

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Sr. Roberto Gómez Espina

Análisis de la influencia de la morfología y el tamaño de arenas naturales y manufacturadas en la resistencia al corte de suelos y la trabajabilidad de morteros



PABLO JESÚS PEÑA RIVAS

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de
Ingeniero Civil de Minas

MAYO 2026

*A mi madre, Jacqueline de Lourdes Rivas Gómez,
que ni la peor de las enfermedades le arrebató la
alegría de vivir y soñar.*

*Eternamente agradecido por todo lo que me diste
a mí y mis hermanos*

.

Un beso al cielo, viejita.

AGRADECIMIENTOS

No puedo empezar sin agradecer primero a mi madre, quien siempre priorizó la familia por sobre todo, devota de sus hijos, que siempre estuvo atenta a que no nos desviáramos y que no dudaba en corregirnos. Cuya resiliencia y valentía en los momentos más duros de su vida hacen eco en todos aquellos que fuimos testigos de su lucha. Mi mamita, lamentablemente hoy no estás físicamente con nosotros, pero siempre estarás en los corazones de quiénes te amamos. Sé que mi madre dónde esté, está enormemente feliz y orgullosa de verme culminar este proceso. Eternamente agradecido, viejita, tu trabajo está cumplido.

Continuo con agradecer al resto de mi familia que me han acompañado toda la vida. A mi padre, Erico, que siempre ha estado dispuesto a sacrificarse para darnos un mejor futuro para mí y mis hermanos, también por su paciencia y confianza en mí, te lo agradezco en el alma viejito. A mis hermanos, que siempre han estado ahí para darme ánimo y su palabra de aliento, cuando las cosas no salían como esperaba. A mi segunda familia, los Rivas-Flores, por todo el apoyo brindado hacía mí y nuestra familia a lo largo de mi vida. A mi abuelita Marta y mi tata Nino, por llenarme de energías con cada encuentro. A mis tíos Ricardo y Nelly, por recibirme con los brazos abiertos en su casa para poder estudiar en Concepción. A mi tío Pablo, por estar siempre atento en este camino. Y al resto de mi familia por sus palabras y energías en este proceso largo de memoria, de verdad muchas gracias.

A mis amigos que conocí en la universidad, Richi, Dario, Navarro, JL, Dante, Sanma, Rubén, Blas, Brandon, los cabros de Meta de MLV FC, los cabros de Civil, compañeros de la carrera y de universidad, se agradecen los momentos compartidos que hicieron de la etapa universitaria una experiencia única y muy importante en mi vida.

A las personas que estuvieron en la etapa de mi memoria; a mi profesor guía Roberto Gómez, por estar siempre dispuesto cuando lo necesité y por su manera excelsa de ser como persona y docente. A los profesores Ramón Díaz y René Gómez, por sus palabras de aliento y apoyo. A las personas con que compartí en el laboratorio de Rocas, Lucas, Adolfo, Vanessa, Franco, Carlos, Josué, Guille con varios que me faltan por nombrar, que hicieron de ir al laboratorio un agrado cada día. A la profesora Eugenia por dejarme usar el equipo de lupa estereoscópica. Y para finalizar, a los docentes y funcionarios del DIMET, por su ayuda y disposición, en especial a don Edgardo y a Meli, excelentes funcionarios y personas. Gracias a todos los que me han acompañado, a Dios y a la vida.

RESUMEN

La presente investigación analizó la influencia de la morfología y del tamaño de partículas de arenas naturales y manufacturadas sobre la resistencia al corte de suelos granulares y la trabajabilidad de morteros, manteniendo una distribución granulométrica controlada de acuerdo con criterios aplicables a hormigón proyectado.

La metodología consideró cuatro muestras de arena, tanto naturales como manufacturadas, las que fueron sometidas a caracterización granulométrica, ensayos de corte directo, ángulo de reposo y determinación de densidad. Paralelamente, se realizó la caracterización morfológica de partículas mediante imágenes obtenidas por estereomicroscopía, procesadas en ImageJ y MatLab, a partir de las cuales se determinaron distintos descriptores bidimensionales. Además, se evaluó el comportamiento de morteros en estado fresco mediante ensayos de asentamiento del cono y resistencia a la segregación. Finalmente, se aplicó un análisis estadístico de correlación para relacionar los descriptores morfológicos con las variables mecánicas y de trabajabilidad obtenidas experimentalmente.

Los resultados mostraron que la distribución granulométrica tuvo una asociación consistente con la resistencia al corte, observándose un aumento de la cohesión aparente y del ángulo de fricción interna a medida que se incrementó el módulo de finura de las curvas sintéticas. Asimismo, la caracterización morfológica permitió evidenciar diferencias claras entre materiales, presentando los áridos naturales mayores valores de redondez, esfericidad y regularidad, mientras que los áridos triturados exhibieron partículas más angulares e irregulares. En relación con las propiedades macroscópicas, los descriptores morfológicos seleccionados se asociaron inversamente con la cohesión aparente máxima, mientras que su relación con el ángulo de fricción interna fue débil y poco consistente.

En el comportamiento en estado fresco del mortero, la morfología mostró una relación más clara con la trabajabilidad, con partículas más redondeadas y regulares tendiendo a asociarse con mayores asentamientos y a requerir menores relaciones agua/cemento para alcanzar niveles equivalentes de deformación, resultado compatible con una menor fricción interna del sistema. En cambio, no se observó una relación directa entre resistencia al corte y trabajabilidad, al responder ambas a mecanismos distintos. Respecto a la segregación, no se observaron diferencias medibles entre las mezclas, por lo que no fue posible establecer correlaciones con las variables estudiadas. En términos generales, la granulometría se asoció más claramente con la resistencia al corte y la morfología con las diferencias observadas en la trabajabilidad del mortero.

ABSTRACT

This research analyzed the influence of the morphology and particle size of natural and manufactured sands on the shear strength of granular soils and the workability of mortars, while maintaining a controlled grain size distribution in accordance with criteria applicable to shotcrete.

The methodology considered four sand samples, including both natural and manufactured materials, which were subjected to grain size characterization, direct shear testing, angle of repose measurement, and density determination. In parallel, particle morphological characterization was carried out using images obtained by stereomicroscopy and processed with ImageJ and MatLab, from which different two-dimensional descriptors were determined. In addition, the fresh-state behavior of mortars was evaluated through slump and segregation resistance tests. Finally, a statistical correlation analysis was performed to relate the morphological descriptors to the mechanical and workability variables obtained experimentally.

The results showed that grain size distribution had a consistent association with shear strength, with an increase in apparent cohesion and internal friction angle as the fineness modulus of the synthetic gradation curves increased. Likewise, the morphological characterization revealed clear differences among materials, with natural aggregates showing higher values of roundness, sphericity, and regularity, whereas crushed aggregates exhibited more angular and irregular particles. In relation to the macroscopic properties, the selected morphological descriptors were inversely associated with maximum apparent cohesion, while their relationship with the internal friction angle was weak and inconsistent.

In the fresh-state behavior of the mortar, morphology showed a clearer relationship with workability, with more rounded and regular particles tending to be associated with greater slump values and requiring lower water-to-cement ratios to reach equivalent levels of deformation, a result compatible with lower internal friction within the system. In contrast, no direct relationship was observed between shear strength and workability, since both respond to different mechanisms. Regarding segregation, no measurable differences were observed among the mixtures, so it was not possible to establish correlations with the variables studied. In general terms, grain size distribution was more clearly associated with shear strength, whereas morphology was associated with the differences observed in mortar workability.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación del trabajo e hipótesis	2
1.2. Objetivos	2
1.3. Alcance y limitaciones	3
1.4. Metodología general.....	3
2. ANTECEDENTES.....	5
2.1. Definición y clasificación de áridos	5
2.1.1. Clasificación por tamaño de partícula	5
2.1.2. Clasificación por origen o proceso de obtención	5
2.2. El mortero y su relevancia en aplicaciones	6
2.2.1. Diferencias entre mortero y hormigón	6
2.2.2. Propiedades de materiales cementicios	6
2.2.3. Shotcrete.....	8
2.2.4. Trabajabilidad en hormigón y propiedades reológicas relevantes	9
2.3. Influencia de los áridos en la resistencia al corte de suelos granulares.....	10
2.3.1. Fundamentos de la resistencia al corte de suelos granulares	10
2.3.2. Efecto de la granulometría en la resistencia al corte de suelos granulares	11
2.3.3. Efecto de la morfología de las partículas en la resistencia al corte de suelos granulares	13
2.3.4. Interacción entre tamaño y forma de las partículas.....	14
2.4. Influencia de los áridos en la trabajabilidad de morteros.....	16
2.4.1. Efecto de la granulometría en la trabajabilidad de morteros.....	17
2.4.2. Efecto de la morfología en la trabajabilidad de morteros	18
2.5. Morfología de partículas	19
2.5.1. Descriptores morfológicos	21
2.5.2. Métodos para la estimación de la morfología de las partículas.....	25
3. METODOLOGÍA	28
3.1. Diseño experimental.....	28
3.2. Materiales y preparación de muestras	28
3.2.1. Composición mineralógica de las muestras	28

3.2.2.	Preparación y clasificación granulométrica	30
3.3.	Procedimiento experimental.....	31
3.3.1.	Caracterización mecánica de las muestras	32
3.3.2.	Caracterización morfológica de las partículas	35
3.3.3.	Evaluación del comportamiento en estado fresco de los morteros	40
3.3.4.	Método de análisis de datos	43
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
4.1.	Caracterización granulométrica de las muestras	47
4.2.	Caracterización mecánica de las muestras	48
4.3.	Caracterización morfológica de las partículas	50
4.4.	Evaluación del comportamiento de los morteros en estado fresco	51
4.5.	Relación entre descriptores morfológicos y propiedades macroscópicas	53
4.5.1.	Selección de descriptores morfológicos.....	53
4.5.2.	Definición de indicadores de trabajabilidad.....	55
4.5.3.	Correlación entre morfología y propiedades macroscópicas	56
4.5.4.	Correlaciones centradas por curva granulométrica	58
4.5.5.	Correlaciones centradas controladas por el material.....	59
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	64
7.	ANEXOS.....	69
A.1.	Serie preferida de tamices NCh165:2009.....	69
A.2.	Procedimiento de mezclado con adición progresiva de agua para el ensayo de asentamiento del cono	70
A.3.	Representación de los diámetros característicos de las curvas sintéticas.....	71
A.4.	Envoltentes de falla máxima y residual por muestra.....	72
A.5.	Curvas esfuerzo corte-altura de deformación.....	73
A.6.	Histogramas de los descriptores morfológicos estudiados.....	75
A.7.	Diagramas de caja de los descriptores morfológicos estudiados	80
A.8.	Imágenes de los ensayos de asentamiento del cono para morteros.....	85
A.9.	Gráficos de dispersión de los descriptores morfológicos seleccionados y las variables de respuesta	87
A.10.	Significancia estadística de las correlaciones de Spearman	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Síntesis del efecto de la granulometría y la morfología del árido sobre la resistencia al corte de suelos granulares según la literatura revisada	15
Tabla 2. Síntesis del efecto de la granulometría y la morfología del árido sobre la trabajabilidad de morteros según la literatura revisada.....	18
Tabla 3. Principales descriptores morfológicos bidimensionales utilizados en la caracterización de partículas granulares.....	22
Tabla 4. Porcentajes de material para cada curva sintética	31
Tabla 5. Parámetros morfológicos utilizados en la caracterización morfológica del estudio	38
Tabla 6. Diámetros característicos, coeficientes granulométricos y módulo de finura de las curvas sintéticas estudiadas.	47
Tabla 7. Valores de cohesión y ángulo de fricción interna máximo y residual obtenidos para cada muestra	48
Tabla 8. Valores de ángulo de reposo y de densidad por muestra	49
Tabla 9. Valores de los descriptores morfológicos escogidos ponderados por muestra	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la metodología general	4
Figura 2. Rango granulométrico recomendado por EFNARC (1996) [19] para hormigón proyectado	9
Figura 3. Esquema conceptual de la influencia de la forma y el tamaño de partícula sobre el espacio poroso y el empaquetamiento de arenas. Fuente: Modificado de Anusree y Latha (2023) [38]	14
Figura 4. Un contorno de partícula (línea sólida gruesa) con su componente de forma (línea sólida clara, aproximación), redondeamiento (círculos discontinuos) y textura (círculos punteados) Fuente: Modificado de Anusree y Latha (2023) [38]	20
Figura 5. Desventajas de la proyección única en 2D para análisis de partículas 3D.	24
Figura 6. Tabla para estimación visual de redondez y esfericidad de granos de arenas Fuente: Extraído de Krumbein y Loss (1963) [52]	26
Figura 7. Muestras utilizadas en el estudio	29
Figura 8. Sistemas de tamices utilizados.....	30
Figura 9. Curvas sintéticas utilizadas en el estudio.....	31
Figura 10. Equipo de corte directo utilizado	33
Figura 11. Mediciones del cono en cuatro direcciones distintas.....	34
Figura 12. Equipo de picnometría utilizado	35
Figura 13. Equipo de lupa estereoscópica utilizado.....	36
Figura 14. Esquema del procesamiento de imágenes realizado en este estudio	37
Figura 15. Representación esquemática de los descriptores utilizados en el análisis de partículas... ..	39
Figura 16. Ensayo de resistencia a la segregación	43
Figura 17. Histograma del diámetro de Feret mínimo por rango granulométrico	51
Figura 18. Asentamiento del cono con adición progresiva de agua por razón agua/cemento (w/c).. ..	52
Figura 19. Matriz de correlación de Spearman entre descriptores morfológicos.....	54
Figura 20. Matriz de correlación de Spearman entre descriptores morfológicos seleccionados y variables respuesta.....	56
Figura 21. Matriz de correlaciones de Spearman centradas por curva granulométrica	58
Figura 22. Matriz de correlaciones de Spearman centradas por material	59
Figura 23. Curvas granulométricas sintéticas y sus diámetros característicos.....	71
Figura 24. Envolventes de falla máxima y residual por muestra	72
Figura 25. Curvas esfuerzo de corte (kPa)- altura de deformación (mm) según material, tipo de curva y peso aplicado	73
Figura 26. Curvas esfuerzo de corte (kPa)- altura de deformación (mm) según peso aplicado, tipo de curva y material	74
Figura 27. Histograma de la redondez de Wadell	75
Figura 28. Histograma de la circularidad de Tickell	75
Figura 29. Histograma de la esfericidad por diámetro	76
Figura 30. Histograma de la esfericidad por relación de círculos	76
Figura 31. Histograma de la esfericidad por perímetro.....	77

Figura 32. Histograma de la relación de aspecto	77
Figura 33. Histograma de la circularidad de Cox.....	78
Figura 34. Histograma de la solidez.....	78
Figura 35. Histograma de la convexidad.....	79
Figura 36. Histograma de la regularidad	79
Figura 37. Diagrama de caja de la redondez de Wadell.....	80
Figura 38. Diagrama de caja de la circularidad de Tickell.....	80
Figura 39. Diagrama de caja de la esfericidad por diámetro	81
Figura 40. Diagrama de caja de la esfericidad por relación de círculos.....	81
Figura 41. Diagrama de caja de la esfericidad por perímetro	82
Figura 42. Diagrama de caja de la relación de aspecto	82
Figura 43. Diagrama de caja de la circularidad de Cox	83
Figura 44. Diagrama de caja de la solidez	83
Figura 45. Diagrama de caja de la convexidad	84
Figura 46. Diagrama de caja de la regularidad.....	84
Figura 47. Ensayo de asentamiento del cono de la arena de río (AG)	85
Figura 48. Ensayo de asentamiento del cono del adocreto triturado (AM).....	85
Figura 49. Ensayo de asentamiento del cono de la arena de playa (AP).....	86
Figura 50. Ensayo de asentamiento del cono de la roca triturado (RT)	86
Figura 51. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y la cohesión máxima aparente	87
Figura 52. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y la cohesión residual aparente	87
Figura 53. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y phi máximo	88
Figura 54. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y phi residual	88
Figura 55. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y la densidad real	89
Figura 56. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y el ángulo de reposo	89
Figura 57. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y el asentamiento con w/c fijo en 0.7	90
Figura 58. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y el área bajo la curva de asentamiento-w/c.....	90
Figura 59. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y el w/c para alcanzar 3 mm de asentamiento	91

1. INTRODUCCIÓN

Los hormigones y morteros son de los materiales de construcción más empleados por la humanidad, esto debido a su versatilidad, durabilidad y capacidad de adaptación a distintos tipos de obras civiles, industriales y mineras.

En estas mezclas, los áridos representan el principal componente volumétrico, y su naturaleza, en términos de granulometría, forma y textura superficial, ejerce una influencia decisiva sobre las propiedades reológicas y mecánicas del material endurecido. El cemento, por su parte, actúa como el agente ligante que cohesiona las partículas de árido, permitiendo el desarrollo de una matriz resistente y durable [1].

En las últimas décadas, la demanda global de materiales cementicios ha experimentado un crecimiento sostenido, impulsado por la urbanización acelerada y la expansión de la infraestructura en economías emergentes [2]. Sin embargo, esta tendencia ha traído consigo desafíos ambientales relacionados tanto con la producción de cemento, responsable aproximadamente entre el 5 y 8 % de las emisiones antropogénicas globales de CO₂ [3], como con la extracción intensiva de áridos naturales, especialmente arenas fluviales, cuya disponibilidad está disminuyendo en varias regiones del mundo [4,5]. Esto ha incentivado el uso de áridos manufacturados o reciclados como alternativa, promoviendo líneas de investigación que apunten hacia una construcción más sostenible.

Dentro de este contexto, surge la necesidad de comprender en profundidad cómo las propiedades físicas de los áridos, especialmente el tamaño y morfología de las partículas, afectan el desempeño de los morteros en específico. Tradicionalmente, en el diseño de mezclas se ha priorizado la granulometría, relegando el análisis de la forma de las partículas, a pesar de la creciente evidencia que sugiere su influencia directa en la resistencia mecánica, la cohesión interna y la trabajabilidad de los morteros.

Por esta razón, el presente trabajo tiene como objetivo estudiar el impacto del tamaño y la morfología de partículas de distintos tipos de áridos, incluyendo alternativas de áridos reciclados, sobre el comportamiento en estado fresco de los morteros, evaluando su trabajabilidad mediante ensayos de asentamiento del cono y resistencia a la segregación. Complementariamente, se examina la relación entre estas propiedades y la resistencia al corte de los áridos mediante ensayos directos, con el fin de enriquecer la comprensión del comportamiento mecánico de los materiales.

1.1. Motivación del trabajo e hipótesis

La caracterización de áridos tradicionalmente se ha centrado en la distribución granulométrica, siguiendo normativas que permiten asegurar un desempeño mínimo en mezclas cementicias. Sin embargo, parámetros como la forma, textura y esfericidad de las partículas también inciden en el comportamiento mecánico de los suelos y en la trabajabilidad de morteros.

Esta investigación surge del interés por profundizar en estos aspectos morfológicos, explorando su impacto en propiedades críticas como la resistencia al corte y la fluidez inicial del mortero. A través de un enfoque experimental y digital, se busca aportar nuevas evidencias que complementen los criterios actuales de selección de áridos, especialmente en aplicaciones donde el comportamiento reológico es determinante, como en el uso de shotcrete en minería o construcción subterránea.

La hipótesis de este trabajo plantea que la granulometría y la morfología de las partículas de arena modifican de manera diferenciada la resistencia al corte del material granular y la trabajabilidad de los morteros. En particular, se espera que las curvas granulométricas más gruesas se asocien a una mayor resistencia al corte y a una mayor trabajabilidad de morteros, reflejada en mayores asentamientos, siempre que la distribución de tamaños mantenga una adecuada estabilidad en la mezcla. A su vez, se espera que partículas más angulares e irregulares se asocien con una mayor resistencia al corte, mientras que las partículas más redondeadas y regulares favorezcan la trabajabilidad del mortero.

1.2. Objetivos

El objetivo general es:

Evaluar la relación entre la morfología y el tamaño de las partículas de áridos con la resistencia al corte de suelos y la trabajabilidad de morteros.

Los objetivos específicos son:

- Revisar el estado del arte de la investigación, así como los métodos actuales de caracterización morfológica de partículas.
- Caracterizar y clasificar las muestras de áridos según normas técnicas aplicables para morteros.
- Determinar la morfología de las partículas mediante análisis digital de imágenes procesadas con ImageJ y codificadas en MatLab.

- Analizar la influencia de las características de los áridos en la resistencia al corte y en la trabajabilidad de morteros, a partir de los resultados experimentales y su análisis estadístico.

1.3. Alcance y limitaciones

El estudio centrará el desarrollo experimental en laboratorio. Solo se considera la granulometría recomendada para hormigón proyectado respecto a la norma EFNARC, sin la realización de pruebas de hormigón proyectado. Asimismo, la caracterización morfológica se basa en el análisis de imágenes 2D de partículas simplemente convexas, lo cual no considera el volumen ni los posibles huecos internos de las partículas. Además, solo se consideran como estudio del comportamiento de estado fresco de morteros, el ensayo de asentamiento del cono y una prueba complementaria de resistencia a la segregación.

Dentro de las limitaciones asociadas al estudio, se encuentra una caracterización de árido para mortero sin considerar todas las pruebas asociadas por normativa chilena vigente, y ausencia de pruebas de composición mineralógica, debido a la imposibilidad de acceder a dichos instrumentos.

Se consideró una limitada cantidad de partículas para el análisis morfológico por muestras, esto debido al extenso trabajo de conseguir el contorno de las partículas para ser procesadas. Se consideraron un limitado número de muestras para el estudio, buscando conseguir un perfil de morfología de partículas variado con el menor número de muestras.

1.4. Metodología general

La metodología empleada en este trabajo se desarrolló en etapas sucesivas, abarcando desde la revisión de antecedentes inicial hasta el análisis experimental y las conclusiones. A continuación, se detallan las etapas del estudio, y se presenta un esquema a partir de estas en la Figura 1.

- **Revisión de antecedentes:** Se recopiló y analizó bibliografía científica relacionada con la influencia de la morfología y el tamaño de partículas en el comportamiento mecánico de suelos y morteros. Esta etapa permitió fundamentar el problema de investigación y definir las variables a estudiar.
- **Recolección y caracterización de muestras:** Se seleccionaron cuatro muestras de arenas (naturales y manufacturadas). Se evaluaron propiedades físicas como la densidad, y se realizaron ensayos de resistencia al corte de suelos y ángulo de reposo a las muestras.
- **Análisis morfológico mediante imágenes digitales:** Las muestras fueron observadas a través de lupa estereoscópica. Las imágenes obtenidas fueron tratadas con el software ImageJ, y se

calcularon parámetros morfológicos como redondez, esfericidad y regularidad mediante algoritmos en MatLab y herramientas en ImageJ.

- **Evaluación del comportamiento en estado fresco de morteros:** Se fabricaron mezclas con los áridos y se ensayó su trabajabilidad mediante el asentamiento del cono y una evaluación complementaria de segregación mediante el ensayo de segregación.
- **Resultados y análisis comparativo:** Se realizó un análisis estadístico para correlacionar los parámetros morfológicos con los resultados de la caracterización mecánica de los áridos y del comportamiento en estado fresco de morteros.
- **Conclusiones y recomendaciones:** Se interpretaron los resultados obtenidos para establecer conclusiones sobre el impacto de la morfología y el tamaño de las partículas en las propiedades mecánicas y reológicas de los materiales. Además, se sugirieron mejoras y propusieron nuevas investigaciones.

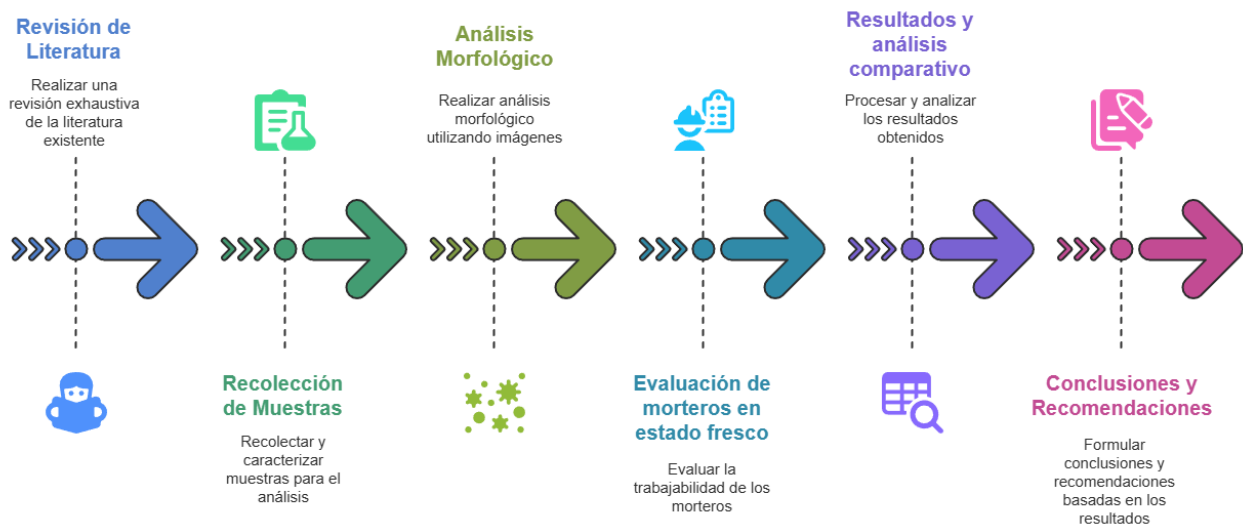


Figura 1. Esquema de la metodología general

2. ANTECEDENTES

En este capítulo se describe el material bibliográfico que se considera fundamental para el entendimiento, desarrollo y análisis del problema a abordar.

2.1. Definición y clasificación de áridos

La normativa chilena NCh163:2013 [6], que establece los requisitos para los áridos utilizados en morteros y hormigones, define los áridos como materiales pétreos compuestos por partículas duras, de forma y tamaño estables. Estos materiales son esenciales para la resistencia, estabilidad y comportamiento reológico de mezclas cementicias, y su clasificación puede realizarse atendiendo a distintos criterios: principalmente su tamaño de partícula y su origen o proceso de obtención.

2.1.1. Clasificación por tamaño de partícula

Según su tamaño, los áridos se clasifican funcionalmente en árido grueso, retenido en el tamiz de 4.75 mm; árido fino, que pasa por dicho tamiz y queda retenido en el de 0.075 mm; filler, cuya mayor parte pasa por el tamiz de 0.075 mm; y árido total o combinado, formado por la mezcla de árido fino y grueso en proporciones definidas por dosificación. Desde una perspectiva geotécnica, esta clasificación puede detallarse mediante la escala granulométrica. Así, la NCh163:2013 [6] distingue grava como el árido grueso retenido en el tamiz de 20 mm, gravilla como el material que pasa por el tamiz de 20 mm y queda retenido en el de 4.75 mm, y arena como el árido fino retenido en el tamiz de 0.075 mm.

2.1.2. Clasificación por origen o proceso de obtención

La NCh163:2013 [6] clasifica los áridos según su procedencia, condición de procesamiento o características estructurales. Para fines de claridad técnica, puede distinguirse entre áridos según su origen geológico y áridos según el tratamiento aplicado. En el primer caso, se incluyen los áridos naturales, provenientes de yacimientos pétreos sin tratamiento mecanizado; los áridos artificiales, obtenidos mediante procesos industriales que implican modificación térmica u otra; y los áridos livianos, de bajo peso volumétrico, como arcilla expandida, perlita, escoria, piedra pómez natural y distintas cenizas. En el segundo caso, se consideran los áridos procesados, sometidos a trituración, clasificación por tamaños, lavado u otro proceso controlado; los áridos reciclados, obtenidos a partir de material inorgánico previamente utilizado en construcción; y los áridos triturados o manufacturados, producidos mediante trituración mecánica

2.2. El mortero y su relevancia en aplicaciones

El mortero es una mezcla cementicia, cuyo objetivo es satisfacer requerimientos tanto de aplicabilidad en estado fresco como de desempeño en estado endurecido. Dada la sensibilidad del mortero a las características y proporciones de sus componentes, resulta esencial comprender cómo estas propiedades afectan su comportamiento en ambas fases [1].

A continuación, se revisan diferencias fundamentales entre mortero y hormigón, las propiedades más relevantes del mortero en sus distintas etapas, su aplicación específica en sistemas de colocación más exigentes como el hormigón proyectado y conceptos claves para comprender la trabajabilidad de morteros en estado fresco.

2.2.1. Diferencias entre mortero y hormigón

El mortero y el hormigón son materiales cementicios ampliamente utilizados en la construcción, ambos formados por una mezcla de cemento, agua y áridos. La principal diferencia entre ellos se encuentra en el tipo y tamaño de áridos que incorporan, lo que se traduce en propiedades físicas y mecánicas distintas, así como en aplicaciones diferentes dentro de la obra [7].

El mortero está compuesto por cemento, agua y árido fino, típicamente arena, pudiendo además incorporar aditivos o productos complementarios. Debido a esto, el mortero posee una textura más fina y una mayor aptitud para aplicaciones en espesores reducidos, relleno de juntas, nivelación y situaciones donde se requiere un material capaz de adaptarse mejor a superficies geométricas complejas [8].

En contraste, el hormigón, también conocido como concreto, incorpora además del cemento, agua y arena, un árido grueso (como gravilla o grava) con tamaños superiores a 4.75 mm [6], y eventualmente aditivos. Esto le permite poseer una mayor resistencia mecánica, lo que lo hace apto para elementos estructurales de mayor volumen como losas, vigas, pilares o fundaciones. En consecuencia, aun cuando ambos materiales comparten una base cementicia, sus condiciones de colocación, su respuesta en estado fresco y sus ámbitos de aplicación difieren significativamente [8].

2.2.2. Propiedades de materiales cementicios

El comportamiento del mortero puede analizarse en dos etapas fundamentales: estado fresco y estado endurecido. En cada una de estas etapas, el material presenta propiedades específicas que influyen directamente en su desempeño durante la construcción y en la vida útil de la estructura.

En estado fresco, debe presentar una combinación adecuada de consistencia, cohesión y homogeneidad, de modo que pueda deformarse y colocarse sin segregarse ni perder uniformidad. En este sentido, las propiedades de mayor interés son la consistencia también referida como trabajabilidad, la cohesión, la estabilidad de la mezcla, y su resistencia a la segregación [8-9].

De acuerdo con la terminología del *American Concrete Institute* (ACI) [10], la consistencia corresponde al grado en que una mezcla fresca resiste deformarse, mientras que la trabajabilidad es la propiedad que determina la facilidad con que el mortero puede mezclarse, colocarse, consolidarse y terminarse hasta alcanzar una condición homogénea. A su vez, según la EFNARC [11], la segregación corresponde a la pérdida de homogeneidad del hormigón en su composición mientras está en su estado fresco. En términos prácticos, según el ACI [12], la cohesión se define como la capacidad de la mezcla para mantenerse unida debido a la floculación e hidratación de las partículas, mientras que la estabilidad se define como la capacidad para mantener la distribución homogénea de los componentes de la mezcla durante su flujo y sedimentación, presentando similitud con el concepto de resistencia a la segregación.

Estas propiedades del estado fresco suelen evaluarse mediante ensayos de consistencia o flujo y mediante mediciones complementarias asociadas a la estabilidad y al comportamiento reológico de la mezcla. En el ámbito normativo europeo, la serie EN 1015 contempla métodos para la determinación de la consistencia del mortero fresco por mesa de sacudidas (*flow table* en inglés) [13]. En Chile, algunas de las normativas que se refieren a estos mismos ensayos o similares son; NCh2257:1 para ensayo de mesa de sacudidas, NCh1019 para asentamiento del cono de Abrams para hormigón [14] y NCh2257:3 para asentamiento del cono en morteros [15].

De forma complementaria, la normativa americana ASTM también dispone de métodos claros para la medición de propiedades reológicas, también, en específico, ASTM C1437 establece el método de ensayo para determinar el flujo de morteros mediante la mesa de sacudidas [16]. Además, en estudios experimentales sobre morteros, la respuesta en estado fresco se ha caracterizado comúnmente mediante ensayos de mesa de sacudidas y asentamiento del cono para morteros (*mini-slump* en inglés) [1] [17].

En cuanto a la resistencia a la segregación, en la normativa internacional existen procedimientos normalizados para concretos autocompactantes, como el ensayo de segregación por tamiz de EN 12350-11 [18] y los criterios de segregación de las guías de EFNARC para concreto autocompactante

[11]. En estudios de morteros, He et al. [9] evaluaron la resistencia a la segregación mediante un procedimiento basado en la norma china JGJ/T 283-2012 para hormigón.

En estado endurecido, adquieren mayor relevancia propiedades asociadas al desempeño mecánico y a la durabilidad del material, entre ellas la densidad aparente en seco, la resistencia a la flexión y compresión, la adherencia, la absorción capilar y la permeabilidad al vapor de agua [8] [13]. Estas propiedades condicionan tanto la capacidad resistente del mortero como su respuesta frente a las condiciones ambientales, y pueden evaluarse mediante métodos contemplados tanto en la serie EN 1015 como en normativa chilena equivalente o cercana [13].

El presente trabajo se enfoca en el comportamiento del mortero en estado fresco, con énfasis en la trabajabilidad y la resistencia a la segregación. Dado que estas propiedades dependen en gran medida de las características del árido fino, en los apartados siguientes se aborda la influencia de la granulometría y la morfología de las partículas.

2.2.3. Shotcrete

En su especificación europea para hormigón proyectado de 1996, la *European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures* (EFNARC) define el hormigón proyectado como una mezcla de cemento, áridos y agua que se proyecta neumáticamente desde una boquilla sobre un sustrato, de manera que se forma una masa densa y homogénea. Esta mezcla suele incorporar aditivos químicos y puede incluir además adiciones minerales y/o fibras de refuerzo según requerimientos de diseño. El término hormigón proyectado abarca tanto al proceso por vía húmeda, en el que el hormigón se mezcla previamente con agua y se bombea hasta la boquilla, como al proceso por vía seca, en el que el cemento y los áridos se transportan en seco y el agua se añade recién en la boquilla antes de la proyección [19].

En ese contexto, la fracción de mortero (pasta junto con el árido fino) cumple un papel central en el comportamiento del material proyectado. Es esta fase la que controla en gran medida la continuidad del flujo, la facilidad de paso por mangueras y boquillas, la capacidad de adherirse al sustrato, el relleno entre armaduras y la reducción de pérdidas por rebote. Por esa razón, aun cuando el producto final pueda clasificarse como hormigón proyectado, el estudio del mortero resulta especialmente pertinente para comprender su comportamiento en servicio. En consecuencia, la especificación EFNARC (1996) [19] se utiliza como referencia para definir los rangos granulométricos recomendados de los áridos y los contenidos de pasta, lo que resulta especialmente relevante para el

análisis del mortero para hormigón proyectado de este estudio. En la Figura 2, se presenta el rango granulométrico recomendado en las especificaciones de la EFNARC (1996).

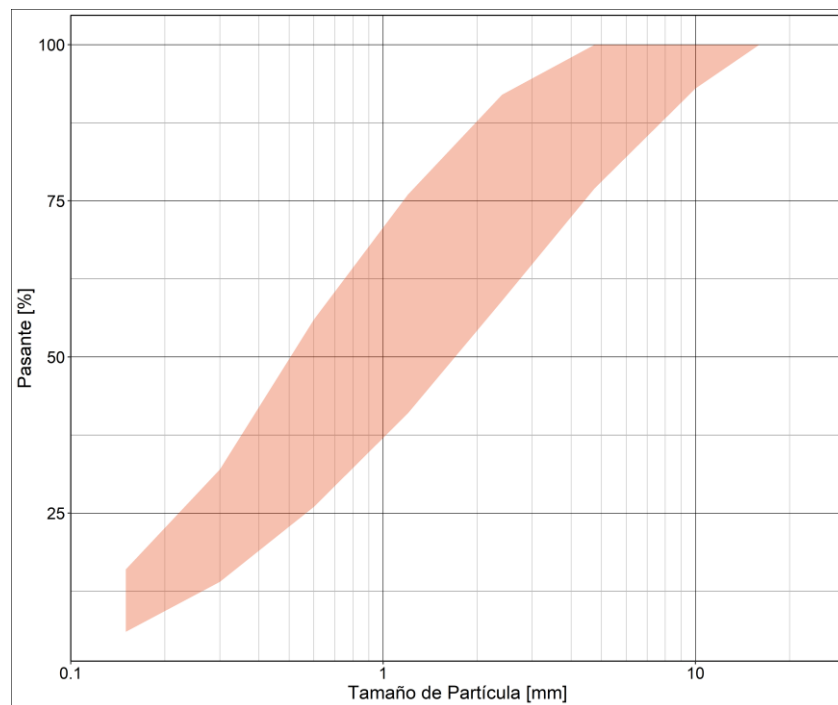


Figura 2. Rango granulométrico recomendado por EFNARC (1996) [19] para hormigón proyectado

2.2.4. Trabajabilidad en hormigón y propiedades reológicas relevantes

La especificación de la EFNARC (1996) [19] para hormigón proyectado no fija un valor único de asentamiento, más bien, señala que, en vía húmeda, la consistencia requerida depende del tipo de transporte y del procedimiento de aplicación, y que esa consistencia puede ajustarse con aditivos; En este mismo contexto, se indica que puede añadirse un plastificante o superplastificante, para lograr una consistencia bombeable no menor que 100 mm de asentamiento con el cono de Abrams para hormigón. Este dato hay que tomárselo con cautela, debido a que corresponde a una mezcla de referencia para ensayo de aditivos, no un valor universal obligatorio para todo hormigón proyectado.

En la norma europea EN 14487-1 [20] que cubre el hormigón proyectado, señala que la clasificación de trabajabilidad de la mezcla para vía húmeda debe hacerse con las clases de consistencia de EN 206, definidas a partir del asentamiento con cono de Abrams entre S1 (10 - 40 mm) y S5 (≥ 220 mm), complementándose con exigencias de bombeabilidad y control reológico cuando corresponde.

Un rango práctico específico para hormigón proyectado en vía húmeda es entregado por la *American Shotcrete Association* (ASA) [21] (en español, Asociación Americana de Hormigón Proyectado), la cual indica que, en bombeo, suele trabajarse con un asentamiento entre 75 - 150 mm, aunque el valor óptimo depende del equilibrio entre bombeabilidad y capacidad de disparo (*shootability* en inglés).

En mezclas cementicias de alta fluidez, además del asentamiento convencional, suele emplearse el *slump-flow*, que corresponde a la capacidad de la mezcla para fluir libremente en condición no confinada una vez retirado el cono, evaluándose habitualmente a partir del diámetro final de extensión. A diferencia del asentamiento tradicional, que describe principalmente la pérdida de altura, el *slump-flow* resulta más representativo cuando la mezcla presenta una fluidez elevada y la deformación se manifiesta preferentemente como expansión lateral [11].

Desde el punto de vista reológico, el comportamiento del material fresco suele describirse mediante dos parámetros principales: el esfuerzo de fluencia (*yield stress* o *yield point* en inglés), que representa el esfuerzo mínimo necesario para iniciar el flujo, y la viscosidad plástica, que expresa la resistencia del material a seguir deformándose una vez iniciado el movimiento. En este marco, el esfuerzo de fluencia se asocia con la facilidad de arranque del flujo, mientras que la viscosidad plástica se relaciona con la velocidad de deformación y con la resistencia interna durante el flujo [12] [22-23].

2.3. Influencia de los áridos en la resistencia al corte de suelos granulares

La resistencia al corte de los suelos granulares está estrechamente vinculada a las características físicas de sus partículas. Entre ellas, la granulometría y la morfología destacan por su influencia sobre el empaquetamiento, la estructura de contactos y los mecanismos de deformación durante el corte. En consecuencia, comprender cómo estos factores modifican la respuesta mecánica del material resulta fundamental para interpretar la variación del ángulo de fricción interna y del comportamiento resistente de arenas y otros suelos granulares [24-25].

2.3.1. Fundamentos de la resistencia al corte de suelos granulares

La resistencia al corte de suelos corresponde a la capacidad que presenta una masa de suelo para oponerse a tensiones tangenciales a lo largo de un plano potencial de falla. Según el criterio de Mohr-Coulomb, como se muestra en la Ecuación 1, la resistencia al corte (τ_f) se expresa como la combinación de la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (φ) [26-27].

$$\tau_f = c + \sigma_f \cdot \tan \varphi \quad (1)$$

Donde σ_f es la tensión normal efectiva. En suelos granulares, la cohesión es despreciable y la resistencia se debe principalmente a la fricción y al entrelazamiento de partículas [25] [28-29].

Factores como el historial de esfuerzos, la estructura, el contenido de agua y la distribución y forma de las partículas determinan la magnitud del φ [25].

2.3.2. Efecto de la granulometría en la resistencia al corte de suelos granulares

La granulometría define la distribución de tamaños de las partículas y controla tanto el empaquetamiento como la densidad relativa. Desde una perspectiva mecánica, la distribución de tamaños condiciona cuántos contactos efectivos se generan entre partículas y cómo se transmite el esfuerzo normal en la matriz granular. Por ende, variaciones en la curva granulométrica se traducen en cambios relevantes en la resistencia al corte, principalmente a través del ángulo de fricción interna (φ). Esto explica que el comportamiento mecánico de las arenas esté fuertemente condicionado por la distribución de tamaños de las partículas del material [24] [30].

Los estudios de Islam et al. (2011) [29] evidencian que, en arenas uniformes, el ángulo de fricción interna aumenta con el tamaño de partícula, pasando de aproximadamente 35.5° en fracciones finas (0.075 mm) a cerca de 42.3° en fracciones gruesas (2.36 mm). Sin embargo, cuando se consideran mezclas con un mayor rango granulométrico, la resistencia al corte se ve aún más favorecida debido al llenado efectivo de vacíos por partículas menores y al incremento del entrelazamiento entre los granos, lo que conduce a una estructura más estable y a valores superiores de $\varphi_{\text{máx}}$, bajo condiciones de densificación similares. En consecuencia, los suelos bien gradados muestran una resistencia al corte mayor que los suelos mal gradados, principalmente por su mejor acomodo y menor índice de vacíos.

Para describir de manera integrada la “finura” o “gruesedad” de un árido, es común utilizar el módulo de finura (MF). Según la normativa chilena para áridos finos de tamizado y determinación de la granulometría NCh165:2009 [7], el módulo de finura corresponde a la centésima parte de la suma de los porcentajes acumulados retenidos en la serie preferida estándar de tamices. Este valor es equivalente al área bajo la curva granulométrica, de forma que un MF mayor representa un árido más grueso, mientras que un MF menor indica un material más fino. Su cálculo puede realizarse a partir de porcentajes acumulados retenidos o que pasan, manteniendo siempre la misma interpretación física, como se aprecia en la Ecuación 2 para porcentajes acumulados retenidos.

$$MF = \frac{\sum(\% \text{ acumulados retenidos en tamices de la serie preferida mayor a \#200})}{100} \quad (2)$$

Donde la serie preferida señalada por normativa corresponde a una serie geométrica de razón 2 y se encuentra en la Tabla A.1 de Anexos A.1.

La granulometría también puede describirse mediante parámetros derivados de la gradación del suelo, entre los cuales destacan el coeficiente de uniformidad (C_u) y el coeficiente de curvatura (C_c). Estos parámetros permiten caracterizar la forma general de la curva y distinguir entre materiales uniformes, mal gradados o bien gradados, lo que directamente afecta la densidad de empaque y el comportamiento al corte.

En la Ecuación 3, el coeficiente de uniformidad se define como:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3)$$

Mientras en la Ecuación 4, el coeficiente de curvatura se expresa como:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (4)$$

Valores de C_u cercanos a 1 indican materiales prácticamente uniformes, mientras que valores elevados indican una dispersión amplia de tamaños. Por otro lado, C_c describe la “curvatura” de la distribución, y su valor permite evaluar si la gradación es o no continua. El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) establece en la norma ASTM D2487 [31], que un suelo bien gradado cumple con $C_u > 4$ para gravas, y $C_u > 6$ para arenas, y que $1 < C_c < 3$. Cuando estos criterios no se satisfacen, el material se clasifica como mal gradado.

Guo et al. (2023) [24], a partir de ensayos de corte directo y modelamiento numérico de elementos discretos, observaron que el ϕ aumenta con el incremento de C_u y con la disminución de C_c , esto debido a mejoras en el empaquetamiento, un mayor número de contactos y una menor fracción de deslizamiento.

2.3.3. Efecto de la morfología de las partículas en la resistencia al corte de suelos granulares

La morfología de las partículas cumple un rol fundamental en el comportamiento mecánico de suelos granulares y materiales compuestos, particularmente a través del ángulo de fricción interna (φ). Las características geométricas de los granos condicionan la manera en que estos interactúan, se traban y se reacomodan durante el proceso de deformación de corte [25-26]. En esta sección se analiza el efecto general de la morfología sobre la resistencia al corte, dejando la definición formal de los descriptores morfológicos y los métodos para su cuantificación para el posterior apartado 2.5.

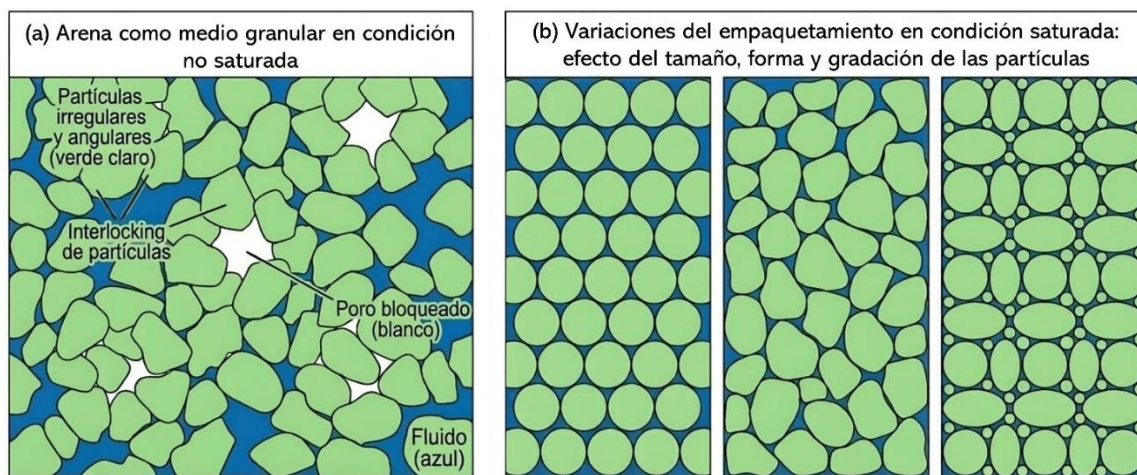
Diversos estudios experimentales han demostrado que arenas compuestas por partículas angulosas, irregulares o con mayor rugosidad en su textura, tienden a generar mayores ángulos de fricción interna (φ) en comparación con arenas con partículas redondeadas y lisas [25-26] [33]. Desde un punto de vista micromecánico, el efecto de la morfología se explica por el aumento de partículas trabadas unas con otras (*interlocking*) y la restricción al deslizamiento relativo entre partículas. Así también, se observa que las aristas pronunciadas o la superficie rugosa de las partículas generan contactos más estables y una mayor resistencia al movimiento relativo, como se demuestra en el estudio de Alshibli y Alsaleh (2004) [34].

La influencia de la morfología no se remite únicamente al valor de la resistencia, sino que también afecta el comportamiento volumétrico durante el corte. Arenas con mayores irregularidades tienden a presentar mayores valores de índices de vacíos máximo y mínimo ($e_{\text{máx}}$, $e_{\text{mín}}$), lo que condiciona su respuesta dilatante o contractiva dependiendo del estado inicial de densificación. Cho et al. (2006) [25] indicaron que, aunque las partículas angulosas pueden limitar un empaquetamiento denso, una vez que el material alcanza dicho estado, la resistencia al corte desarrollada es superior a la de arenas redondeadas bajo condiciones equivalentes.

Finalmente, cabe destacar que el efecto de la morfología no actúa de manera aislada, sino que se encuentra estrechamente vinculada tanto al tamaño característico de las partículas como a su gradación. Guo et al. (2023) [24] demostraron que la forma de los granos se potencia en materiales con distribución granulométricas amplias, donde la trabazón se ve reforzada por un mayor número de contactos efectivos. En este contexto, la interacción de la morfología de las partículas con la granulometría resulta clave para comprender el comportamiento resistente de los suelos granulares, aspecto que se aborda en el apartado siguiente.

2.3.4. Interacción entre tamaño y forma de las partículas

El comportamiento resistente de los suelos granulares no depende de manera aislada del tamaño ni de la morfología de las partículas, sino del efecto combinado de ambos factores. Las variaciones en estos atributos dan lugar a interacciones complejas que influyen en el empaquetamiento, el índice de vacíos, la conectividad del espacio poroso, la cantidad de contactos entre partículas y los mecanismos de deslizamiento durante el corte [25] [35-36]. En consecuencia, el efecto de la morfología puede intensificarse o reducirse de acuerdo con la escala de tamaño dominante y la distribución granulométrica presente en el material [36-37]. La Figura 3, esquematiza estas interacciones: en (a) se presenta cómo el bloqueo entre partículas irregulares favorece la formación de poros bloqueados y trayectorias de flujo en una condición no saturada; en (b) se presenta cómo las combinaciones de tamaño, forma y gradación de partículas influyen en empaquetamientos distintos en condición saturada.



Los resultados experimentales muestran que la influencia del tamaño y de la morfología de las partículas no es constante, sino que depende del nivel de resistencia que se analiza. En ensayos realizados sobre arenas de morfología similar, Vangla y Latha (2015) [28] observaron que el ángulo de fricción máximo o pico ($\phi_{m\acute{a}x}$) presenta variaciones marginales entre fracciones de distinto tamaño cuando se comparan condiciones de vacíos equivalentes. En contraste, el ángulo de fricción de estado crítico (ϕ_{CS}), asociado al régimen de grandes deformaciones a volumen constante, aumenta de manera evidente al incrementarse el tamaño de partículas, misma conclusión que señalan Prabhakar y Ramasamy (2024) en su estudio [33]. Este fenómeno sugiere que, una vez superada la resistencia

cortante máxima y establecida la localización de la deformación, el tamaño pasa a controlar tanto la extensión de la banda de corte como la resistencia cortante post-pico o última que el material alcanza durante el corte, lo que posteriormente se refleja en variaciones del ángulo de fricción último ($\varphi_{\text{últ}}$), ángulo de fricción que se observa al final del ensayo de corte [28].

En el caso cuando la gradación y el tamaño se mantienen comparables, la morfología emerge como el factor dominante, particularmente en el ángulo de fricción asociada al estado crítico (φ_{CS}). Como se señaló en el apartado anterior, partículas más angulosas generan mayores ángulos de fricción interna a volumen constante. En este marco, la resistencia cortante máxima puede interpretarse como el resultado de una fricción crítica controlada por la morfología, a la que se suma un aporte adicional asociado a la dilatancia del material, relación que Santamarina y Cho (2004) expresan como $\varphi_{\text{máx}} = \varphi_{\text{CS}} + 0.8 \psi$, donde ψ corresponde al ángulo de dilatancia, parámetro que se refiere a la tendencia del suelo granular a aumentar de volumen cuando es sometido a corte [36]. Así mientras la granulometría gobierna la estructura global y en su comportamiento a grandes deformaciones, la forma de las partículas condiciona el φ_{CS} y, junto con la dilatancia, la magnitud de la resistencia cortante máxima.

Con el fin de sintetizar la literatura revisada, la Tabla 1 resume los principales efectos reportados para distintas características del árido sobre la resistencia al corte de suelos granulares, indicando la tendencia general observada y la variable afectada.

Tabla 1. Síntesis del efecto de la granulometría y la morfología del árido sobre la resistencia al corte de suelos granulares según la literatura revisada

Característica del árido	Tendencia general observada	Variable principalmente afectada	Referencias
Aumento del tamaño de partícula en arenas uniformes	Tiende a aumentar la resistencia al corte	Ángulo de fricción interna, esfuerzo cortante máximo	[29]
Gradación más amplia o mejor gradada	Tiende a aumentar la resistencia al corte por mejor empaquetamiento y mayor número de contactos	Ángulo de fricción interna, estabilidad del esqueleto granular	[24], [29], [31]

Aumento del coeficiente de uniformidad (Cu)	Se asocia con mayor resistencia al corte	Ángulo de fricción interna	[24], [31]
Disminución del coeficiente de curvatura (Cc)	En el estudio citado se asocia con mayor ángulo de fricción interna	Ángulo de fricción interna	[24]
Aumento del módulo de finura (como indicador de material más grueso)	Puede asociarse con una mayor resistencia al corte, en la medida en que represente un mayor tamaño medio de partícula	Resistencia al corte, ángulo de fricción interna	[7], [29]
Mayor angularidad, irregularidad o rugosidad superficial	Tiende a aumentar la trabazón e incrementar la resistencia al corte	Ángulo de fricción interna, resistencia a volumen constante	[25], [26], [33], [34]
Partículas más redondeadas y lisas	Tienden a facilitar el reacomodo y a reducir la resistencia friccional relativa	Ángulo de fricción interna	[25], [26], [34]
Morfología más irregular	También tiende a aumentar los índices de vacíos extremos, afectando la respuesta volumétrica durante el corte	Dilatancia, índices de vacíos, resistencia movilizad	[25]

2.4. Influencia de los áridos en la trabajabilidad de morteros

La trabajabilidad de un mortero depende de su capacidad para fluir, extenderse, compactarse y mantener cohesión sin presentar segregación ni exudación excesiva. Desde el punto de vista reológico, esta respuesta suele interpretarse a partir del esfuerzo umbral de fluencia y de la viscosidad plástica, parámetros que no dependen únicamente de la pasta cementicia, sino también de las características del árido fino que conforma la estructura granular del sistema. De esta forma, la influencia de los

áridos sobre la trabajabilidad no debe entenderse como un efecto secundario, sino como un factor relevante en el comportamiento del mortero fresco [9] [39-40].

2.4.1. Efecto de la granulometría en la trabajabilidad de morteros

La granulometría del árido fino influye directamente en la trabajabilidad porque modifica simultáneamente la superficie específica del conjunto granular, el volumen de vacíos del esqueleto sólido y la cantidad de pasta necesaria para separar las partículas y permitir su desplazamiento relativo [40-41]. Cuando la distribución granulométrica es deficiente, o cuando existe un exceso de fracciones muy finas sin una compensación adecuada del resto de tamaños, aumenta la demanda de agua y se eleva la resistencia al flujo del material [41]. En ese sentido, Westerholm et al. [39] reportaron que las propiedades y la cantidad de árido fino influyen fuertemente en la demanda de agua y en la reología del mortero, observando además que los altos contenidos de finos propios de arenas trituradas incrementan principalmente el esfuerzo umbral de fluencia, mientras que también pueden aumentar la viscosidad plástica por efecto de la fricción entre partículas.

La influencia de la granulometría sobre la trabajabilidad no depende únicamente del contenido de finos, sino de la distribución completa de tamaños dentro del árido. Estudios recientes han mostrado que la gradación del árido fino afecta de manera cuantificable la reología del mortero, y que este efecto se vuelve más marcado a medida que aumenta la fracción volumétrica de árido. En particular, una gradación más favorable puede reducir los vacíos del esqueleto granular, aumentar la densidad de empaquetamiento y disminuir tanto el esfuerzo umbral de fluencia relativo como la viscosidad relativa del sistema, aunque este beneficio tiende a atenuarse una vez alcanzado cierto umbral de empaquetamiento [40] [42]. En este sentido, una granulometría “óptima” no debe entenderse simplemente como una curva más fina o gruesa, sino como aquella que logra un equilibrio entre empaquetamiento, superficie específica y espesor de pasta disponible entre partículas [40] [42].

Esta interpretación es consistente con lo observado por Cortes et al. (2008) [17], quienes ensayaron cuatro arenas con igual distribución granulométrica para aislar el efecto de la forma, pero aun así mostraron que una fluidez adecuada dependía de que el volumen de pasta superara el volumen de vacíos del agregado fino en estado suelto. Por ello, puede sostenerse que la granulometría controla la trabajabilidad a través de tres mecanismos principales: la demanda de líquido asociada a la superficie específica [40], la eficiencia de empaquetamiento y la proporción de pasta efectivamente disponible para permitir el flujo. En consecuencia, incluso en morteros con igual dosificación de pasta, las

diferencias granulométricas de sus áridos pueden traducirse en cambios importantes en consistencia, fluidez y estabilidad, antes incluso de considerar el efecto de la forma de las partículas [17] [41].

2.4.2. Efecto de la morfología en la trabajabilidad de morteros

La morfología del árido fino influye de manera decisiva en la trabajabilidad del mortero, ya que modifica tanto la demanda de pasta como la fricción interna del sistema. En términos generales, las partículas más redondeadas, cúbicas y lisas presentan menor superficie específica y menor interferencia geométrica durante el movimiento, por lo que requieren menos agua o pasta para alcanzar una misma consistencia; en cambio, las partículas alargadas, aplanadas, angulares o rugosas tienden a generar mezclas más ásperas y menos fluidas, además de elevar la demanda de agua para una trabajabilidad dada. [1] [43]. Esto concuerda con lo observado por Cortes et al. (2008) [17], quienes, trabajando con arenas de igual granulometría, mostraron que los morteros elaborados con arenas trituradas y más angulares presentaban menor trabajabilidad que aquellos preparados con arenas naturales más redondeadas.

Diversos estudios han permitido precisar mejor los mecanismos detrás de ese efecto. Hafid et al. (2016) mostraron que, como primera aproximación, la forma global de la partícula, en específico la relación de aspecto, es el parámetro morfológico que más condiciona el empaquetamiento, y que las variaciones de morfología se reflejan conjuntamente en el esfuerzo umbral de fluencia y la viscosidad del mortero modelo [44]. También a nivel aplicado, He et al. (2022) [9] incluso propusieron un factor de impacto de la morfología para arenas gradadas, verificando su buena correlación con el esfuerzo umbral de fluencia y el *slump-flow* del mortero, lo que refuerza la idea de que la morfología no solo describe la partícula, sino que constituye una variable cuantificable para predecir y optimizar la trabajabilidad.

La Tabla 2 resume los principales efectos reportados para distintas características del árido sobre la trabajabilidad de morteros, indicando la tendencia general observada y la variable afectada.

Tabla 2. Síntesis del efecto de la granulometría y la morfología del árido sobre la trabajabilidad de morteros según la literatura revisada

Característica del árido	Tendencia general observada	Variable principalmente afectada	Referencias
Mayor contenido de finos o mayor superficie específica	Tiende a aumentar la demanda de agua y la resistencia al flujo	Demanda de agua, esfuerzo umbral de fluencia, viscosidad	[39], [41]

Disminución del tamaño máximo de partícula	Tiende a requerir mayor cantidad de líquido para alcanzar una misma consistencia	Relación líquido/sólido o agua/cemento, fluidez	[41]
Gradación más favorable o mejor empaquetamiento	Tiende a mejorar la trabajabilidad al reducir vacíos y disminuir la pasta requerida para permitir el flujo	Esfuerzo umbral de fluencia, viscosidad relativa, fluidez	[17], [40], [42]
Mayor módulo de finura o árido relativamente más grueso	Puede mejorar la trabajabilidad si reduce la superficie específica total del sistema	Demanda de agua, consistencia	[7], [41]
Partículas más redondeadas, cúbicas, lisas o más esféricas	Tienden a requerir menos agua y a facilitar el flujo	Slump/fluidez, esfuerzo umbral, viscosidad	[9], [17], [43], [44]
Partículas angulares, alargadas, aplanadas o rugosas	Tienden a aumentar la fricción interna del sistema y reducir la trabajabilidad	Demanda de agua, esfuerzo umbral, viscosidad, fluidez	[17], [41], [43]
Mayor esfericidad o regularidad morfológica	Se asocia con mayor empaquetamiento y menor resistencia inducida al flujo	Empaquetamiento, esfuerzo umbral, viscosidad	[9], [44]
Árido triturado o reciclado	Suele afectar negativamente la fluidez respecto de áridos más redondeados o menos absorbentes	Fluidez, demanda de líquido	[17], [41]

2.5. Morfología de partículas

La morfología de las partículas corresponde al conjunto de características geométricas asociadas a su forma global (macroescala), al grado de redondez o angularidad de sus bordes (mesoescala) y a la textura superficial de sus caras (microescala) [45-46]. Respecto a los áridos y suelos granulares, la morfología de las partículas influye en su comportamiento físico, mecánico e hidráulico [38]. Asimismo, en mezclas de morteros u hormigones, influye en el comportamiento reológico y en la trabajabilidad de estos [6] [9] [17] [41].

Desde una perspectiva geométrica, la morfología no puede describirse mediante un único parámetro. La forma global, el grado de angularidad de sus bordes y la rugosidad de su superficie representan escalas distintas de la geometría, las cuales son representadas en la Figura 4. Estas propiedades influyen de manera diferenciada en los mecanismos de contacto e interacción entre partículas. A partir

de esto, distintos descriptores morfológicos han sido propuestos en la literatura para capturar estos aspectos, sin que exista un consenso absoluto respecto de los descriptores capaces de representar adecuadamente la complejidad geométrica de los granos [38]. A continuación, se presentan algunos detalles de estas propiedades geométricas.

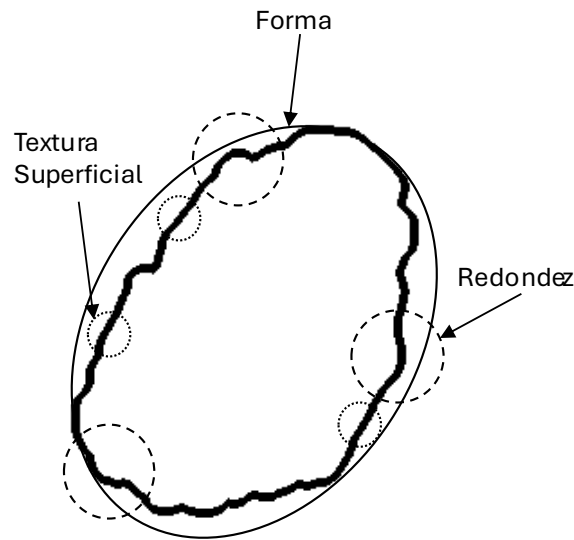


Figura 4. Un contorno de partícula (línea sólida gruesa) con su componente de forma (línea sólida clara, aproximación), redondeamiento (círculos discontinuos) y textura (círculos punteados) Fuente: Modificado de Anusree y Latha (2023) [38]

I) Forma global

La forma global describe la geometría general de la partícula y se asocia habitualmente con la relación entre sus dimensiones principales. Esta propiedad busca representar qué tan cercana es la partícula a una geometría regular o equidimensional, como una esfera o una elipse [38] [45].

II) Redondez/Angularidad

La redondez, o su contraparte conceptual, la angularidad, describe el grado de suavidad o agudeza de los bordes y esquinas de una partícula. Esta propiedad está fuertemente relacionada con los procesos de desgaste y controla de manera directa el tipo de contacto entre partículas [25] [34] [45].

III) Textura superficial

La textura superficial corresponde a las irregularidades presentes en la superficie y se asocia comúnmente a la rugosidad. Esta propiedad controla la fricción a nivel de contacto puntual y puede influir significativamente en el comportamiento mecánico y reológico del material. Sin embargo, presenta mayores desafíos que las otras propiedades debido a su dependencia de la escala de observación [34] [38] [45].

La caracterización morfológica se vuelve más compleja en materiales granulares naturales y triturados debido a la alta variabilidad geométrica entre partículas. Esta dificultad es más evidente cuando los granos tienden a formas equidimensionales, ya que distintos descriptores (forma, redondez/angularidad y textura) pueden no variar de manera proporcional y conducir a interpretaciones distintas según el método empleado, lo que ha sido discutido en la literatura [25] [45].

Frente a estas limitaciones, el análisis morfológico ha evolucionado desde métodos cualitativos y comparativos, basados principalmente en la observación visual, hacia enfoques cuantitativos sustentados en el análisis de imágenes y la geometría computacional. Estos avances permiten una evaluación objetiva y reproducible de la morfología, facilitando el análisis de grandes poblaciones de partículas y la comparación entre distintos materiales [34] [47].

En las siguientes secciones se presentan los principales descriptores morfológicos utilizados en la literatura, así como los métodos más relevantes para la estimación de la morfología de partículas, con un especial énfasis en los enfoques basados en análisis de imágenes.

2.5.1. Descriptores morfológicos

La cuantificación de la morfología de partículas se ha desarrollado históricamente a través de descriptores morfológicos, entendidos como parámetros matemáticos que permiten medir aspectos específicos de la geometría del grano. Estos descriptores traducen dichas propiedades geométricas en indicadores numéricos comparables, lo que facilita tanto el análisis estadístico como la comparación sistemática entre distintos materiales granulares [25] [38] [45] [47].

No existe un descriptor único capaz de representar por sí solo toda la complejidad geométrica de una partícula. Numerosos descriptores han sido propuestos a lo largo del tiempo, cada uno orientado en capturar un aspecto particular de la morfología del grano. En la revisión del estado del arte de la caracterización de la morfología de partículas de arena de Anusree y Latha (2023), destacan que la selección de descriptores debe responder al objetivo del estudio en cuestión [38].

De acuerdo con dicha revisión, los descriptores cuantitativos pueden agruparse en tres categorías principales: descriptores geométricos, descriptores espectrales y descriptores fractales, estos se detallan a continuación.

2.5.1.1. Descriptores geométricos

Los descriptores geométricos constituyen el grupo más utilizado en la caracterización morfológica de partículas, especialmente en aplicaciones geotécnicas y de materiales. Estos descriptores se basan en relaciones matemáticas entre variables geométricas simples, tales como dimensiones lineales, áreas, perímetros o radios de curvatura, y permiten representar la forma de la partícula mediante índices adimensionales.

En caso del análisis bidimensional de arenas y áridos, los descriptores más utilizados corresponden principalmente a los geométricos, esto debido a que son más simples de calcular, poseen una interpretación física más directa y resultan compatibles con técnicas de análisis de imágenes ampliamente utilizadas en geotecnia y ciencia de materiales.

Dentro de los descriptores clásicos, destacan las formulaciones propuestas por Wadell, particularmente en lo referente a redondez y esfericidad [48]. Dichas formulaciones establecieron una base conceptual clara para distinguir entre forma global y agudeza de bordes, las cuales siguen siendo fundamentales en la caracterización moderna de partículas. Esta distinción ha sido retomada posteriormente por diversos autores y constituye también el fundamento de métodos computacionales recientes, como los desarrollados por Zheng y Hryciw (2015), orientados a obtener de manera objetiva estos descriptores a partir de imágenes digitales [47].

Con base a lo anterior, en la Tabla 3 se resume algunos de los descriptores bidimensionales más utilizados en la literatura para la caracterización morfológica de partículas, indicando la propiedad geométrica que representan y su formulación general.

Tabla 3. Principales descriptores morfológicos bidimensionales utilizados en la caracterización de partículas granulares

Descriptor [Propiedad]	Fórmula	Referencia y comentarios
Circularidad ^a [Forma]	$\frac{A}{A_p} = \frac{4\pi A}{P^2}$	Cox (1927) [38] A, P: Área y perímetro de la proyección 2D de la partícula, A _p : Área del círculo que tiene el

		mismo perímetro que la proyección de la partícula
		Tickell (1931) [38]
Circularidad ^b (φ_s)	$\frac{A}{A_{\text{cir}}} = \frac{4A}{\pi D_{\text{cir}}^2}$	A_{cir} : Área del círculo circunscrito mínimo, D_{cir} : Diámetro del círculo circunscrito mínimo
[Forma]		
Grado de circularidad C_r	$\frac{P_c}{P} = \sqrt{\frac{4\pi A}{P^2}}$	Wadell (1933) [38] P_c : Perímetro de un círculo que tiene la misma área que la proyección de la partícula
[Forma]		
Relación de aspecto (AR) [Forma]	$\frac{d_{\text{mín}}}{d_{\text{máx}}}$	$d_{\text{mín}}$: Eje menor de elipse equivalente, $d_{\text{máx}}$: Eje mayor de elipse equivalente
Relación de círculo inscrito/circunscrito (S)[Forma]	$S = \frac{D_{\text{ins}}}{D_{\text{cir}}}$	Riley (1941) [38] D_{ins} : Diámetro del círculo inscrito máximo
		Wadell (1932) [48]
Redondez de Wadell (Rw)	$Rw = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{r_i}{r_{\text{ins}}}$	r_i : Radio de un círculo inscrito tangente al borde de una partícula, r_{ins} : Radio del círculo inscrito máximo en la partícula, N: Número de círculos inscritos en la partícula
[Redondez/Angularidad]		
Angularidad (A)	$\sum_{i=1}^n \left[(180 - a_i) \frac{x_i}{r_{\text{ins}}} \right]$	Lees (1964) [38] a_i : ángulo medido entre los planos que limitan la esquina, x_i : Distancia desde el centro del círculo inscrito máximo hasta la punta de la partícula en su esquina
[Redondez/Angularidad]		

En el caso del análisis tridimensional de partículas, los primeros descriptores fueron creados a partir de la medición directamente sobre las partículas o siluetas de estas. Con el desarrollo de técnicas avanzadas de adquisición de imágenes, especialmente la tomografía computarizada de rayos X, ha sido posible obtener descriptores geométricos tridimensionales capaces de representar de manera más cercana la geometría real de las partículas. Entre los descriptores más utilizados se encuentran la

esfericidad volumétrica, la relación entre volumen y área superficial, la relación entre esfera inscrita y circunscrita, y parámetros basados en curvatura espacial [35] [38] [49].

Estos descriptores se calculan a partir de modelos tridimensionales obtenidos mediante escaneo o reconstrucción digital y permiten evaluar propiedades geométricas que no pueden ser capturadas completamente en representaciones bidimensionales [38] [49]. Una representación de esta problemática se observa en la Figura 5, donde se da cuenta de la limitación de solo considerar un plano proyectado de la partícula frente a varias vistas de esta.

No obstante, debido a la mayor complejidad experimental y computacional asociada a estos métodos, los descriptores bidimensionales continúan siendo ampliamente utilizados en estudios experimentales debido a su facilidad en analizar un gran número de partículas o establecer comparaciones entre diferentes materiales.

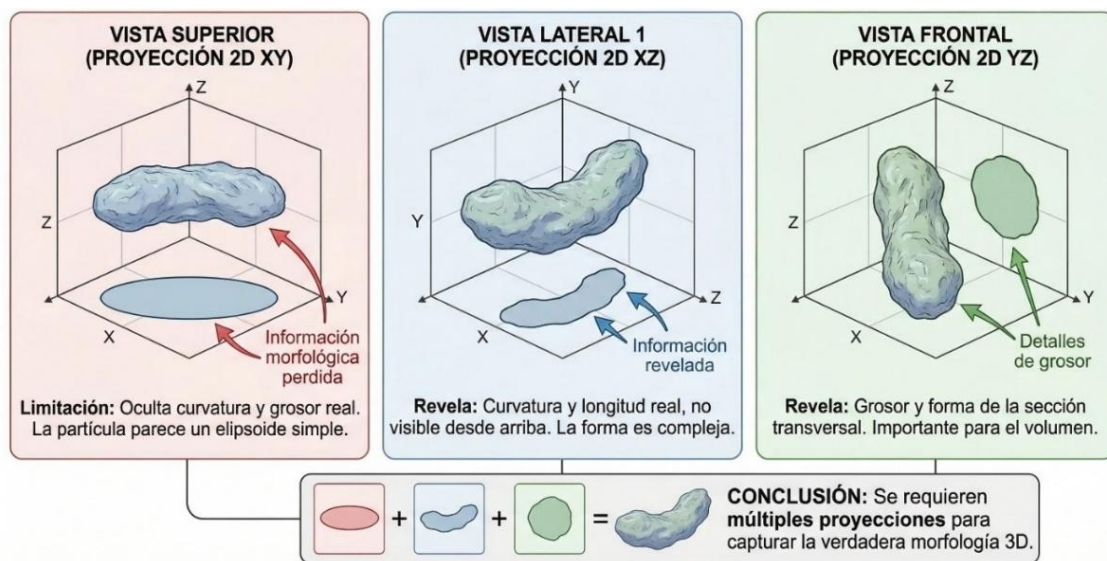


Figura 5. Desventajas de la proyección única en 2D para análisis de partículas 3D.

2.5.1.2. Descriptores espectrales

Los descriptores espectrales representan la geometría de la partícula mediante funciones matemáticas. Este enfoque permite representar la forma completa de la partícula mediante un conjunto reducido de coeficientes matemáticos, lo que facilita su análisis y almacenamiento computacional. Entre los métodos más utilizados se encuentran los descriptores de Fourier y las funciones armónicas esféricas [38].

En el análisis de Fourier, el contorno de la partícula se expresa como una serie de funciones trigonométricas que describen las variaciones de la distancia radial en función del ángulo. Con este planteamiento, los términos de baja frecuencia representan la forma global de la partícula, los términos de frecuencia media representan la angularidad y los términos de alta frecuencia representan la textura superficial [38].

El análisis espectral ha sido extendido a representaciones tridimensionales mediante el uso de funciones armónicas esféricas, que constituyen la extensión tridimensional de la serie de Fourier. Estas funciones permiten describir la geometría de la superficie de una partícula en tres dimensiones y han sido utilizadas para la reconstrucción y caracterización de partículas con geometrías complejas a partir de datos obtenidos mediante tomografía computarizada [49]

Este tipo de descriptores resulta especialmente útil en aplicaciones de modelación numérica y simulación de materiales granulares, sin embargo, el cálculo de estos descriptores requiere herramientas matemáticas y computacionales más complejas que las utilizadas en el análisis geométrico tradicional [38].

2.5.1.3. Descriptores fractales

Los descriptores fractales se utilizan para caracterizar la complejidad geométrica del contorno o de la superficie de una partícula. Estos descriptores se basan en el concepto de dimensión fractal, que permite cuantificar el grado de irregularidad o rugosidad de una geometría [38].

Desde el punto de vista conceptual, la dimensión fractal se determina a partir de la relación entre el número de segmentos utilizados para medir el contorno de una partícula y la longitud de dichos segmentos, evaluada en escala logarítmica. Cuando esta relación presenta un comportamiento lineal en un gráfico log-log, el perfil puede considerarse fractal y la pendiente de dicha relación corresponde a la dimensión fractal del contorno [51].

A pesar de su utilidad para describir la complejidad geométrica del contorno, el uso de descriptores fractales en estudios de ingeniería geotécnica y de materiales es menos frecuente que el de descriptores geométricos convencionales [38].

2.5.2. Métodos para la estimación de la morfología de las partículas

La estimación de la forma de partículas ha evolucionado significativamente a lo largo del tiempo, pasando desde métodos cualitativos basados en la observación visual hasta técnicas cuantitativas

basadas en análisis digital de imágenes. Esta evolución ha permitido mejorar la precisión, reproducibilidad y objetividad de la caracterización morfológica.

Los métodos para la estimación de la morfología de las partículas pueden clasificarse en tres categorías principales: métodos cualitativos, métodos cuantitativos bidimensionales y métodos cuantitativos tridimensionales, estos métodos se detallan a continuación.

2.5.2.1. Métodos cualitativos

Los métodos de captación de la morfología de las partículas han sido tradicionalmente cualitativos, relegando su definición a comparaciones visuales a través de diagramas de referencia y a la experiencia del evaluador. Estos métodos permitían clasificar las partículas en categorías descriptivas u ofrecer valores estimativos de la forma o redondez de las partículas.

Existen varias tablas visuales con el fin de estimar valores o categorías de parámetros morfológicos [38], uno de ellos es el desarrollado por Krumbein y Loss, que utiliza una escala visual para estimar el grado de redondez y esfericidad de las partículas [52], como se puede apreciar en la Figura 6. Aunque estos métodos resultan simples y rápidos de aplicar, presentan un alto grado de subjetividad y una limitada reproducibilidad, lo que ha motivado el desarrollo de técnicas cuantitativas más precisas.

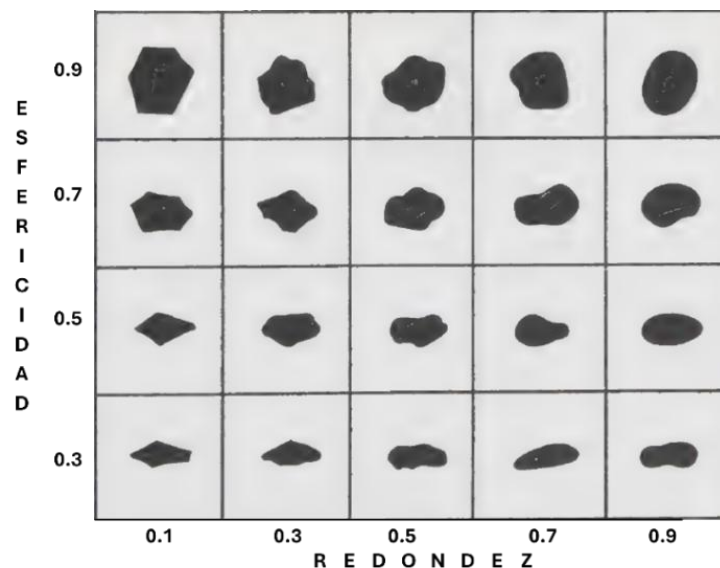


Figura 6. Tabla para estimación visual de redondez y esfericidad de granos de arenas Fuente: Extraído de Krumbein y Loss (1963) [52]

2.5.2.2. Métodos cuantitativos bidimensionales

Los métodos cuantitativos bidimensionales se basan en el análisis de imágenes digitales de partículas, generalmente obtenidas mediante cámaras digitales o microscopía óptica. En este enfoque, las partículas se representan mediante su proyección bidimensional y su contorno se analiza utilizando algoritmos de procesamiento de imágenes.

El análisis bidimensional se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada en estudios de morfología de partículas debido a su precisión, rapidez y bajo costo experimental. Además, el desarrollo de software especializado ha permitido automatizar el cálculo de múltiples descriptores morfológicos a partir de una sola imagen [38] [47].

La calidad de las mediciones morfológicas obtenidas mediante análisis digital de imágenes depende directamente de la resolución con que se representan las partículas. Se ha demostrado que existe un umbral mínimo de resolución necesario para obtener parámetros geométricos confiables, Sun et al. (2019) indican que el tamaño característico de la partícula debe estar representado por al menos 50 píxeles en su dimensión mínima para asegurar una estimación estable de descriptores, de 75 a 130 píxeles una resolución aceptable con error controlado, de 130 - 250 píxeles una resolución adecuada, y sobre 250 píxeles el error es despreciable [53].

En el presente estudio, la caracterización morfológica se realiza mediante análisis digital de imágenes bidimensionales utilizando software especializado, lo que permite obtener de manera automática descriptores geométricos de forma global y redondez de las partículas.

2.5.2.3. Métodos cuantitativos tridimensionales

Los métodos cuantitativos tridimensionales permiten obtener la geometría completa de las partículas mediante técnicas avanzadas de adquisición de imágenes. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran: la tomografía computarizada de rayos X, el escaneo láser tridimensional y la microscopía electrónica tridimensional [38].

Estas técnicas permiten medir directamente el volumen, la superficie y la geometría tridimensional de las partículas, lo que proporciona una representación más precisa de su morfología real. Sin embargo, el análisis tridimensional presenta algunas limitaciones, entre las que se encuentran: el alto costo del equipamiento, una mayor complejidad experimental, mayores tiempos de procesamiento y gran volumen de datos generados [38].

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta los detalles experimentales y de análisis estadístico acerca del estudio llevado a cabo.

3.1. Diseño experimental

El diseño experimental del presente estudio es de tipo comparativo, con alcance acotado, orientado a evaluar la influencia de la morfología y el tamaño de partículas en el comportamiento mecánico y reológico de materiales granulares y morteros. Para ello, se comparó la trabajabilidad de morteros mediante el ensayo de asentamiento del cono y la resistencia al corte de muestras granulares, utilizando áridos finos con curvas granulométricas controladas y equivalentes entre materiales, pero con diferentes características morfológicas. Además, se evaluó la resistencia a la segregación del mortero mediante un ensayo adaptado de He et al. [9].

La morfología de las partículas fue cuantificada en su representación bidimensional mediante análisis de imágenes digitales obtenidas a partir de observaciones en lupa estereoscópica, considerando el material y los distintos intervalos de tamaño que componen cada muestra.

Se trabajó con cuatro áridos finos disponibles en laboratorio, clasificados en dos áridos manufacturados y dos áridos naturales, todos provenientes de la región del Biobío. Estas muestras fueron acondicionadas para presentar distribuciones granulométricas equivalentes, permitiendo representar el efecto del tamaño y de la morfología de partículas como variables principales del estudio.

3.2. Materiales y preparación de muestras

Los materiales granulares utilizados en este estudio corresponden a dos áridos finos manufacturados: adocreto y roca triturados; y dos áridos finos naturales: arena de río y arena de playa. Esta selección permitió contrastar materiales con distinto origen y proceso de formación, incorporando partículas sometidas a procesos naturales de transporte y abrasión, junto a materiales obtenidos de trituración mecánica. De esta forma, fue posible comparar materiales con diferencias esperadas en su caracterización morfológica. Mayores antecedentes acerca de su composición mineralógica inferidas por su origen y preparación de las muestras para el estudio se darán en los siguientes subapartados.

3.2.1. Composición mineralógica de las muestras

Debido a que no se hicieron pruebas mineralógicas de las muestras, la información de la composición mineralógica fue inferida a partir de antecedentes geológicos y bibliográficos según su fuente de origen.

- **Arena de río:** Proveniente de la ribera del río Biobío dentro de la ciudad de Concepción, de la marca Arenas costanera Biobío (ACBB), la información mineralógica encontrada corresponde a material extraído del sector bajo del río en el entorno Concepción-Hualpén, se describe un predominio de fragmentos de rocas basálticas, con menor proporción de magnetita, plagioclasa, hematita, micas, olivino, cuarzo y vidrio volcánico, pertenecientes a la formación Huachipato [54].
- **Arena de playa:** Proveniente del sector Lengua, comuna de Hualpén, corresponde a un depósito marino moderno similares litológicamente a las arenas de la formación Huachipato. No obstante, pueden presentar diferencias mineralógicas y texturales debido al retrabajo producido por la acción del oleaje [54].
- **Adocreto triturado:** Perteneciente a adoquines, su composición se interpreta como la de un árido reciclado de hormigón, dominado por cuarzo y calcita, junto con fases derivadas de la pasta de cemento endurecida, como portlandita y compuestos hidratados de calcio [55].
- **Roca triturada:** Corresponde a un árido chancado de uso habitual en la construcción, que puede interpretarse como compatible con áridos de origen ígneo de uso corriente en la región. Su composición mineralógica se infiere con base en antecedentes geológicos regionales del entorno Concepción-Talcahuano-Hualpén, donde aflora el Batolito de la Costa. En esta unidad, la mineralización principal corresponde a plagioclasa, hornblenda y biotita, junto con minerales accesorios como titanita, apatito y minerales de hierro [56].

En la Figura 7, se muestran imágenes de las muestras utilizadas en este estudio. Cabe destacar que la denominación en adelante de estas muestras es: “AG” para la arena de río, “AP” para la arena de playa, “AM” para el adocreto triturado y “RT” para la roca triturada.

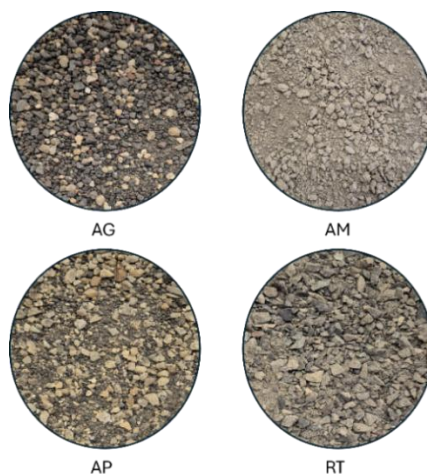


Figura 7. Muestras utilizadas en el estudio

3.2.2. Preparación y clasificación granulométrica

Para la preparación de las muestras se realizó primeramente un secado al horno de 12 horas a 110 °C con el objetivo de eliminar completamente la humedad de los materiales. Luego, con las muestras enfriadas, se procedió con el proceso de tamizado, cuyo objetivo era obtener fracciones granulométricas de acuerdo con la serie preferida especificada en Anexos A.1, más el tamiz de abertura 0.075 mm. Se utilizaron dos sistemas de tamices, uno de capacidad de 2 kg, pero con solo algunas mallas compatibles con la serie preferida para avanzar con mayor rapidez en el procedimiento, y posterior, un sistema de tamices de capacidad 200 g con las mallas de la serie preferida completa, ambos compatibles con el estándar americano ASTM E11.

El primer sistema incorporaba siete tamices con aberturas cuadradas de tamaño 0.075 mm, 0.15 mm, 0.3 mm, 0.6 mm, 1 mm, 2.0 mm y 4.75 mm de la marca Wstyler sobre una tamizadora electromagnética de la marca Matest, la cual permite una triple acción vibratoria (vertical, lateral y rotacional). Y el segundo sistema, también incorporaba siete tamices de abertura cuadrada de tamaños 4.75 mm, 2.36 mm, 1.18 mm, 0.6 mm, 0.3 mm, 0.15 mm y 0.075 mm. Este sobre un equipo Tyler Ro-Tap, que combina un movimiento giratorio horizontal de 270 a 300 rotaciones por minuto con 140 a 160 golpes en la tapa superior por minuto [57]. Ambos sistemas se muestran en la Figura 8, siendo el primero el del lado izquierdo y el segundo sistema el del lado derecho.



Figura 8. Sistemas de tamices utilizados

Después del tamizado, se separaron las fracciones granulométricas necesarias en bolsas con cierre hermético, luego, se lavaron y volvieron a secar en el horno las fracciones de los materiales triturados puesto presentaban material fino dentro de estas. Posteriormente, se construyeron curvas granulométricas sintéticas con cada material de acuerdo con el rango definido en la EFNARC 1996.

Las curvas sintéticas fueron definidas con el propósito de cubrir distintos sectores del rango granulométrico, incorporando una curva relativamente fina, una curva intermedia y una curva más gruesa. Se estipuló una cantidad de 2 kg por muestra para realizar los ensayos. En la Tabla 4, se muestran los porcentajes acumulados pasantes, los porcentajes acumulados retenidos y el porcentaje retenido por malla correspondiente a cada curva granulométrica sintética. Además, en la Figura 9, se representa como quedaron estas curvas en un gráfico log-normal.

Tabla 4. Porcentajes de material para cada curva sintética

Mallas	% acumulado que pasa			% retenido			% por malla		
	CS-1	CS-2	CS-3	CS-1	CS-2	CS-3	CS-1	CS-2	CS-3
4.75	100	100	100	0	0	0	0	0	0
2.36	92	78	59	8	22	41	8	22	41
1.18	75	58	41	25	42	59	17	20	18
0.6	56	41	26	44	59	74	19	17	15
0.3	32	23	14	68	77	86	24	18	12
0.15	16	11	6	84	89	94	16	12	8
0.075	4	4	4	96	96	96	12	7	2
Fondo	0	0	0	100	100	100	4	4	4

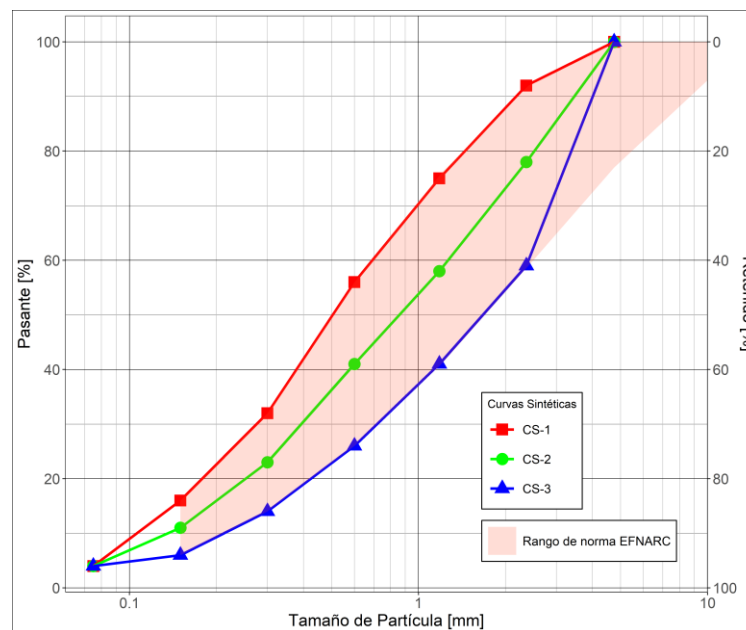


Figura 9. Curvas sintéticas utilizadas en el estudio

3.3. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental desarrollado en esta investigación tuvo como objetivo evaluar la influencia de la morfología y el tamaño de partículas de áridos finos principalmente sobre la

trabajabilidad de morteros y la resistencia al corte del suelo granular. Para ello, se diseñó una secuencia de ensayos orientada a caracterizar el comportamiento mecánico y reológico de las muestras, así como sus propiedades morfológicas.

En primer lugar, se realizó la caracterización mecánica de los materiales granulares, mediante ensayos de corte directo, ángulo de reposo y determinación de densidades por picnometría, con el fin de obtener parámetros asociados a la resistencia al corte y al comportamiento volumétrico de las muestras. Posteriormente, se efectuó la captura y procesamiento digital de imágenes de partículas obtenidas a partir de los distintos intervalos granulométricos, lo que permitió generar imágenes binarizadas aptas para su análisis morfológico.

Luego, se desarrolló el análisis morfológico de partículas, mediante la determinación de descriptores morfológicos geométricos en representación bidimensional, tales como redondez, esfericidad, relación de aspecto y parámetros asociados a la forma de las partículas. En una etapa posterior, se evaluó la trabajabilidad de morteros elaborados con los mismos áridos, mediante el ensayo de asentamiento del cono, y la segregación de los morteros mediante ensayos de segregación. Finalmente, los resultados obtenidos en cada etapa fueron integrados mediante métodos de análisis estadístico, con el objetivo de identificar relaciones entre la morfología de partículas, la granulometría y el comportamiento mecánico y reológico de los materiales estudiados.

A continuación, se profundiza a detalle en cada procedimiento llevado a cabo en el estudio experimental.

3.3.1. Caracterización mecánica de las muestras

La caracterización mecánica de las muestras contempló ensayos destinados a determinar parámetros asociados a la resistencia al corte, al comportamiento en estado no confinado y a la densidad de partículas. Los resultados obtenidos permitieron establecer las variables mecánicas necesarias para el análisis posterior de la influencia de la granulometría y la morfología de partículas en el comportamiento de los materiales.

3.3.1.1. Ensayo de corte directo

El ensayo de corte directo es el ensayo principal para obtener los parámetros de resistencia al corte, se realizó con un equipo Matest de ensayo de corte directo y residual para suelos con medición digital de carga y adquisición de datos. El equipo contemplaba una caja de dimensiones en su base 10 cm x

10 cm, y con una altura de 4.75 cm aproximadamente. Se realizaron cuatro ensayos en seco por muestra, con cargas normales efectuadas por pesos de 1, 5, 10 y 20 kg.

Todos los ensayos se realizaron con una velocidad de corte de 0.2 mm/min, para un desplazamiento de corte de 11 mm, durando 55 minutos cada ensayo. El procedimiento utilizado básicamente era homogeneizar la muestra, luego ir agregando por capas el material apisonándolo por cada capa, con el fin de lograr una compactación densa de los granos; con alrededor de cuatro capas se llenaba la caja para finalizar montando la caja al equipo y ajustar la máquina con los pesos, pernos y sensores correspondientes.

A partir de los resultados del ensayo se determinaron los valores de esfuerzo de corte máximo y residual, correspondientes, respectivamente, al valor máximo y al último valor registrado de esfuerzo de corte. Posteriormente, para cada muestra se graficaron en función de las cargas normales aplicadas y se ajustaron líneas de tendencia de acuerdo con la ecuación de Mohr-Coulomb (Ec. 1), obteniéndose así los valores de cohesión y ángulo de fricción interna (φ) máximos y residuales.

En la Figura 10, se muestra en (a) el equipo completo, en (b) la caja del equipo y en (c) la caja montada en el equipo lista para iniciar el ensayo.

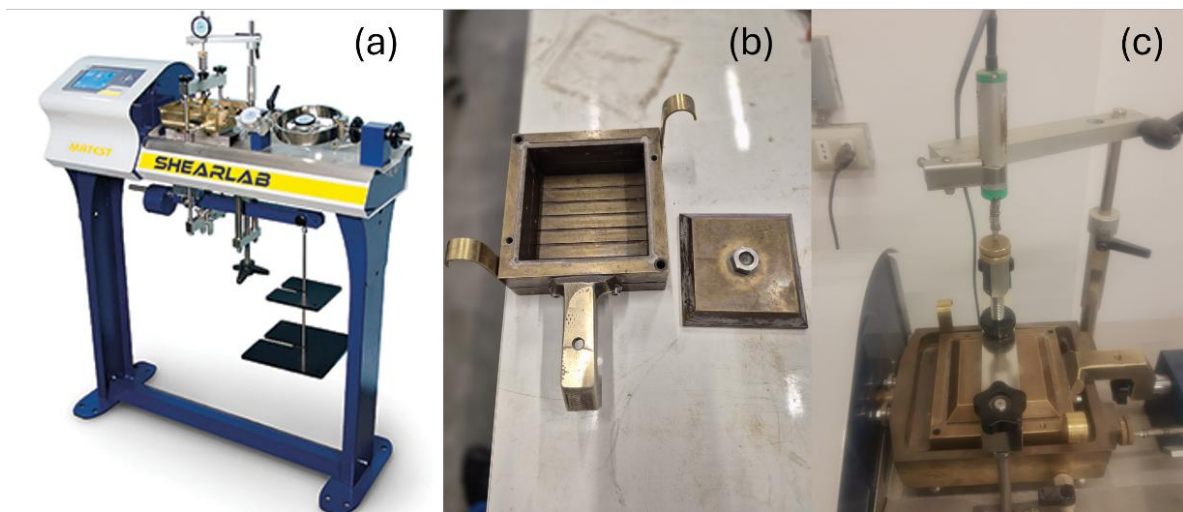


Figura 10. Equipo de corte directo utilizado

3.3.1.2. Ensayo de ángulo de reposo

El ensayo de ángulo de reposo entrega una medida simple del comportamiento friccional en estado suelto, esta se define como el ángulo máximo al que una pila de material se mantiene sin movimiento, con ángulos superiores a este el material fluye por la pila. Este parámetro se ve relacionado con el

tamaño, la forma de las partículas del material y su densidad aparente. También se relaciona al φ_{CS} o φ_{res} , mostrando según Vangla et al. buena similitud con el ángulo de reposo [28].

Para obtener el ángulo de reposo de las muestras, se utilizó el método estándar internacional C 1444 para medir el ángulo de reposo de polvos de molde de flujo libre, cuyo método también es utilizado tanto para arenas, así como para gravas [58].

En este método, se utiliza un embudo de plástico el cuál se mantiene a una altura específica para formar un montículo de arena con una base nivelada sobre un papel glaseado, en este caso se utilizó un papel couche brillante, posteriormente se pasa arena seca ayudado con una poruña y se junta hasta que el montículo tapona el embudo y detiene el flujo de arena. Luego, se miden cuatro veces en distintas direcciones con un pie de metro el diámetro de la base del cono del montículo; para cada muestra se repite tres veces este proceso, finalmente se obtiene el ángulo de reposo, mediante la Ecuación 5. El proceso de las mediciones de la base del cono se muestra en la Figura 11.

$$\text{Ángulo de reposo} = \tan^{-1} \left(\frac{2H}{D_A - d} \right) \quad (5)$$

Donde: H = Altura del cono (in); D_A = Diámetro promedio, al 0.10 (in) más cercano de las 3 determinaciones de prueba, y d = Diámetro interno de la abertura del embudo (in)



Figura 11. Mediciones del cono en cuatro direcciones distintas

3.3.1.3. Obtención de densidades mediante picnometría

La densidad ayuda a interpretar diferencias físicas entre materiales y posibles efectos en la dosificación y empaquetamiento. Para la obtención de la densidad específica de las partículas de las muestras, se ajustaron las cantidades de muestra por fracción granulométrica de las curvas controladas

para así asegurar la correcta representación en las mediciones. Para el ensayo se utilizaron picnómetros de volumen conocido, los cuáles fueron pesados en diferentes combinaciones, primero vacío, luego solo con la muestra, después con la muestra más agua destilada; a esta última combinación se le realizó dos secuencias de vacío con una cámara de vacío con el fin de eliminar completamente las burbujas de aire en su interior. Finalmente, mediante operaciones de aritmética y al considerar la masa del agua destilada igual a su volumen a condiciones atmosféricas normales, se obtiene el volumen de la muestra que al ser dividido con la masa de la muestra anteriormente pesada resulta en la densidad del material. En la Figura 12, se presenta el equipo con el cual se desarrolló la picnometría.



Figura 12. Equipo de picnometría utilizado

3.3.2. Caracterización morfológica de las partículas

La caracterización morfológica de las partículas constituye una etapa fundamental del presente estudio, ya que permite cuantificar la forma de los áridos en términos de parámetros objetivos que describen su forma, angularidad y regularidad. El procedimiento consideró la adquisición de imágenes, su procesamiento digital y el análisis cuantitativo de los parámetros morfológicos, etapas que se describen en los subapartados siguientes.

3.3.2.1. Adquisición de imágenes de partículas

Para la adquisición de imágenes en 2D, se utilizó una lupa estereoscópica de la marca Zeiss, equipada con un sistema de iluminación incidente regulable, el cual permitió capturar imágenes de los granos correspondientes a los distintos intervalos granulométricos de las muestras estudiadas. En la Figura 13, se muestra el equipo utilizado para la adquisición de imágenes.

La adquisición de las imágenes se realizó colocando las partículas en su posición más estable sobre una superficie de fondo uniforme y de alto contraste, para este estudio se decidió utilizar un papel Canson Mi-Teintes negro para las partículas más claras y una hoja de carta blanca para las partículas más oscuras, con el fin de facilitar la identificación de los contornos durante el procesamiento digital. La iluminación se ajustó de manera que se minimizaran los reflejos superficiales y se asegurara una adecuada definición de los bordes de las partículas.



Figura 13. Equipo de lupa estereoscópica utilizado

Las imágenes obtenidas constituyeron la base para el posterior procesamiento digital y análisis cuantitativo de la forma de las partículas. Se priorizó la máxima resolución de imagen entregada por el equipo de 1600x1200 para obtener el mayor detalle de las partículas. Se consideraron 50 partículas por rango granulométrico por material, y los rangos considerados fueron 4.75-2.36 mm, 2.36-1.18 mm, 1.18-0.6 mm y 0.6-0.3 mm.

Como criterio de calidad de imagen, se adoptó un rango mínimo aceptable de resolución comprendido entre 75 y 130 píxeles para la dimensión mínima característica de las partículas, de acuerdo con el estudio experimental de calidad de imagen mínima para caracterización morfológica de partículas de Sun et al. [53]. Para evaluar este requisito se optó por el diámetro de Feret mínimo que corresponde a la dimensión mínima proyectada de la partícula en la imagen 2D, determinada como la menor distancia entre dos tangentes paralelas en su contorno.

3.3.2.2. Procesamiento de imágenes

Posterior a la adquisición de imágenes, estas fueron procesadas mediante el software ImageJ, donde se aplicaron procedimientos de umbralización para una mejor captura de los contornos, utilizando tres umbrales disponibles en el software, otsu, triangular (*triangle*) y por percentiles (*percentile*). Estos procuraban representar distintas interpretaciones de la misma imagen. Siguiendo a esto, se sumaron las imágenes binarizadas por estos umbrales, ponderándolas con un mismo peso, así se obtuvo una imagen a escala de grises, donde los diferentes valores de grises representaban su aparición en las distintas imágenes, siendo el color negro su aparición en las tres imágenes, el gris oscuro en dos y el gris más claro solo en una.

Luego, dado que no se logró capturar la totalidad del contorno de cada partícula mediante el proceso anterior, se realizó una edición manual de los detalles faltantes de los contornos, utilizando como referencia una superposición con la imagen original, procurando cerrar la partícula. Posterior a ello, se binarizó la imagen siendo el criterio definido el de conservar los píxeles de color de gris oscuro y negro, que generalmente representaban mejor la partícula, con esto se obtuvo una imagen binarizada con ruido menor, la cual mediante pequeños ajustes de edición se lograba eliminar el ruido. Con la imagen binarizada de solo las partículas a estudiar, finalmente mediante el análisis de imágenes se obtuvieron los parámetros de la caracterización morfológica. En la Figura 14, se presenta un esquema del procesamiento de imágenes realizado en este estudio.

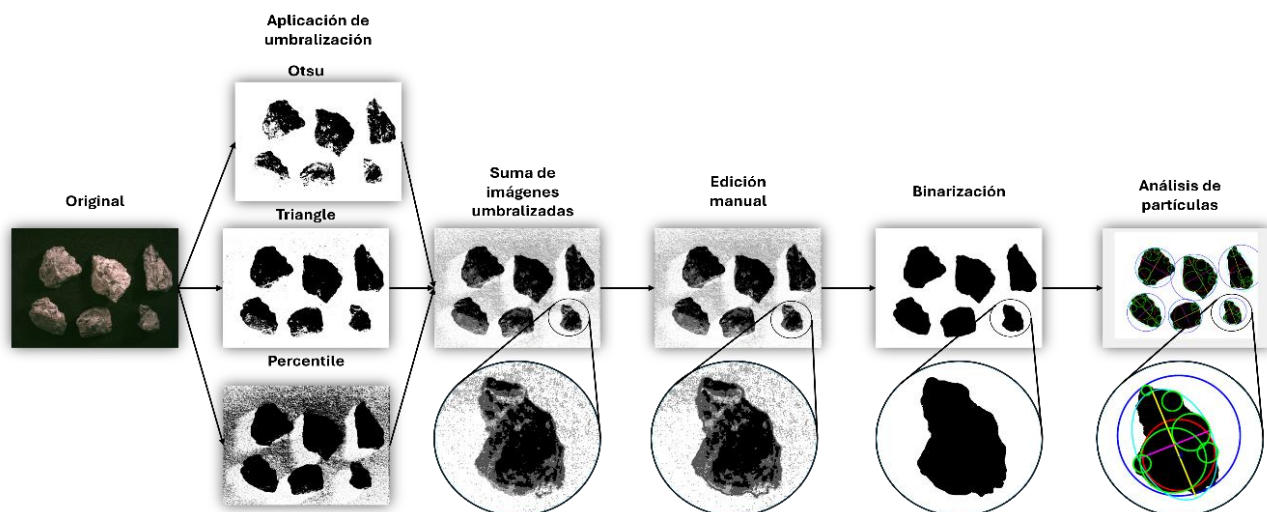


Figura 14. Esquema del procesamiento de imágenes realizado en este estudio

3.3.2.3. Análisis de imágenes

El análisis de imágenes de partículas se desarrolló con la herramienta de análisis de partículas de ImageJ y con el algoritmo creado por Zheng y Hryciw en MatLab enfocado principalmente en la redondez de Wadell [47]. Del análisis realizado se obtuvo la información en archivos CSV los cuales fueron unificados y trabajados mediante el entorno RStudio con el fin de obtener una base maestra de los parámetros morfológicos para el posterior análisis estadísticos y extracción de resultados. En la Tabla 5 se disponen los parámetros morfológicos utilizados en este estudio, mencionando el software de origen, fórmula y comentarios de dichos parámetros.

Tabla 5. Parámetros morfológicos utilizados en la caracterización morfológica del estudio

Parámetro [Software]	Fórmula	Comentarios
Redondez de Wadell (R_w) [MatLab]	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{r_i}{r_{ins}}$	Wadell (1932) r_i : Radio de un círculo inscrito tangente al borde de una partícula, r_{ins} : Radio del círculo inscrito máximo en la partícula, N: Número de círculos inscritos en la partícula
Esfericidad por área (S_A) o Circularidad de Tickell [MatLab]	$\frac{A}{A_{cir}}$	A: Área proyectada de la partícula, A_{cir} : Área del círculo inscrito mínimo
Esfericidad por diámetro (S_D) [MatLab]	$\frac{D_c}{D_{cir}}$	D_c : Diámetro de un círculo que tiene la misma área proyectada que la partícula, D_{cir} : Diámetro del círculo circunscrito mínimo
Esfericidad por círculos (S_C) o Relación de círculo inscrito/circunscrito [MatLab]	$\frac{D_{ins}}{D_{cir}}$	D_{ins} : Diámetro del círculo inscrito máximo
Esfericidad por perímetro (S_P) [MatLab]	$\frac{P_c}{P}$	P_c : Perímetro de un círculo que tiene la misma área proyectada que la partícula, P: Perímetro de la partícula
Relación de aspecto (AR) [MatLab][ImageJ]	$\frac{d_{min}}{d_{max}}$	d_{min} : Eje menor de elipse equivalente, d_{max} : Eje mayor de elipse equivalente
Circularidad (Circ) [ImageJ]	$\frac{A}{A_p} = \frac{4\pi A}{P^2}$	Cox (1927) A_p : Área del círculo que tiene el mismo perímetro que la proyección de la partícula

Solidez (Sol) [ImageJ]	$\frac{A}{A_{\text{ConvexHull}}}$	$A_{\text{ConvexHull}}$: Área del envolvente convexo de la partícula
Convexidad (Conv) [ImageJ]	$\frac{P_{\text{ConvexHull}}}{P}$	$P_{\text{ConvexHull}}$: Perímetro del envolvente convexo de la partícula
Regularidad (ρ) [MatLab]	$\rho = \frac{R_w + S}{2}$	R_w : Redondez de Wadell, S : Relación de círculo inscrito/circunscrito o esfericidad por círculos (S_C)

En la Figura 15, se representan los descriptores morfológicos utilizados en esta investigación, mediante la visualización de los componentes geométricos que intervienen en su cálculo sobre la proyección bidimensional de una partícula.

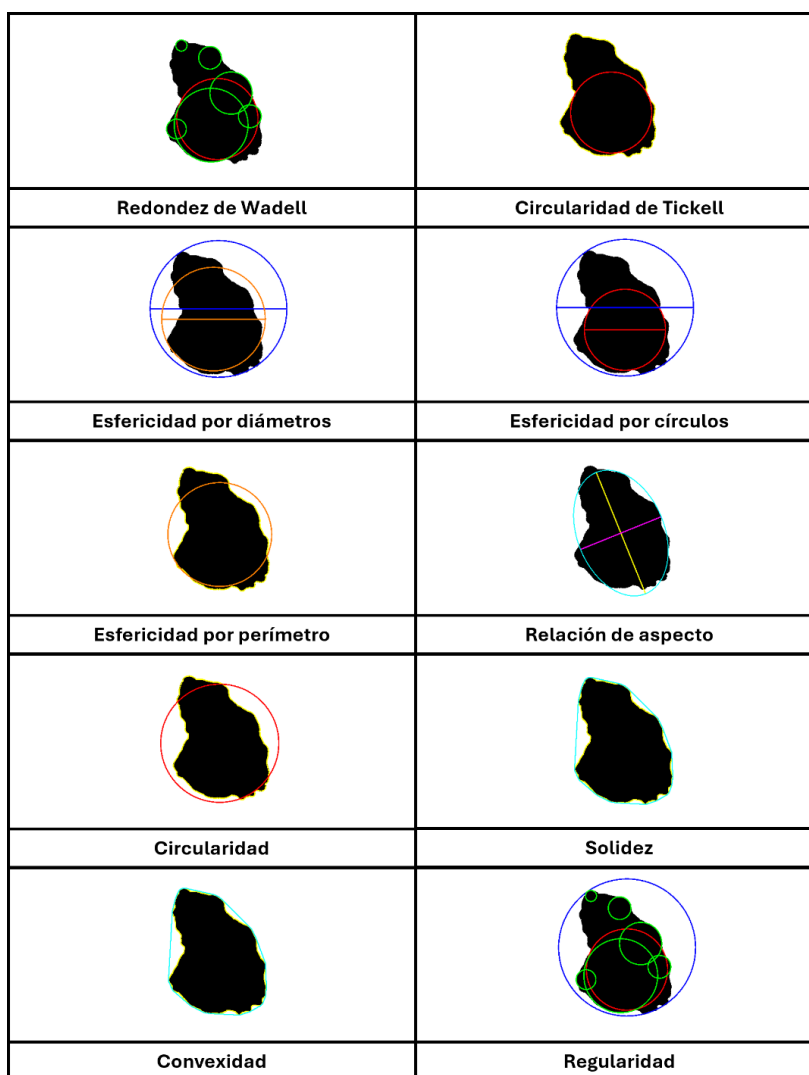


Figura 15. Representación esquemática de los descriptores utilizados en el análisis de partículas

Por último, cabe destacar que los parámetros o descriptores morfológicos obtenidos para cada rango granulométrico fueron integrados mediante un promedio ponderado, con el fin de obtener un valor representativo del material completo. Este se calculó considerando el valor promedio del descriptor obtenido en cada rango granulométrico y su respectiva fracción porcentual dentro de la muestra total, como muestra la Ecuación 6.

$$X_{\text{ponderado}} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (6)$$

Donde:

- $X_{\text{ponderado}}$ = valor representativo del descriptor morfológico
- $\bar{X}_i$ = valor promedio del descriptor del rango granulométrico i
- w_i = peso del rango i
- n = número de rangos granulométricos considerados

3.3.3. Evaluación del comportamiento en estado fresco de los morteros

El comportamiento de los morteros en estado fresco constituye un aspecto fundamental para evaluar su desempeño durante la colocación y compactación, así como para analizar la influencia de las características del árido en la respuesta del material [9] [44]. En el presente estudio, este comportamiento se evaluó mediante ensayos experimentales orientados a caracterizar la consistencia y estabilidad de las mezclas de mortero preparado con distintas distribuciones granulométricas y tipos de árido.

Para ello, se empleó el ensayo de asentamiento del cono como método principal para evaluar la trabajabilidad de los morteros, complementado con una evaluación experimental de la tendencia a la segregación del material bajo condiciones controladas. Las condiciones de preparación de las mezclas y los procedimientos experimentales aplicados en estos ensayos se describen en los subapartados siguientes.

3.3.3.1. Dosificación y preparación de mezclas

Las mezclas de morteros utilizadas en el presente estudio fueron diseñadas con el propósito de evaluar el comportamiento del material en estado fresco bajo condiciones controladas, manteniendo constante la proporción de árido/cemento (a/c) y variando la proporción de agua/cemento (w/c) como principal parámetro de ajuste de la trabajabilidad. Esta estrategia permitió analizar la influencia de las

características granulométricas y morfológicas de los áridos en la respuesta del mortero, asegurando la comparabilidad entre las distintas mezclas evaluadas.

Los materiales utilizados fueron los siguientes; el árido empleado en cada mezcla correspondió a las muestras previamente preparadas y caracterizadas en términos granulométricos y morfológicos. El cemento empleado corresponde a cemento especial de la marca Cementos Bío-Bío, que en cuya ficha técnica señala tratarse de un cemento obtenido por molienda de clinker, puzolana y yeso [59]. Mientras, el agua empleada corresponde a agua de la llave de uso corriente. Además, el equipo utilizado para mezclar los materiales fue una mezcladora planetaria de laboratorio para morteros marca Thomas con su respectivo recipiente metálico.

Debido a que las muestras de áridos eran limitadas, se optó por mezclas de morteros con adición progresiva de agua. Para ello, se utilizó una mezcla base de cemento y árido fino, sobre la cual se incorporaron incrementos progresivos de agua hasta alcanzar los distintos niveles de relación agua/cemento definidos para el estudio. De esta manera, fue posible evaluar la evolución de la trabajabilidad del mortero bajo condiciones comparables entre mediciones. El procedimiento detallado de amasado, ajuste del contenido de agua y medición del asentamiento se describe en el Anexo A.2.

Las proporciones iniciales de las mezclas correspondieron a una relación fija de a/c de 3 y a una relación inicial de w/c de 0.4. A partir de lo anterior, las cantidades de materiales se consideraron para un desarrollo holgado de los ensayos y fueron las siguientes; 1.26 kg de árido, 0.42 kg de cemento y 0.168 kg de agua. Posteriormente, se fue incrementando la relación w/c en 0.05 hasta llegar a una relación w/c de 0.8, por ende, se fueron agregando 21 g de agua por cada incremento para llegar a las relaciones de w/c estipuladas.

3.3.3.2. Ensayo de asentamiento del cono

La trabajabilidad de los morteros en estado fresco fue evaluada mediante el ensayo de asentamiento del cono, aplicado como indicador principal de la consistencia del material. Este ensayo se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la norma NCh2257:3 para asentamiento del cono en morteros [13]. Dicha norma se basa en los principios del ensayo de asentamiento del cono de Abrams para hormigón descritos en la norma NCh1019 [14], adaptando el procedimiento a las características propias de los morteros.

El procedimiento considerado para la determinación del asentamiento se desarrolló de acuerdo con las etapas establecidas en la normativa vigente. El valor de asentamiento obtenido por ensayo corresponde a la diferencia de la altura del molde troncocónico (cono) con la altura que alcanza el mortero moldeado medido en su eje central con aproximación de 1 mm.

En el presente estudio, el ensayo de asentamiento del cono se aplicó de manera repetida sobre una misma mezcla base, incorporando incrementos progresivos de agua con el fin de evaluar la variación de la consistencia del mortero en función de la relación agua/cemento. Cada medición del asentamiento se realizó siguiendo las condiciones establecidas en la normativa, manteniendo control cronometrado de las etapas de llenado, enrase, levantamiento del molde y medición.

3.3.3.3. Evaluación complementaria de segregación

Con el fin de complementar el análisis del comportamiento de los morteros en estado fresco, se incorporó un ensayo experimental orientada a analizar la tendencia del material a la segregación. Esta evaluación permite complementar el ensayo de asentamiento, ya que una mayor fluidez no necesariamente implica una mezcla estable u homogénea. La resistencia a la segregación constituye una propiedad relevante en materiales cementicios, ya que refleja la capacidad del sistema para mantener una distribución homogénea de sus componentes durante el manejo, colocación y deformación del material.

En particular, el procedimiento utilizado en el presente estudio se basó en la metodología propuesta por He et al., quienes evaluaron la resistencia a la segregación de morteros mediante un ensayo adaptado a partir de la norma china JGJ/T 283-2012, originalmente desarrollada para hormigón [9]. Este enfoque consiste en someter el material fresco a una condición de reposo sobre un tamiz de abertura definida, permitiendo cuantificar la cantidad de material que atraviesa el tamiz en un intervalo de tiempo determinado, como indicador de la estabilidad del sistema frente a la segregación. La Ecuación 7 descrita por He et al. para evaluar la segregación y los criterios utilizados se muestran a continuación.

$$SR (\%) = \frac{m_0}{m_1} \times 100 \quad (7)$$

Donde:

- SR (%): índice o tasa de segregación
- m_1 : masa total inicial de la mezcla colocada en el tamiz (g)

- m_0 : masa del material que pasó a través del tamiz después del tiempo de reposo (g)

El criterio utilizado define a un $SR < 15\%$, como una mezcla estable con buena resistencia a la segregación y a un $SR \geq 15\%$ como una mezcla inestable con baja resistencia a la segregación.

Las condiciones del ensayo utilizado por He et al., corresponden a un tamiz de abertura de 0.15 mm durante 10 min, lo que se estableció como el procedimiento a utilizar en el estudio, quedando dispuesto a modificaciones en caso de que el material no precipite. En la Figura 16, se observa la realización del ensayo dispuesto para el estudio.



Figura 16. Ensayo de resistencia a la segregación

3.3.4. Método de análisis de datos

Con el fin de interpretar de manera integrada los resultados obtenidos en las distintas etapas experimentales, se definió un método de análisis de datos orientado a relacionar las características morfológicas de las partículas con las propiedades macroscópicas medidas en la investigación. Para ello, fue necesario estructurar la información en una base consolidada y aplicar herramientas estadísticas que permitieran evaluar tanto la redundancia entre descriptores morfológicos como su asociación con variables de trabajabilidad y de caracterización mecánica de las muestras. En este contexto, el análisis se desarrolló mediante correlaciones de Spearman a nivel global y mediante correlaciones centradas por curva granulométrica y por material, con el propósito de distinguir tendencias atribuibles a la morfología de aquellas influenciadas por la granulometría o por el material del árido.

El análisis de datos se desarrolló en el entorno RStudio, utilizando herramientas del lenguaje R para la preparación de bases de datos, el cálculo de correlaciones y la representación gráfica de resultados.

Primeramente, se elaboró una base maestra de datos a nivel de muestra, en la cual se consolidaron los resultados de morfología de partículas, trabajabilidad, densidad, ángulo de reposo y parámetros derivados de los ensayos de corte directo. Para hacer comparables las variables entre muestras, algunos datos requirieron procesamiento previo antes de incorporarse a la base final. En particular, los resultados de asentamiento, originalmente expresados como curvas en función de la relación agua/cemento, se resumieron mediante indicadores representativos, mientras que los descriptores morfológicos se integraron a nivel de muestra a partir de valores ponderados. Esta base consolidada constituyó el recurso principal para el análisis estadístico desarrollado en la investigación.

Con el fin de evaluar la relación entre descriptores morfológicos y variables de respuesta, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman (ρ_s). Este coeficiente corresponde a una medida no paramétrica de asociación monotónica entre dos variables, basada en los rangos de los datos en lugar de sus valores originales [60-61]. La elección de Spearman se consideró adecuada debido al tamaño reducido de la base de datos, a que no se verificó una distribución normal de las variables analizadas y a que no se asumió una relación estrictamente lineal entre los descriptores morfológicos y las variables macroscópicas. A diferencia del coeficiente de Pearson, que evalúa principalmente asociaciones lineales entre variables, Spearman permite identificar tendencias monotónicas, incluso cuando la relación entre las variables no presenta una forma lineal definida. Por lo tanto, el análisis se orientó a identificar asociaciones generales entre variables, más que a construir un modelo predictivo multivariable. En términos generales, Spearman puede expresarse como la correlación entre los rangos de las variables analizadas y se representa en la Ecuación 8.

$$\rho_s = \text{cor}(R(X), R(Y)) \quad (8)$$

Donde $R(X)$ y $R(Y)$ representan los rangos de las variables X e Y , respectivamente.

Todos los análisis estadísticos fueron realizados en el entorno RStudio utilizando el lenguaje R, mediante las funciones `cor()`, `cor.test()` y `p.adjust()` del paquete base “stats”, las cuales permiten calcular el coeficiente de Spearman y sus correspondientes valores p , considerando adecuadamente la presencia de empates y el cálculo aproximado de significancia cuando corresponde.

Para cada correlación se calculó el correspondiente valor p , considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Debido a que se realizaron múltiples pruebas de correlación, los valores p fueron ajustados mediante el procedimiento de Benjamini-Hochberg (BH) (1995) [62], con el objetivo de controlar la tasa de falsos descubrimientos y reducir la probabilidad de identificar asociaciones estadísticamente

significativas producto del elevado número de comparaciones realizadas. En consecuencia, las correlaciones se consideraron estadísticamente significativas cuando el valor p ajustado fue inferior a 0.05.

En una primera etapa, la correlación de Spearman se empleó para evaluar la redundancia entre los descriptores morfológicos. A partir de la matriz de correlación obtenida, se construyó una matriz de distancia definida en la Ecuación 9 como:

$$d = 1 - |p| \quad (9)$$

Donde $|p|$ corresponde al valor absoluto del coeficiente de correlación. De esta forma, pares de variables con asociaciones más fuertes presentan menores distancias entre sí.

Sobre esta matriz se aplicó un agrupamiento jerárquico aglomerativo mediante el método de enlace promedio, en el cual la distancia entre dos grupos se define como el promedio de las distancias entre todos los pares posibles de elementos pertenecientes a ambos grupos. Finalmente, los grupos se definieron utilizando un umbral de $|p| \geq 0.98$, equivalente a una distancia máxima de $d \leq 0.02$, lo que permitió identificar conjuntos de descriptores estadísticamente redundantes y seleccionar parámetros representativos para el análisis posterior.

Posteriormente, las correlaciones de Spearman se calcularon entre los descriptores morfológicos seleccionados y las variables de respuesta asociadas a resistencia al corte, trabajabilidad, densidad y ángulo de reposo. En el caso del asentamiento, se construyeron previamente indicadores resumen por muestra, tales como el asentamiento a una relación fija, la relación agua/cemento necesaria para alcanzar un asentamiento objetivo y el área bajo la curva asentamiento- w/c .

Por último, con el objetivo de discriminar parcialmente el efecto de la granulometría y del material, se realizaron dos análisis complementarios de correlaciones centradas. En el primero, las variables fueron centradas por curva granulométrica, restando a cada observación el promedio de la curva a la que pertenecía, definiéndose el valor centrado en la Ecuación 10 como:

$$X_{c,ij} = X_{ij} - \bar{X}_j \quad (10)$$

Donde $\bar{X}_j$ corresponde al promedio de dicha variable dentro de la curva j y X_{ij} representa el valor de una variable para la muestra i perteneciente a la curva j .

En el segundo, las variables fueron centradas por material, restando a cada observación el promedio correspondiente a su material, definiéndose el valor centrado en la Ecuación 11 como:

$$X_{c,ik} = X_{ik} - \bar{X}_{.k} \quad (11)$$

Donde $\bar{X}_{.k}$, corresponde al promedio de dicha variable dentro del material k y X_{ik} representa el valor de una variable para la muestra i perteneciente al material k.

En ambos casos, las correlaciones se recalcularon mediante Spearman sobre las variables centradas, de manera de analizar asociaciones relativas una vez reducido el efecto medio de cada factor experimental. Este procedimiento se vincula conceptualmente con el centrado dentro de grupo, ampliamente utilizado en análisis multinivel para separar efectos dentro y entre grupos [63]. Los resultados se representaron mediante matrices de calor, con el fin de visualizar la intensidad y dirección de las asociaciones, así como posibles redundancias y tendencias interpretables.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo, primeramente, se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de la caracterización granulométrica, mecánica y morfológica de los materiales estudiados, así como el comportamiento del mortero en estado fresco mediante los ensayos estipulados anteriormente, con la discusión estructurándose de manera progresiva mediante estos. Luego, se presenta el análisis de datos de los resultados con su respectivo desarrollo estadístico mediante correlaciones de Spearman como se estipuló en la metodología.

4.1. Caracterización granulométrica de las muestras

Con el fin de caracterizar cuantitativamente las distribuciones granulométricas definidas para el estudio, se determinaron los diámetros característicos D_{10} , D_{30} y D_{60} , así como los coeficientes de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c) con las Ecuaciones 3 y 4, respectivamente, parámetros ampliamente utilizados para describir la forma de la curva granulométrica y el grado de dispersión de tamaños. Adicionalmente, se calculó el módulo de finura (MF) con la Ecuación 2 como indicador global de la granulometría. Los resultados obtenidos para las tres curvas sintéticas consideradas se presentan en la Tabla 6, mientras que la representación gráfica de las curvas granulométricas y sus diámetros característicos se muestran en el Anexo A.3.

Tabla 6. Diámetros característicos, coeficientes granulométricos y módulo de finura de las curvas sintéticas estudiadas.

Curvas	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_u	C_c	MF
CS-1	0.106	0.275	0.692	6.523	1.031	2.29
CS-2	0.136	0.393	1.265	9.309	0.898	2.89
CS-3	0.212	0.719	2.401	11.317	1.014	3.54

Los resultados muestran un incremento progresivo de los diámetros característicos y del módulo de finura desde la curva CS-1 hasta la curva CS-3, lo que indica una transición sistemática hacia materiales de mayor tamaño medio y menor contenido relativo de finos. De manera consistente, los valores del coeficiente de uniformidad (C_u) aumentan entre las curvas, evidenciando una mayor amplitud en la distribución de tamaños. Por su parte, los coeficientes de curvatura (C_c) se mantienen cercanos a la unidad, lo que sugiere distribuciones granulométricas continuas y bien gradadas dentro del rango de tamaños considerado.

4.2. Caracterización mecánica de las muestras

La caracterización mecánica de las muestras se realizó mediante ensayos de corte directo, a partir de los cuales se determinaron los parámetros de resistencia al corte en términos de cohesión aparente (c) y ángulo de fricción interna (φ), tanto en condición de falla máxima como residual. Complementariamente, se evaluó el ángulo de reposo como indicador del comportamiento friccional en estado suelto, y la densidad de las partículas mediante picnometría, con el fin de caracterizar propiedades físicas relevantes para la interpretación del comportamiento mecánico del medio granular.

Los resultados obtenidos del ensayo de corte directo se presentan en la Tabla 7, donde se resumen los valores de cohesión y ángulo de fricción interna para cada muestra. La representación gráfica de las envolventes de falla máxima y residual se presenta en el Anexo A.4, mientras que las curvas esfuerzo corte-altura de deformación registradas durante los ensayos se presentan en el Anexo A.5, con distintas combinaciones de las variables, permitiendo visualizar la evolución de la resistencia al corte en función del desplazamiento vertical registrado.

Tabla 7. Valores de cohesión y ángulo de fricción interna máximo y residual obtenidos para cada muestra

Muestra	$c_{m\acute{a}x}$ (kPa)	$\varphi_{m\acute{a}x}$ (°)	c_{res} (kPa)	φ_{res} (°)
AG CS-1	8.54	50.11	2.59	32.77
AG CS-2	2.91	53.64	-6.1	41.37
AG CS-3	9.26	51.17	-0.39	34.31
AM CS-1	19.3	50.6	6.34	36.5
AM CS-2	28.76	52.36	2.91	38.99
AM CS-3	31.65	54.2	13.32	32.06
AP CS-1	3.92	50.89	-2.22	38.83
AP CS-2	14.23	46.17	4.27	33.92
AP CS-3	8.27	49.12	0.67	33.11
RT CS-1	12.82	49.04	1.28	40.45
RT CS-2	24.04	51.13	11.26	37.4
RT CS-3	26.13	52.08	12.44	37.61

Los resultados muestran que el comportamiento mecánico de las muestras varía tanto en función del tipo de material como de la distribución granulométrica. En general, los valores de $\varphi_{m\acute{a}x}$ se sitúan en un rango aproximado entre 46° y 54°, lo que es característico de materiales granulares con baja plasticidad y partículas predominantemente angulares.

Se observa que los materiales triturados, particularmente la muestra AM, presentan los valores más elevados de cohesión aparente que las arenas naturales, alcanzando el valor máximo de cohesión de 31.65 kPa en la muestra AM CS-3. Sin embargo, esta diferencia debe interpretarse con cautela, ya que

en materiales granulares la cohesión corresponde a un intercepto del ajuste de la envolvente de falla y no necesariamente a una propiedad física efectiva. Dado que las curvas granulométricas fueron equivalentes entre materiales, este comportamiento puede asociarse más bien a diferencias en la dilatancia, la trabazón inicial y la forma de movilización de la resistencia, antes que un efecto cohesivo real.

Respecto a la influencia de la distribución granulométrica, se observa una tendencia general al incremento de los parámetros asociados a la resistencia al corte con el aumento del tamaño medio de partícula. En la mayoría de los materiales, las muestras correspondientes a CS-3 presentan valores iguales o superiores de cohesión y ángulo de fricción interna en comparación con las curvas con más finas. Este comportamiento es coherente con el efecto del tamaño y la gradación sobre el empaquetamiento granular, ya que distribuciones con mayor proporción de partículas gruesas tienden a desarrollar estructuras más estables y resistentes al corte.

Los resultados del ensayo de ángulo de reposo y de densidad se presentan en la Tabla 8. El ángulo de reposo muestra variaciones moderadas entre las muestras, con valores comprendidos aproximadamente entre 36° y 41° , lo que indica diferencias en la fricción interna y la estabilidad del material en estado suelto. En general, los valores más altos de ángulo de reposo se observan en los materiales triturados, particularmente en la muestra RT, lo que es consistente con una mayor resistencia al deslizamiento entre las partículas, siendo este comportamiento coherente con los resultados de los ensayos de corte directo para estos materiales.

Tabla 8. Valores de ángulo de reposo y de densidad por muestra

Muestras	Ángulo de reposo ($^\circ$)	Densidad (Kg/m^3)
AG CS-1	37.9	2632
AG CS-2	36.5	2642
AG CS-3	36.5	2660
AM CS-1	40.2	2364
AM CS-2	40.2	2480
AM CS-3	39.4	2287
AP CS-1	37.2	2722
AP CS-2	37.2	2580
AP CS-3	37.2	2564
RT CS-1	41	2543
RT CS-2	41	2637
RT CS-3	39.4	2537

Por su parte, la densidad de las partículas presenta variaciones asociadas principalmente al origen mineralógico y al grado de porosidad interna de los materiales. Las arenas naturales, como la arena de playa (AP), presentan valores de densidad relativamente altos, mientras que los materiales reciclados o triturados muestran valores ligeramente menores, lo que puede atribuirse a la presencia de microfisuras o mayor porosidad interna.

4.3. Caracterización morfológica de las partículas

La caracterización morfológica de las partículas se realizó mediante el análisis digital de imágenes estipulado en la metodología. A partir de esto los descriptores morfológicos definidos se calcularon como promedios ponderados por fracción granulométrica con la Ecuación 6, utilizando como factores de ponderación los porcentajes en masa retenidos en cada rango de tamaño definidos en la Tabla 4. Este enfoque permite integrar la variabilidad morfológica asociada a las distintas fracciones granulométricas y obtener valores representativos del material completo.

Los valores promedio ponderados de los parámetros morfológicos para cada material y curva granulométrica se presentan en la Tabla 9.

Las representaciones detalladas de la distribución de los parámetros morfológicos, mediante histogramas y diagramas de caja, se presentan en los Anexos A.6 y A.7, respectivamente, con el propósito de complementar el análisis estadístico y proporcionar una visualización más completa de la variabilidad en las muestras.

Tabla 9. Valores de los descriptores morfológicos escogidos ponderados por muestra

Muestras	Rw	ϕ_s	S_D	S_C	S_P	AR	Circ	Sol	Conv	ρ
AG CS-1	0.385	0.675	0.82	0.665	0.908	0.747	0.748	0.953	0.93	0.525
AG CS-2	0.392	0.681	0.823	0.672	0.912	0.755	0.753	0.956	0.931	0.532
AG CS-3	0.398	0.686	0.827	0.678	0.915	0.763	0.759	0.958	0.932	0.538
AM CS-1	0.334	0.604	0.774	0.596	0.857	0.69	0.669	0.926	0.907	0.465
AM CS-2	0.33	0.603	0.774	0.594	0.85	0.688	0.66	0.925	0.901	0.462
AM CS-3	0.326	0.601	0.773	0.591	0.843	0.686	0.65	0.924	0.894	0.458
AP CS-1	0.379	0.65	0.804	0.641	0.898	0.727	0.732	0.949	0.927	0.51
AP CS-2	0.381	0.643	0.8	0.637	0.896	0.722	0.729	0.95	0.926	0.509
AP CS-3	0.381	0.636	0.795	0.633	0.893	0.717	0.725	0.951	0.925	0.507
RT CS-1	0.33	0.568	0.75	0.573	0.859	0.644	0.673	0.937	0.918	0.451
RT CS-2	0.334	0.572	0.752	0.574	0.861	0.648	0.675	0.938	0.919	0.454
RT CS-3	0.338	0.575	0.755	0.576	0.862	0.652	0.677	0.94	0.919	0.457

Nota: Abreviaturas usadas: **Rw**= Redondez de Wadell; **ϕ_s** = Circularidad de Tickell o esfericidad por área; **S_D**= Esfericidad por diámetro; **S_C**= Esfericidad por círculos; **S_P**= Esfericidad por perímetro; **AR**= Relación de aspecto; **Circ**= Circularidad; **Sol**= Solidez; **Conv**= Convexidad; **ρ** = Regularidad

A partir de la Tabla 9, vemos que se observa una clara diferenciación entre los materiales en su caracterización morfológica. En términos generales, AG presenta los valores más altos de redondez, esfericidad y regularidad, los materiales triturados AM y RT, presentan los valores más bajos de redondez y esfericidad, mientras que la AP presenta valores intermedios.

Estos resultados indican que las partículas de los materiales naturales presentan geometrías más redondeadas y regulares, mientras que los materiales triturados presentan formas más angulares y superficies más irregulares, lo que es consistente con su origen y proceso de formación.

En cuanto a la confiabilidad de los cálculos de los descriptores morfológicos respecto a la resolución de las partículas, el parámetro del diámetro de Feret mínimo se escogió para verificar el cumplimiento del criterio de resolución de partículas definido en metodología. La distribución del parámetro diámetro de Feret mínimo en los distintos rangos granulométricos considerados se muestra en la Figura 17.

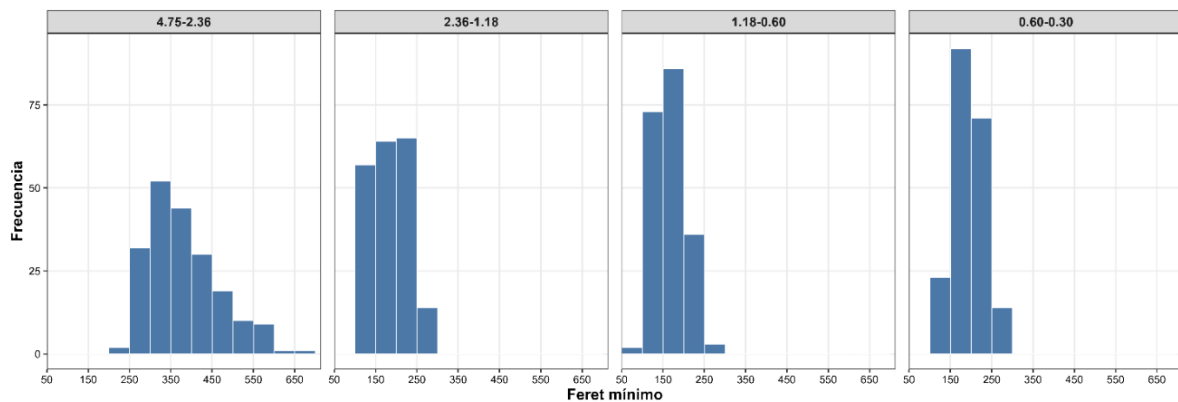


Figura 17. Histograma del diámetro de Feret mínimo por rango granulométrico

El análisis de la base de datos mostró que el valor mínimo del diámetro de Feret mínimo fue de 95 píxeles aproximadamente, confirmando que la resolución de las partículas analizadas se encuentra dentro del rango aceptable de 70 - 130 píxeles estipulado en la metodología, e incluso se supera en la mayoría de las partículas.

4.4. Evaluación del comportamiento de los morteros en estado fresco

El comportamiento de los morteros en estado fresco se evaluó mediante el ensayo de asentamiento del cono, utilizando un procedimiento de adición progresiva de agua, con el fin de analizar la evolución de la consistencia en función de la razón agua/cemento (w/c). Los resultados obtenidos se

presentan en la Figura 18, donde se muestra la diferencia de altura entre el molde y el mortero para cada material y curva granulométrica.

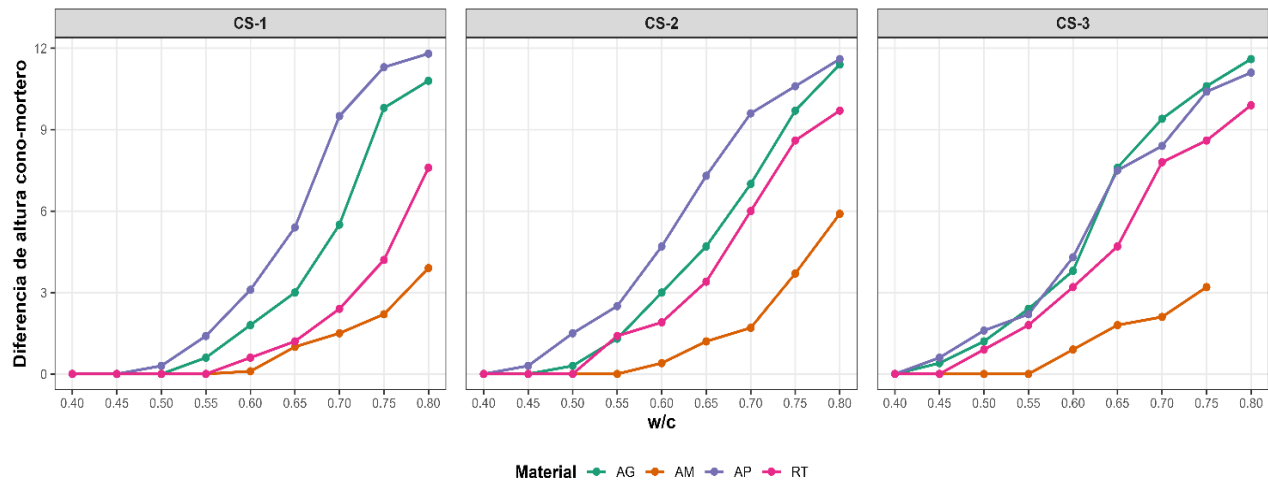


Figura 18. Asentamiento del cono con adición progresiva de agua por razón agua/cemento (w/c)

En general, se observa un incremento sistemático del asentamiento a medida que aumenta la razón agua/cemento, lo que refleja el comportamiento esperado de los morteros frente a la incorporación progresiva de agua.

Se observa que los materiales presentan diferencias significativas en su respuesta a la adición de agua. En particular, el material AM muestra sistemáticamente los menores valores de asentamiento para una misma razón agua/cemento, lo que sugiere una mayor resistencia al flujo y una mayor demanda de agua para alcanzar niveles equivalentes de trabajabilidad. Por el contrario, la AP presenta los mayores valores de asentamiento, indicando una mayor facilidad de deformación en estado fresco. En el Anexo A.8 se presentan imágenes de los resultados de los ensayos de asentamiento del cono de todas las muestras.

Estas diferencias pueden asociarse a la morfología de las partículas, ya que materiales con partículas más angulares y rugosas tienden a generar mayores fuerzas de fricción interna y menor movilidad relativa entre partículas. Este comportamiento también es compatible con lo reportado por Cortes et al. (2008) [17], quienes señalaron que una fluidez adecuada depende que el volumen de pasta supere el volumen de vacíos del agregado fino en estado suelto. Aunque en el presente estudio no se cuantificó directamente dicha relación, las diferencias observadas en asentamiento para una misma razón agua/cemento sugieren variaciones en el empaquetamiento del árido y en la cantidad de pasta efectivamente disponible para permitir el flujo del mortero.

Como evaluación complementaria del comportamiento en estado fresco, se determinó la tendencia a la segregación de los morteros mediante el procedimiento estipulado en la metodología. Para ello, se realizaron ensayos preliminares utilizando pequeñas cantidades de mezcla en distintas condiciones experimentales, incluyendo variaciones en el tiempo de reposo del material y en el tamaño de abertura del tamiz empleado. Sin embargo, en todas las configuraciones ensayadas no se observó precipitación de material a través del tamiz, incluso al utilizar mezclas con las mayores razones agua/cemento consideradas en el estudio.

La ausencia de segregación observada en los ensayos sugiere que las mezclas presentan una adecuada estabilidad en estado fresco dentro del rango de razones agua/cemento evaluadas. Este comportamiento indica que la interacción entre partículas y pasta es suficiente para mantener la cohesión del sistema, evitando la separación de sus componentes incluso en condiciones de mayor contenido de agua

4.5. Relación entre descriptores morfológicos y propiedades macroscópicas

Con el objetivo de evaluar la influencia de la morfología de partícula sobre la respuesta macroscópica de los materiales estudiados, se realizó un análisis de correlación entre los descriptores morfológicos obtenidos mediante procesamiento de imágenes y las variables de respuesta derivadas de los ensayos de corte, trabajabilidad, densidad y ángulo de reposo. Dado que el estudio estuvo compuesto por 12 muestras, correspondientes a la combinación de cuatro materiales y tres curvas granulométricas sintéticas, se empleó el coeficiente de correlación de Spearman, por tratarse de una medida no paramétrica adecuada para tamaños muestrales reducidos y para relaciones monotónicas no necesariamente lineales.

4.5.1. Selección de descriptores morfológicos

Previamente al análisis descriptor-respuesta, se evaluó la redundancia interna entre los descriptores morfológicos disponibles. Para ello, se construyó una matriz de correlación de Spearman exclusivamente entre variables morfológicas, con el propósito de identificar parámetros altamente correlacionados entre sí y, por tanto, potencialmente redundantes desde el punto de vista estadístico e interpretativo. En la Figura 19, se presenta la matriz de correlación de Spearman de los descriptores morfológicos considerados en el estudio.

Los resultados mostraron la existencia de grupos de descriptores con asociaciones muy elevadas, lo que indicó que varios de ellos entregaban información redundante dentro del análisis. Sin embargo,

esta agrupación no debe interpretarse como una clasificación rígida de la morfología, ya que varios parámetros compuestos pueden reflejar simultáneamente más de un aspecto geométrico de la partícula. En consecuencia, la interpretación de los grupos se realizó considerando tanto la definición teórica de cada descriptor como el valor de correlación observado en la matriz.

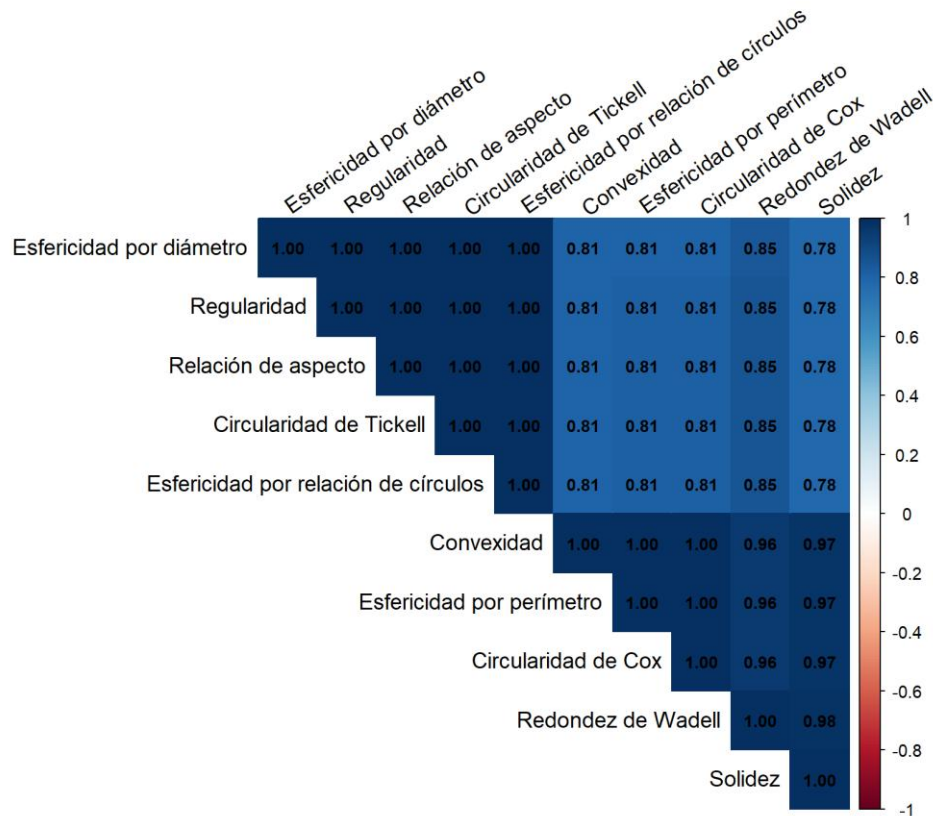


Figura 19. Matriz de correlación de Spearman entre descriptores morfológicos

- Un primer grupo integrado por parámetros como la relación de aspecto, circularidad de Tickell, regularidad, esfericidad por relación de círculos y esfericidad por diámetros, puede asociarse a la forma global de la partícula, ya que dependen de relaciones dimensionales o cercanía a una geometría ideal;
- Un segundo grupo compuesto por la circularidad de Cox, convexidad y esfericidad por perímetros fue interpretado como un conjunto de descriptores compuestos sensibles a la regularidad del contorno proyectado, dado que involucran combinaciones de perímetro, área y/o envolvente convexa, sin representar de manera exclusiva un único aspecto morfológico;
- Y, por último, un tercer grupo representado por la redondez de Wadell y solidez se asociaron estadísticamente en el presente análisis, no obstante, esta relación debe tomarse con cautela

debido a que la redondez de Wadell corresponde a un descriptor clásico de redondez y la solidez está vinculado a la presencia de concavidades o irregularidades del contorno.

A partir de esta estructura de redundancia, se decidió reducir el número de variables morfológicas utilizadas en la etapa final del análisis, seleccionando un descriptor representativo por grupo estadísticamente afin. Esta decisión permite evitar sobreinterpretaciones derivadas de correlacionar múltiples parámetros con comportamientos similares. En consecuencia, se seleccionaron como descriptores representativos los parámetros de regularidad, convexidad y redondez de Wadell, debido a que permiten representar, de manera complementaria, la regularidad general del contorno proyectado, la forma global y la redondez de los bordes.

4.5.2. Definición de indicadores de trabajabilidad

A diferencia de las demás variables de respuesta (variables de caracterización del material), el asentamiento no se encontraba representado por un único valor por muestra, sino por una curva completa de respuesta en función de la relación agua/cemento (w/c). Por esta razón, no resultaba metodológicamente adecuado correlacionar directamente todas las columnas de asentamiento con los descriptores morfológicos, ya que ello habría multiplicado artificialmente el número de comparaciones y dificultado la interpretación física de los resultados.

Para resolver este problema, la curva de asentamiento de cada muestra fue resumida mediante indicadores representativos, los cuáles se presentan a continuación:

- w/c para 3 mm: relación de agua/cemento necesaria para alcanzar un asentamiento objetivo de 3 mm;
- Asentamiento w/c 0.7: asentamiento a una relación fija de agua/cemento de 0.7;
- Área bajo la curva asentamiento- w/c : Área bajo la curva completa de asentamiento- w/c calculada con el método de los trapecios.

En términos interpretativos, un menor valor de w/c para 3 mm indica que una muestra requiere menos agua para alcanzar un asentamiento determinado, mientras que valores mayores de asentamiento w/c 0.7 y el área bajo la curva asentamiento- w/c reflejan una mayor capacidad de deformación del mortero dentro del rango estudiado de relaciones agua/cemento.

4.5.3. Correlación entre morfología y propiedades macroscópicas

Una vez definidos los descriptores morfológicos representativos y los indicadores de trabajabilidad, se calculó la correlación de Spearman entre dichos descriptores y las variables respuesta de interés: cohesión aparente máxima y residual, ángulo de fricción interna máximo y residual, ángulo de reposo, densidad e indicadores de trabajabilidad, como se muestra en la Figura 20.

En el Anexo A.9 se presentan los diagramas de dispersión individuales entre los descriptores morfológicos seleccionados y las variables de respuesta macroscópicas de los materiales, con el fin de visualizar mejor las relaciones entre sí.

Las matrices de correlación presentadas a continuación incluyen simbología de significancia, los símbolos *, ** y *** indican valores p inferiores a 0.05, 0.01 y 0.001, respectivamente, mientras que el símbolo “~” representa una tendencia estadística para valores p inferiores a 0.10. Con el propósito de evaluar la robustez de las asociaciones frente a la realización de múltiples pruebas de correlación, los valores p también fueron ajustados mediante el procedimiento de Benjamini-Hochberg (BH). Los valores p ajustados se presentan en el Anexo A.10 como una verificación complementaria de la robustez estadística de las asociaciones identificadas.

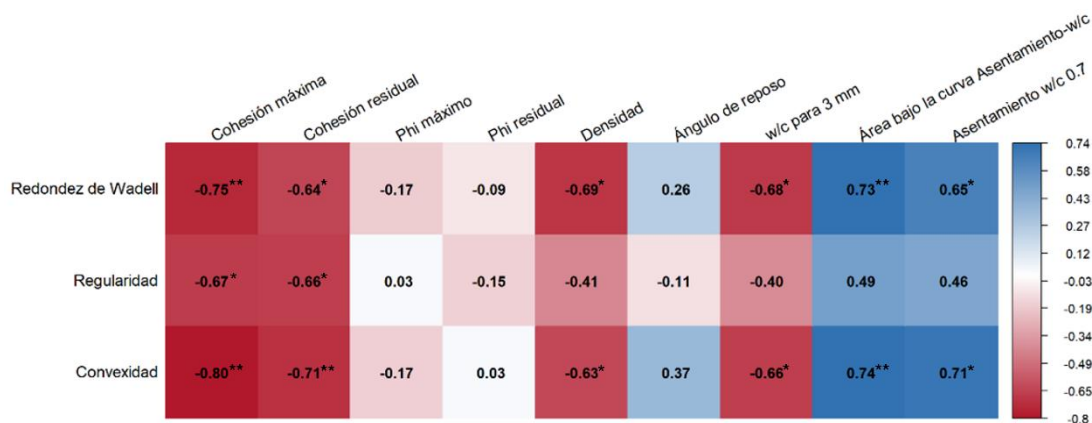


Figura 20. Matriz de correlación de Spearman entre descriptores morfológicos seleccionados y variables respuesta.

En particular, se observó que la convexidad y la redondez de Wadell presentaron correlaciones negativas de magnitud alta con la cohesión aparente máxima. La regularidad mostró la misma tendencia con una intensidad algo menor. En términos físicos, este resultado sugiere que las muestras compuestas por partículas más redondeadas, regulares y convexas tendieron a presentar menores valores de cohesión aparente máxima.

Por otra parte, la relación entre morfología y ángulo de fricción interna, tanto máximo como residual, fue considerablemente más débil. Los coeficientes de correlación obtenidos para $\varphi_{m\acute{a}x}$ y φ_{res} fueron bajos y no mostraron una tendencia suficientemente clara como para sostener una relación robusta dentro del presente estudio. En consecuencia, no resulta conveniente afirmar que la morfología de partícula controló de manera directa el ángulo de fricción interna. Más bien, los resultados sugieren que su efecto se observó con mayor claridad en los indicadores de trabajabilidad del mortero que en los parámetros friccionales del material granular seco.

En el caso del ángulo de reposo y de la densidad, si bien se observaron algunas tendencias, estas fueron menos claras y, por tanto, deben considerarse como resultados complementarios. En particular, la densidad mostró asociaciones moderadas con algunos descriptores morfológicos, aunque su interpretación física requiere mayor cautela, dado que puede estar influida simultáneamente por la forma de partícula, la distribución granulométrica y la composición mineralógica de los materiales.

Respecto de la trabajabilidad, los resultados fueron igualmente consistentes. Los parámetros de convexidad y redondez de Wadell presentaron correlaciones positivas con el asentamiento w/c 0.7 y con el área bajo la curva de asentamiento-w/c, así como correlaciones negativas con w/c para 3 mm.

En conjunto, estos resultados sugieren que, en términos generales, las muestras con partículas más redondeadas, regulares y convexas tendieron a desarrollar mayores asentamientos y, simultáneamente, a requerir menores relaciones agua/cemento (w/c) para alcanzar un nivel de deformación predefinido. En consecuencia, la morfología de partícula mostró una asociación consistente con la trabajabilidad de los morteros realizados.

Desde un punto de vista mecánico, esta tendencia puede interpretarse considerando que, en el mortero, la morfología de las partículas no solo afecta el contacto entre granos, sino también el empaquetamiento del sistema, el volumen de vacíos y la cantidad de pasta necesaria para recubrir y lubricar las partículas durante el flujo. Así, partículas que presentan contornos más suaves y formas más regulares, al presentar menor superficie específica y menor interferencia geométrica tienden a requerir menos pasta para alcanzar una misma consistencia y a oponer menos resistencia al movimiento de la mezcla.

En contraste, partículas más angulosas o irregulares tendieron a aumentar los vacíos, la demanda de pasta y la resistencia al flujo, reduciendo la fluidez del mortero. En ese sentido, el efecto de la morfología pareció ser más evidente en la trabajabilidad del mortero que en el ángulo de fricción

interna del material granular seco, lo que sugiere que su influencia se manifiesta con mayor claridad cuando las partículas interactúan en presencia de la pasta cementicia.

4.5.4. Correlaciones centradas por curva granulométrica

Con el fin de controlar el efecto de la curva granulométrica de las muestras y analizar las diferencias asociadas al material, se realizó un análisis complementario centrando las variables dentro de cada curva sintética. Este procedimiento permitió analizar cómo varían las propiedades macroscópicas entre materiales cuando la curva granulométrica permanece fija, dicho efecto del material se relaciona de forma importante con la morfología de las partículas, aunque también puede incorporar otras características propias del árido, como lo es su mineralogía, textura superficial, entre otras características no capturadas completamente por los descriptores. Para facilitar la interpretación de las asociaciones, los resultados se presentan mediante una matriz de calor de correlaciones de Spearman en la Figura 21.

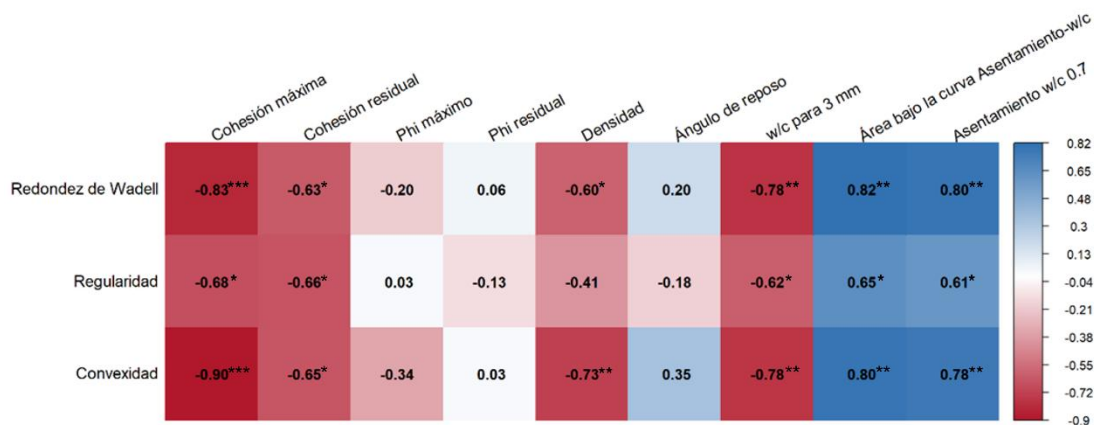


Figura 21. Matriz de correlaciones de Spearman centradas por curva granulométrica

Los resultados obtenidos mostraron que las asociaciones más claras se concentraron tanto en los indicadores de trabajabilidad como en las variables derivadas del ensayo de corte directo. El asentamiento fijo a w/c 0.7 y el área bajo la curva asentamiento-w/c mostraron correlaciones positivas con los descriptores morfológicos, mientras la variable w/c para 3 mm presentó correlaciones negativas con los tres descriptores. Estos resultados indican que, a curva granulométrica fija, las muestras con partículas más redondeadas, convexas y regulares tendieron a presentar mejor trabajabilidad, expresada en mayores asentamientos y una menor relación w/c requerida para alcanzar un nivel dado de deformación.

En el caso de las variables derivadas del ensayo de corte directo, las asociaciones más marcadas se observaron con la cohesión aparente, tanto máximo como residual. Por el contrario, el ángulo de fricción interna máximo y residual presentaron asociaciones débiles o casi nulas. La densidad mostró relaciones negativas de magnitud moderada, mientras el ángulo de reposo exhibió asociaciones débiles y poco consistentes. En consecuencia, al controlar el efecto de la curva granulométrica, las diferencias entre materiales ligados a la morfología mostraron una asociación más consistente con la trabajabilidad y con la cohesión aparente, mientras que con el ángulo de fricción interna resulta mucho menos definido.

4.5.5. Correlaciones centradas controladas por el material

Con el propósito de diferenciar el efecto de la granulometría del efecto estrictamente morfológico, se realizó un análisis complementario centrando las variables dentro de cada material. Este procedimiento permitió evaluar cómo varían las propiedades macroscópicas al modificar la curva granulométrica dentro de un mismo material, reduciendo así la influencia entre áridos. Los resultados se presentan mediante una matriz de calor de correlaciones de Spearman en la Figura 22.

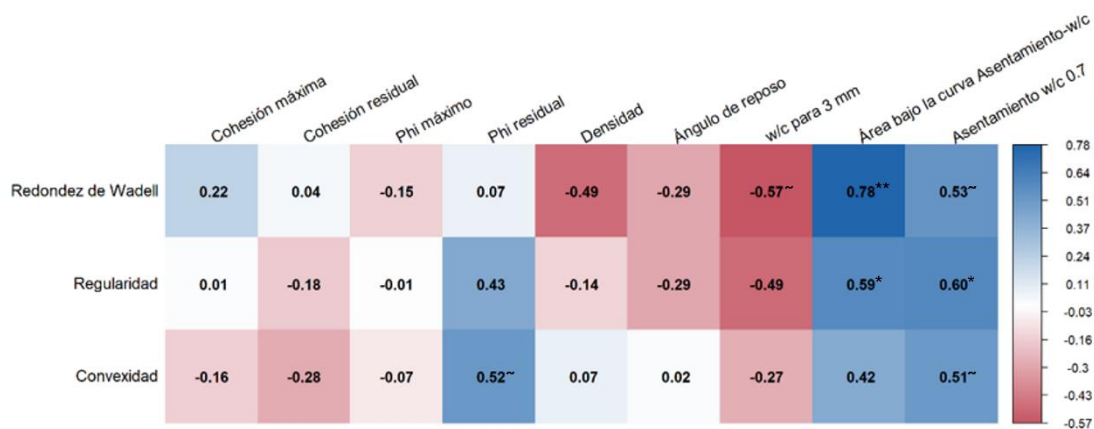


Figura 22. Matriz de correlaciones de Spearman centradas por material

Las correlaciones centradas por material mostraron que las asociaciones más claras se concentraron en los indicadores de trabajabilidad. El asentamiento a $w/c = 0.7$ presentó correlaciones positivas con los descriptores, mientras que el área bajo la curva asentamiento-w/c también mostró relaciones positivas, particularmente con redondez de Wadell. A su vez, la variable w/c para 3 mm presentó correlaciones negativas, destacando redondez de Wadell y regularidad.

En cambio, las variables derivadas del corte directo mostraron asociaciones más débiles y menos consistentes, especialmente en el caso de la cohesión máxima aparente y del ángulo de fricción interna máximo. La cohesión residual tampoco evidenció una tendencia clara, con coeficientes cercanos a cero. En el caso del ángulo de fricción interna residual, se observó una asociación positiva con la convexidad y regularidad, pero no así con la redondez de Wadell. Por su parte la densidad mostró correlaciones negativas moderadas, y en menor medida con la regularidad. Finalmente, el ángulo de reposo exhibió asociaciones débiles a moderadas con la redondez de Wadell y regularidad, y prácticamente nula con convexidad. En consecuencia, al controlar el efecto del material, las variaciones asociadas a la curva granulométrica parecen presentar una relación más clara con los indicadores de trabajabilidad que con la respuesta mecánica obtenida en el ensayo de corte.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las principales conclusiones derivadas del desarrollo de la investigación. En primer lugar, se sintetizan los resultados asociados al cumplimiento de los objetivos metodológicos planteados. Posteriormente, se exponen las principales conclusiones derivadas del análisis experimental y estadístico realizado.

La revisión bibliográfica permitió establecer que, además de la granulometría, la morfología de las partículas constituye un factor relevante en el comportamiento de suelos granulares y morteros. Asimismo, permitió identificar los principales descriptores morfológicos empleados en la literatura y los métodos de caracterización, mediante análisis digital de imágenes, proporcionando el fundamento teórico para la selección de las variables estudiadas y la metodología experimental desarrollada en esta investigación.

La caracterización física y granulométrica permitió clasificar las muestras de acuerdo con las normas técnicas consideradas y construir curvas granulométricas controladas para el desarrollo de los ensayos. Esta etapa permitió aislar, en la medida de lo posible, los efectos de la distribución de tamaños respecto de los asociados a la morfología de las partículas, facilitando la comparación entre materiales naturales y manufacturados bajo condiciones experimentales equivalentes.

La metodología basada en adquisición de imágenes mediante lupa estereoscópica y procesamiento digital con ImageJ y MatLab permitió cuantificar objetivamente distintos descriptores morfológicos de las partículas. Los resultados evidenciaron diferencias consistentes entre los materiales analizados, observándose que las arenas naturales presentaron, en general, mayores valores de redondez, esfericidad y regularidad, mientras que los materiales triturados exhibieron partículas más angulares e irregulares. Estos resultados confirman la utilidad del análisis digital de imágenes como herramienta para caracterizar cuantitativamente la morfología de los áridos.

Las conclusiones derivadas del análisis experimental y estadístico se vinculan con el objetivo específico orientado a evaluar la influencia de las características de los áridos sobre la resistencia al corte y la trabajabilidad de morteros. Estas deben interpretarse dentro de las condiciones experimentales evaluadas, considerando el alcance de la base experimental y del análisis estadístico realizado.

- La distribución granulométrica mostró una asociación sistemática sobre los parámetros de resistencia al corte, observándose un incremento de la cohesión aparente y del ángulo de fricción

interna a medida que aumenta el módulo de finura de las curvas sintéticas, lo que sugiere que granulometrías más gruesas favorecen estructuras granulares más estables y resistentes al corte.

- Se observó que la redondez, regularidad y convexidad presentan correlaciones negativas de magnitud alta con la cohesión aparente máxima, lo que sugiere que las partículas más angulares o irregulares tendieron a asociarse con mayores valores de cohesión aparente debido a un mayor grado de intertrabazón, sin embargo, respecto al ángulo de fricción interna (ϕ), los descriptores morfológicos mostraron relaciones débiles y poco consistentes, lo que sugiere que, en las condiciones evaluadas, el ϕ podría depender de múltiples factores y que la morfología, por sí sola, no explicaría su variación.
- Respecto a la trabajabilidad, al controlar el efecto del material, las variaciones granulométricas mostraron asociaciones más consistentes con los indicadores de trabajabilidad que con las variables de resistencia al corte, lo que sugiere que la distribución de tamaños desempeña un papel relevante en el comportamiento del mortero en estado fresco.
- En cuanto a la morfología, se observó que partículas más redondeadas y regulares tienden a generar mayores valores de asentamiento y requerir menores relaciones agua/cemento para alcanzar niveles equivalentes de deformación.
- Respecto a la segregación, no se observaron diferencias medibles entre las mezclas evaluadas mediante el procedimiento empleado, por lo que no fue posible establecer correlaciones con los descriptores morfológicos, la granulometría ni las demás variables de respuesta consideradas.
- Del análisis de correlaciones centradas, se mostró que, al controlar tanto la curva granulométrica como el material, las asociaciones más consistentes se concentraron en los indicadores de trabajabilidad, mientras que las variables mecánicas mostraron relaciones débiles.
- Finalmente, no se observó una relación directa entre los parámetros de resistencia al corte de los áridos y los indicadores de trabajabilidad de los morteros, lo que sugiere que ambas respuestas están gobernadas por mecanismos físicos distintos dentro de las condiciones evaluadas.

En términos generales, los resultados obtenidos permiten concluir que el objetivo general de la investigación fue alcanzado, al establecerse relaciones entre las características granulométricas y morfológicas de los áridos y su comportamiento tanto en resistencia al corte como en trabajabilidad de morteros. En particular, la granulometría mostró una asociación más consistente con la resistencia al corte, mientras que la morfología se asoció con mayor claridad con las diferencias observadas en la trabajabilidad, aportando antecedentes que complementan la caracterización tradicional de los áridos

y que podrían contribuir a su selección en aplicaciones donde el desempeño mecánico y reológico resulta relevante.

Para futuras investigaciones, sería recomendable ampliar el número de muestras estudiadas e incorporar su caracterización mineralógica, con el fin de discriminar con mayor precisión el efecto relativo de la composición y de la morfología de las partículas. Asimismo, resultaría pertinente complementar el análisis bidimensional empleado en este trabajo con mediciones tridimensionales de la morfología, de manera de representar con mayor fidelidad la geometría real de los granos. Del mismo modo, sería conveniente incorporar indicadores reológicos adicionales, tales como el esfuerzo de fluencia y la viscosidad plástica, que permitan profundizar en la interpretación del comportamiento del mortero en estado fresco. Finalmente, se sugiere analizar con mayor detalle la interacción entre la morfología de las partículas y el contenido de finos, particularmente en su influencia sobre la trabajabilidad y en aplicaciones específicas como el hormigón proyectado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Quiroga, P. N. (2003). The effect of the aggregate's characteristics on the performance of Portland cement concrete (Tesis doctoral). The University of Texas at Austin, Austin, Estados Unidos. <https://search.proquest.com/openview/0bf74435120c6154e2fc2cc04489c215/1> (Revisado 31/03/2026)
- [2] Grand View Research. (2024). Concrete market size, share & trends analysis report by application, by region, and segment forecasts, 2025-2030. Grand View Research. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/concrete-market-report> (Revisado 31/03/2026)
- [3] Farfan, J., Fasihi, M., & Breyer, C. (2019). Trends in the global cement industry and opportunities for long-term sustainable CCU potential for Power-to-X. *Journal of Cleaner Production*, 217, 821-835. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.01.226> (Revisado 31/03/2026)
- [4] Pilkey, O., Longo, N., Neal, W., Rangel-Buitrago, N., Pilkey, K., & Hayes, H. (2023). *Vanishing sands: Losing beaches to mining* (Electronic ed.). Duke University Press. <https://doi.org/10.1215/9781478023432> (Revisado 31/03/2026)
- [5] United Nations Environment Programme. (2022). Sand and sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis. UNEP. <https://www.unep.org/resources/report/sand-and-sustainability-10-strategic-recommendations-avert-crisis> (Revisado 31/03/2026)
- [6] Instituto Nacional de Normalización (INN). (2013). NCh163:2013: Áridos para morteros y hormigones - Requisitos. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización.
- [7] Instituto Nacional de Normalización (INN). (2009). NCh165:2009 Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización.
- [8] Gismera, S. (2019). Comportamiento reológico de cementos y morteros activados alcalinamente: influencia de las variables del proceso (Tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid.
- [9] He, X., Fang, Y., Peng, Y., Shen, W., Qiao, D., & Wang, M. (2022). Mortar's rheological property and workability investigation based on morphology impact factor for graded sand particles. *Construction and Building Materials*, 328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126987> (Revisado 31/03/2026)
- [10] American Concrete Institute (ACI). ACI concrete terminology (ACI CT-13). Farmington Hills, Michigan, Estados Unidos: American Concrete Institute, 2013.
- [11] EFNARC. (2005). The European guidelines for self-compacting concrete (SCC): Specification, production and use. European Federation of National Associations Representing for Concrete (EFNARC)
- [12] American Concrete Institute (ACI). (2021). Form pressure exerted by self-consolidating concrete: Primary factors and prediction models (ACI PRC-237.2-21). Farmington Hills, Michigan, Estados Unidos.
- [13] British Standards Institution. (s. f.). BS EN 1015: Methods of test for mortar for masonry [Serie de normas multipartes]. BSI Standards. <https://doi.org/10.3403/BSEN1015>
- [14] Instituto Nacional de Normalización (INN). (2009). NCh1019:2009 Hormigón - Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización.

- [15] Instituto Nacional de Normalización (INN). (1996). NCh2257/3:1996 Morteros - Determinación de la consistencia - Parte 3: Método de asentamiento del cono. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización.
- [16] ASTM International. (2020). Standard test method for flow of hydraulic cement mortar (ASTM C1437-20). ASTM International.
- [17] Cortes, D., Kim, H., Palomino, A., & Santamarina, J. (2008). Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands. *Cement and Concrete Research*, 38(10), 1142-1147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.020> (Revisado 31/03/2026)
- [18] European Committee for Standardization (CEN). (2010). Testing fresh concrete — Part 11: Self-compacting concrete - Sieve segregation test (EN 12350-11). Bruselas, Bélgica: CEN
- [19] EFNARC. (1996). European specification for sprayed concrete (ISBN 0-9522483-1-X). European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures.
- [20] European Committee for Standardization. (2008). EN 14487-1:2022, Sprayed concrete - Part 1: Definitions, specifications and conformity.
- [21] American Shotcrete Association (ASA). (2014). Shotcrete for the mining industry. Farmington Hills, Michigan, Estados Unidos: American Shotcrete Association.
- [22] Wong, G., Alexander, A., Haskins, R., Poole, T., Malone, P., & Wakeley, L. (2001). Portland-cement concrete rheology and workability: Final report (FHWA-RD-00-025). Federal Highway Administration, Estados Unidos. Department of Transportation.
- [23] EFNARC. (2006). Guidelines for viscosity modifying admixtures for concrete. European Federation of National Associations Representing for Concrete.
- [24] Guo, H., Wang, S., Guo, C., Yang, K., Guo, R., Fu, J., Nan, Y., & Tao, M. (2023). Effect of grain size distribution on the shear properties of sand. *Frontiers in Materials*, 10, 1219765. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1219765> (Revisado 31/03/2026)
- [25] Cho, G.-C., Dodds, J., & Santamarina, J. C. (2006). Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132, 591-602.
- [26] Sezer Alper, Altun Selim, & Göktepe Burak Ahmet. (2011). Relationship between shape characteristics and shear strength of sands. *Soils and Foundations - Japanese Geotechnical Society*, 51(5), 857-871. <https://doi.org/10.3208/sandf.51.857> (Revisado 31/03/2026)
- [27] Hoek, E. (s. f.). Practical Rock Engineering. Rocscience, Hoek's Corner.
- [28] Vangla, P., & Latha, G. M. (2015). Influence of Particle Size on the Friction and Interfacial Shear Strength of Sands of Similar Morphology. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s40891-014-0008-9> (Revisado 31/03/2026)
- [29] Islam, M., Siddika, A., Hossain, B., Rahman, A., & Asad, A. (2011). Effect of Particle Size on the Shear Strength Behaviour of Sands. *Australian Geomechanics*, 46(3), 75-86.
- [30] Eteraf, H., Kovacs, B., Mikita, V., & Delshad, Z. (2023). Effect of particle size distribution on shear strength of soil. *MATEC Web of Conferences*, 385, 01043. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202338501043> (Revisado 31/03/2026)
- [31] ASTM International. (2017). ASTM D2487: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, Pensilvania
- [32] Altuhafi, F. N., Coop, M. R., & Georgiannou, V. N. (2016). Effect of Particle Shape on the Mechanical Behavior of Natural Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*

- Engineering, 142(12). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001569](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001569) (Revisado 31/03/2026)
- [33] Prabhakar, & Ramasamy, A. (2024). Influence of morphological features on mechanical properties of granular soils from different depositional environments. Powder Technology, 435. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119399> (Revisado 31/03/2026)
- [34] Alshibli, K., & Alsaleh, M. (2004). Characterizing Surface Roughness and Shape of Sands Using Digital Microscopy. Journal of Computing in Civil Engineering, 18, 36-45.
- [35] Bagheri, G., Bonadonna, C., Manzella, I., & Vonlanthen, P. (2015). On the characterization of size and shape of irregular particles. Powder Technology, 270(Part A), 141-153. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.10.015> (Revisado 31/03/2026)
- [36] Santamarina, J., & Cho, G. (2004). Soil behavior: The role of particle shape. In Advances in geotechnical engineering: The Skempton conference: Proceedings of a three-day conference on advances in geotechnical engineering, organized by the Institution of Civil Engineers and held at the Royal Geographical Society, Londres, Reino Unido, on 29-31 March 2004 (pp. 604-617). Thomas Telford Publishing.
- [37] Altuhafi, F., O'Sullivan, C., & Cavarretta, I. (2013). Analysis of an Image-Based Method to Quantify the Size and Shape of Sand Particles. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139(8), 1290-1307. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000855](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000855) (Revisado 31/03/2026)
- [38] Anusree, K., & Latha, G. M. (2023). Characterization of sand particle morphology: state-of-the-art. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 82(269). <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03309-x> (Revisado 31/03/2026)
- [39] Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J., & Forssberg, E. (2008). Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. Cement and Concrete Composites, 30(4), 274-282. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.08.008> (Revisado 31/03/2026)
- [40] Li, T., Nogueira, R., de Brito, J., & Liu, J. (2023). Influence of fine aggregate's morphology on mortars' rheology. Journal of Building Engineering, 63. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105450> (Revisado 31/03/2026)
- [41] Gismera, S., Alonso, M. del M., & Puertas, F. (2018). Influencia de la naturaleza y granulometría de los áridos en el comportamiento reológico de morteros de cementos activados alcalinamente. V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales. <https://doi.org/10.4995/hac2018.2018.6002> (Revisado 31/03/2026)
- [42] Li, T., Zhou, Y., Zhu, J., & Liu, J. (2022). Effect of fine aggregate gradation on the rheology of mortar. Construction and Building Materials, 332. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127362> (Revisado 31/03/2026)
- [43] León, M., & Ramírez, F. (2010). Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. Revista Ingeniería de Construcción, 25(2), 215-240.
- [44] Hafid, H., Ovarlez, G., Toussaint, F., Jezequel, P. H., & Roussel, N. (2016). Effect of particle morphological parameters on sand grains packing properties and rheology of model mortars. Cement and Concrete Research, 80, 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.11.002> (Revisado 31/03/2026)
- [45] Barrett, P. J. (1980). The shape of rock particles, a critical review. Sedimentology, 27, 291-303.

- [46] Blott, S. J., & Pye, K. (2008). Particle shape: A review and new methods of characterization and classification. In *Sedimentology* (Vol. 55, Issue 1, pp. 31-63). <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2007.00892.x> (Revisado 31/03/2026)
- [47] Zheng, J., & Hryciw, R. D. (2015). Traditional soil particle sphericity, roundness and surface roughness by computational geometry. *Géotechnique*, 65(6), 494-506.
- [48] Wadell H (1932) Volume, shape, and roundness of rock particles. *J Geol* 40:443-451. <https://doi.org/10.1086/623964> (Revisado 31/03/2026)
- [49] Zhou, B., Wang, J., & Zhao, B. (2015). Micromorphology characterization and reconstruction of sand particles using micro X-ray tomography and spherical harmonics. *Engineering Geology*, 184, 126-137. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.11.009> (Revisado 31/03/2026)
- [51] Vallejo, L. E. (1995). Fractal analysis of granular materials. *Géotechnique*, 45(1), 159-163.
- [52] Krumbein WC, Sloss LL (1951) *Stratigraphy and sedimentation*. W.H. Freeman and Company, San Francisco
- [53] Sun, Q., Zheng, J., Coop, M. R., & Altuhafi, F. N. (2019). Minimum image quality for reliable optical characterizations of soil particle shapes. *Computers and Geotechnics*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103110> (Revisado 31/03/2026)
- [54] Hillerns, C. S. (2025). Remociones en masa del límite sur oriental de la Península de Tumbes y su relación con la falla San Vicente, Talcahuano, Región del Biobío, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo/a. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra. Concepción
- [55] Contreras, M., Romero, M., Gázquez, M., & Bolívar, J. (2022). Construction and demolition waste as recycled aggregate for environmentally friendly concrete paving. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 9826-9840. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15849-4> (Revisado 31/03/2026)
- [56] Vives, G. V. (2024). Evaluación del sellado de pozo como método para la reducción del contenido de Fe y Mn en aguas subterráneas, Unihue, Región del Bío-Bío, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo/a, Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- [57] ASTM International. (2023). ASTM B214-16 (2023): Standard test method for sieve analysis of metal powders. West Conshohocken, Pensilvania: ASTM International.
- [58] ASTM International. (2000). ASTM C1444-00. Standard Test Method for Measuring the Angle of Repose of Free-Flowing Mold Powders. West Conshohocken, Pensilvania: ASTM International
- [59] Cbb Cementos. (2019). Cemento especial puzolánico: Ficha técnica del producto. Chile: Cbb Cementos.
- [60] Wang, Y., Lang, A., & Pan, W. (2017). Bagging nearest-neighbor prediction independence test. *Bioinformatics*, 33(22), 3603-3609. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12783-9> (Revisado 31/03/2026)
- [61] Hollander, M., Wolfe, D. A., & Chicken, E. (2014). *Nonparametric statistical methods* (3rd ed.). Wiley.
- [62] Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 57(1), 289-300.
- [63] Enders, C., & Tofighi, D. (2007). Supplemental Material for Centering Predictor Variables in Cross-Sectional Multilevel Models: A New Look at an Old Issue. *Psychological*

Methods, 12, 121-138. <https://doi.org/10.1037/1082-989x.12.2.121.supp> (Revisado 31/03/2026)

7. ANEXOS

A.1. Serie preferida de tamices NCh165:2009

Tabla A.1.1. Serie de tamices de árido para hormigón

Serie preferida	Serie complementaria	Serie combinada
75	-	75
-	63	63
-	50	50
37.5	-	37.5
-	25	25
19	-	19
-	12.5	12.5
9.5	-	9.5
4.75	-	4.75
2.36	-	2.36
1.18	-	1.18
0.6	-	0.6
0.3	-	0.3
0.15	-	0.15

A.2. Procedimiento de mezclado con adición progresiva de agua para el ensayo de asentamiento del cono

La mezcla inicial del mortero se preparó mediante un procedimiento controlado y cronometrado en todas sus etapas. En primer lugar, se mezclaron el agua y el cemento durante 30 s para formar la pasta inicial. Posteriormente, se incorporó la arena y se continuó con un mezclado inicial a velocidad lenta durante 60 s. A continuación, la mezcla se dejó en reposo durante 1 min, realizando el raspado del mortero adherido a las paredes del recipiente. Luego, se aplicó un mezclado a velocidad alta durante 30 s, seguido de una homogenización final de 15 s. Una vez obtenida una mezcla uniforme, se procedió al llenado del cono, operación que se realizó en un tiempo aproximado de 2 min 30 s. El cono se levantó en 10 s y, posteriormente, se registró la altura del mortero y se tomaron fotografías en vista frontal en un tiempo aproximado de 20 s.

Finalizada la primera medición, el material fue recuperado desde la batea en aproximadamente 45 s, tras lo cual se incorporó un incremento controlado de agua en 5 s para aumentar progresivamente la relación agua/cemento. Luego, la mezcla fue reamasada a velocidad alta durante 30 s, dejada en reposo por 30 s y nuevamente mezclada a velocidad alta durante 15 s, seguida de una homogenización final de 15 s. Una vez alcanzada una consistencia uniforme, se repitió el procedimiento de llenado del cono, levantamiento, medición de altura y registro fotográfico, manteniendo control cronometrado en cada etapa. Este ciclo de incremento de agua y remezclado se repitió sucesivamente hasta alcanzar la relación agua/cemento máxima definida para el estudio.

A.3. Representación de los diámetros característicos de las curvas sintéticas

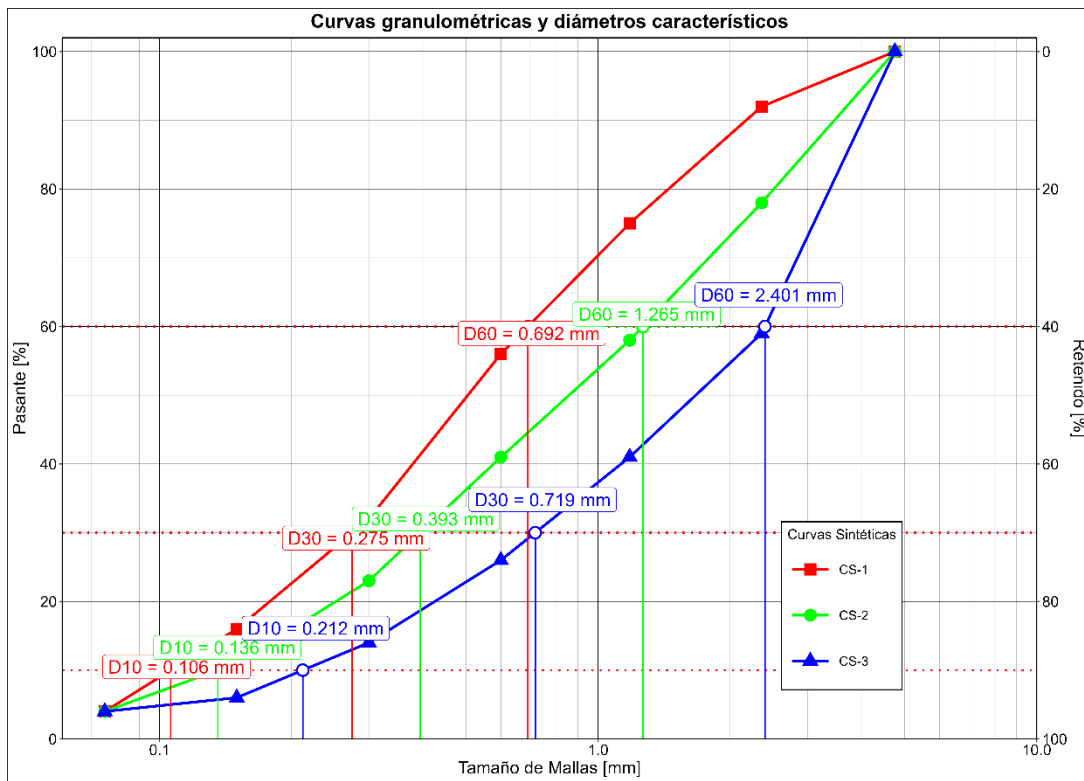


Figura 23. Curvas granulométricas sintéticas y sus diámetros característicos

A.4. Envolventes de falla máxima y residual por muestra

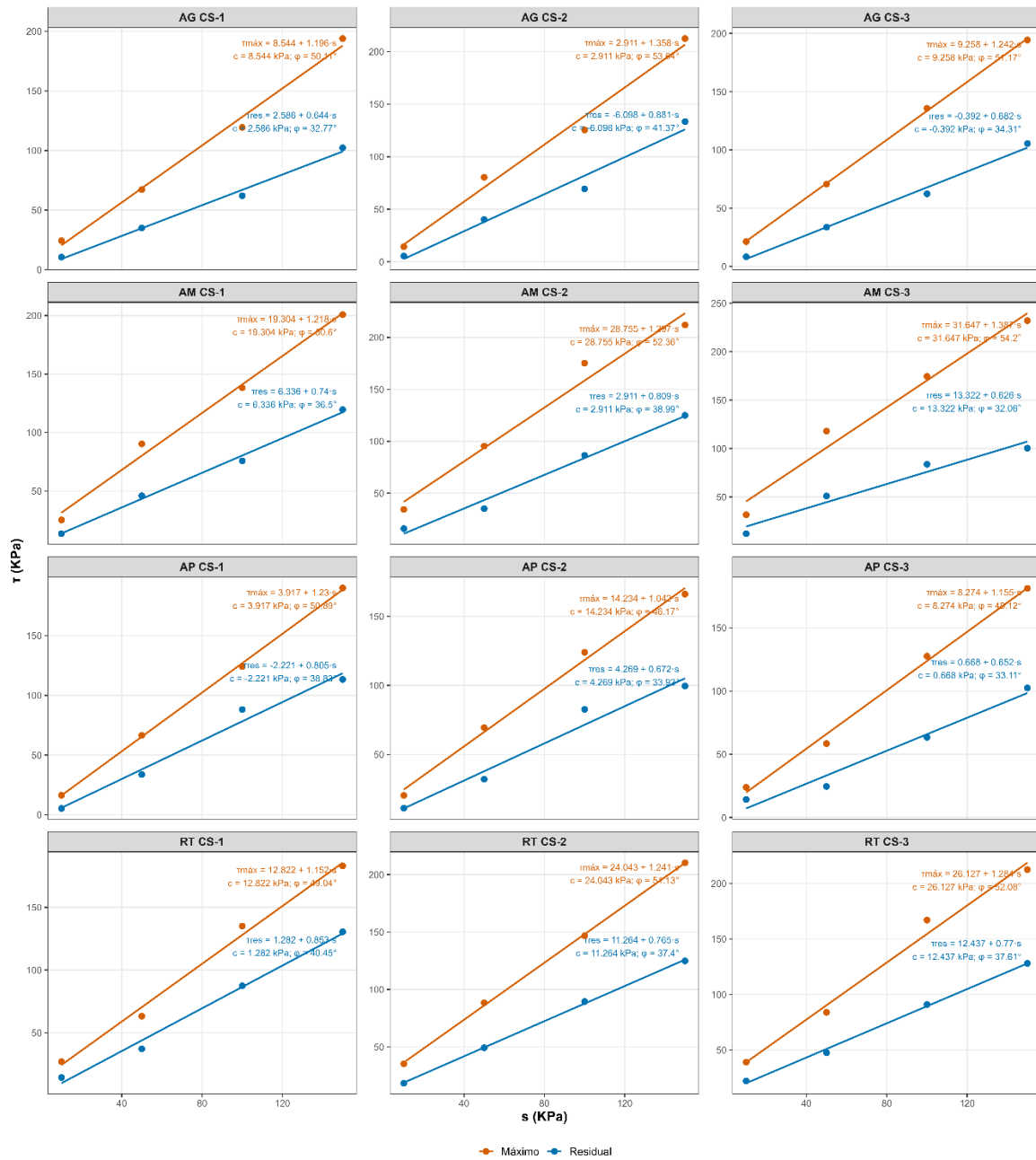


Figura 24. Envolventes de falla máxima y residual por muestra

A.5. Curvas esfuerzo corte-altura de deformación

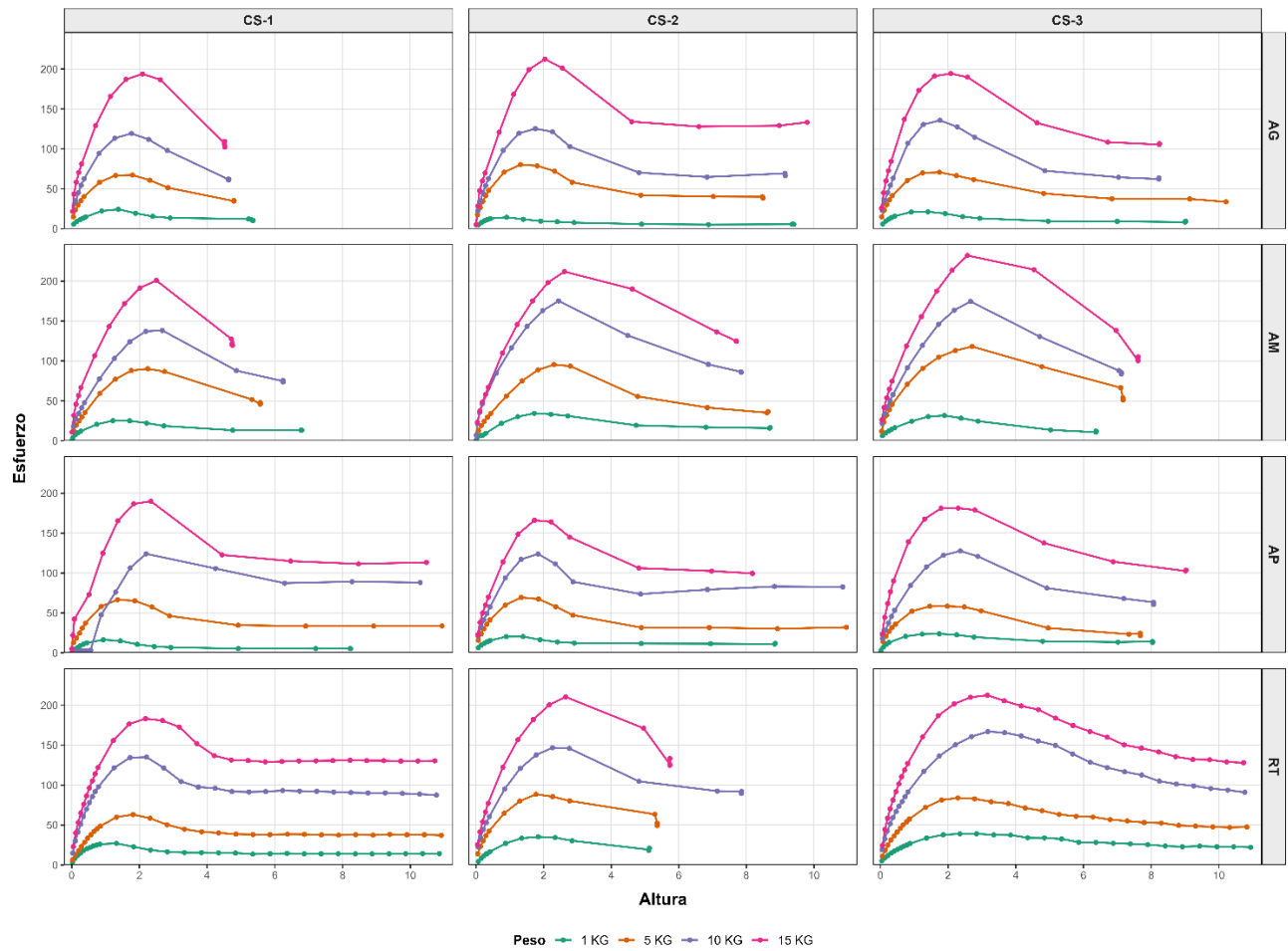


Figura 25. Curvas esfuerzo de corte (kPa)- altura de deformación (mm) según material, tipo de curva y peso aplicado

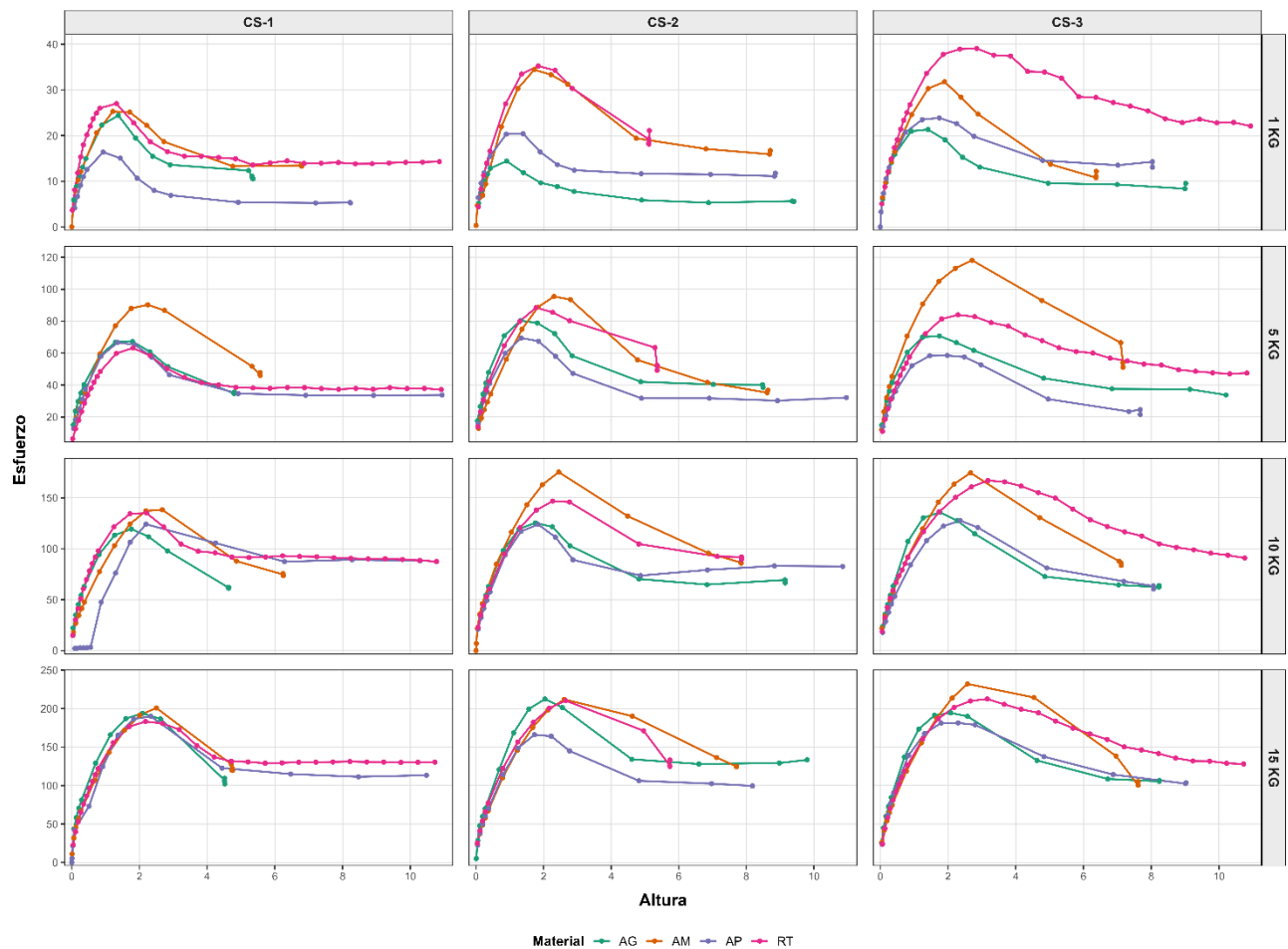


Figura 26. Curvas esfuerzo de corte (kPa)- altura de deformación (mm) según peso aplicado, tipo de curva y material

Las curvas esfuerzo de corte-altura de deformación presentadas en la Figura 25 y 26 muestran un comportamiento típico de materiales granulares sometidos a corte directo, caracterizado por un incremento inicial rápido del esfuerzo cortante hasta alcanzar un valor máximo, seguido de una reducción gradual hacia un estado residual más estable. Asimismo, se aprecia que el incremento del peso normal aplicado produce un aumento sistemático en la resistencia al corte, lo que confirma la dependencia directa entre esfuerzo normal y resistencia cortante descrita por el criterio de Mohr-Coulomb.

A.6. Histogramas de los descriptores morfológicos estudiados

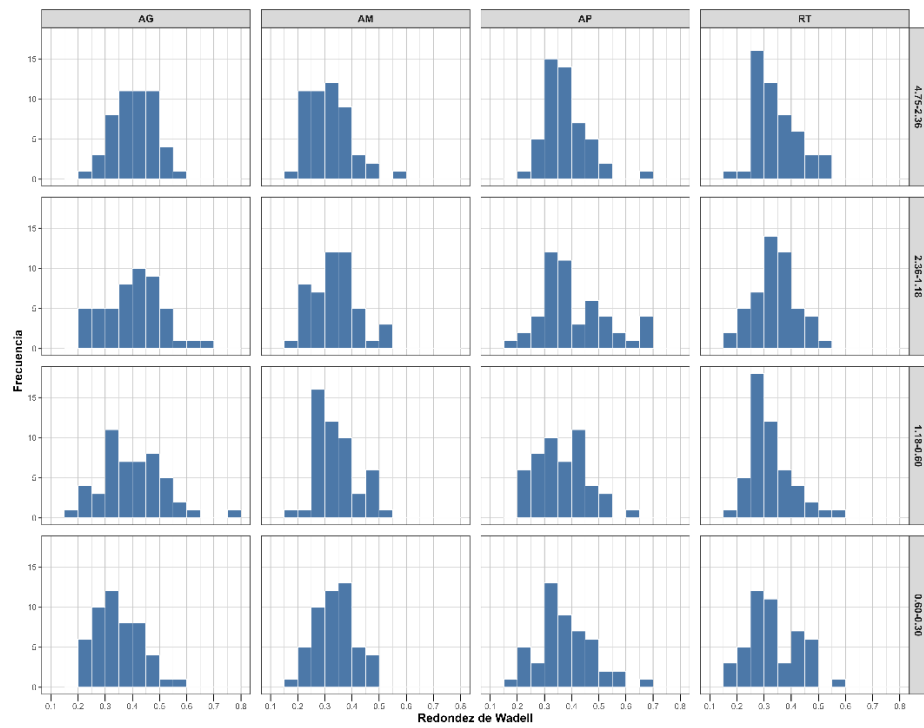


Figura 27. Histograma de la redondez de Wadell

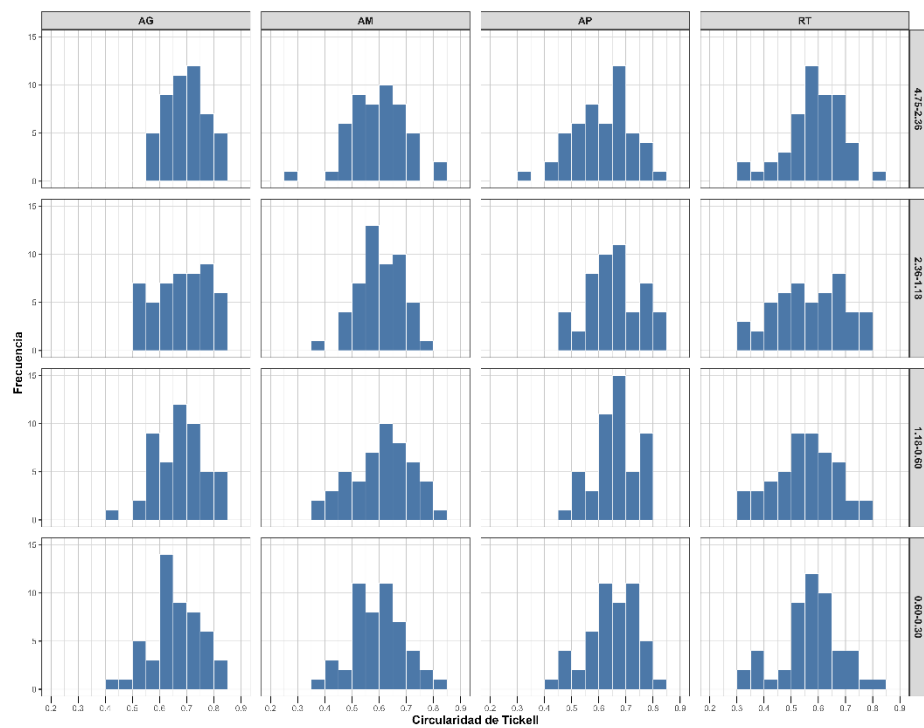


Figura 28. Histograma de la circularidad de Tickell

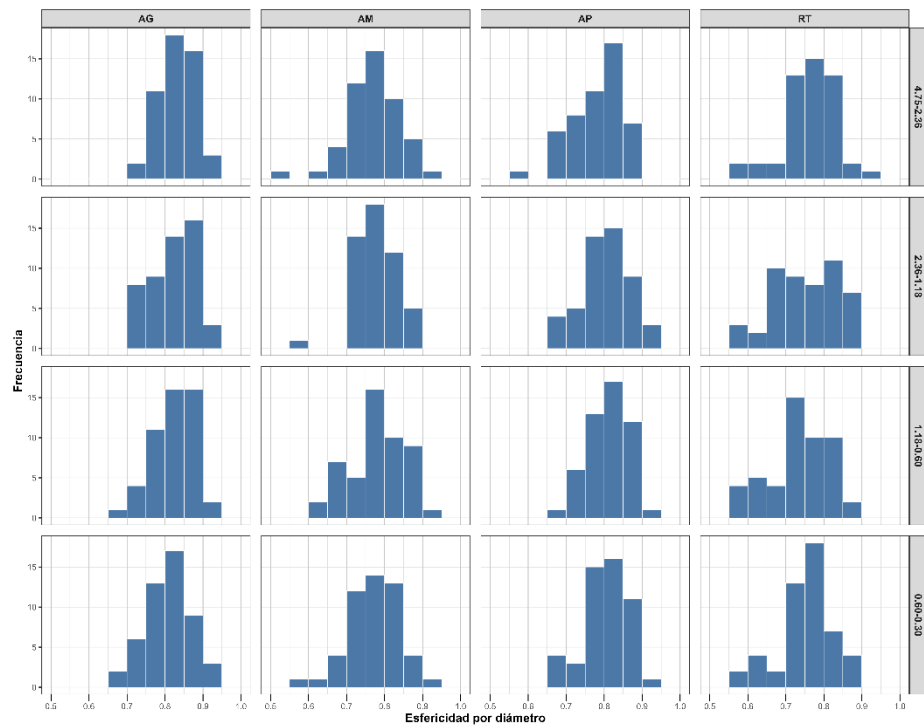


Figura 29. Histograma de la esfericidad por diámetro

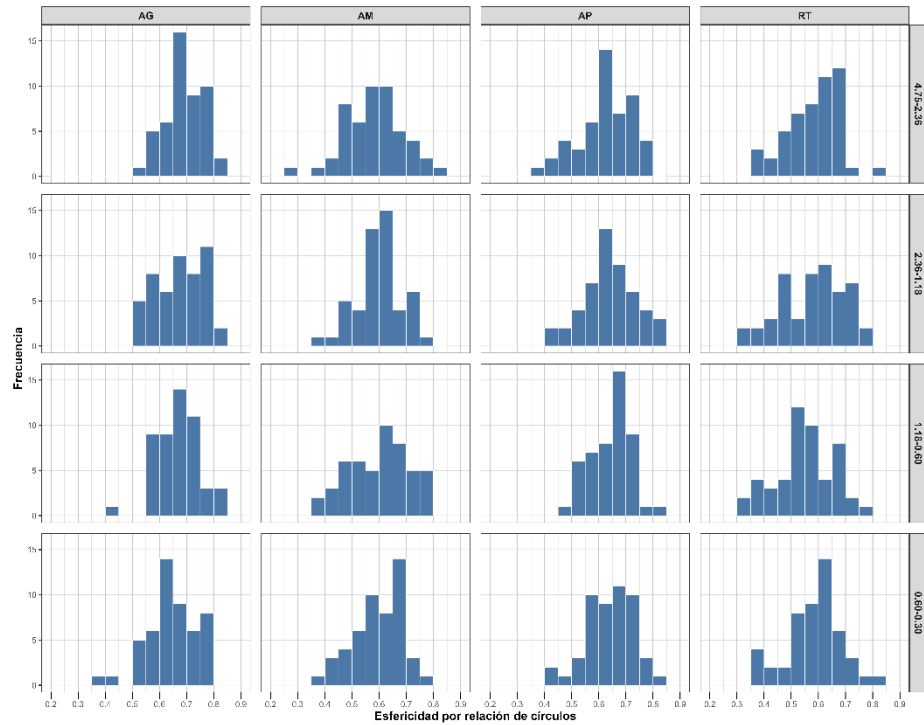


Figura 30. Histograma de la esfericidad por relación de círculos

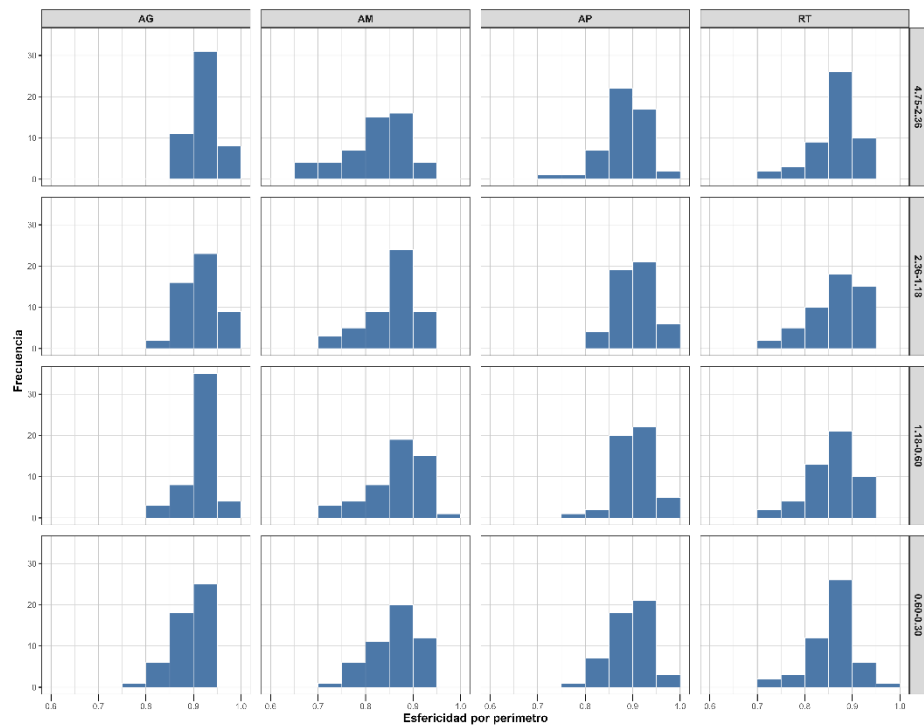


Figura 31. Histograma de la esfericidad por perímetro

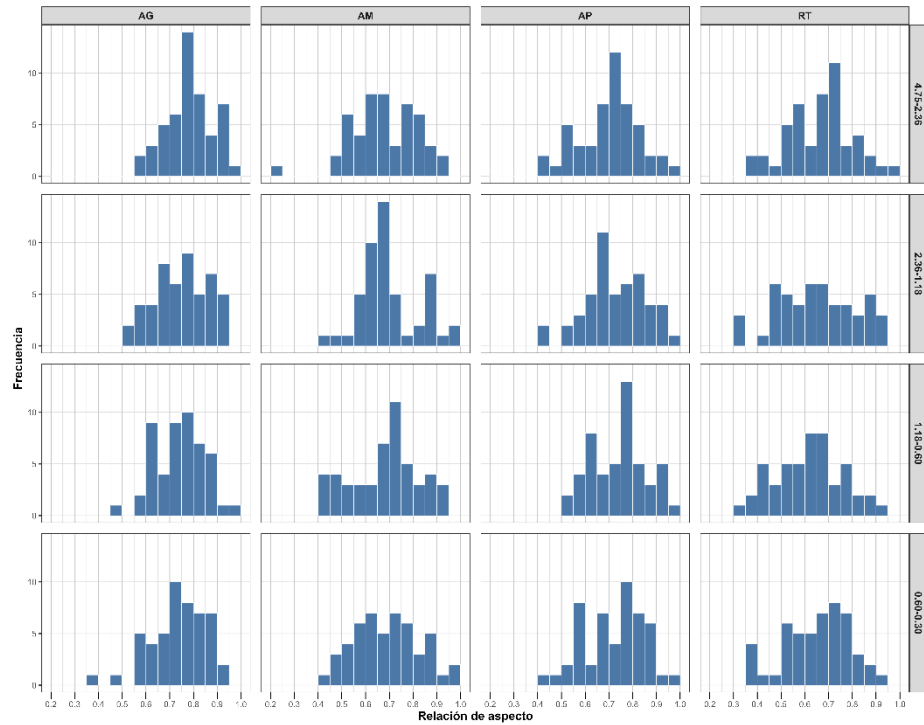


Figura 32. Histograma de la relación de aspecto

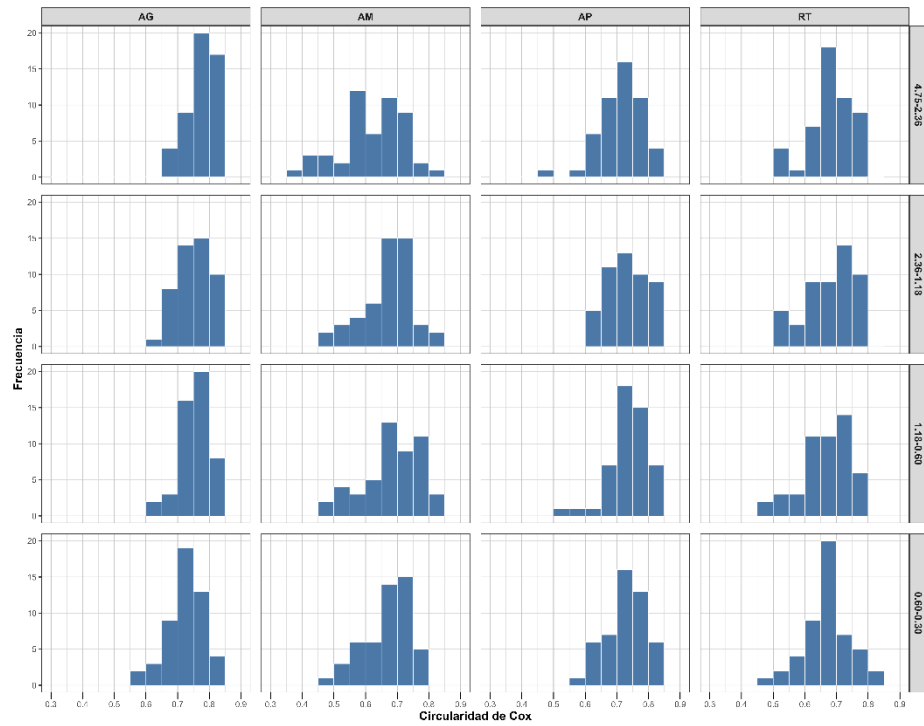


Figura 33. Histograma de la circularidad de Cox

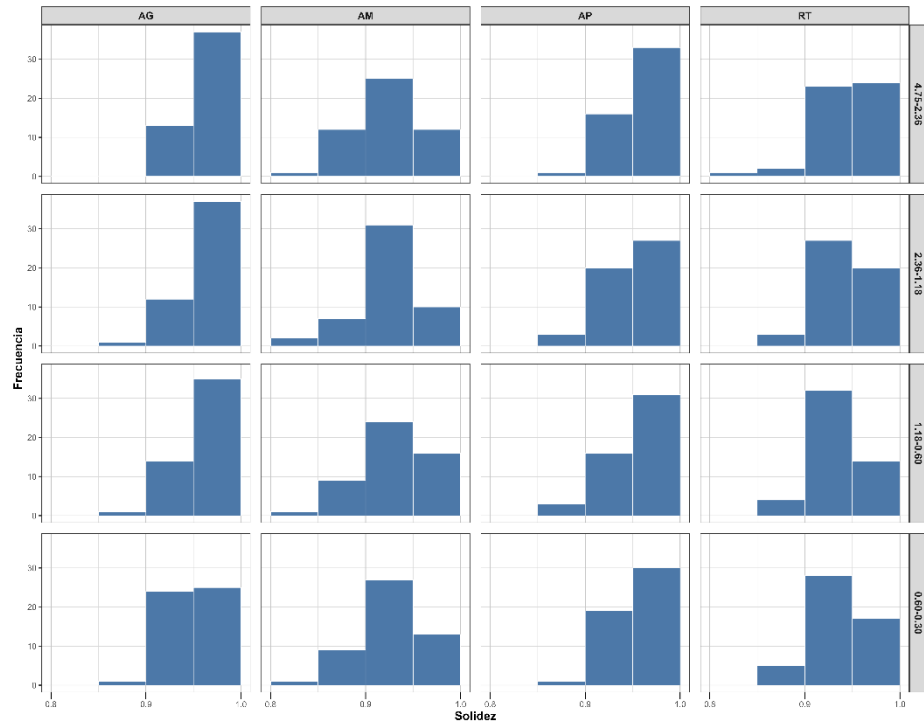


Figura 34. Histograma de la solidez

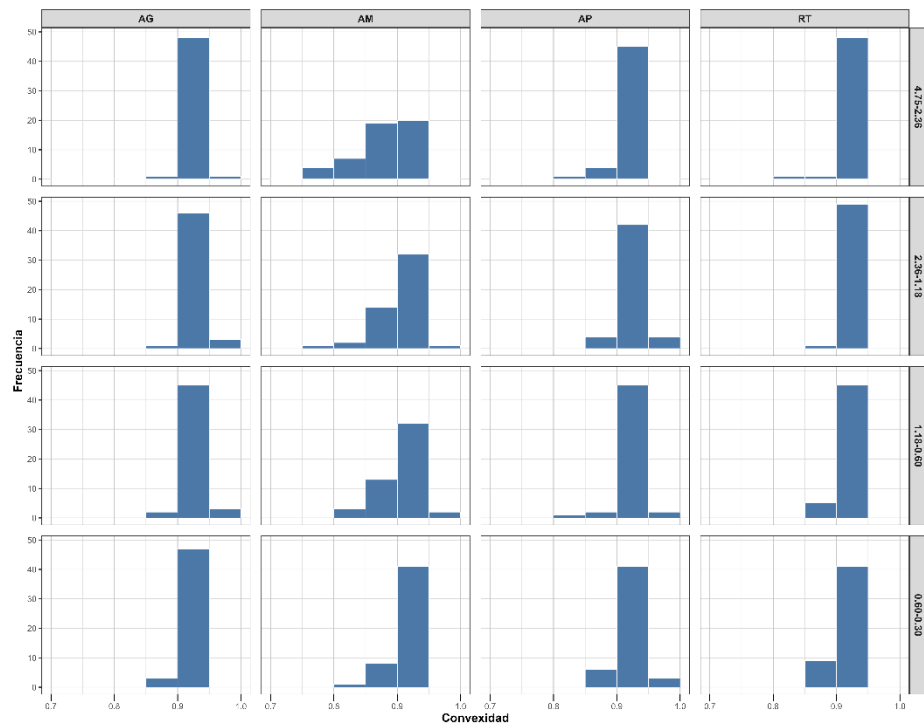


Figura 35. Histograma de la convexidad

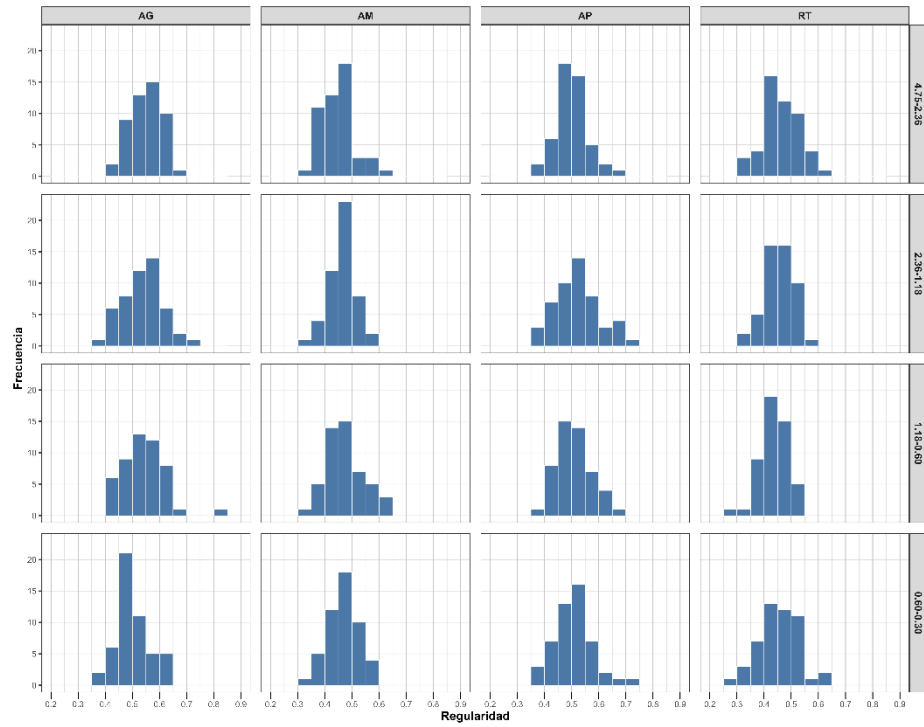


Figura 36. Histograma de la regularidad

A.7. Diagramas de caja de los descriptores morfológicos estudiados

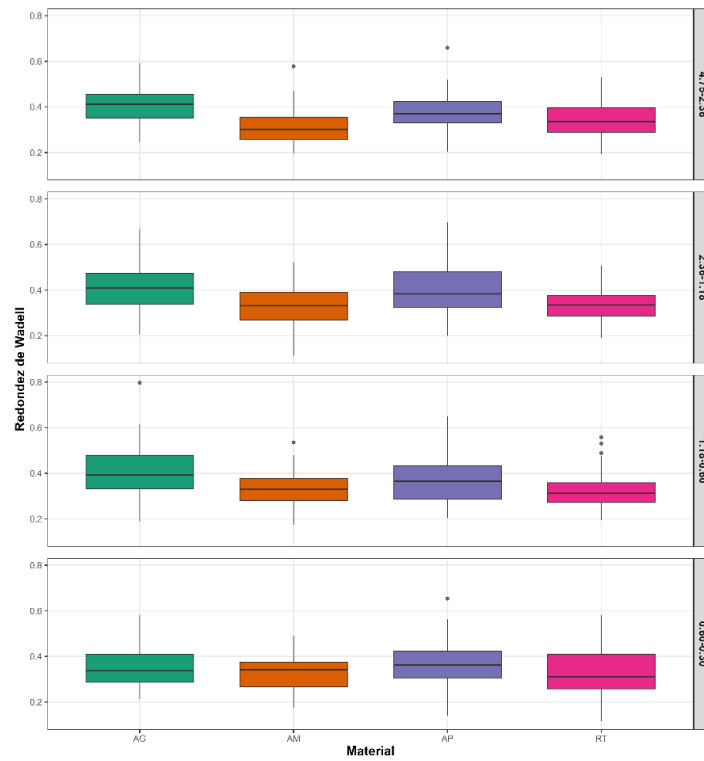


Figura 37. Diagrama de caja de la redondez de Wadell

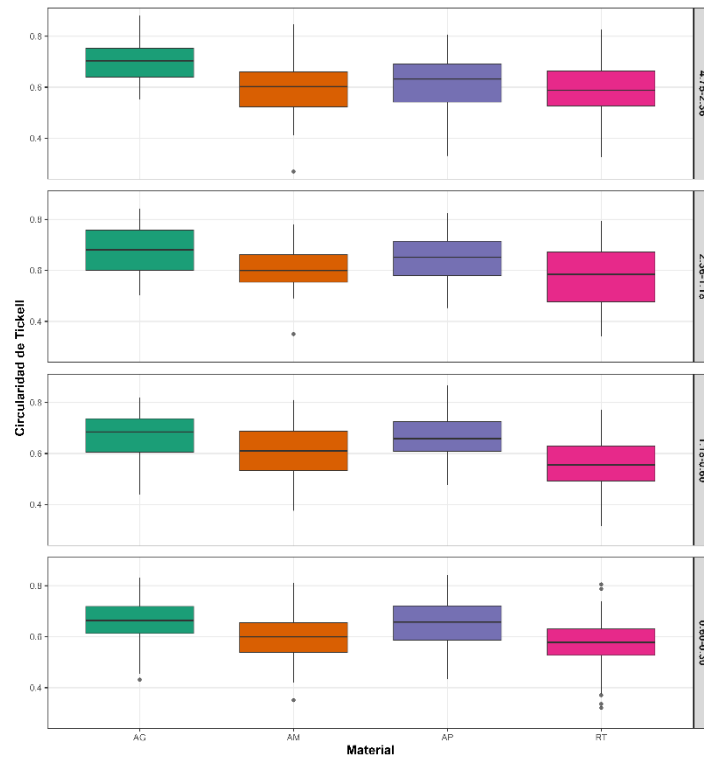


Figura 38. Diagrama de caja de la circularidad de Tickell

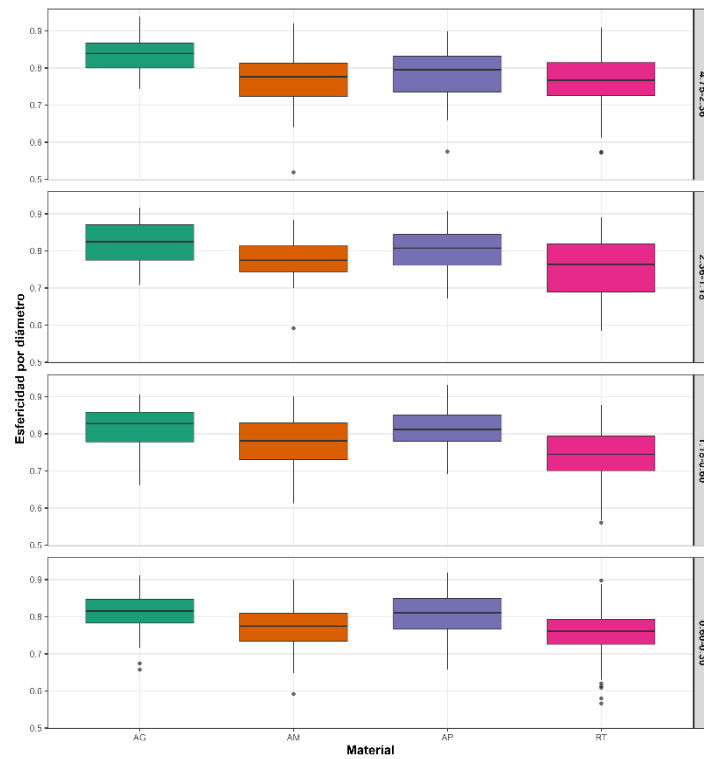


Figura 39. Diagrama de caja de la esfericidad por diámetro

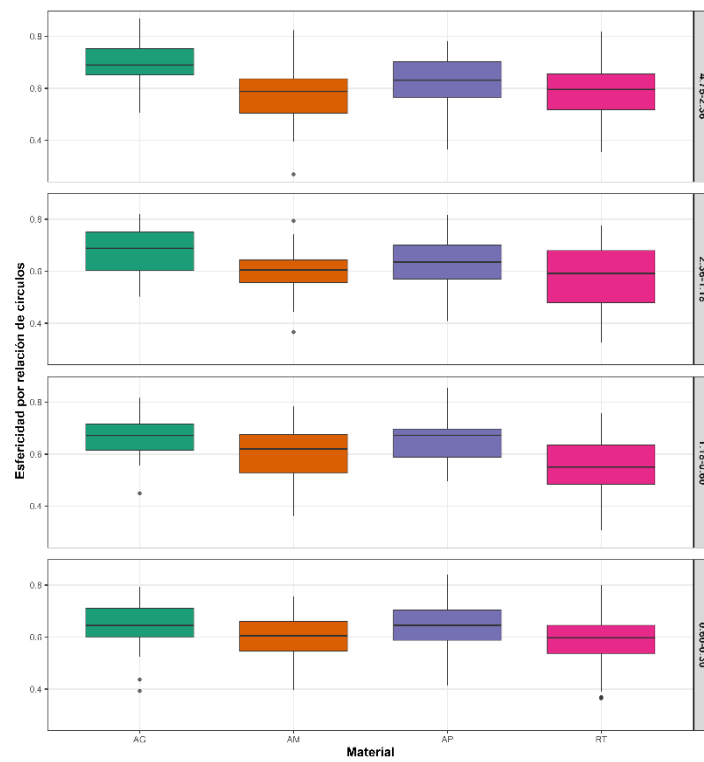


Figura 40. Diagrama de caja de la esfericidad por relación de círculos

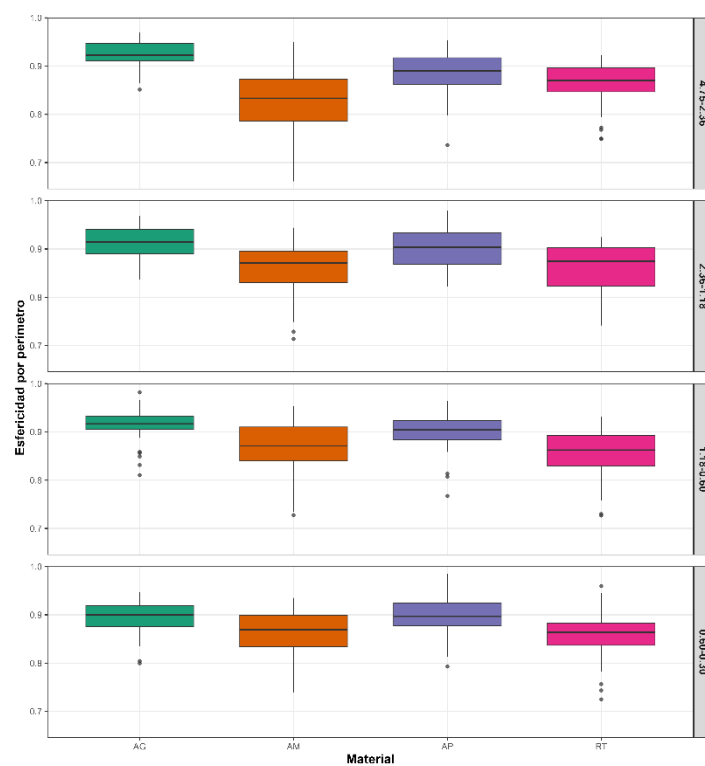


Figura 41. Diagrama de caja de la esfericidad por perímetro

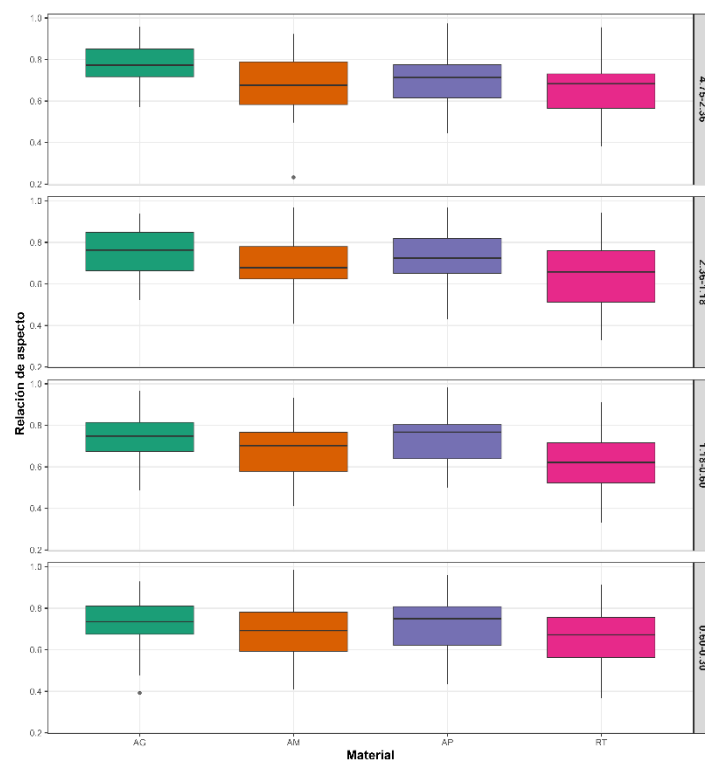


Figura 42. Diagrama de caja de la relación de aspecto

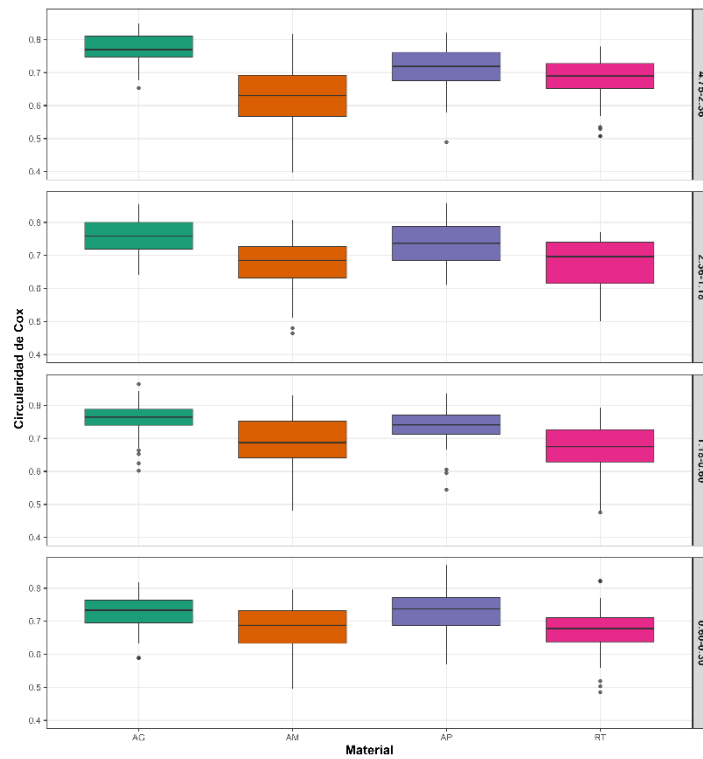


Figura 43. Diagrama de caja de la circularidad de Cox

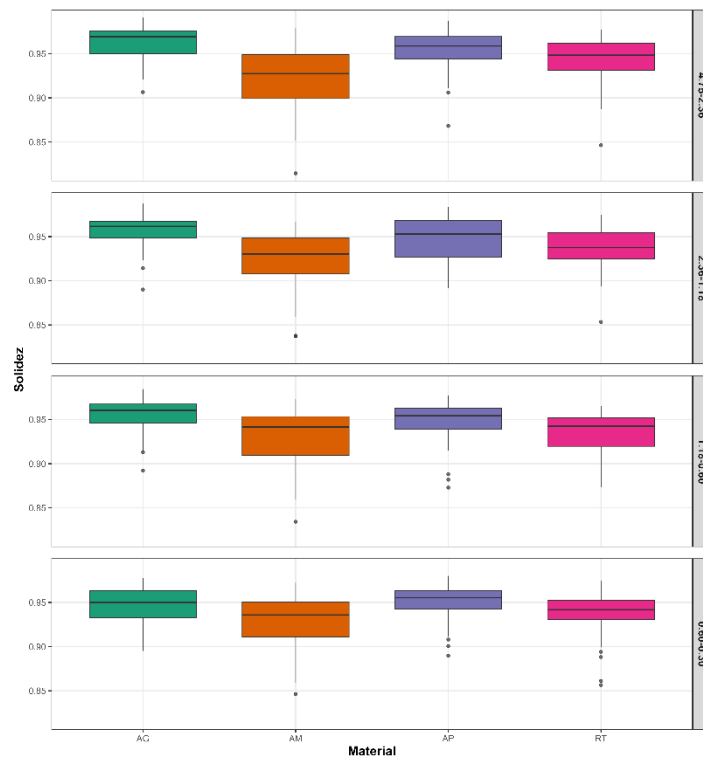


Figura 44. Diagrama de caja de la solidez

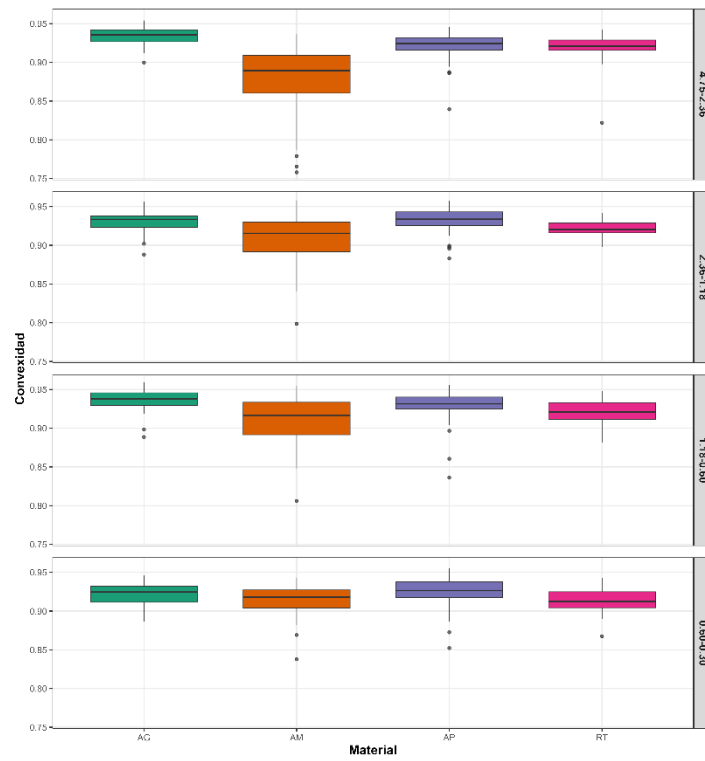


Figura 45. Diagrama de caja de la convexidad

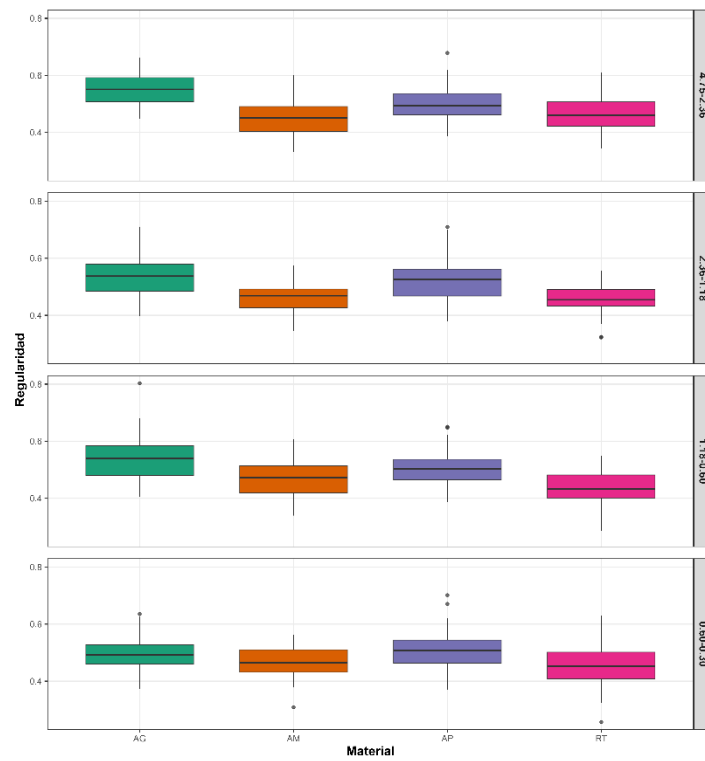


Figura 46. Diagrama de caja de la regularidad

A.8. Imágenes de los ensayos de asentamiento del cono para morteros

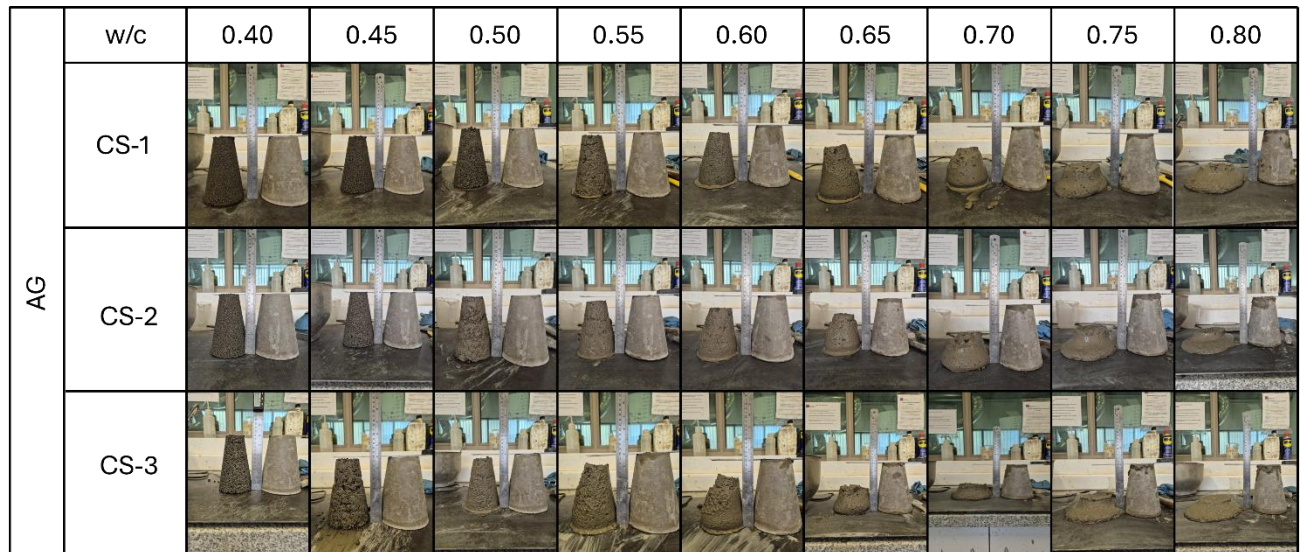


Figura 47. Ensayo de asentamiento del cono de la arena de río (AG)

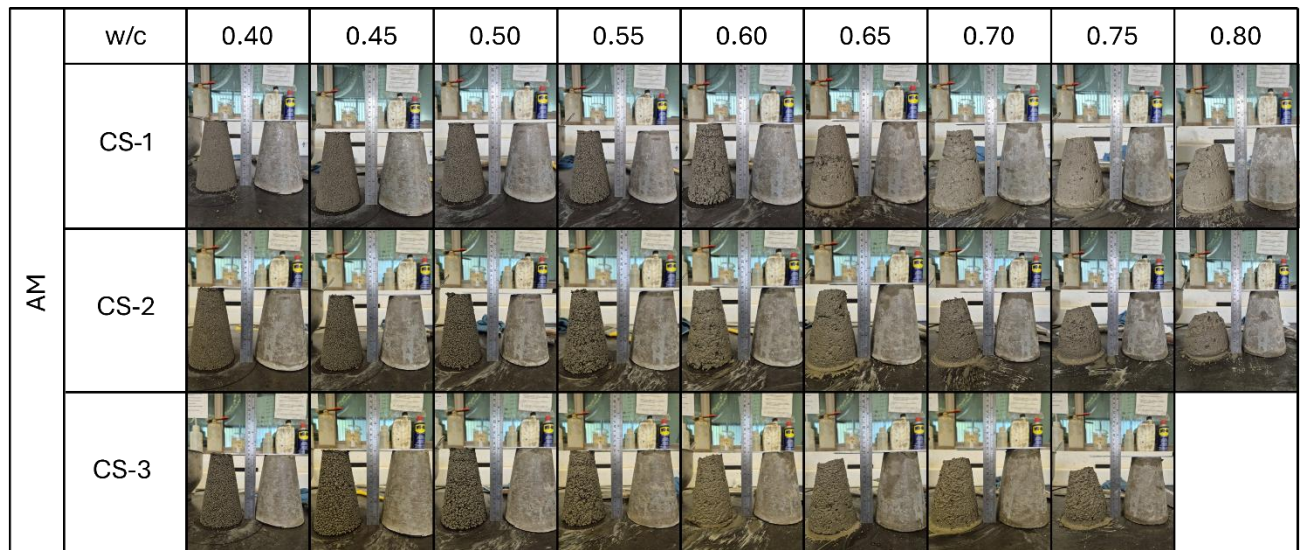


Figura 48. Ensayo de asentamiento del cono del adocreto triturado (AM)

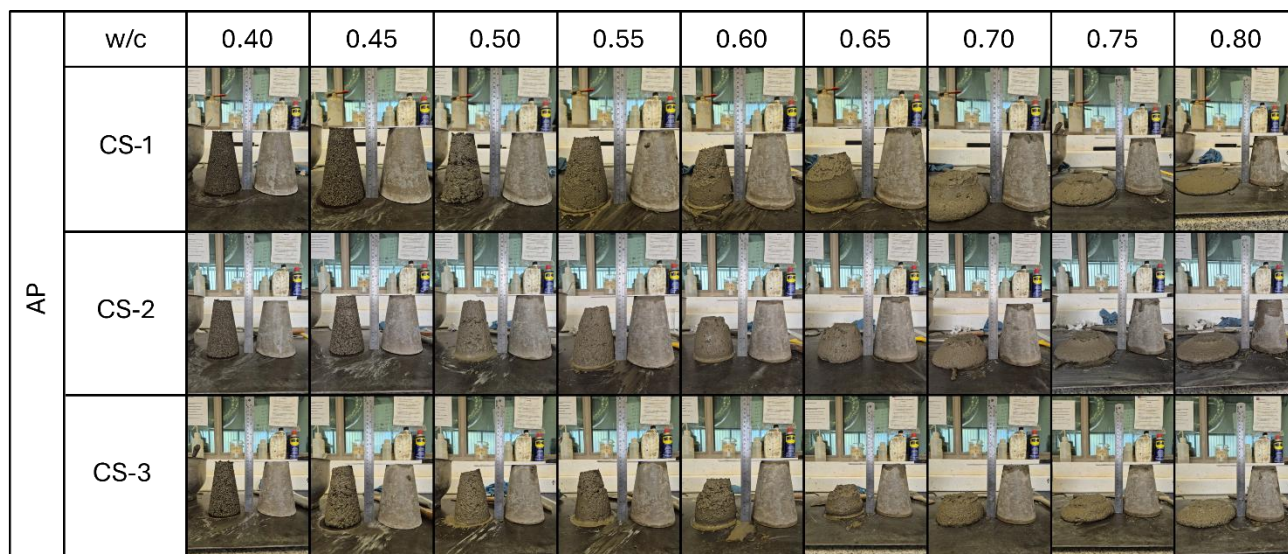


Figura 49. Ensayo de asentamiento del cono de la arena de playa (AP)

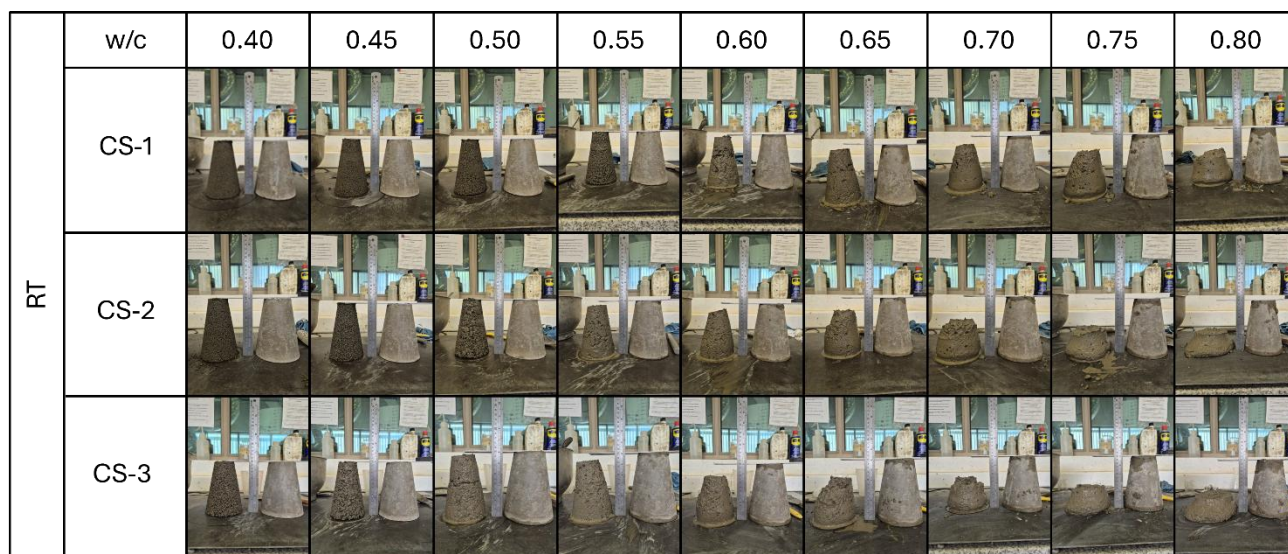


Figura 50. Ensayo de asentamiento del cono de la roca triturado (RT)

A.9. Gráficos de dispersión de los descriptores morfológicos seleccionados y las variables de respuesta

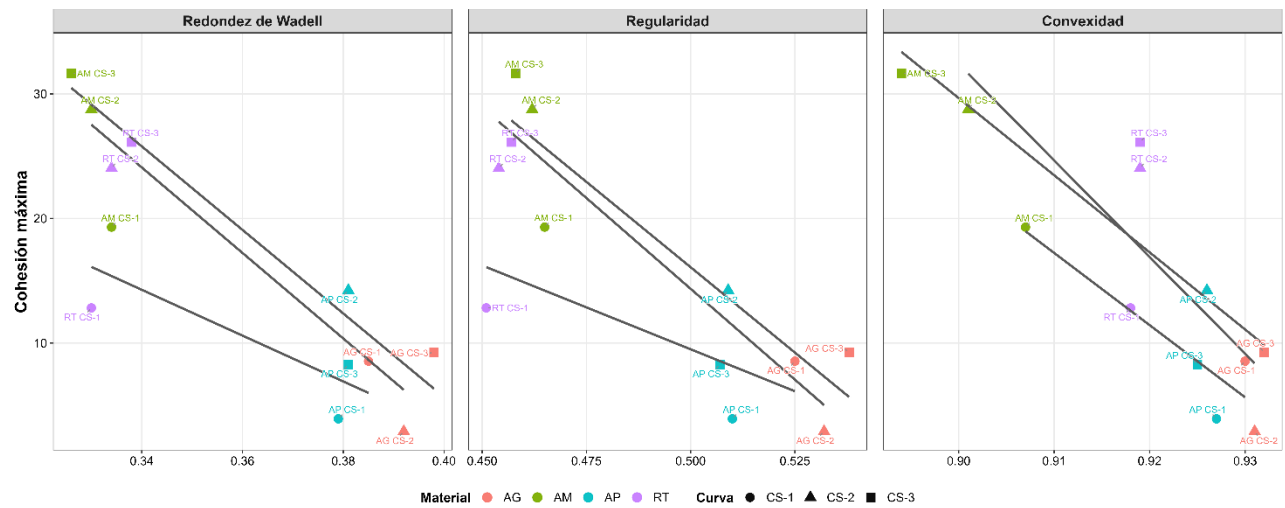


Figura 51. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y la cohesión máxima aparente

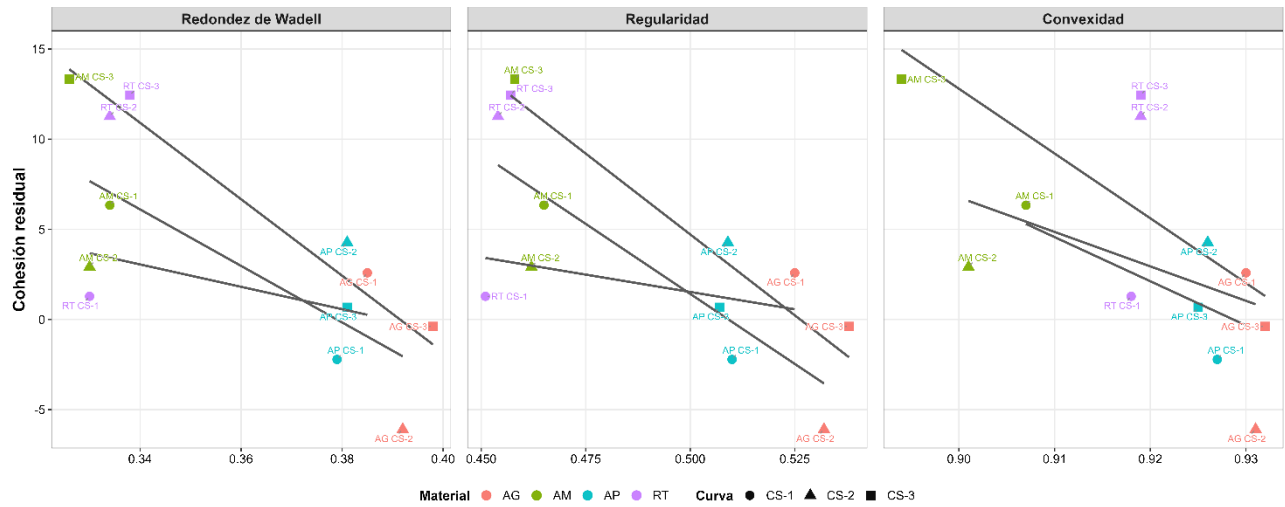


Figura 52. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y la cohesión residual aparente

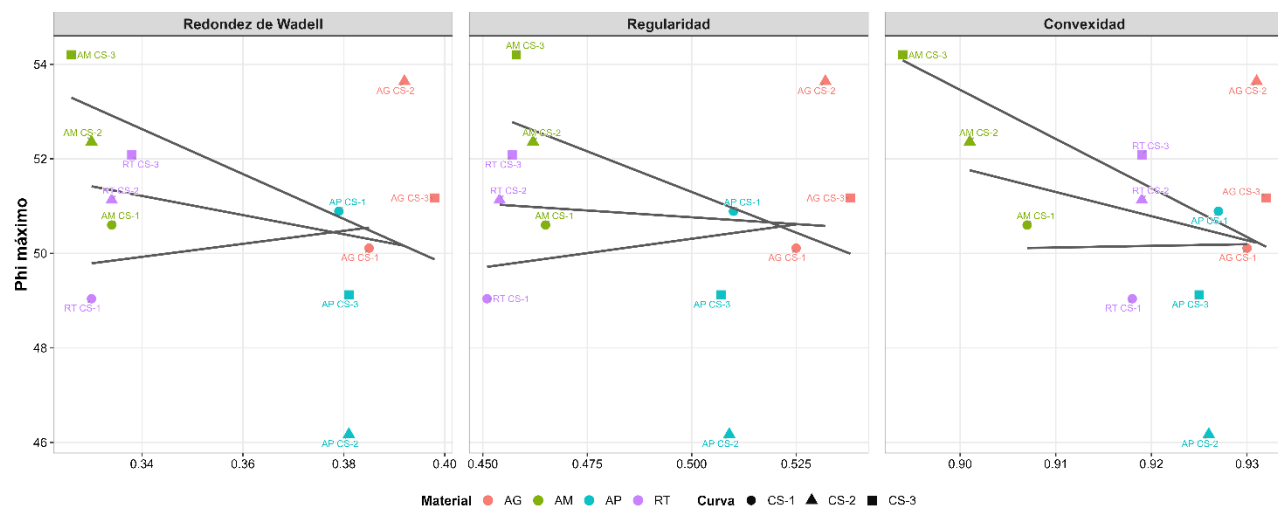


Figura 53. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y phi máximo

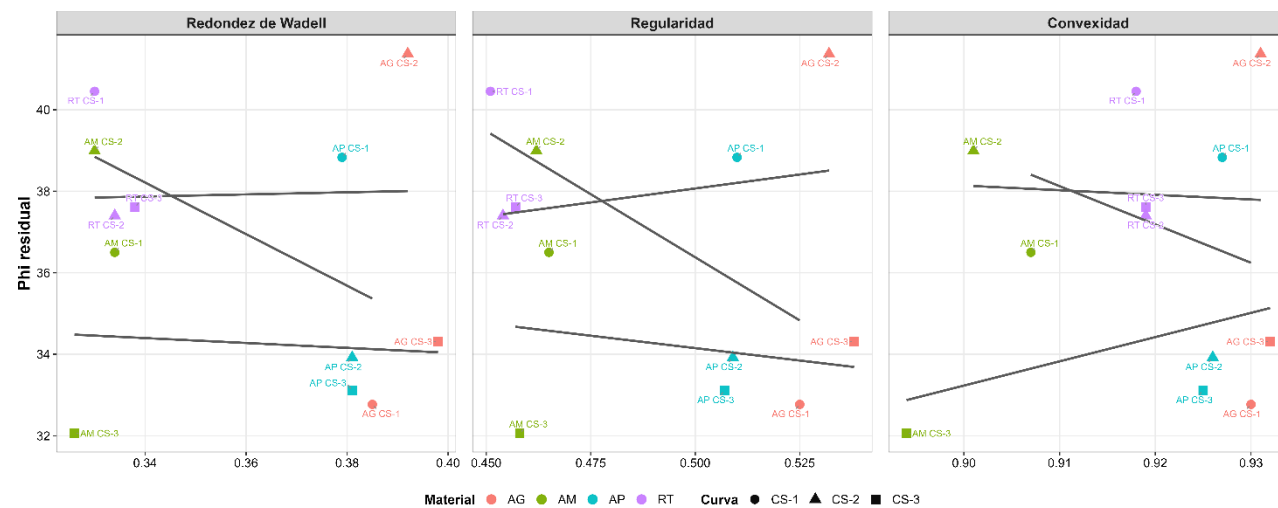


Figura 54. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y phi residual

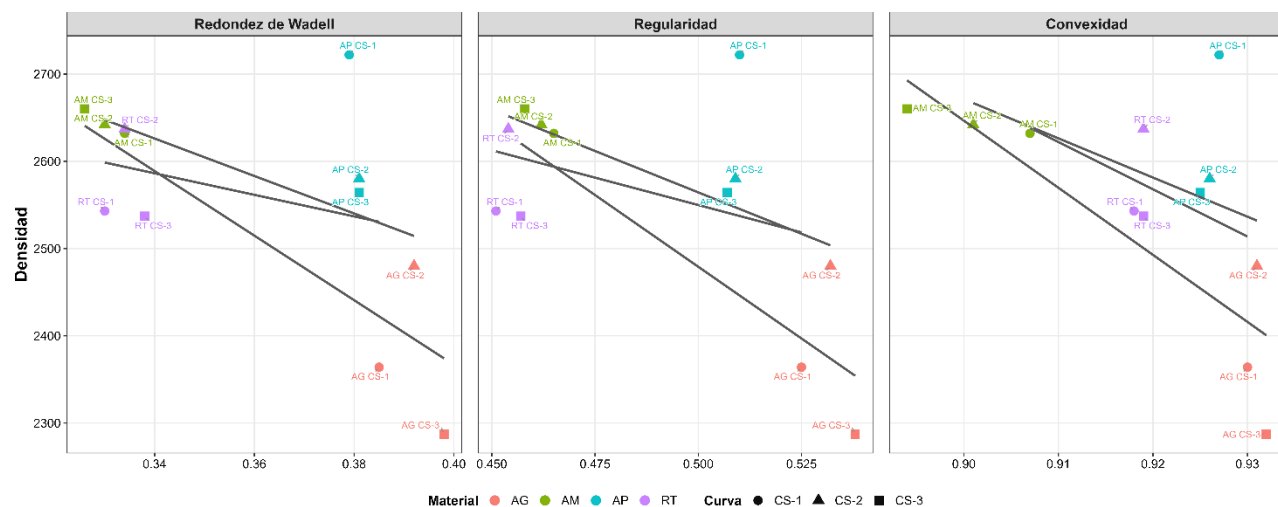


Figura 55. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y la densidad real

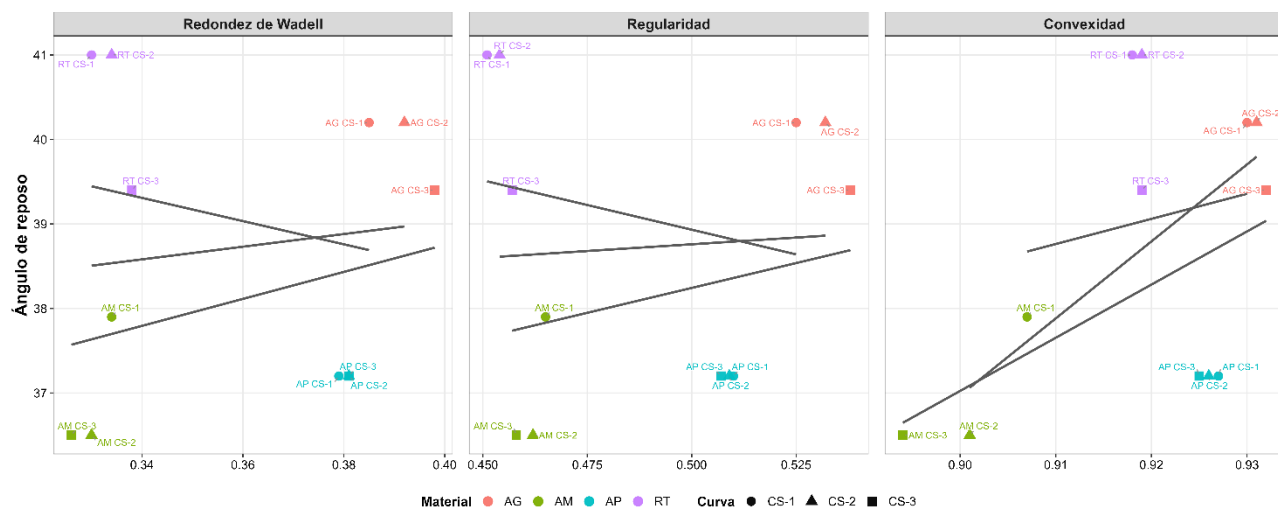


Figura 56. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y el ángulo de reposo

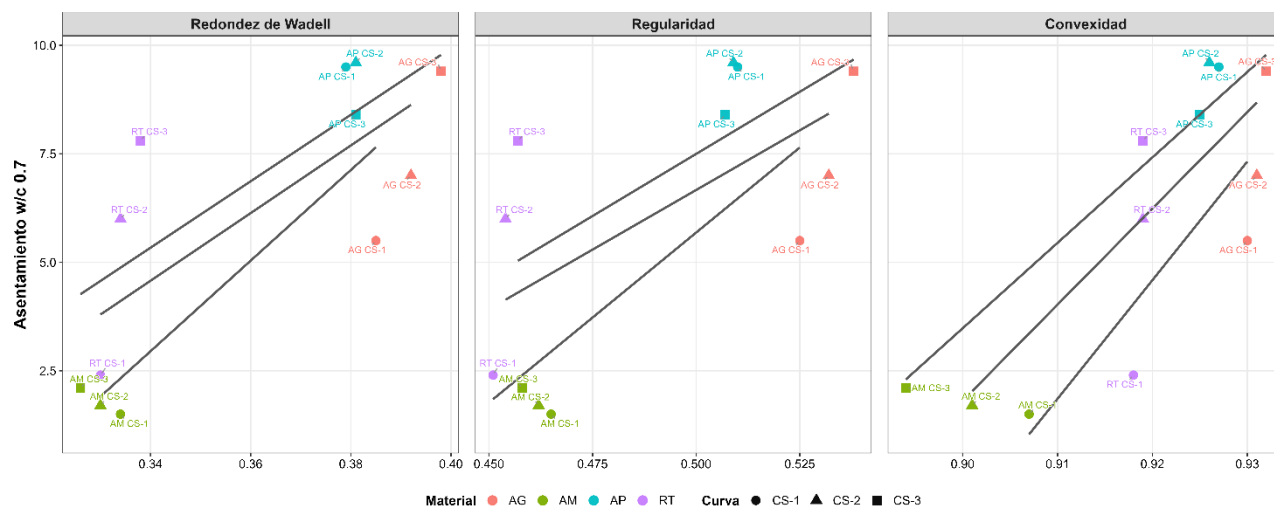


Figura 57. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y el asentamiento con w/c fijo en 0.7

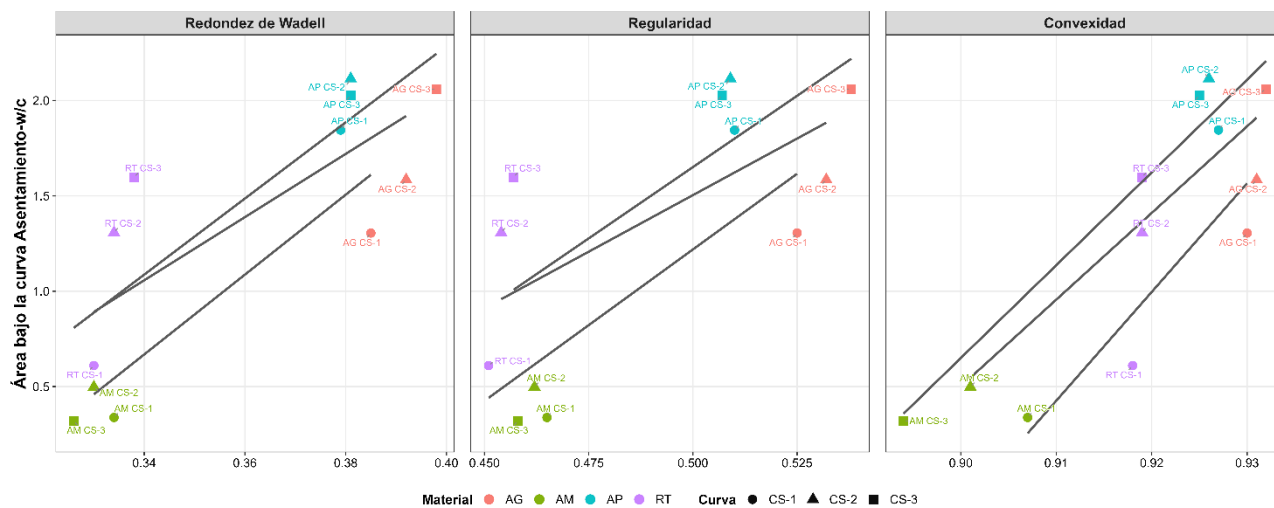


Figura 58. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y el área bajo la curva de asentamiento-w/c

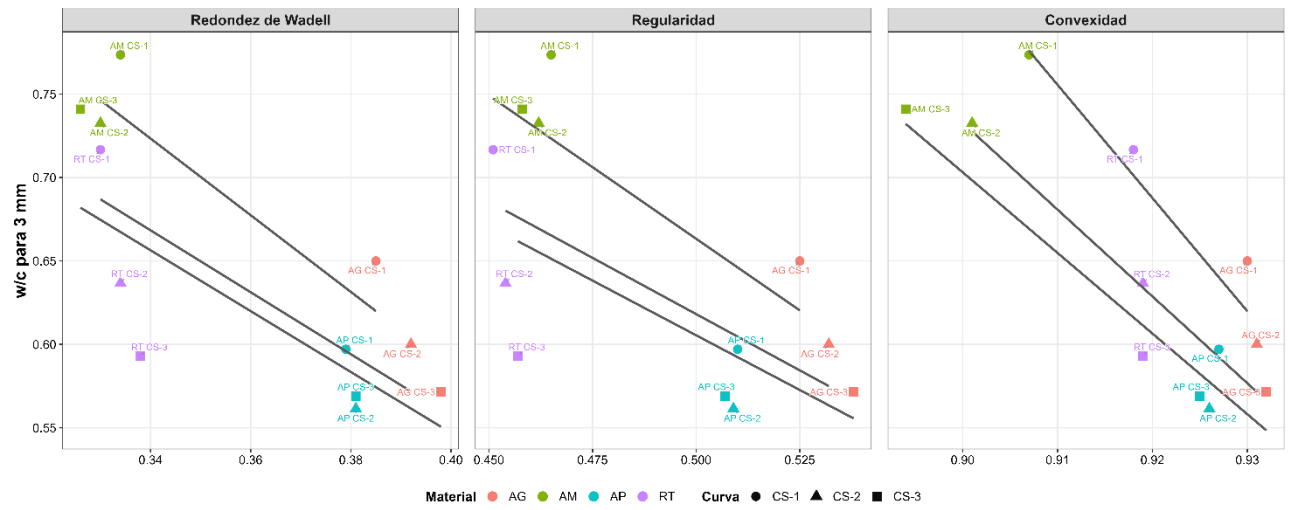


Figura 59. Relaciones de los descriptores morfológicos seleccionados y el w/c para alcanzar 3 mm de asentamiento

A.10. Significancia estadística de las correlaciones de Spearman

Tabla A.10.1. Significancia estadística de las correlaciones globales entre descriptores morfológicos y variables respuesta

Descriptor	Variable	ρ_s	p	$p_{ajustado}(BH)$
Convexidad	Asentamiento w/c 0,70	0.708	0.010	0.045
Redondez de Wadell	Asentamiento w/c 0,70	0.654	0.021	0.047
Regularidad	Asentamiento w/c 0,70	0.462	0.131	0.221
Convexidad	Cohesión máxima	-0.802	0.002	0.044
Redondez de Wadell	Cohesión máxima	-0.745	0.005	0.044
Regularidad	Cohesión máxima	-0.671	0.017	0.047
Convexidad	Cohesión residual	-0.711	0.010	0.045
Redondez de Wadell	Cohesión residual	-0.636	0.026	0.054
Regularidad	Cohesión residual	-0.664	0.018	0.047
Convexidad	Densidad	-0.627	0.029	0.056
Redondez de Wadell	Densidad	-0.692	0.013	0.047
Regularidad	Densidad	-0.413	0.183	0.290
Convexidad	Phi máximo	-0.168	0.601	0.738
Redondez de Wadell	Phi máximo	-0.169	0.600	0.738
Regularidad	Phi máximo	0.028	0.931	0.931
Convexidad	Phi residual	0.032	0.923	0.931
Redondez de Wadell	Phi residual	-0.088	0.786	0.849
Regularidad	Phi residual	-0.154	0.633	0.743
Convexidad	Ángulo de reposo	0.366	0.242	0.344
Redondez de Wadell	Ángulo de reposo	0.258	0.417	0.563
Regularidad	Ángulo de reposo	-0.106	0.742	0.835
Convexidad	w/c para 3 mm	-0.662	0.019	0.047
Redondez de Wadell	w/c para 3 mm	-0.678	0.015	0.047
Regularidad	w/c para 3 mm	-0.399	0.199	0.299
Convexidad	Área bajo la curva asentamiento-w/c	0.736	0.006	0.044
Redondez de Wadell	Área bajo la curva asentamiento-w/c	0.735	0.007	0.044
Regularidad	Área bajo la curva asentamiento-w/c	0.490	0.106	0.191

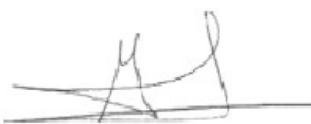
Tabla A.10.2. Significancia estadística de las correlaciones centradas por curva granulométrica

Descriptor	Variable	ρ_s	p	$p_{ajustado}(BH)$
Convexidad	Asentamiento w/c 0,70	0.776	0.003	0.010
Redondez de Wadell	Asentamiento w/c 0,70	0.797	0.002	0.010
Regularidad	Asentamiento w/c 0,70	0.608	0.036	0.060
Convexidad	Cohesión máxima	-0.895	0.000	0.002
Redondez de Wadell	Cohesión máxima	-0.832	0.001	0.010
Regularidad	Cohesión máxima	-0.678	0.015	0.041
Convexidad	Cohesión residual	-0.650	0.022	0.046
Redondez de Wadell	Cohesión residual	-0.629	0.028	0.055
Regularidad	Cohesión residual	-0.657	0.020	0.046
Convexidad	Densidad	-0.727	0.007	0.022
Redondez de Wadell	Densidad	-0.601	0.039	0.061
Regularidad	Densidad	-0.406	0.191	0.286
Convexidad	Phi máximo	-0.343	0.276	0.372
Redondez de Wadell	Phi máximo	-0.196	0.542	0.665
Regularidad	Phi máximo	0.028	0.931	0.931
Convexidad	Phi residual	0.028	0.931	0.931
Redondez de Wadell	Phi residual	0.056	0.863	0.931
Regularidad	Phi residual	-0.133	0.681	0.766
Convexidad	Ángulo de reposo	0.350	0.264	0.372
Redondez de Wadell	Ángulo de reposo	0.203	0.527	0.665
Regularidad	Ángulo de reposo	-0.179	0.579	0.679
Convexidad	w/c para 3 mm	-0.776	0.003	0.010
Redondez de Wadell	w/c para 3 mm	-0.783	0.003	0.010
Regularidad	w/c para 3 mm	-0.615	0.033	0.060
Convexidad	Área bajo la curva asentamiento-w/c	0.797	0.002	0.010
Redondez de Wadell	Área bajo la curva asentamiento-w/c	0.818	0.001	0.010
Regularidad	Área bajo la curva asentamiento-w/c	0.650	0.022	0.046

Tabla A.10.3. Significancia estadística de las correlaciones centradas por material

Descriptor	Variable	ρ_s	p	$p_{ajustado}(BH)$
Convexidad	Asentamiento w/c 0,70	0.506	0.093	0.328
Redondez de Wadell	Asentamiento w/c 0,70	0.532	0.075	0.328
Regularidad	Asentamiento w/c 0,70	0.599	0.040	0.328
Convexidad	Cohesión máxima	-0.156	0.629	0.886
Redondez de Wadell	Cohesión máxima	0.222	0.488	0.824
Regularidad	Cohesión máxima	0.014	0.966	0.983
Convexidad	Cohesión residual	-0.276	0.385	0.728
Redondez de Wadell	Cohesión residual	0.039	0.905	0.983
Regularidad	Cohesión residual	-0.179	0.579	0.886
Convexidad	Densidad	0.074	0.818	0.982
Redondez de Wadell	Densidad	-0.486	0.109	0.328
Regularidad	Densidad	-0.144	0.656	0.886
Convexidad	Phi máximo	-0.074	0.818	0.982
Redondez de Wadell	Phi máximo	-0.155	0.631	0.886
Regularidad	Phi máximo	-0.007	0.983	0.983
Convexidad	Phi residual	0.520	0.083	0.328
Redondez de Wadell	Phi residual	0.067	0.836	0.982
Regularidad	Phi residual	0.431	0.162	0.424
Convexidad	Ángulo de reposo	0.018	0.956	0.983
Redondez de Wadell	Ángulo de reposo	-0.289	0.363	0.728
Regularidad	Ángulo de reposo	-0.293	0.356	0.728
Convexidad	w/c para 3 mm	-0.266	0.404	0.728
Redondez de Wadell	w/c para 3 mm	-0.567	0.055	0.328
Regularidad	w/c para 3 mm	-0.494	0.103	0.328
Convexidad	Área bajo la curva asentamiento-w/c	0.421	0.173	0.424
Redondez de Wadell	Área bajo la curva asentamiento-w/c	0.778	0.003	0.078
Regularidad	Área bajo la curva asentamiento-w/c	0.588	0.044	0.328

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Análisis de la influencia de la morfología y el tamaño de arenas naturales y manufacturadas en la resistencia al corte de suelos y la trabajabilidad de morteros		
Nombre Memorista: PABLO JESÚS PEÑA RIVAS		
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	EXCELENTE	 Prof. Roberto Gómez Espina
Calificación	7.0	
Fecha	26/06/2026	
 Prof. Ramón Díaz N.		Ingeniero Supervisor:
		Institución:
Comisión		
 Prof. Roberto Fustos Toribio		
Resumen		
La presente investigación analizó la influencia de la morfología y del tamaño de partículas de arenas naturales y manufacturadas sobre la resistencia al corte de suelos granulares y la trabajabilidad de morteros, manteniendo una distribución granulométrica controlada de acuerdo con criterios aplicables a hormigón proyectado. La metodología consideró cuatro muestras de arena, que fueron sometidas a caracterización granulométrica y mecánica. Paralelamente, se realizó la caracterización morfológica de partículas mediante imágenes obtenidas por estereomicroscopía. Además, se evaluó el comportamiento de morteros en estado fresco mediante ensayos de trabajabilidad. Finalmente, se aplicó un análisis estadístico de correlación para relacionar los descriptores morfológicos con las variables mecánicas y de trabajabilidad obtenidas. Los resultados mostraron que la distribución granulométrica tuvo una asociación sistemática sobre la resistencia al corte, con un aumento en la cohesión aparente y el ángulo de fricción interna con curvas más gruesas. Asimismo, la		

caracterización morfológica permitió evidenciar diferencias claras entre las arenas naturales y manufacturadas. En relación con las propiedades macroscópicas, los descriptores morfológicos se asociaron inversamente con la cohesión aparente máxima, mientras que su relación con el ángulo de fricción fue débil.

En el comportamiento en estado fresco del mortero, en términos generales, la granulometría se asoció más claramente con la resistencia al corte, mientras que la morfología explicó con mayor claridad las diferencias observadas en la trabajabilidad del mortero. Finalmente, no se observó una relación directa entre resistencia al corte y trabajabilidad, al responder a mecanismos distintos.