embargo, disminuye el peso unitario por los vacíos generados (Ver **Figura 18**).

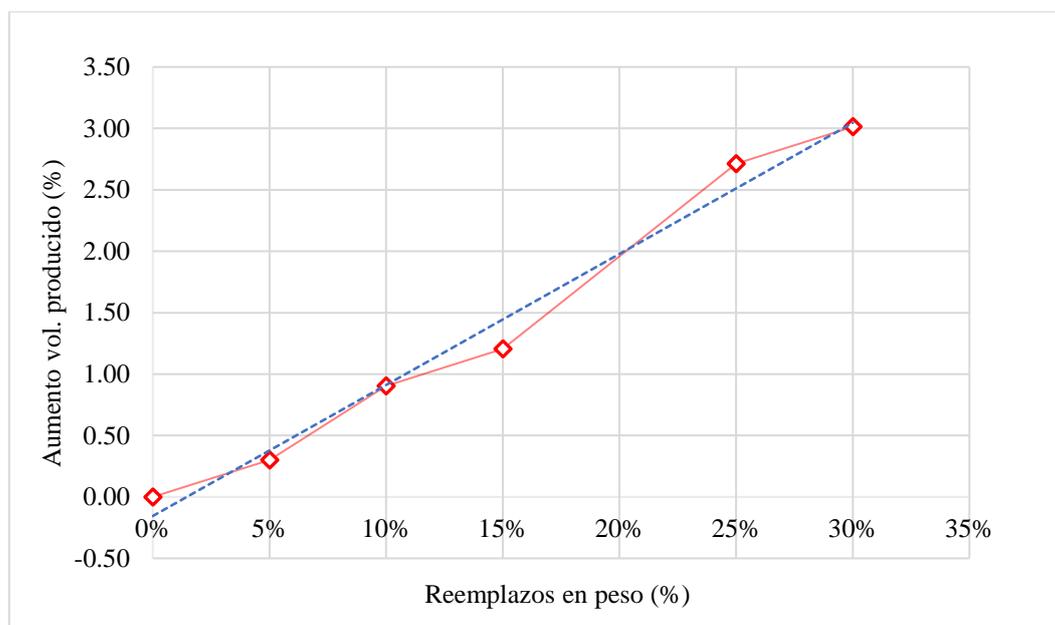


Figura 18. Variación del volumen producido de concreto respecto a los reemplazos.

Fuente: Elaboración propia.

*Gráfico realizado con valores de diseño de muestra A.

5.1.4. Slump

Los resultados del ensayo de cono de Abrams o slump, presentados en la Figura 19, muestran una notoria disminución cuando la proporción de caolín aumenta. El tamaño no unificado del caolín en el rango de 0.074mm a 0.0013mm versus el tamaño de los agregados pétreos afectan significativamente la necesidad de pasta en el concreto, pues a diferencia de los agregados pétreos, las partículas de arcilla del caolín, debido a la fuerte cohesión entre ellas, se encuentran más próximas, necesitando una cantidad mayor de agua para aumentar la viscosidad en la mezcla. Al existir una correspondencia entre plasticidad y cohesión (afinidad entre las partículas de sólido y líquido) depende del espesor de la película húmeda, la separación entre las partículas de arcilla y, en consecuencia, su movilidad.

La mezcla de concreto exhibe una textura más espesa y cremosa a medida que aumenta el porcentaje de caolín.

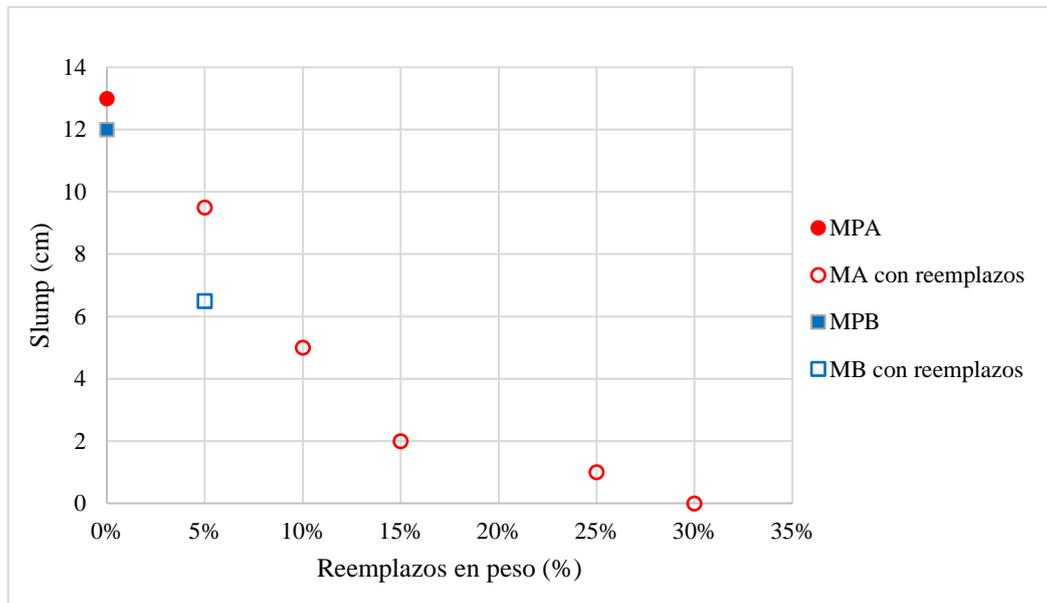


Figura 19. Variación del slump con respecto a los porcentajes de reemplazo.

Fuente: Elaboración propia.

Según la literatura, las arenas son un suelo sin plasticidad, dado que su índice de plasticidad (IP) es nulo; los limos y las arcillas son considerados un suelo débilmente plástico ($1 < IP < 7$), mientras que las arcillas coloidales son consideradas medianamente plásticas ($7 < IP < 15$). Por otro lado, la plasticidad de la mezcla de concreto está directamente relacionada a la cohesión entre partículas. En donde, las moléculas de agua de la mezcla actúan como puente conector entre las partículas de los agregados pétreos y el caolín.

A diferencia del agregado fino utilizado, el caolín tiene un alto valor de cohesión⁹. Esta cohesión o afinidad entre partículas depende de muchos factores. Fueron detectados, principalmente, de las partículas de caolín: la influencia del tamaño y la superficie específica (Fernandez, 1962). La predominancia de las partículas menores a 0.074 mm en la curva granulométrica del caolín (ver **Figura 14**) y la gran superficie específica que consecuentemente presentan, hace que aparezcan exaltados fenómenos de superficie. Es decir, a menor tamaño de partícula, mayor área superficial y, por ende, mayor plasticidad. Debido a esto, las mezclas con reemplazos no logran un alto índice de asentamiento a diferencia de la mezcla patrón.

⁹ La arena tiene plasticidad 0 por lo que la cohesión entre sus partículas en estado húmedo es nula, por el contrario, el caolín tiene plasticidad 7.

Por otro lado, el caolín proporciona a la mezcla normalmente granulosa una textura suave y lisa. El caolín se suspende en la pasta y permite una textura agradable. A su vez, la plasticidad de la mezcla ocasionada por la cohesión entre partículas (antes explicada) contiene al agregado grueso y evita la segregación.

En la **Tabla 23** se muestran los slump obtenidos para el concreto patrón y con reemplazos. El asentamiento del diseño MPA fue de 13 cm, que es el establecido para el diseño de mezcla, mientras que los concretos con más de 10% de caolín alcanzaron menos de 5 cm. Con el 5% de reemplazo de caolín, la mezcla se muestra blanda puesto que se obtuvo 9.5 cm de asentamiento; por el contrario, con el 30% de reemplazo, la mezcla se muestra seca sin asentamiento alguno. Además, se observó que para el diseño de mezcla B el slump disminuye considerablemente con el 5% de reemplazo en comparación al concreto patrón. Se puede establecer que en el rango de 0 a 10% de reemplazo, la mezcla mantiene una buena trabajabilidad, independientemente del diseño de mezcla.

Tabla 23. Slump para mezcla patrón y con reemplazos.

Diseños	Slump (cm)	Slump (in)
MPA	13	5.12
MA-5%	9.5	3.74
MA-10%	5	1.97
MA-15%	2	0.79
MA-25%	1	0.39
MA-30%	0	0
MPB	12	4.72
MB-5%	6.5	2.56

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 20** se muestran los asentamientos obtenidos con los diferentes porcentajes de reemplazo de caolín, así como de la mezcla patrón. Se puede apreciar claramente como el asentamiento disminuye conforme se incrementa el porcentaje de reemplazo. Sin embargo, aun con el MA-25% la muestra es manejable puesto que, al varillar y golpear con el martillo de goma las probetas, las partículas se acomodan.



Figura 20. Resultado de ensayo de cono de Abrams

Fuente: Elaboración propia.

Todas las mezclas describieron la misma forma de asentamiento uniforme; no apareció una separación de una parte de la masa de concreto como sucede en el asentamiento tipo corte. Esto quiere decir, que pese a la disminución del slump al aumento de reemplazo, las mezclas aún tienen la cantidad de pasta suficiente para cubrir las partículas de los agregados. Cabe resaltar que, estas mezclas con reemplazo con bajo slump, aun cuando la dificultad al manejarlas es mucho mayor, no son inaprovechables ya que pueden ser utilizadas para cimentación.

5.1.5. Relación entre las propiedades del concreto en estado fresco

La **Figura 21** muestra la relación entre el slump y el contenido de aire en las mezclas. A mayor reemplazo, menor slump y a su vez genera mayor cantidad de vacíos.

La disminución del slump ocasionada por la escasez de pasta de cemento, a consecuencia del incremento del área superficial de la mezcla, hace que aumente la cantidad de vacíos en la mezcla.

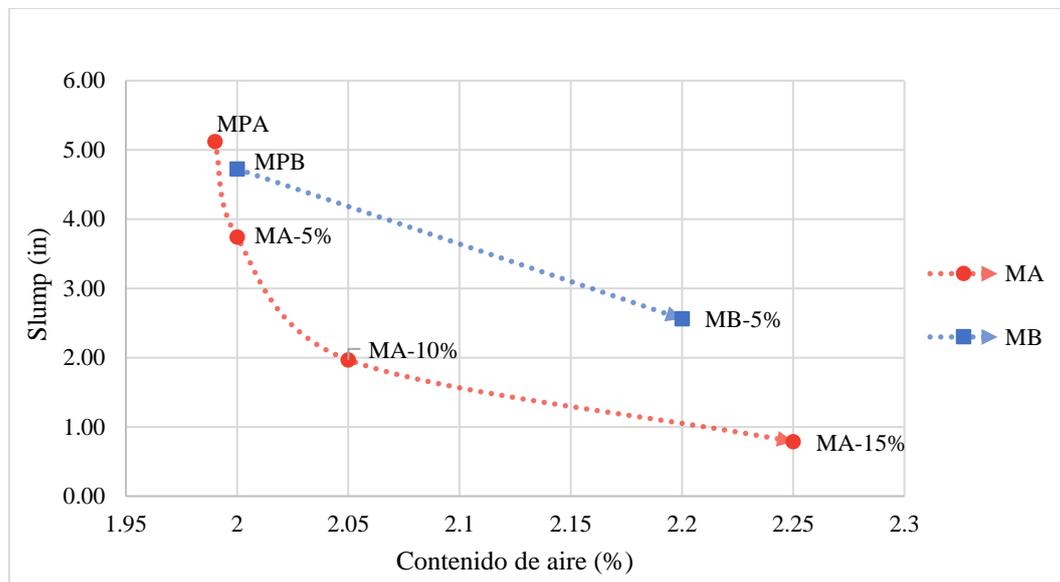


Figura 21. Slump vs contenido de aire en mezclas con reemplazo.

Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 22** muestra la existencia de una relación entre el peso unitario y slump. Esto es, a mayor porcentaje de vacíos, menor peso unitario y en consecuencia bajo slump.

Conforme el porcentaje de reemplazo es mayor, aumenta la cohesión entre las partículas, que es producido por el incremento del área superficial de la mezcla, debido al tamaño filler del caolín. Por lo tanto, se genera una escasez de pasta de cemento para recubrir todos los agregados. Esto hace que se generen espacios vacíos en la mezcla. El aire atrapado en los espacios vacíos de la mezcla hace que el valor de peso unitario disminuya.

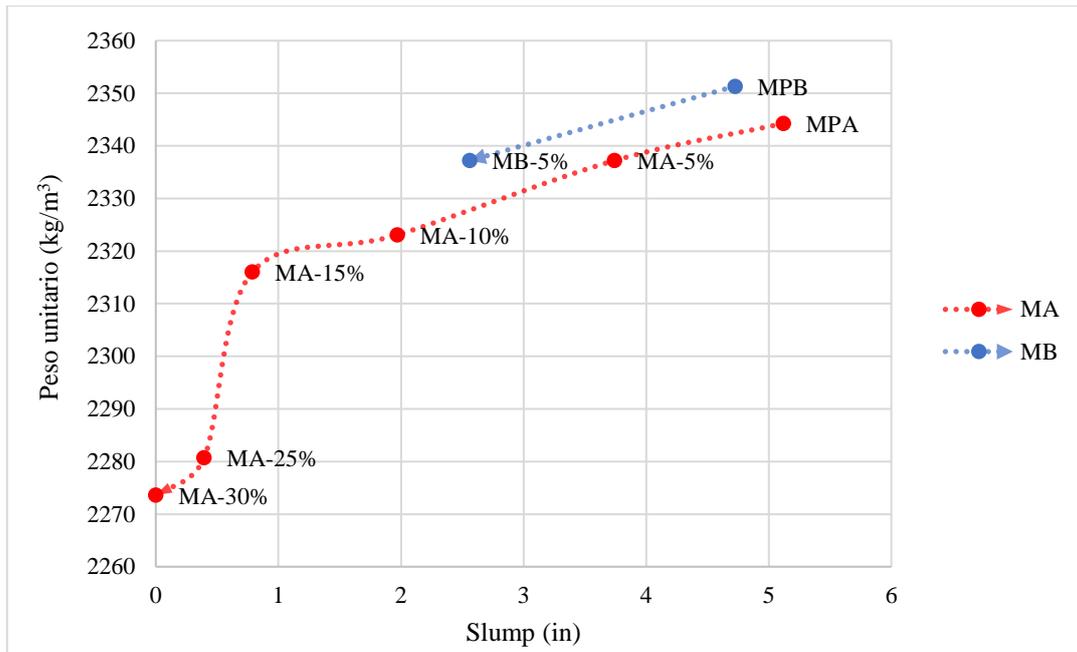


Figura 22. Peso unitario vs slump en mezclas con reemplazo.

Fuente: Elaboración propia.

5.2. Concreto en estado endurecido

5.2.1. Resistencia a la compresión

Los resultados de la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días de todos los reemplazos y el porcentaje de variación de las mezclas con porcentajes de reemplazo respecto a la mezcla patrón se muestran en la **Tabla 24**. En el **Anexo D** se muestran los certificados de los resultados del ensayo a la compresión.

Tabla 24. Resistencia a la compresión (kg/cm²) de la mezcla patrón y reemplazos a los 7 y 28 días.

Diseños	f'c (7 días)	%	f'c (28 días)	%
MPA	314.00	100.00	410.50	100.00
MA-5%	316.00	100.64	403.00	98.17
MA-10%	310.50	98.89	395.00	96.22
MA-15%	293.00	93.31	379.50	92.45
MA-25%	-	-	327.50	79.78
MA-30%	-	-	317.50	77.34
MPB	282.00	100.00	367.00	100.00
MB-5%	283.50	100.53	359.00	97.82

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 23** se muestra la variación de la resistencia conforme aumenta la edad de curado y el porcentaje de reemplazo de caolín. Se puede apreciar que la resistencia a los 7 días muestra un ligera disminución conforme aumenta el porcentaje de reemplazo. Sin embargo, con el 5% existe una leve aumento en la resistencia. Las partículas finas dentro de la mezcla se han distribuido de manera uniforme, reduciendo la formación de vacíos, por lo que el nuevo acomodo genera una mezcla mas compacta y con resistencia ligeramente mayor a la del concreto patrón.

A la edad de 28 días de curado, las mezclas en el rango de 0% a 10% exhiben una disminución menor al 5% en la resistencia con respecto al concreto patrón. Sin embargo, para reemplazos mayores la resistencia disminuye considerablemente. Entonces se puede decir que el concreto elaborado con menos de 10% de reemplazo de caolín podría ser considerado como de una mezcla típica fabricada con agregados pétreos locales y que su incorporación no genera un efecto significativo en la resistencia a la compresión. Los resultados evidencian un comportamiento coherente entre las propiedades físicas relacionadas al tamaño y forma de las partículas y la plasticidad y cohesión del caolín.

Esta caída en la resistencia a la compresión también se puede explicar con la dificultad en la colocación de partículas, reflejada en los valores de slump y la disminución del peso unitario de las mezclas generada por el aumento de vacíos. Es decir, conforme aumenta el porcentaje de reemplazo, aumenta el contenido de aire en la mezcla. En consecuencia, disminuye la resistencia a la compresión, puesto que disminuye la sección real, producida por el aire atrapado.

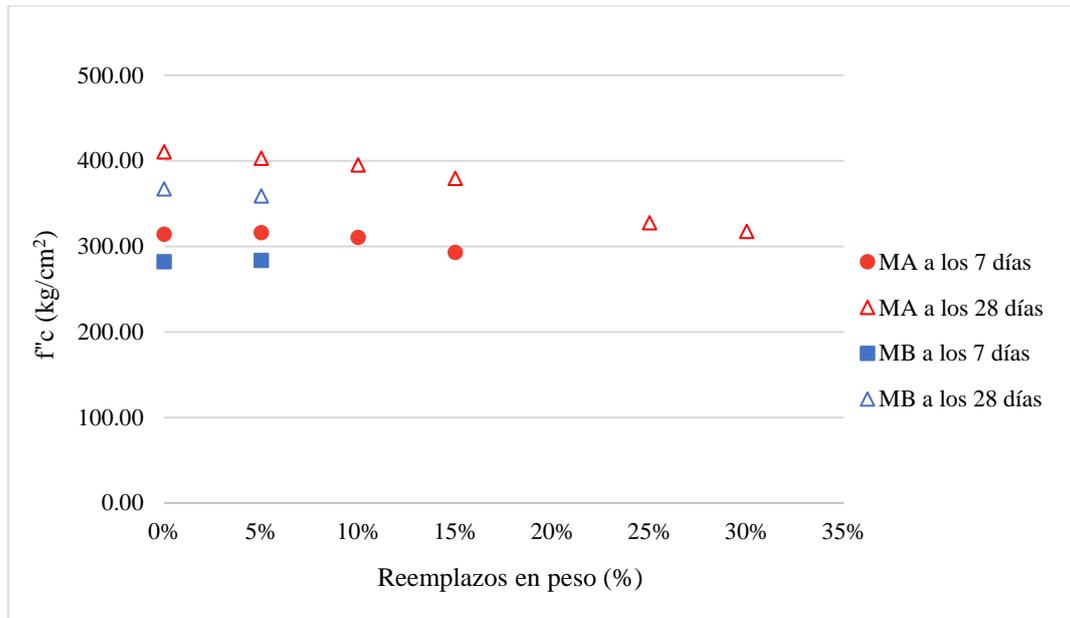


Figura 23. Variación de la resistencia a la compresión del concreto patrón y reemplazos.

Fuente: Elaboración propia.

La disminución de la resistencia a los 28 días de los concretos con reemplazos de caolín se puede explicar observando la distribución de agregados dentro de la probeta (ver **Figura 24**). Se mencionó en la caracterización del caolín que el material utilizado presentaba algunos terrones deleznable, pues son estos los que no se terminaron de mezclar con los demás agregados generando espacios vacíos, haciendo que la mezcla pierda compacidad en ciertas zonas.

Por otro lado, dado que la composición mineralógica por si misma define el comportamiento de las puzolanas naturales al estar asociada con la composición química (Ramírez, 2018). Se puede decir que el caolín empleado, al no tener como fase mineral principal a la caolinita (ver **Figura 15**) no generó la actividad puzolánica esperada. Además, que la composición química de la muestra de arcilla estudiada no corresponde a la exigida (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 superior al 70%) para su utilización como puzolana.



Figura 24. Distribución de agregados en disco de probeta de concreto con reemplazos de caolín.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2. Patrones de falla de las probetas tras el ensayo de compresión

Una vez realizado el ensayo a la compresión, se identificaron y analizaron las fallas en las probetas para cada reemplazo según los tipos de fractura fijados por la NTP 339.034 (ver Figura 25).

Una fractura tiene su origen en pequeños defectos o concentraciones de esfuerzo/fuerza en donde cada incremento en la deformación produce un avance en la grieta o una mayor concentración hasta que el material no soporta la carga aplicada y se fractura. Las fallas tipo “cono”, “corte” y sus combinaciones, son consideradas típicas; por otro lado, la falla de tipo “columnar” es considerada como un modo de falla atípica en mezclas de concreto.

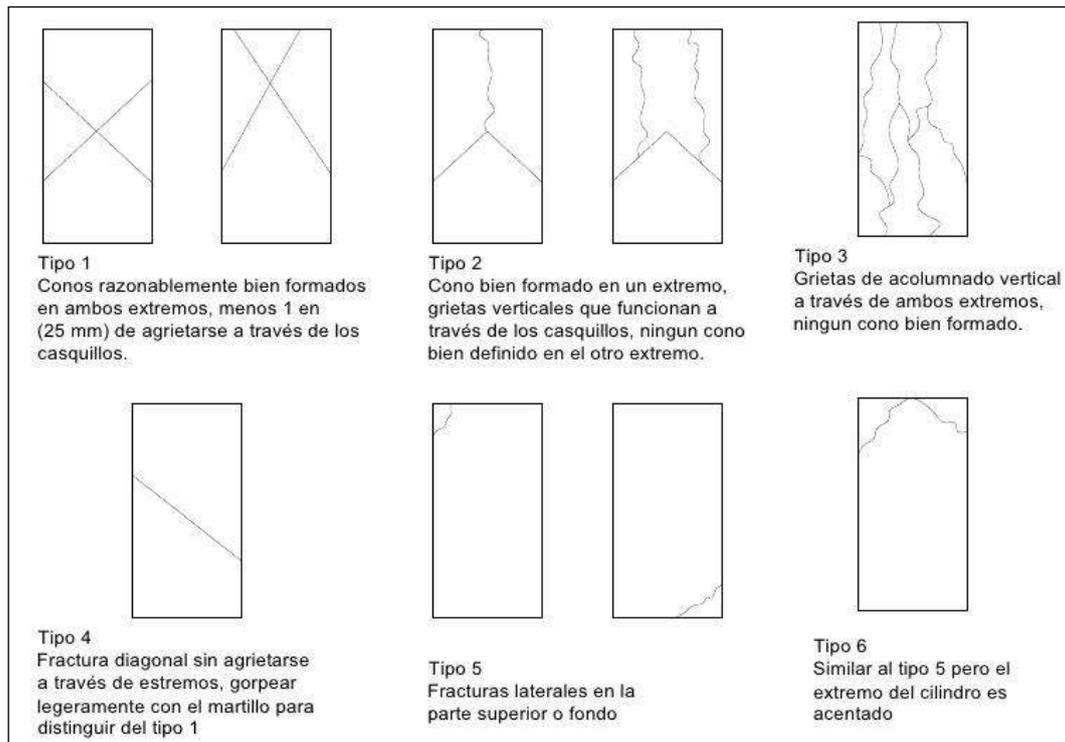


Figura 25. Esquema de los patrones de tipos de fractura.

Fuente: NTP 339.034

Los tipos de falla para las probetas del diseño A, ensayadas a compresión a los 28 días, se muestra en la **Figura 26**. En los especímenes se ha remarcado de color rojo el tipo de falla desarrollado, de esta forma será más fácil homologar la falla con la información entregada en la **Figura 25**. Se observa que la probeta MPA describe la falla tipo 4 o corte, falla típica. Sin embargo, las probetas con reemplazos (5%, 10%, 15%, 25%, 30%) de la mezcla con diseño A, describen la falla tipo 3 o columnar.

En general, la probeta elaborada con mezclas con reemplazo de caolín por agregado fino, presentan un menor grado de conservación, referente a la pérdida de hormigón, cohesión y pérdida de forma original, en comparación a la probeta patrón. La probeta MPA, presenta falla frágil¹⁰, mientras que las probetas que contienen caolín fallan de forma más dúctil¹¹. El grado de conservación de las probetas, es directamente proporcional al porcentaje de caolín reemplazado en la mezcla de concreto.

¹⁰ Se fractura rápidamente cuando se encuentra bajo la influencia de una fuerza o al ser sometido a presión.

¹¹ Presentan deformación plástica apreciable, antes de llegar a fracturarse.

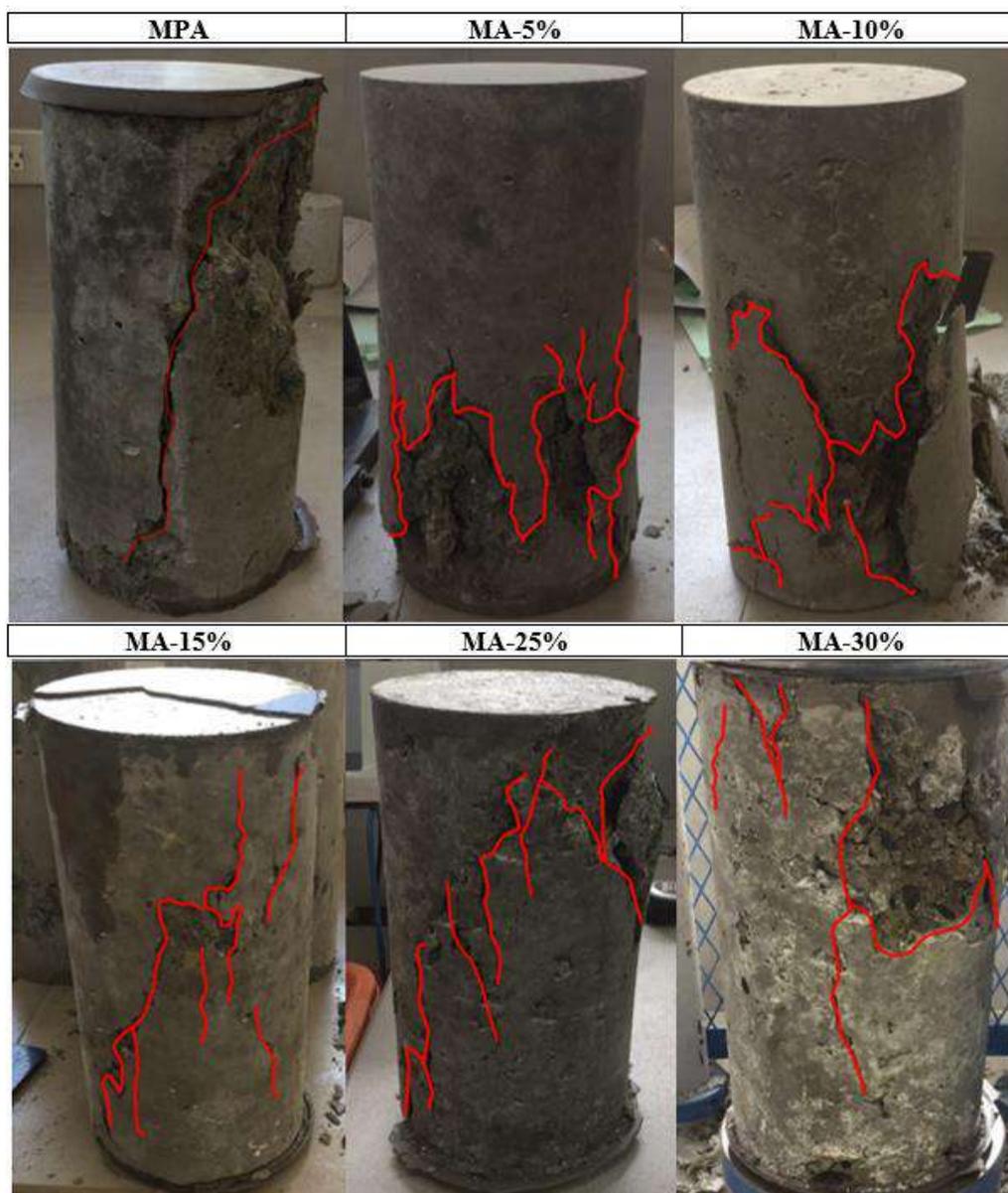


Figura 26. Patrón de falla en probetas de concreto patrón y reemplazos.

Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 27** evidencia como la fragilidad de las partículas de caolín fomentan la falla de la probeta, dando la impresión de “desmoronamiento”.



Figura 27. Probeta MA-15% después del ensayo a la compresión.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.3. Resistencia a la tracción por compresión diametral

Los resultados de la resistencia a la tracción 28 días de todos los reemplazos y la variación respecto al concreto patrón se muestran en la **Figura 23**. Se puede apreciar que la resistencia a la tracción con reemplazos es ligeramente menor al concreto patrón. En el **Anexo D** se muestran los certificados de los resultados del ensayo a la compresión diametral.

Tabla 25. Resistencia a la tracción y relación con la resistencia a la compresión del concreto, a los 28 días.

Diseños	Compresión (kg/m ³)	Tracción (kg/cm ²)	f _t /f _c (%)
MPA	410.50	34.30	8.36
MA-5%	403.00	29.70	7.37
MA-10%	395.00	29.40	7.44
MA-15%	379.50	28.10	7.40
MPB	367.00	32.20	8.77
MB-5%	359.00	30.70	8.55

Fuente: Elaboración propia.

La resistencia en tracción directa o por flexión del concreto, es una magnitud muy variable. La resistencia a la tracción directa (f_t) varía entre el 8% y el 15% de la resistencia a la compresión (f'_c) (Otazzi, 2004).

La resistencia a la tracción del concreto es importante ya que la resistencia al corte, la adherencia entre el concreto y el acero, y la fisuración por retracción y temperatura dependen mucho de esta. En la **Tabla 25**, se aprecia que las mezclas con reemplazos de la mezcla A, no cumplen con la premisa mencionada líneas arriba. Por otro lado, las mezclas con reemplazo de la mezcla B, si cumplen.

En la Figura 28 se observa una ligera disminución de la resistencia a la tracción conforme aumenta el porcentaje de reemplazo.

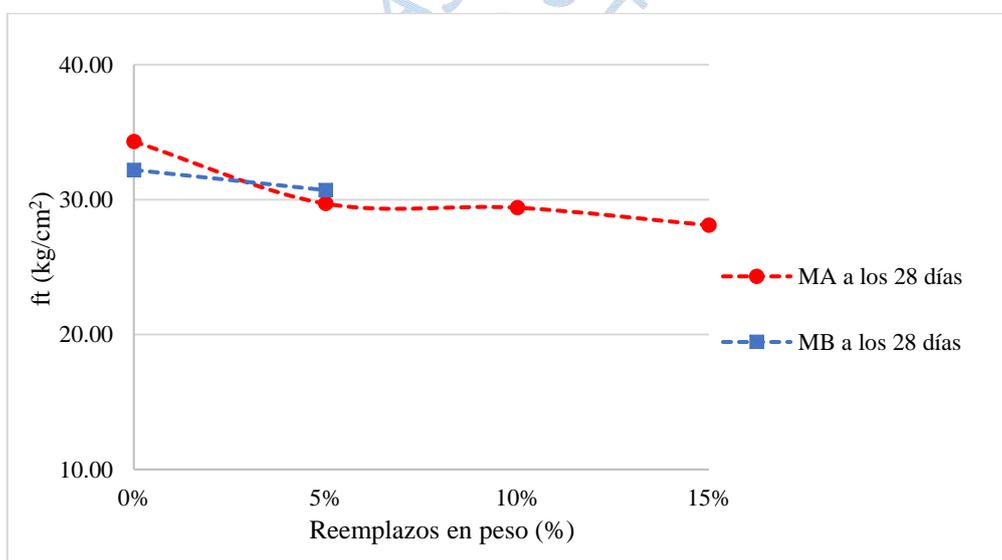
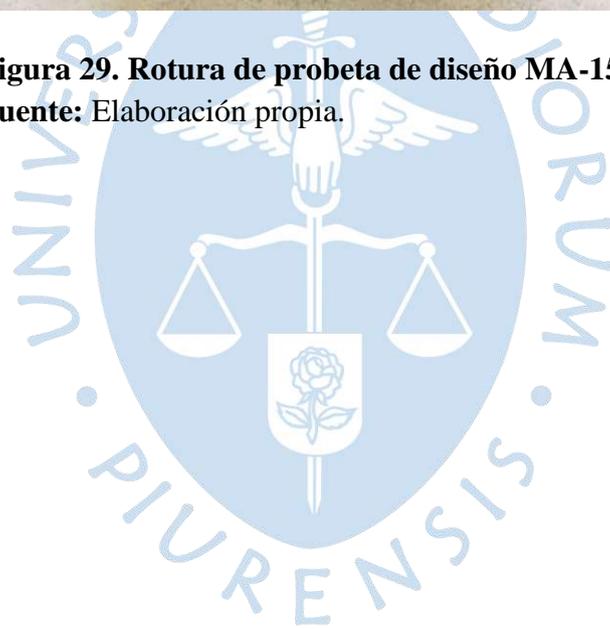


Figura 28. Variación de resistencia a la tracción en concreto patrón y reemplazos.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 29 se puede apreciar que la probeta MA-15% ha fallado, con presencia de terrones deleznable de caolín, los cuales tienen menor resistencia mecánica comparada con los agregados naturales.



**Figura 29. Rotura de probeta de diseño MA-15%.
Fuente: Elaboración propia.**



Conclusiones

1. El contenido de aire en la mezcla de concreto aumenta ligeramente conforme el porcentaje de reemplazo de caolín es mayor. El predominio de partículas filler ($< a 0.0315 \text{ mm}$) del caolín produce el aumento del área superficial de la mezcla y a su vez hace que el requerimiento de pasta de cemento sea insuficiente. Al producirse una escasez de pasta para recubrir todos los agregados de la mezcla, aumenta la cantidad de vacíos en la mezcla.
2. El peso unitario del concreto con caolín tiende a disminuir conforme aumenta el porcentaje de reemplazos. Esto se explica con la granulometría obtenida del caolín, el cual presenta partículas muy pequeñas (filler $< a 0.0315 \text{ mm}$) y partículas deleznable de tamaño $> a 0.074 \text{ mm}$. Aquellas que no se disolvieron por completo en el proceso de mezclado en el trompo, ocupan mayor espacio en la mezcla, incrementando el volumen de concreto producido. Además, el aumento del porcentaje de aire aumenta la dificultad de acomodo de las partículas, haciendo que el peso unitario de la mezcla disminuya.
3. El reemplazo de caolín en el concreto afecta la trabajabilidad de la mezcla, debido a su tamaño no unificado de partículas (de 0.074 mm a 0.0013 mm) que, en comparación al tamaño uniforme de los agregados pétreos afectan significativamente la necesidad de pasta en el concreto. A diferencia de los agregados pétreos, el caolín al ser una arcilla necesita una mayor cantidad de agua para aumentar la cohesión entre sus partículas y, en consecuencia, aumentar la viscosidad de la mezcla. Debido a esto, las mezclas con reemplazos muestran una notoria disminución del slump; sin embargo, el caolín proporciona a la mezcla normalmente granulosa una textura suave y lisa.
4. La resistencia del concreto disminuye conforme aumenta el porcentaje de reemplazo a 28 días. Sin embargo, en el rango de 0% a 10% de reemplazo la disminución no sobrepasa el 5% de la resistencia del concreto patrón, por lo que podría ser considerado como mezcla típica,

ya que la incorporación de caolín no genera un efecto significativo en la resistencia a la compresión.

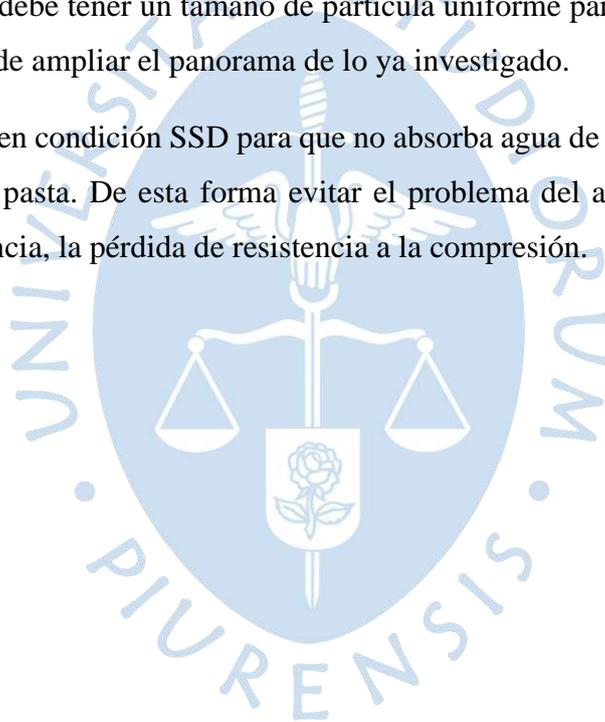
5. Las probetas elaboradas con mezclas con reemplazo de caolín por agregado fino sometidas al ensayo de compresión fallaron de forma dúctil, reflejando un menor grado de conservación. El grado de conservación de las probetas, es directamente proporcional al porcentaje de caolín reemplazado en la mezcla de concreto.

6. La relación entre la resistencia a la compresión y resistencia a la tracción de las mezclas de diseño A, se ven afectadas por la incorporación de caolín en el concreto. Sin embargo, para las mezclas B, el cual el MPB tuvo como condición de diseño, un slump deseado de 4 a 5". Esta relación se encuentra dentro del rango de valores permitidos (8% a 15%). La disminución de la resistencia a la tracción es coherente con tendencia de la resistencia a la compresión.

7. El caolín utilizado presenta en su composición química un alto contenido de sílice y alúmina. Sin embargo, no cumple con las recomendaciones de la ASTM C618-08, el cual menciona que los contenidos de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 deben ser mayor a 70% de su composición química total. Además, que la fase mineral predominante debe ser la caolinita para que el material tenga actividad puzolánica. Por otro lado, la no uniformidad de tamaños y la presencia de terrones deleznales en el material usado, interfieren en la plasticidad del terrón durante el proceso de mezclado homogéneo en la mezcla de concreto, impidiendo que se generen todas las reacciones químicas deseables con las partículas del cemento.

Recomendaciones

1. Utilizar caolín con mayor pureza, verificando su composición química y fases minerales presentes. La muestra debe tener un tamaño de partícula uniforme para reemplazos entre 0% a 10%, con la finalidad de ampliar el panorama de lo ya investigado.
2. Utilizar caolín en condición SSD para que no absorba agua de la mezcla y pueda existir adecuada cantidad de pasta. De esta forma evitar el problema del aumento de contenido de vacíos y, en consecuencia, la pérdida de resistencia a la compresión.





Referencias bibliográficas

- ACI Committee 211.1. (1991). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1 1.9.1). *ACI Manual of Concrete Practice, Part 1. American Concrete Institute. Farmington Hills. Detroit, Michigan. USA.*
- ASTM International. (2014). *C231M -14 Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method.*
- Atria Innovation. (2019). *Hidrofobicidad de materiales.* Zaragoza: Atria Innovation.
- Bhimani, P., & Vyas, C. (2013). Performance of Concrete with China Clay (Kaolin) Waste. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, 2(3), 49-54.
- Cementos Pacasmayo S.A. (2018, Setiembre 3). *Especificación Técnica Cemento Fortimax.* Retrieved from Pacasmayo: <http://www.cementospacasmayo.com.pe/>
- Cham, J., Solís, R., & Moreno, E. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. (U. A. Yucatán, Ed.) *Ingeniería*, 7(2), 39-46.
- Díaz, A., & Rodríguez, I. (24 de Agosto de 2018). *Potencial, Producción y Comercio de las Rocas y Minerales Industriales del Perú 1970-2017.* Obtenido de INGEMMET: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1744>
- Fadzil, A., Muhd, M., Norliyati, M., Hamidah, M., Wan, I., & Assrul, Z. (2017). Characterization of Kaolin as Nano Material for High Quality Construction. *MATEC Web of Conferences*, 103(09019), 1-9.
- Fernandez, J. (1962). Plasticidad de las arcillas. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 1(7), 449-473.

- Fernandez, R., Mrtirena, F., & Scrivener, K. (2011). The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research*, 41(1), 113-122.
- Freedonia Group. (2016, Marzo). *Freedonia*. Retrieved from World Construction Aggregates: <https://www.freedoniagroup.com/industry-study/world-construction-aggregates-3389.htm>
- Gallarday, T. (2007). *Las Arcillas sector central del Perú* (3era ed.). Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- INDECOPI. (1999). *NTP 339.035 - CONCRETO: Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto de Cemento Portland*. Lima.
- INDECOPI. (2001). *NTP 400.012 - AGREGADOS: Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global*. Lima.
- INDECOPI. (2002). *NTP 339.185 - AGREGADOS: Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado*. Lima.
- INDECOPI. (2002). *NTP 400.022 - AGREGADOS: Método de ensayo para la determinación del peso específico y absorción del agregado fino*. Lima.
- INDECOPI. (2008). *NTP 339.046 - CONCRETO: Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del concreto*. Lima.
- INDECOPI. (2011). *NTP 400.017 - AGREGADOS: Método normalizado para determinar el peso unitario del agregado*. Lima.
- INDECOPI. (2013). *NTP 339.184 - HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo normalizado para determinar la temperatura de mezclas de hormigón (concreto)*. Lima.
- INGEMMET. (2017). Prospección de Recursos de Rocas y Minerales Industriales en la Región Piura. *Boletín Serie B: Geología Económica* N° 35, 71-80.
- Instituto de la Construcción y el Desarrollo-IDC de la Cámara Peruana de la Construcción. (2018). *Informe Económico de la Construcción*. Lima: CAPECO.

- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. (2009). Descripción de Perfiles Geoeconómicos de Rocas y Minerales Industriales. In A. Díaz Valdiviezo, & J. Ramirez Carrión, *Compendio de Rocas y Minerales Industriales en el Perú* (pp. 58-73). Lima.
- Jepson, W. (1984). Kaolins: Their Properties and Uses. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 311(1517), 411-432.
- Lorenz, W., & Gwosdz, W. (2005). Caolín y arcillas caoliníticas. *Manual para la evaluación geológica-técnica de recursos minerales de construcción*, 1-12.
- Pino, J., Alvarez, M., Macías, A., Ponce, F., Fienco, B., & Parrales, G. (2018). *Materiales de la Construcción*. Manabí: 3Ciencias.
- Poll, L., Almenares, R., Romero, Y., Alujas, A., Leyva, C., & Martirena, J. (2016). Evaluación de la actividad puzolánica del material arcilloso del depósito La Delta, Moa, Cuba. In I. S. Moa, *Minería y Geología* (Vol. 32, pp. 15-27). Holguin: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- Qasim Shabbir, S., Ahmed, S., & Sarfraz, A. (2016). Experimental Study of Partial Replacement of Fine Aggregate with Waste Material from China Clay Industries. *Life Science Journal*, 13(12), 41-45.
- Ramírez, D. (2018). *Desarrollo de una metodología para definir el potencial puzolánico de un depósito mineral contemplando aspectos geológicos*. Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Retrieved from Universidad Nacional de Colombia: <http://bdigital.unal.edu.co/64493/>
- Santos, D., Malagón, P., & Córdoba, E. (2011). Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander. *DYNA*, 78(167), 53-61.
- Shen, J., Xie, Z., Griggs, D., & Shi, Y. (2012). Effects of Kaolin on the Engineering Properties of Portland Cement Concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 147(177), 76-81.
- Soria Santamaría, F. (1983). Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción. *Revistas Científicas del CSIC*, 33(190), 69-84.
- Uribe, R. (1991). *El control de calidad en los agregados para concreto 3ª parte* (era ed.). Chihuahua: Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción.

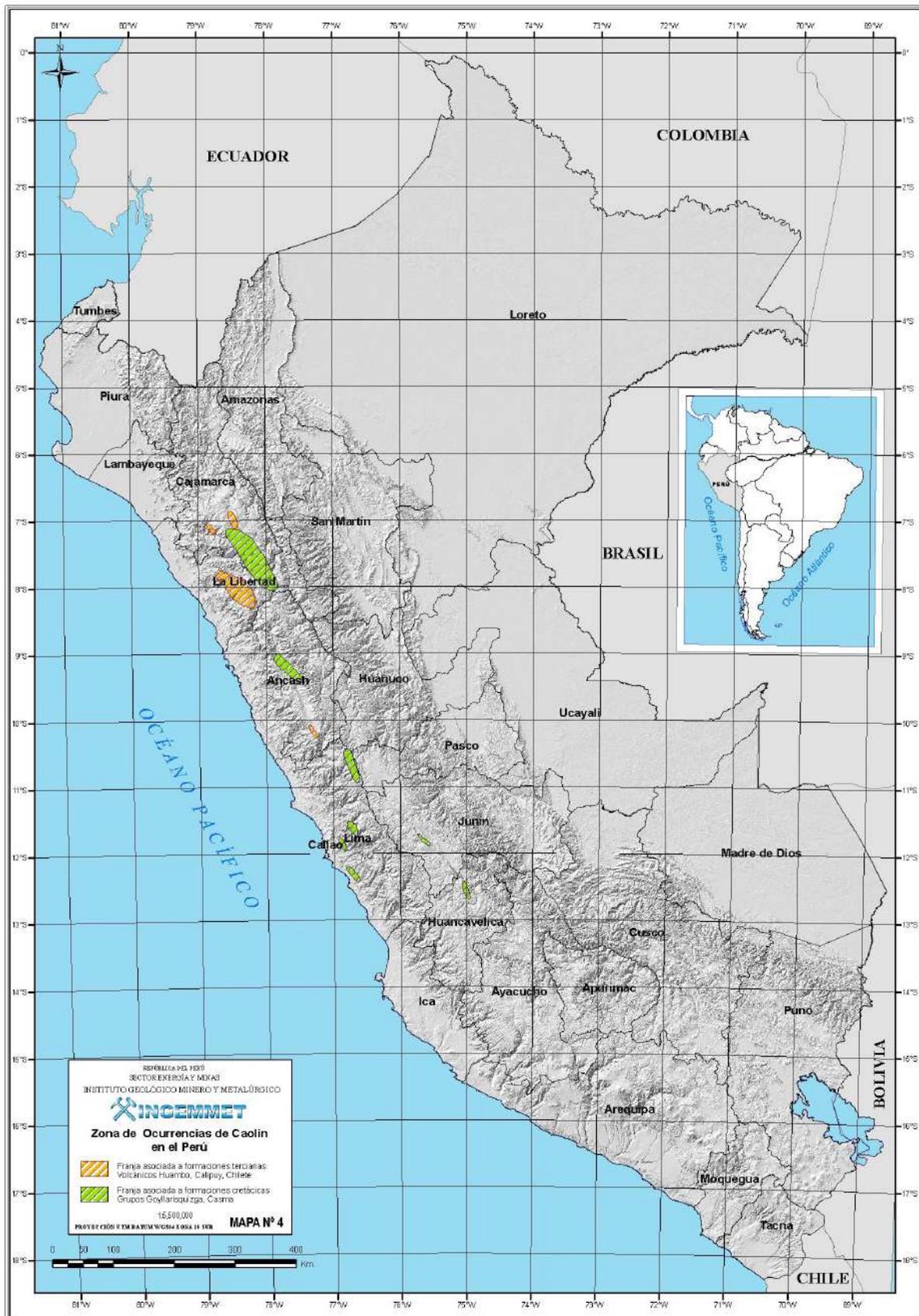


Anexos





Anexo A: Mapa de yacimientos de caolín en el Perú



Fuente: (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2009)

Anexo B: Mapa de yacimientos de caolín en el departamento de La Libertad



Fuente: (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2009)

Anexo C: Curvas granulométricas de los agregados



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

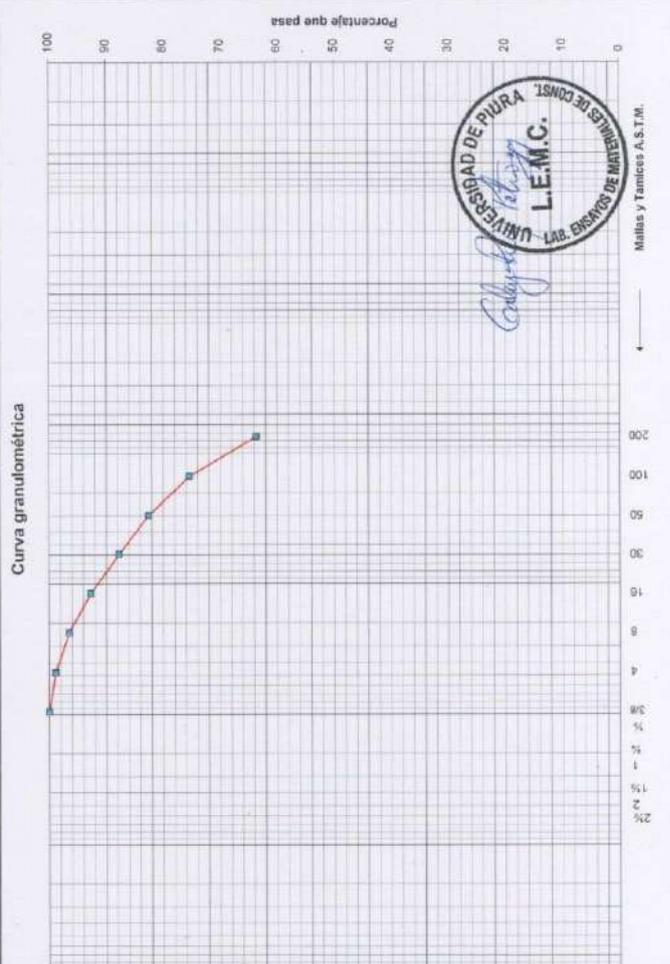
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO, GRUESO Y GLOBAL
Norma: NTP 400.012 2001

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante : GLADYS ERITO VALLADARES BRIONES Ubicación : Piura Muestreo realizado por: El solicitante
 Obra : Reemplazo de acililla blanca (caolín) por agregado fino en el concreto hidráulico
 Procedencia : Caolín procedente de cantera Cerro Vitín - Virú - Trujillo

Abertura	Tamiz ASTM	Contenido (g)	Retenido parcial %	Retenido total %	Pasa %
62.7	2 1/2 "				
50.8	2 "				
38.1	1 1/2 "				
24.4	1 "				
19.1	3/4 "				
12.7	1/2 "				
9.5	3/8 "	0.00	0.00	0.00	100
4.76	4	6.30	1.13	1.13	99
2.38	8	13.00	2.34	3.47	97
1.19	16	21.00	3.77	7.24	93
0.59	30	27.70	4.88	12.21	88
0.297	50	29.20	5.25	17.46	83
0.149	100	39.50	7.10	24.56	75
0.074	200	65.50	11.77	36.32	64
	Fondo	354.00	63.59		
	Total	556.20			
	Peso inicial	556.70			
	Pérdida	0.50			

Curva granulométrica



Mallas y Tamices A.S.T.M.



Descripción de la muestra: Caolín, procedente de cantera Cerro Vitín - Virú - Trujillo. Módulo de finura 0.7

Supervisó el ensayo: Gaby Ruiz Petrozzi
Ingeniero Civil
CJP 46912

El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO, GRUESO Y GLOBAL
Norma: NTP 400.012 2001

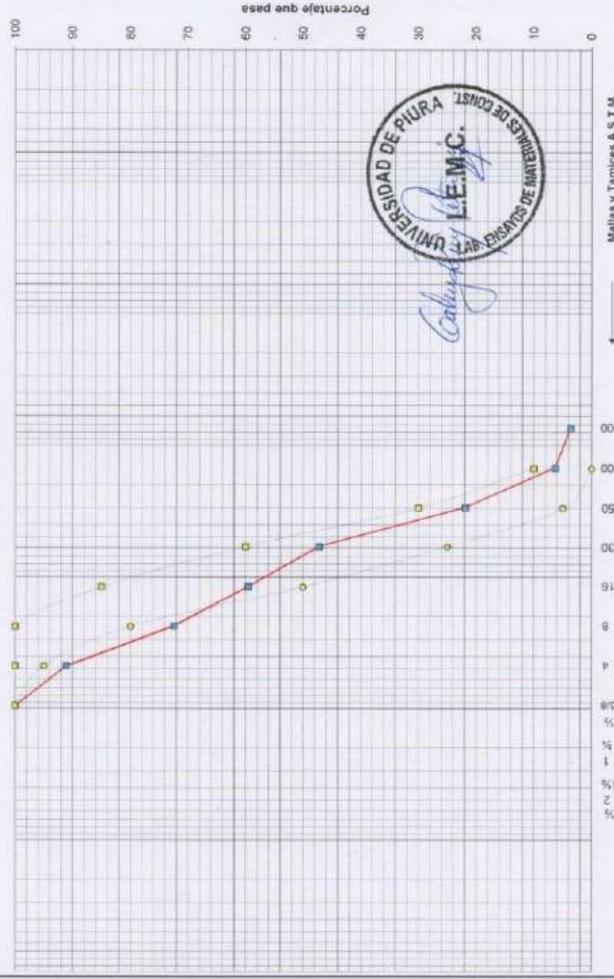
EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante : GLADYS ERITD VALLADARES BRIONES Ubicación : Piura
Muestreo realizado por: El solicitante
Tesis : Recambio de arcilla blanca (casim) por agregado fino en el concreto hidráulico
Procedencia : Agregado fino procedente de cantera Santa Cruz

Orden de servicio N° : 20131
Informe N° : 183656
Fecha de ensayo : 23/06/2018
Realizó el ensayo : Téc. Francisco Castro C.

Abertura	Tamiz	Contenido	Retenido	Retenido	Pasa
mm	ASTM	(g)	parcial %	total %	%
62.7	2 1/2 "				
50.8	2 "				
38.1	1 1/2 "				
24.4	1 "				
19.1	3/4 "				
12.7	1/2 "				
9.5	3/8 "	0.00	0.00	0.00	100
4.76	4	50.30	8.89	8.89	91
2.38	8	105.70	18.68	27.57	72
1.19	16	73.10	12.92	40.48	60
0.59	30	69.90	12.35	52.84	47
0.297	60	143.10	25.29	78.12	22
0.149	100	88.10	15.57	93.69	6
0.074	200	15.10	2.67	96.36	4
	Fondo	20.30	3.59		
	Total	565.60			
	Peso Inicial	565.90			
	Pérdida	0.30			

Curva granulométrica



Descripción de la muestra: Agregado fino, procedente de cantera Santa Cruz. Módulo de finura 3.0
Fuso trazado: NTP 400.037-2002, tabla N° 2

Supervisó el ensayo: Gaby Ruiz Petrozzi
Ingeniero Civil
CIP: 46912

El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP, esta exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCION

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO, GRUESO Y GLOBAL
Norma: NTP 400.012 2001

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Orden de servicio N° : 21845
Informe N° : 183657
Fecha de ensayo : 22/08/2018
Realizó el ensayo : Téc. Francisco Castro C.

Solicitante : GLADYS ERITD VALLADARES BRIONES Ubicación : Piura
Tesis : Reemplazo de arcilla blanca (cecin) por agregado fino en el concreto hidráulico Muestreo realizado por : El solicitante

Procedencia : Agregado grueso triturado, procedente de cantera Sojo

Abertura (mm)	Tamiz ASTM	Contenido (g)	Retenido parcial %	Retenido total %	Pasa %
63.50	2 1/2"				
50.8	2"				
38.1	1 1/2"				
25.4	1"	0.0	0.00	0.00	100
19.1	3/4"	74.0	1.45	1.45	99
12.7	1/2"	2401.0	47.07	48.52	51
9.53	3/8"	1254.0	24.58	73.10	27
4.76	4	1270.0	24.90	98.00	2
2.38	8	82.0	1.61	99.61	0
1.19	16				
0.89	30				
0.297	50				
0.149	100				
0.074	200				
	Fondo	15.0			
	Total	5096.0			
	Peso Inicial	5101.0			
	Pérdida	5.0			

Curva granulométrica



Descripción de la muestra: Agregado grueso de tamaño máximo nominal 3/4" (19.1 mm)
Huso granulométrico trazado: N° 6757 NTP 400.037 - 2002

Supervisó el ensayo: Gaby Ruiz Petrozzi
Ingeniero Civil
CIP 46912

EL LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. EL LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del Cliente o de terceros.

Anexo D: Resultados en el concreto endurecido



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN DE MUESTRAS CILÍNDRICAS DE CONCRETO Norma: NTP 339.034 1999

Orden de servicio N° : 21845 Informe N° : 183662
Fecha de recepción : 28/08/2018
Fecha de ensayo : 04/09/2018
Fecha de emisión : 05/09/2018

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante	: GLADYS ERITD VALLADARES BRIONES
Obra	: Reemplazo de arcilla blanca (caolín) por agregado fino en el concreto hidráulico
Ubicación	: Piura
Muestreo realizado por	: El solicitante
Resistencia especificada	: -
Fecha de moldeo	: 28/08/2018

RESULTADOS:

Identificación del espécimen	Fecha de moldeo	Fecha de ensayo	Edad (días)	Diámetro (cm)	Carga máxima (kg)	Resistencia de rotura (kg/cm ²)	Resistencia especificada (kg/cm ²)
P2 Patrón	28/08/18	04/09/18	7	15.2	56728	313	-
P2 Patrón	28/08/18	04/09/18	7	15.2	58817	324	-
P2 Patrón	28/08/18	04/09/18	7	10.0	24712	315	-
P2 con 10% de reemplazo	28/08/18	04/09/18	7	15.2	56328	310	-
P2 con 10% de reemplazo	28/08/18	04/09/18	7	15.2	55837	308	-
P2 con 10% de reemplazo	28/08/18	04/09/18	7	10.0	24426	311	-

Observaciones:

La resistencia de rotura sólo refleja la resistencia individual a compresión de la probeta ensayada.
Los cuidados previos de los especímenes hasta la edad de ensayo, han sido hechos por: LEMC-UDEP
Han sido recepcionados, pertenecientes a la misma orden de servicio : 06 Especímenes
La identificación de los especímenes ha sido definida por el solicitante.

Realizó el ensayo : Téc. Francisco Castro C.
Presenció el ensayo : ---

Gaby Ruiz Retrosado
Ingeniero Civil
CIP 46910
Responsable

El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN DE
MUESTRAS CILÍNDRICAS DE CONCRETO
Norma: NTP 339.034 1999

Orden de servicio N° : 21845 Informe N° : 183661
Fecha de recepción : 28/08/2018
Fecha de ensayo : 04/09/2018
Fecha de emisión : 05/09/2018

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante	: GLADYS ERITD VALLADARES BRIONES
Obra	: Reemplazo de arcilla blanca (caolin) por agregado fino en el concreto hidráulico
Ubicación	: Piura
Muestreo realizado por	: El solicitante
Resistencia especificada	: -
Fecha de moldeo	: 28/08/2018

RESULTADOS:

Identificación del espécimen	Fecha de moldeo	Fecha de ensayo	Edad (días)	Diámetro (cm)	Carga máxima (kg)	Resistencia de rotura (kg/cm ²)	Resistencia especificada (kg/cm ²)
P1 Patrón	28/08/18	04/09/18	7	15.2	51223	282	-
P1 Patrón	28/08/18	04/09/18	7	15.2	51960	286	-
P1 Patrón	28/08/18	04/09/18	7	10.0	22148	282	-
P1 con 5% de reemplazo	28/08/18	04/09/18	7	15.2	50554	279	-
P1 con 5% de reemplazo	28/08/18	04/09/18	7	15.2	51738	285	-
P1 con 5% de reemplazo	28/08/18	04/09/18	7	10.0	22168	282	-

Observaciones:

La resistencia de rotura sólo refleja la resistencia individual a compresión de la probeta ensayada.
Los cuidados previos de los especímenes hasta la edad de ensayo, han sido hechos por: LEMC -UDEP
Han sido recepcionados, pertenecientes a la misma orden de servicio : 06 Especímenes
La identificación de los especímenes ha sido definida por el solicitante.

Realizó el ensayo : Téc. Francisco Castro C.
Presenció el ensayo : ---


Gaby Ruiz Petrozzi
Ingeniero Civil
CIP 4691205
Responsable

El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN DE
MUESTRAS CILÍNDRICAS DE CONCRETO
Norma: NTP 339.034 1999

Orden de servicio N° : 21845 Informe N° : 183663
Fecha de recepción : 03/09/2018
Fecha de ensayo : 10/09/2018
Fecha de emisión : 10/09/2018

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante	: GLADYS ERITD VALLADARES BRIONES
Obra	: Reemplazo de arcilla blanca (caolin) por agregado fino en el concreto hidráulico
Ubicación	: Piura
Muestreo realizado por	: El solicitante
Resistencia especificada	: -
Fecha de moldeo	: 03/09/2018

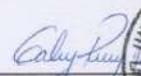
RESULTADOS:

Identificación del espécimen	Fecha de moldeo	Fecha de ensayo	Edad (días)	Diámetro (cm)	Carga máxima (kg)	Resistencia de rotura (kg/cm ²)	Resistencia especificada (kg/cm ²)
P2 con 5% de reemplazo	03/09/18	10/09/18	7	15.2	56841	313	-
P2 con 5% de reemplazo	03/09/18	10/09/18	7	15.2	56841	313	-
P2 con 5% de reemplazo	03/09/18	10/09/18	7	10.0	24878	317	-
P2 con 15% de reemplazo	03/09/18	10/09/18	7	15.2	53573	295	-
P2 con 15% de reemplazo	03/09/18	10/09/18	7	15.2	52780	291	-
P2 con 15% de reemplazo	03/09/18	10/09/18	7	10.0	22724	289	-

Observaciones:

La resistencia de rotura sólo refleja la resistencia individual a compresión de la probeta ensayada.
Los cuidados previos de los especímenes hasta la edad de ensayo, han sido hechos por: LEMC -UDEP
Han sido recepcionados, pertenecientes a la misma orden de servicio : 06 Especímenes
La identificación de los especímenes ha sido definida por el solicitante.

Realizó el ensayo : Téc. Francisco Castro C.
Presenció el ensayo : ---


Gaby Ruiz Patrozzini
Ingeniero Civil
CIP 46912
Responsable



El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN DE
MUESTRAS CILÍNDRICAS DE CONCRETO
Norma: NTP 339.034 1999

Orden de servicio N° : 21845 Informe N° : 183665
Fecha de recepción : 28/08/2018
Fecha de ensayo : 25/09/2018
Fecha de emisión : 26/09/2018

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante	: GLADYS ERITD VALLADARES BRIONES
Obra	: Reemplazo de arcilla blanca (caolin) por agregado fino en el concreto hidráulico
Ubicación	: Piura
Muestreo realizado por	: El solicitante
Resistencia especificada	: -
Fecha de moldeo	: 28/08/2018

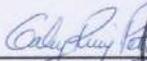
RESULTADOS:

Identificación del espécimen	Fecha de moldeo	Fecha de ensayo	Edad (días)	Diámetro (cm)	Carga máxima (kg)	Resistencia de rotura (kg/cm ²)	Resistencia especificada (kg/cm ²)
P2 Patrón	28/08/18	25/09/18	28	15.2	74938	413	-
P2 Patrón	28/08/18	25/09/18	28	15.2	74433	410	-
P2 Patrón	28/08/18	25/09/18	28	15.2	74623	411	-
P2 con 10% de reemplazo	28/08/18	25/09/18	28	15.2	71762	395	-
P2 con 10% de reemplazo	28/08/18	25/09/18	28	15.2	71645	395	-
P2 con 10% de reemplazo	28/08/18	25/09/18	28	15.2	70572	389	-

Observaciones:

La resistencia de rotura sólo refleja la resistencia individual a compresión de la probeta ensayada.
Los cuidados previos de los especímenes hasta la edad de ensayo, han sido hechos por: LEMC -UDEP
Han sido recepcionados, pertenecientes a la misma orden de servicio : 06 Especímenes
La identificación de los especímenes ha sido definida por el solicitante.

Realizó el ensayo : Téc. Francisco Castro C.
Presenció el ensayo : ---


Gaby Ruiz Perazzo
Ingeniero Civil
CIP 46912
Responsable



El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN DE
MUESTRAS CILÍNDRICAS DE CONCRETO
Norma: NTP 339.034 1999

Orden de servicio N° : 21845 Informe N° : 183664
Fecha de recepción : 28/08/2018
Fecha de ensayo : 25/09/2018
Fecha de emisión : 26/09/2018

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante	: GLADYS ERITD VALLADARES BRIONES
Obra	: Reemplazo de arcilla blanca (caolín) por agregado fino en el concreto hidráulico
Ubicación	: Piura
Muestreo realizado por	: El solicitante
Resistencia especificada	: -
Fecha de moldeo	: 28/08/2018

RESULTADOS:

Identificación del espécimen	Fecha de moldeo	Fecha de ensayo	Edad (días)	Diámetro (cm)	Carga máxima (kg)	Resistencia de rotura (kg/cm ²)	Resistencia especificada (kg/cm ²)
P1 Patrón	28/08/18	25/09/18	28	15.2	66671	367	-
P1 Patrón	28/08/18	25/09/18	28	15.2	66599	367	-
P1 Patrón	28/08/18	25/09/18	28	15.2	66991	369	-
P1 con 5% de reemplazo	28/08/18	25/09/18	28	15.2	65324	360	-
P1 con 5% de reemplazo	28/08/18	25/09/18	28	15.2	64914	358	-
P1 con 5% de reemplazo	28/08/18	25/09/18	28	15.2	64801	357	-

Observaciones:

La resistencia de rotura sólo refleja la resistencia individual a compresión de la probeta ensayada.
Los cuidados previos de los especímenes hasta la edad de ensayo, han sido hechos por: LEMC -UDEP
Han sido recepcionados, pertenecientes a la misma orden de servicio : 06 Especímenes
La identificación de los especímenes ha sido definida por el solicitante.

Realizó el ensayo : Téc. Francisco Castro C.
Presenció el ensayo : ---


Gaby Ruiz Petrozzi
Ingeniero Civil
CIP 4691
Responsable



El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN DE
MUESTRAS CILÍNDRICAS DE CONCRETO
Norma: NTP 339.034 1999

Orden de servicio N° : 21845 Informe N° : 183666
Fecha de recepción : 03/09/2018
Fecha de ensayo : 01/10/2018
Fecha de emisión : 02/10/2018

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante	: GLADYS ERITD VALLADARES BRIONES
Obra	: Reemplazo de arcilla blanca (caolín) por agregado fino en el concreto hidráulico
Ubicación	: Piura
Muestreo realizado por	: El solicitante
Resistencia especificada	: -
Fecha de moldeo	: 03/09/2018

RESULTADOS:

Identificación del espécimen	Fecha de moldeo	Fecha de ensayo	Edad (días)	Diámetro (cm)	Carga máxima (kg)	Resistencia de rotura (kg/cm ²)	Resistencia especificada (kg/cm ²)
P2 con 5% de reemplazo	03/09/18	01/10/18	28	15.2	72593	400	-
P2 con 5% de reemplazo	03/09/18	01/10/18	28	15.2	72853	401	-
P2 con 5% de reemplazo	03/09/18	01/10/18	28	15.2	73452	405	-
P2 con 15% de reemplazo	03/09/18	01/10/18	28	15.2	68829	379	-
P2 con 15% de reemplazo	03/09/18	01/10/18	28	15.2	69018	380	-
P2 con 15% de reemplazo	03/09/18	01/10/18	28	15.2	67801	374	-

Observaciones:

La resistencia de rotura sólo refleja la resistencia individual a compresión de la probeta ensayada.
Los cuidados previos de los especímenes hasta la edad de ensayo, han sido hechos por: LEMC -UDEP
Han sido recepcionados, pertenecientes a la misma orden de servicio : 06 Especímenes
La identificación de los especímenes ha sido definida por el solicitante.

Realizó el ensayo : Téc. Francisco Castro C.
Presenció el ensayo : -


Gaby Ruiz Retoza
Ingeniero Civil
CIP 4691203 DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
Responsable

El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN DE
MUESTRAS CILÍNDRICAS DE CONCRETO
Norma: NTP 339.034 1999

Orden de servicio N° : 21845 Informe N° : 183667
Fecha de recepción : 11/09/2018
Fecha de ensayo : 09/10/2018
Fecha de emisión : 09/10/2018

EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante	: GLADYS ERITD VALLADARES BRIONES
Obra	: Reemplazo de arcilla blanca (caolin) por agregado fino en el concreto hidráulico
Ubicación	: Piura
Muestreo realizado por	: El solicitante
Resistencia especificada	: -
Fecha de moldeo	: 11/09/2018

RESULTADOS:

Identificación del espécimen	Fecha de moldeo	Fecha de ensayo	Edad (días)	Diámetro (cm)	Carga máxima (kg)	Resistencia de rotura (kg/cm ²)	Resistencia especificada (kg/cm ²)
P2 con 25% de reemplazo	11/09/18	09/10/18	28	15.2	59384	327	-
P2 con 25% de reemplazo	11/09/18	09/10/18	28	15.2	59536	328	-
P2 con 25% de reemplazo	11/09/18	09/10/18	28	15.2	58649	323	-
P2 con 30% de reemplazo	11/09/18	09/10/18	28	15.2	57839	319	-
P2 con 30% de reemplazo	11/09/18	09/10/18	28	15.2	57312	316	-
P2 con 30% de reemplazo	11/09/18	09/10/18	28	15.2	56698	312	-

Observaciones:

La resistencia de rotura sólo refleja la resistencia individual a compresión de la probeta ensayada.
El cuidados previos de los especímenes hasta la edad de ensayo, han sido hechos por: LEMC-UDEP
Han sido recepcionados, pertenecientes a la misma orden de servicio : 06 Especímenes
La identificación de los especímenes ha sido definida por el solicitante.

Realizó el ensayo : Téc. Francisco Castro C.
Presenció el ensayo : --


Gaby Ruiz Retros
Ingeniero Civil
CIP 46912
Responsable



El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ESFUERZO A LA TRACCIÓN DE
MUESTRAS CILÍNDRICAS DE CONCRETO

Orden de servicio N° : 21845 Informe N° : 183669
Fecha de recepción : 28/08/2018
Fecha de ensayo : 25/09/2018
Fecha de emisión : 26/09/2018

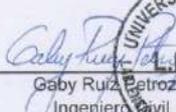
EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante	: GLADYS ERITD VALLADARES BRIONES
Obra	: Reemplazo de arcilla blanca (caolín) por agregado fino en el concreto hidráulico
Ubicación	: Piura
Muestreo realizado por	: El solicitante
Resistencia especificada	: -
Fecha de moldeo	: 28/08/2018

RESULTADOS:

Identificación del espécimen	Fecha de moldeo	Fecha de ensayo	Edad (días)	Diámetro (cm)	Carga máxima (kg)	Longitud (cm.)	Resistencia a la tracción (kg/cm ²)
P2 Patrón	28/08/18	25/09/18	28	15.2	25256	30.4	34.8
P2 Patrón	28/08/18	25/09/18	28	15.2	23260	30.4	32.0
P2 Patrón	28/08/18	25/09/18	28	10.0	11559	20.3	36.2
P2 con 10% de reemplazo	28/08/18	25/09/18	28	15.2	22592	30.4	31.1
P2 con 10% de reemplazo	28/08/18	25/09/18	28	15.2	20799	30.4	28.7
P2 con 10% de reemplazo	28/08/18	25/09/18	28	10.0	9051	20.3	28.4

Realizó el ensayo : Téc. Francisco Castro C.
Presenció el ensayo : ---


Gaby Ruiz Petrozzi
Ingeniero Civil
CIP 46912
Responsable



El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.



UNIVERSIDAD DE PIURA
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ESFUERZO A LA TRACCIÓN DE
MUESTRAS CILÍNDRICAS DE CONCRETO

Orden de servicio N° : 21845 Informe N° : 183668
Fecha de recepción : 28/08/2018
Fecha de ensayo : 25/09/2018
Fecha de emisión : 26/09/2018

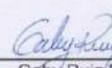
EL SOLICITANTE DECLARA COMO CIERTA LA SIGUIENTE INFORMACIÓN:

Solicitante	: GLADYS ERITD VALLADARES BRIONES
Obra	: Reemplazo de arcilla blanca (caolín) por agregado fino en el concreto hidráulico
Ubicación	: Piura
Muestreo realizado por	: El solicitante
Resistencia especificada	: _
Fecha de moldeo	: 28/08/2018

RESULTADOS:

Identificación del espécimen	Fecha de moldeo	Fecha de ensayo	Edad (días)	Diámetro (cm)	Carga máxima (kg)	Longitud (cm.)	Resistencia a la tracción (kg/cm ²)
P1 Patrón	28/08/18	25/09/18	28	15.2	22177	30.4	30.6
P1 Patrón	28/08/18	25/09/18	28	15.2	22373	30.4	30.8
P1 Patrón	28/08/18	25/09/18	28	10.0	11199	20.3	35.1
P1 con 5% de reemplazo	28/08/18	25/09/18	28	15.2	21217	30.4	29.2
P1 con 5% de reemplazo	28/08/18	25/09/18	28	15.2	21564	30.4	29.7
P1 con 5% de reemplazo	28/08/18	25/09/18	28	10.0	10588	20.3	33.2

Realizó el ensayo : Téc. Francisco Castro C.
Presenció el ensayo : ---


Gabry Ruiz Perrozz
Ingeniero Civil
CIP 46912
Responsable



El LEMC de la Universidad de Piura ha emitido este reporte de ensayo, según los datos proporcionados por el cliente. Con la aceptación de los datos y resultados de este reporte, las partes dejan constancia que la responsabilidad del LEMC-UDEP, se restringe exclusivamente al procedimiento de ejecución y al resultado del reporte de ensayo. El LEMC-UDEP está exento de toda responsabilidad que derive de la interpretación y uso posterior de la información contenida en este reporte por parte del cliente o de terceros.

Anexo E: DRX y FRX del caolín

INFORME TÉCNICO

Número Total de Páginas: 4

SOLICITADO POR : GLADYS VALLADARES.
MUESTRA : 01 Muestra de caolín.
REALIZADO POR : Dr. José Fernandes / Dr. Rolf Grieseler.
FECHA DE EMISIÓN : 05.10.2018.



I. INTRODUCCIÓN

A pedido del solicitante se ha realizado el análisis químico por fluorescencia de rayos X (FRX) y análisis mineralógico por difracción de rayos X (DRX) en una muestra de caolín.

La muestra se recibió el 19 de setiembre del presente año en forma de aglomerado, seca, y en cantidad apropiada para realizar el análisis.

Inicialmente, la muestra fue sometida al proceso de pulverización, para obtener partículas menores a 40 micras para los análisis.

En el análisis químico por fluorescencia de rayos X se reportan todos los óxidos presentes en la muestra. Los óxidos que no se reportan se encuentran por debajo del límite de detección del óxido respectivo o no han sido detectados por el equipo. El método de preparación aplicado a la muestra fue perla de fusión.

En los análisis mineralógicos semicuantitativos por DRX se han determinado todos los minerales presentes (fases cristalinas).

Este informe no es un certificado. Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin autorización del CAM/PUCP.

II. RESULTADOS

2.1. Análisis de Fluorescencia de rayos X (FRX)

Muestra Caolín

El resultado del análisis químico por fluorescencia de rayos X de la muestra Caolín se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Análisis químico de la Muestra Caolín.

Fórmula	(%) en peso
SiO ₂	37.380
CaO	30.000
Al ₂ O ₃	22.600
MgO	3.700
Fe ₂ O ₃	2.430
Na ₂ O	1.540
Cl	0.835
K ₂ O	0.746
SO ₃	0.732
SrO	0.037
Total	100.00

Este informe no es un certificado. Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin autorización del CAM/PUCP.

2.2. Análisis de Difracción de rayos X (DRX)

El resultado del análisis por difracción de rayos X se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Análisis semicuantitativo de las fases identificadas en la muestra Caolín.

Fase cristalina	Símbolo químico	Porcentaje (%)
Calcita	CaCO_3	40,3
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	12,5
Albita	$(\text{Na}, \text{Ca})\text{Al}(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$	8,5
Cristobalita	SiO_2	7,1
Hornablenda	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_3(\text{Al}, \text{Si})_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	5,7
Zeolita	$\text{Ca}_{1,5}(\text{AlSiO}_4)_n$	0,3
Fase amorfo	—	25,6

En la figura 1 se presenta el difractograma de la muestra estudiada con las fases identificadas.

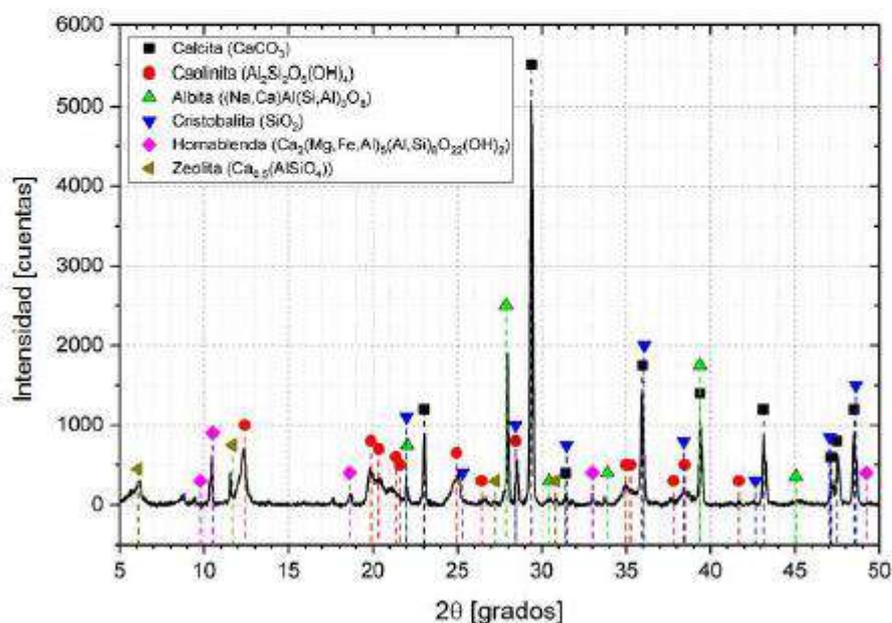


Figura 1: Difractograma de la Muestra Caolín con sus fases identificadas.

Este informe no es un certificado. Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin autorización del CAMPUCP.

III. CONDICIONES DE OPERACIÓN Y ANÁLISIS

FRX

- Equipo: Espectrómetro modelo S8 Tiger marca Bruker.
- Tiempo de análisis: 7 minutos.
- Método de preparación de la muestra: Perla de fusión prensada.

DRX

- Equipo: Difractómetro modelo D8 Discover marca Bruker.
- Detector: LynxEye.
- Rango de medida: $2\theta = 5^\circ$ hasta $2\theta = 70^\circ$, paso de 0.02° por segundo y tiempo total de análisis 30 minutos.
- Identificación: Base de datos del Centro Internacional de Datos para Difracción (ICDD).
- Cuantificación: Método Refinamiento Rietveld (TOPAS Structure Database versión 5 y Fiz Karlsruhe ICSD).

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Centro de Caracterización de Materiales

Dr. Francisco Rumiche
Jefe

Este informe no es un certificado. Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin autorización del CAMPUCP.