



**Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
GEOLÓGICA
Curso 2021-2022**

**Lineamientos metodológicos para la
caracterización de materiales mixtos suelo-
roca tipo Bimsoils**

*Methodological guidelines for the characterization of
mixtures materials soil-rock Bimsoils type*

SEBASTIAN OSWALDO ROMERO MORALES

**TUTORES: JULIO GARZÓN ROCA
DAVID JIMÉNEZ MOLINA**



**Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
GEOLÓGICA
Curso 2021-2022**

**Lineamientos metodológicos para la
caracterización de materiales mixtos suelo-
roca tipo Bimsoils**

*Methodological guidelines for the characterization of
mixtures materials soil-rock Bimsoils type*

SEBASTIAN OSWALDO ROMERO MORALES

TUTORES:

DAVID JIMÉNEZ MOLINA;

JULIO GARZÓN ROCA

Fdo.:

Fdo.:



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid
DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

D. Sebastian Oswaldo Romero Morales con Pasaporte AV171425 de Colombia, estudiante del Máster en Ingeniería Geológica en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2021-2022, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado Lineamientos metodológicos para la caracterización de materiales mixtos suelo-roca tipo Bimsoils y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyos tutores son: David Jiménez Molina y Julio Garzón Roca

DECLARO QUE:

El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en las referencias bibliográficas. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 10 de julio de 2022

Fdo.:v

A mis padres Edgar Romero y Helen Morales por su incondicional apoyo, dedicación, esfuerzo, consejos y aliento a lo largo de cada etapa de mi vida.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	3
3	METODOLOGÍA.....	4
4	COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE BIMSOILS	6
4.1	Concepto de Bimsoil.....	6
4.2	Bloque y matriz.....	7
4.3	Elementos que influyen en el comportamiento.....	11
4.3.1	VBP (Proporción volumétrica de bloques)	11
4.3.2	Forma y disposición de las partículas gruesas:.....	12
4.3.3	Tamaño máximo de partículas:	14
4.3.4	Influencia de resistencia de la matriz y erodabilidad:.....	15
4.3.5	Porosidad, permeabilidad y succión:.....	17
4.4	Propagación irregular de la superficie de rotura	18
4.5	Escenarios análisis de estabilidad	20
5	Caracterización GEOTECNICA de Bimsoils.....	22
5.1	Exploración directa y ensayos In situ	22
5.2	Exploración indirecta.....	25
5.3	Ensayos de laboratorio.....	27
5.4	Estimación de VBP (proporción volumétrica de bloques).....	30
5.5	Estimación de parámetros resistentes.....	32
6	ANALISIS INTEGRADO Y DISCUSIÓN	38
6.1	Propuesta de clasificación de Bimsoil para establecer sus parámetros resistentes	38
6.1.1	Parámetros considerados en la clasificación.....	38
6.1.2	Clasificación de Bimsoil	43
6.1.3	Ejemplo uso de la clasificación	45
7	CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	46
8	BIBLIOGRAFÍA	47

INDICE DE FIGURAS

Figura 3-1. Clasificación forma de las partículas Krumbein & Sloss (1963).....	5
Figura 4-1. Ejemplos de Bimsoil. A) Depósito coluvio-aluvial, ubicado en el suroriente de departamento de Santander, Colombia. B) Depósito coluvial ubicado en vereda Cachiri departamento de Santander, Colombia.....	7
Figura 4-2. Efecto escala. I. Talud de altura 0.5X. II. Talud de altura X. III. Talud de altura 2X. IV. Talud de altura 4X. Elaboración propia.....	9
Figura 4-3. Flujograma definición de bloque y matriz. Elaboración propia.....	10
Figura 4-4. Comportamiento esquemático de resistencia al corte en Bimrock soldado (a) y no soldado (b). Tomado de Kalender et al. (2014).	12
Figura 4-5. Influencia de disposición de los bloques en la estabilidad del talud. A. Bloques paralelos a horizontal. B. Bloques paralelos a superficie de talud. C. Bloques perpendicular a la horizontal. D. Bajo porcentaje de bloques. Basado en Medley & Sanz (2004).	13
Figura 4-6. Representación de la orientación de los bloques en las muestras preparadas por Lindquist (1994).	14
Figura 4-7. Influencia del tamaño de bloques en la tortuosidad de superficie de rotura. Elaboración propia.	14
Figura 4-8. Influencia del tamaño de bloque en cohesión y ángulo de rozamiento interno del material. Tomado de Whang et al 2020.	15
Figura 4-9. Fenómeno de desprendimiento de bloques.....	16
Figura 4-10. Tipos de rotura en Bimrocks. Tomado y modificado de Xu et al. (2008).....	19
Figura 4-11. Ejemplo superficies de deslizamiento análisis de estabilidad local muro de escollera. Ministerio de Fomento de España 2006.	20
Figura 5-1. Ejemplificación incertidumbre exploración con sondeos. Elaboración propia.....	23
Figura 5-2. Bimtest. Tomado de Coli et al 2011.	24
Figura 5-3. Ejemplo teórico aplicación Geoeléctrica en caracterización de Bimsoils.....	25
Figura 5-4. tamaño máximo partícula ensayable según diámetro de la célula en ensayo triaxial	27
Figura 5-5. tamaño máximo partícula ensayable según longitud de caja de corte en ensayo corte directo	27
Figura 5-6. Rango recomendado de aplicación de técnicas de corte. Tomado de Dorador & Villalobos (2020).	29
Figura 5-7. Ejemplo aplicación imagen 2D para estimación de VBP. Tomado de Pasato et al. (2019). 31	
Figura 5-8. Esquema comportamiento parámetros resistentes en función de VBP (%). Tomado de Sonmez et al. (2009).....	33
Figura 5-9. Comportamiento parámetros resistentes Bimsoil. Tomado de Kalender et al. (2014)	35
Figura 5-10. Definición parámetro “A”. Tomado de Kalender et al. (2014).....	36
Figura 6-1. Relación ángulo de rozamiento interno vs VBP. Elaboración propia.....	38
Figura 6-2. Relación cohesión vs VBP. Elaboración propia.....	39
Figura 6-3. A) ángulo de rozamiento interno vs angulosidad-redondez. B) Cohesión vs angulosidad-redondez. Elaboración propia.	40
Figura 6-4. Límites establecidos con base en el parámetro “A” para clasificación de Bimsoil. Tomado y modificado de Kalender et al (2014).	41
Figura 6-5. Relación tamaño medio de bloque con ángulo de rozamiento interno del Bimsoil. Elaboración propia	41
Figura 6-6. Influencia de tamaño bloque en la relación phi vs VBP. Elaboración propia.....	42
Figura 6-7. influencia de tamaño de bloque máximo en la relación phi vs VBP. Elaboración propia... 42	
Figura 6-8. Clasificación de Bimsoils. Elaboración propia	44

INDICE DE TABLAS

Tabla 4-1. Contraste de resistencia/rigidez que deben existir entre bloque y matriz. Elaboración propia	10
Tabla 4-2. Valores límites VBP influyentes en resistencia de Bimsoil. Elaboración propia.....	12
Tabla 4-3. Modelos o escenarios de análisis de estabilidad de taludes en Bimsoil. Elaboración propia	21
Tabla 5-1. Algunas correlaciones entre parámetros sísmicos y parámetros geotécnicos	26
Tabla 5-2. Parámetro A propuesto por Sonmez et al. (2009). Tomado de Nanclares (2018).	34
Tabla 5-3. Ecuaciones empíricas estimación parámetros resistentes a partir de parámetros granulométricos propuestas por Nanclares (2018).	37
Tabla 6-1. Pasos que considerar para diseño de campaña de caracterización en Bimsoils.....	44
Tabla 6-2. Recomendaciones para la caracterización de cada clase de Bimsoil	45

RESUMEN

Este trabajo presenta recomendaciones metodológicas a la hora de realizar el trabajo de caracterización geotécnica de Bimsoils, los cuales corresponden a materiales compuestos por bloques o fragmentos geotécnicamente significativos de roca, embebidos en una matriz más fina (granular o cohesiva), donde la resistencia del contacto matriz-bloque es menor que la de la propia matriz.

A partir de una amplia recopilación y análisis de información secundaria, se desarrolla la base teórica de los elementos y particularidades que gobiernan el comportamiento geomecánico de un Bimsoil. Se presentan las ventajas, desventajas, requerimientos y limitaciones de los modelos para el análisis de estabilidad en taludes compuestos por estos materiales.

Igualmente se desarrollan recomendaciones en los trabajos de exploración directa, indirecta, ensayos in situ y de laboratorio. Se presentan las técnicas o metodologías para la estimación de la proporción volumétrica de bloques, y estimación de parámetros resistentes del material, utilizando ecuaciones empíricas y experiencias de diversos autores.

Por último, se propone una clasificación de Bimsoils basada en los elementos más importantes que gobiernan el comportamiento geomecánico del material, y que limitan la aplicación de técnicas clásicas de caracterización geotécnica, dando recomendaciones específicas para cada una de las clases o tipos de Bimsoil propuestos.

Este trabajo representa una síntesis y análisis de información existente, generando un avance en las metodologías empleadas a la hora de caracterizar correctamente los Bimsoils con un enfoque en estudios de estabilidad de taludes.

1 INTRODUCCIÓN

La dinámica externa de la tierra presenta una rama amplia de procesos erosivos, que de acuerdo con la energía del medio da lugar a diversos materiales térreos texturalmente muy diferentes. En el caso de medios con alta energía es común que se originen depósitos sedimentarios caóticos o anisótropos en granulometría, como el caso de depósitos fluviotorrenciales, depósitos de vertiente y algunos depósitos glaciares. Igualmente, por procesos tectónicos los macizos rocosos pueden llegar a tal grado de fracturación y molienda de la roca que el resultado es un material compuesto por roca triturada y bloques de roca.

En ambos casos se da a lugar a un material mixto compuesto por bloques de roca de diversos tamaños y formas embebidos en una matriz o "suelo", con diferencias geomecánicas entre ambos componentes, y que según si esta matriz es soldada o no (welded o unwelded) son conocidos en ingeniería geológica como Bimrock o Bimsoil.

La ingeniería geológica al dar su enfoque a la relación e interacción terreno-obra, tiene como una de sus primeras necesidades el hacer una simplificación de la anisotropía del medio natural, tratando de ser lo más cercano posible a la realidad. Por tanto, una problemática presente es caracterizar de la forma más precisa materiales de tipo Bimrock/Bimsoil. Temas simples como la granulometría, relación porcentaje de matriz-bloques, angulosidad de los bloques, composición de la matriz, etc., se complican y se convierten en un problema geoestadístico y de trabajo de geología de campo exhaustivo.

Trabajos como los de Lindquist & Goodman (1994) y Sonmez et al. (2009) han demostrado que, de acuerdo con la variación de porcentaje de bloques o clastos vs matriz, parámetros como el ángulo de rozamiento interno del material, resistencia a la compresión simple y la cohesión varían, llegando incluso hasta 15° de variación del ϕ° para un porcentaje de volumen de bloques del 75 % (Lindquist 1994).

Sumado a esto, se ha planteado que no solamente los parámetros del material dependen de la relación de matriz-bloques, sino también de la angulosidad de los bloques y la orientación de los mismos (Kalender et al., 2014), lo que convierte en todo un reto una correcta aproximación a los parámetros y comportamiento de materiales tipo Bimrock/Bimsoil

Existen diversas metodologías y maneras de obtener parámetros representativos de los materiales, siendo una de las más comunes los ensayos de laboratorio, los cuales de nuevo se encuentran limitados por el tamaño de bloques que no permiten la utilización de la mayoría de los equipos, como el caso de ensayos triaxiales o de corte directo comunes.

En la práctica, debido a la falta de metodologías específicas para abordar el problema, se recurre a seguir los procedimientos y técnicas clásicas, lo cual termina por simplificaciones

tales como que el comportamiento de estos materiales es completamente gobernado por la matriz, o la utilización de tablas de referencias y correlaciones que no aseguran que se pueda reproducir la realidad en los modelos.

Ante tantos interrogantes y tal incertidumbre es natural plantear, ¿cómo abordar la caracterización y parametrización de estos materiales heterogéneos desde la ingeniería geológica? ¿Cómo diseñar una campaña de exploración que permita obtener la información necesaria para caracterizar lo más cercano posible a la realidad? ¿Qué alternativas existen? ¿Cuáles son sus ventajas y limitaciones?

2 OBJETIVOS

Este trabajo busca, a partir de una base teórica amplia, dar herramientas y lineamientos que permitan a los profesionales caracterizar Bimsoil de manera adecuada y lo más precisa posible. Genera una clasificación de Bimsoil basado en los elementos más importantes que gobiernan el comportamiento geomecánico del material y da recomendaciones para el trabajo con los mismos, enfocado a la estimación de parámetros para realizar estudios de estabilidad de taludes. De acuerdo con lo anterior el objetivo del trabajo es:

Generar lineamientos metodológicos claros que permitan abordar el problema de caracterización y parametrización de materiales mixtos de suelo-roca tipo Bimsoil en el campo profesional, a través de la recopilación, análisis y síntesis de información de cada uno de los elementos importantes en la definición del comportamiento mecánico de estos.

Para alcanzar el objetivo anterior se definen los siguientes objetivos específicos:

- Definir los elementos y características que tienen mayor influencia en el comportamiento mecánico de Bimsoils.
- Aportar recomendaciones y alternativas para las campañas de exploración, y ensayos de laboratorio en estos materiales, con base en experiencias y trabajos previos de múltiples autores.
- Dar a conocer las metodologías existentes para la estimación de los parámetros resistentes de un Bimsoil.
- Generar lineamientos metodológicos en forma de tablas y diagramas de flujo que permitan clarificar los trabajos a la hora de caracterizar un material mixto de suelo-roca tipo Bimsoil.
- Desarrollar una clasificación de Bimsoils a partir de información secundaria, que tenga en cuenta los elementos que tienen mayor influencia en el comportamiento geomecánico del material.

3 METODOLOGÍA

Como fue expuesto, en la academia existen diversos estudios que se enfocan en resolver problemas específicos relacionados con la naturaleza de Bimsoils/Bimrocks, como los trabajos de Medley (1977), que busca estimar lo más confiable posible las proporciones volumétricas de bloques y matriz, trabajos ya mencionados como Sonmez (2009), Sonmez et al., (2004), Lindquist & Goodman (1994), centrados en la influencia del volumen de bloques en los parámetros de resistencia a compresión (RCS), cohesión (C) y ángulo de rozamiento (ϕ); la evaluación de la capacidad portante de un Bimsoil (Campos et al., 2018), criterios de rotura para estos materiales (Tesis doctoral Agrillo 2021), etc., pero en el campo profesional aplicado, ante la falta de lineamientos claros que los reúnan, estos trabajos no son tenidos en cuenta.

Este trabajo parte de la recopilación de información que reúne artículos científicos, tesis doctorales, tesis de Maestría y libros, todos ellos relacionados con el comportamiento geomecánico, caracterización y elementos de interés en materiales denominados Bimsoil, Bimrocks, "Soil rock-mixture", etc. Así, fue generada una base de más de 40 estudios diferentes y clasificada según su temática utilizando el software libre ZOTERO.

La información se ha catalogado en las siguientes categorías, con el fin de dar un desarrollo coherente y claro al trabajo: (i) teoría de Bimrocks/Bimsoils, (ii) caracterización geotécnica, (iii) ensayos de campo, (iv) ensayos de laboratorio, (v) ensayos geofísicos, (vi) estimación de proporción volumétricas de bloques, (vii) modelos numéricos y simulación numérica de ensayos y (viii) criterios de rotura y análisis de estabilidad de taludes.

Debido a que este trabajo busca en gran medida ser una guía o lineamiento metodológico para abordar el tema de caracterización de Bimsoils con un enfoque en la estabilidad de taludes, gran parte de los resultados corresponden al análisis, síntesis y conjunción de la información de diversos autores, por lo cual reúne un gran componente teórico. A su vez se generan nuevas tablas, esquemas e ilustraciones que permiten la clarificación de conceptos y los pasos a seguir para los ingenieros geólogos y geotecnistas que se enfrenta con estos materiales.

Todas las tablas, gráficas y figuras fueron elaboradas digitalmente, utilizando el paquete de software de Microsoft y la versión estudiantil de AutoCAD, soportándose con base en resultados y conclusiones de otros autores; la propuesta de clasificación de Bimsoils fue elaborada a partir del análisis de resultados de ensayos y descripciones dadas por los autores referenciados.

Para el desarrollo de la propuesta de clasificación fue generada una base de datos utilizando la información de publicaciones existentes, que incluye parámetros geotécnicos,

descripciones, granulometría y otras características de los materiales. La base de datos incluye los resultados de 13 publicaciones, que de acuerdo con lo descrito en el apartado de “Elementos que influyen el comportamiento” de Bimsoils, reúnen información de: Ángulo de rozamiento interno del Bimsoil, Cohesión de Bimsoil, proporción volumétrica de bloques (VBP), tamaño medio y máximo de bloques, Parámetro A, angulosidad y esfericidad de los bloques, parámetros granulométricos como coeficiente de uniformidad y coeficiente de curvatura, naturaleza de la matriz (cohesiva y granular) y parámetros de la matriz (cohesión, resistencia a compresión simple, ángulo de rozamiento interno, densidad).

Los parámetros que no eran presentados en las publicaciones originales fueron estimados cuando era posible de acuerdo con las descripciones dadas por los autores. Los parámetros de angulosidad y esfericidad fueron cuantificados o llevados a escala numérica (de 0 a 1) utilizando la propuesta de Krumbein & Sloss (1963).

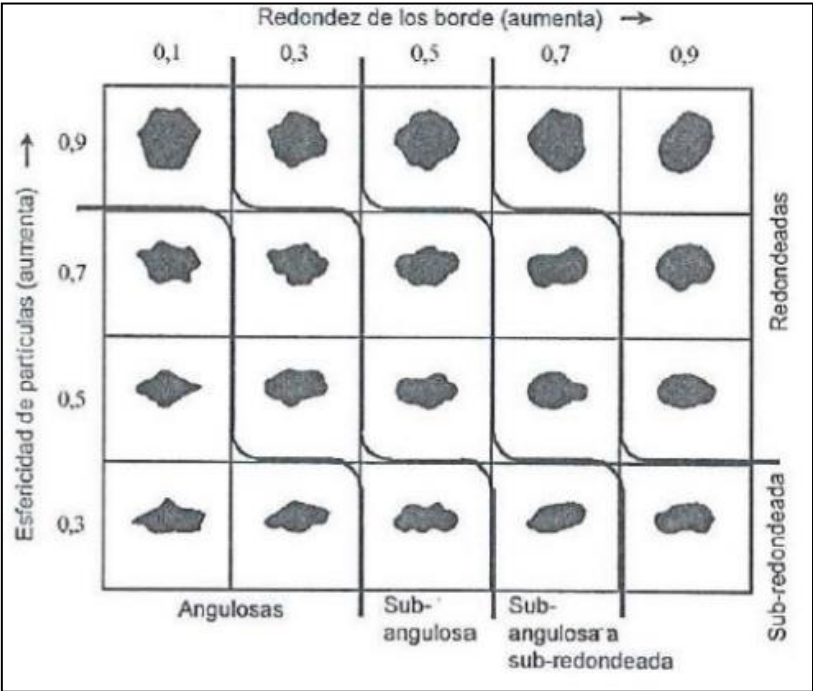


Figura 3-1. Clasificación forma de las partículas Krumbein & Sloss (1963)

Con el fin de establecer los parámetros a utilizar y límites para la construcción de una clasificación de Bimsoils que sea una guía sencilla para enfrentarse a la tarea de caracterizar correctamente estos materiales, en función de sus características más importantes, que condicionan las campañas de exploración, ensayos in situ y ensayos de laboratorio, fueron realizadas correlaciones a partir de gráficos que mostraran la relación de parámetros y la influencia o no entre ellos.

4 COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE BIMSOILS

4.1 Concepto de Bimsoil

En ingeniería geológica y geotécnica existen dos grandes grupos de materiales: (1) suelos, conformados por partículas sólidas consideradas indeformables y espacios vacíos ocupados por aire y una sustancia líquida, comúnmente agua, siendo clásicamente considerados en su conjunto como un material isótropo y continuo; y (2) macizos rocosos, conformados por una matriz rocosa y discontinuidades, dando lugar a un material considerado como un medio discontinuo, con propiedades heterogéneas, anisótropas e inelásticas.

Si bien estos dos grandes grupos dividen el enfoque y la mecánica de suelos o rocas en geotecnia, existen materiales conformados por partículas sólidas relativamente homogéneas, y bloques o partículas sólidas de gran tamaño, que conformarían un medio discontinuo o continuo, isótropo o anisótropo, de acuerdo con la escala a la que sean estudiados.

En la literatura existen diferentes nombres y términos dados a los materiales conformados por una matriz compuesta por partículas relativamente homogéneas en sus características y bloques de roca de un tamaño considerable con características diferentes a la matriz.

El término Bimrock fue introducido por Medley et al. (1994) y es definido por varios autores como una “mezcla de rocas, compuesta de bloques geotécnicamente significativos con una matriz de textura fina” (Medley & Zekkos, 2011). Los Bimrocks son divididos en dos grandes grupos, Welded Bimrock (Bimrock soldados) y Unwelded Bimrocks (Bimrocks no soldados), entendiendo como soldado que los bloques están fuertemente adheridos a la matriz y no pueden separarse de esta sin quebrarse (Altinsoy, 2006).

Comúnmente los Bimrock no soldados han sido denominados **Bimsoils**, los cuales son definidos como mezclas estructuralmente complejas, compuestas de bloques rígidos significativos de varias litologías y tamaños, separados por una matriz de suelo “fino”, con un contacto entre bloque y matriz de resistencia menor que los dos componentes.

Por tanto, se espera para Bimrocks soldados que la resistencia en el límite o contacto entre bloque y matriz sea aproximadamente igual a la resistencia de la matriz, mientras que para Bimrocks no soldados (Bimsoils) la resistencia del contacto entre la matriz y los bloques sea menor que la resistencia de la propia matriz (Kalender et al., 2014).

También en la literatura se ha establecido el término *mélange*, considerado como un subgrupo de los Bimrocks, y definido como un material que consta de bloques embebidos en matriz de roca cizallada o débil (Medley & Zekkos, 2011). Otro término común es “soil-rock mixture” que no es más que, “materiales compuestos por bloques embebidos en una matriz de suelo” (Afifipour & Moarefvand, 2013), siendo entonces un sinónimo de Bimsoils.

Dentro de los Bimsoils están considerados depósitos aluviales heterogéneos, depósitos fluvio-torrenciales, rellenos antrópicos (p.e. rellenos todo-uno o tipo pedraplén), depósitos coluviales, rocas en transición a suelo por su alta meteorización, depósitos glaciales, depósitos piroclásticos, otros que cumplan las características ya señaladas.



Figura 4-1. Ejemplos de Bimsoil. A) Depósito coluvio-aluvial, ubicado en el suroriente de departamento de Santander, Colombia. B) Depósito coluvial ubicado en vereda Cachiri departamento de Santander, Colombia

4.2 Bloque y matriz

En los Bimsoils/Bimrocks, se hace primordial la definición conceptual y practica de bloque-matriz, pues como será expuesto, la base de la caracterización de estos materiales es establecer acertadamente la relación de proporción entre estos dos componentes. Siendo en materia de Bimrocks/Bimsoils el “bloque” no un tamaño específico de partícula (p.e. tamaño bloque > 300 mm o bolos > 75 mm), sino las partículas gruesas de mayor resistencia como clastos de roca de diversos tamaños; y la matriz es las partículas de menor tamaño que soportan o en las que están embebidos los “Bloques”

En la literatura, la definición de qué es bloque y qué es matriz ha sido tema de discusión. Un enfoque clásico es que dicho límite depende de la escala de investigación o interés. Esta está representada por la “dimensión ingenieril característica” o “longitud característica” (**Lc**), correspondiente a la longitud de un elemento del modelo que es representativo de la geometría, dimensiones del problema en consideración y escala de trabajo, siendo, por ejemplo, la dimensión del ancho de la cimentación, el diámetro del túnel, la altura del talud, etc.

Autores como Medley & Lindquist (1995) han teorizado sobre la independencia de la escala en estos materiales, definiendo los límites de diámetro mínimo y máximo de un bloque, haciendo uso de la escala ingenieril, siendo las partículas de diámetro menores a $0,05L_c$ consideradas como parte de la matriz, y las mayores a $0,75L_c$ consideradas como un macizo rocoso o un elemento o material individual que no hace parte del Bimsoil/Bimrock.:

$$0,05L_c < d_{\text{bloque}} < 0,75L_c$$

Esta relación muy utilizada en diversos trabajos, clarifica enormemente la definición de qué granulometrías deben ser consideradas como matriz y cuáles como bloque. Sin embargo, en casos donde la dimensión ingenieril se hace grande y se cuenta con un material de una matriz fina con bolos menores a $0,05 L_c$, estos serían despreciados, a pesar de sus enormes diferencias mecánicas con la matriz en la que están embebidos.

Por tanto, autores como Zhang et al. (2015) plantean no hacer uso de la escala ingenieril, sino definir el límite de la fracción gruesa como el límite granulométrico para gravas (4,75 mm por ejemplo), teniendo así en consideración esta fracción gruesa que comúnmente no puede ser experimentada con ensayos de laboratorio tradicionales debido a sus dimensiones.

Este enfoque está sustentado en simulaciones numéricas de ensayos de laboratorio donde se obtuvo que la fracción entre 4,75 mm y $0,05L_c$ representaba el 50% del volumen total de la muestra, y tenía un aporte muy significativo en el comportamiento del material.

La Figura 4-2 representa el efecto escala en estos materiales heterogéneos, cuya longitud característica sería de $X/2$ para el talud I, X para el talud II, $2X$ para el talud III y $4x$ para el talud IV.

Como se puede observar en el caso del Talud I. y II., un bloque de $0,3X$ de diámetro no sería considerado como bloque sino como un elemento independiente, de acuerdo con el enfoque de la “Longitud característica”, mientras que para los taludes III., y IV., sí lo es. En casos de taludes de gran altura, las fracciones tamaño grava o bolos que deberían ser consideradas como “bloque” en los taludes de menor dimensión, serían considerados erróneamente como matriz en los taludes de dimensión mayor según el enfoque de longitud característica.

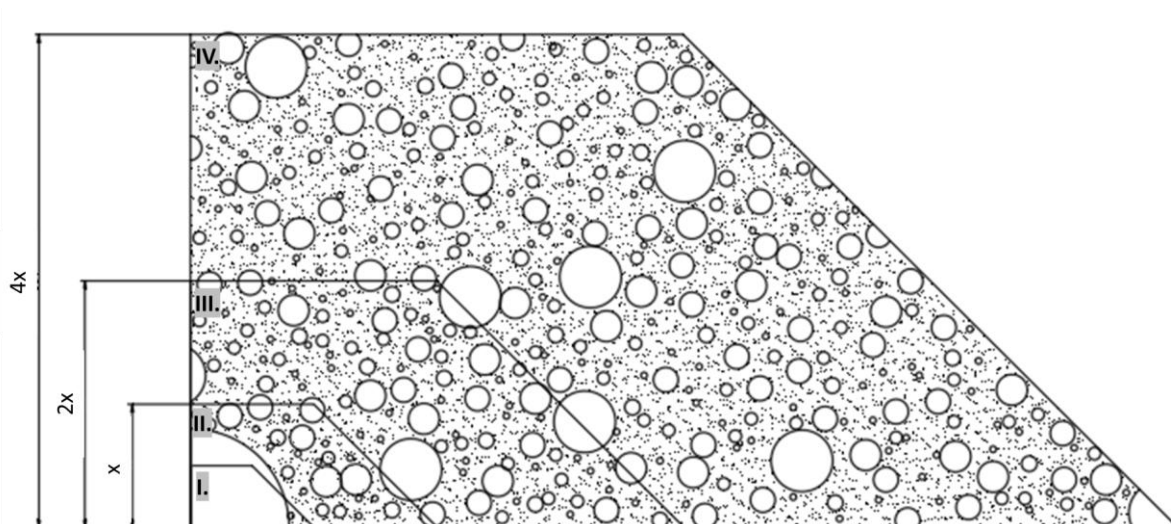


Figura 4-2. Efecto escala. I. Talud de altura $0.5X$. II. Talud de altura X . III. Talud de altura $2X$. IV. Talud de altura $4X$. Elaboración propia.

La definición de los límites de bloque y matriz debe ser estudiada con detalle, y de acuerdo con el problema específico, el ingeniero geólogo o geotecnista deberá tomar la decisión de la metodología a seguir, según las características y comportamiento del material.

De acuerdo con la información y resultados de diversos autores (Zhang et al. 2015; Whang et al 2020; Agrillo 2021; Nanclares 2018), se recomienda entonces definir la matriz y los bloques a partir de límites granulométricos (teniendo en cuenta el huso granulométrico del material), diámetros máximos, mínimos, porcentaje de finos, y por último la escala de trabajo.

Esto es debido a que, como se plantea más adelante, en los ensayos de laboratorio es común descartar la fracción de gravas y bolos; a su vez, en ensayos de penetración en sondeos, suele obtenerse rechazo ante la presencia de partículas de igual o mayor diámetro a la perforación; además, geológicamente la presencia de bolos o partículas de tamaños decimétricos a métricos, embebidos en una matriz de arena o arcilla, está sustentada por la diferencia litológica y por tanto mecánica de los materiales, como en el caso de depósitos aluviales, torrenciales y coluviales.

A continuación, se presenta un esquema que sirve como guía para conseguir una mejor definición de la fracción considerada como bloque y como matriz en materiales tipo Bimsoils.

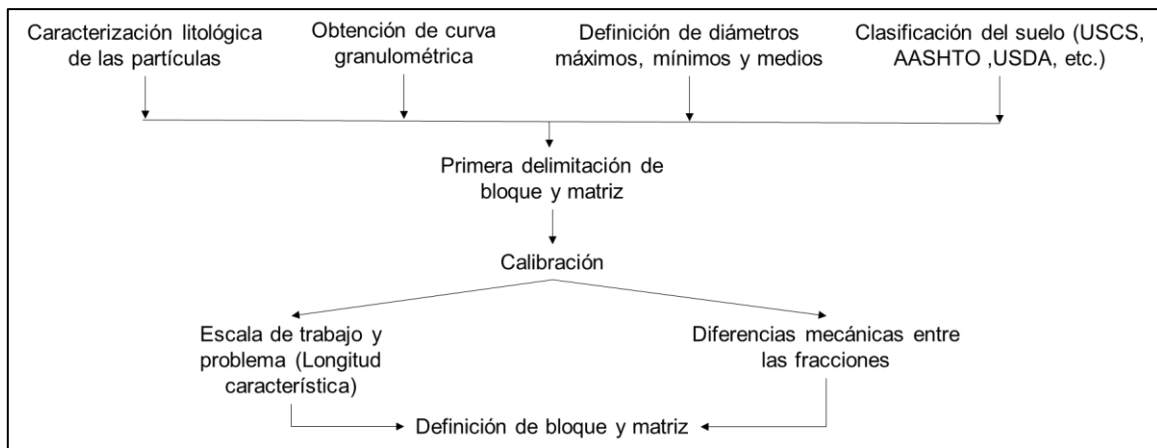


Figura 4-3. Flujograma definición de bloque y matriz. Elaboración propia

Como se observa en la figura anterior, es fundamental la existencia de un contraste suficiente de resistencia o rigidez entre la matriz y los bloques para que el material sea considerado Bimrock/Bimsoil (Kalender et al. 2014). Autores como Lindquist (1994) y Medley (1994) indican que no es influyente la resistencia en sí de los bloques, sino que solo un contraste relevante es suficiente para obligar a la superficie de rotura a pasar alrededor de los bloques y ser más “tortuosa” o irregular.

De acuerdo con la literatura, algunos criterios de referencia o condiciones de contraste que debe cumplir el material para comportarse como Bimsoil son:

Condición	Autor/Referencia
$RCS_{\text{bloque}} / RCS_{\text{matriz}} > 1,5$	Medley & Zekkos (2011)
$\tan\Phi_{\text{bloque}} / \tan\Phi_{\text{matriz}} > 1,5$	Medley (1994)
$\tan\Phi_{\text{bloque}} / \tan\Phi_{\text{matriz}} > 2$	Barbero et al. (2006)
$\tan\Phi_{\text{bloque}} / \tan\Phi_{\text{matriz}} > 1,2$	Nanclares (2018)
$E_{\text{bloque}} / E_{\text{matriz}} > 2,0$	Lindquist (1994)

RCS: Resistencia a compresión simple; E: Modulo de elasticidad; Φ : Ángulo de rozamiento interno

Tabla 4-1. Contraste de resistencia/rigidez que deben existir entre bloque y matriz. Elaboración propia

En cualquier caso, esta comparativa entre la diferencia de resistencia bloque-matriz puede ser realizada fácilmente a partir de análisis litológico visual, tablas, pruebas de campo o pruebas de laboratorio sencillas, utilizando por ejemplo un esclerómetro o un penetrómetro de bolsillo. Como se indicó, lo más importante es la existencia de contraste entre los bloques y la matriz, así como la relación porcentual volumétrica entre ambos.

4.3 Elementos que influyen en el comportamiento

En la literatura, múltiples investigaciones han demostrado diferencias en la resistencia y deformabilidad de los materiales que cumplen las condiciones de Bimsoil. Trabajos como los de Kalender et al., (2014), Sonmez et al., (2009), Medley & Sanz (2004) o Coli et al., (2009) entre otros, llegan siempre a concluir que estos materiales presentan una resistencia mayor que un material compuesto solo por la matriz del mismo, definiendo la resistencia como el máximo nivel de tensión que un material puede resistir sin fallar ante cualquier tipo de carga (ASTM D653 2004).

Además, los resultados de ensayos de laboratorio y simulaciones numéricas en esas investigaciones demuestran, un aumento del ángulo de rozamiento interno y una disminución de la cohesión en el material debido a la presencia de bloques o partículas gruesas de mayor rigidez que la matriz.

En su tesis doctoral Nanclares (2018) recoge una serie de aspectos que influyen en la resistencia y deformabilidad de suelos granulares: forma de partículas, relación de vacíos, distribución granulométrica y tamaño máximo de la partícula. Estos aspectos tienen igualmente influencia en materiales tipo Bimsoil. De acuerdo con la experiencia de múltiples autores (Lindquist 1994; Sonmez et al 2009; Kalender et al 2014; entre otros), el factor más influyente en el comportamiento geomecánico del material es el porcentaje de bloques presentes en el material, denominado VBP por sus siglas en inglés “volume block proportion”.

A continuación, se describen los aspectos más relevantes que gobiernan el comportamiento de estos materiales de acuerdo con su estado del arte.

4.3.1 VBP (Proporción volumétrica de bloques)

De acuerdo con Ramos et al. (2020), VBP se define como la relación entre el volumen de los bloques y el volumen total del material..

Múltiples investigaciones con base en resultados de laboratorio, ensayos de campo y simulación numérica de ensayos demuestran que existe un rango de VBP en el que el material aumenta considerablemente de manera lineal su ángulo de rozamiento interno y disminuye su cohesión. Esto quiere decir que la resistencia del material está condicionada en gran medida por el porcentaje de bloques presentes en él (ver Figura 4-4-b).

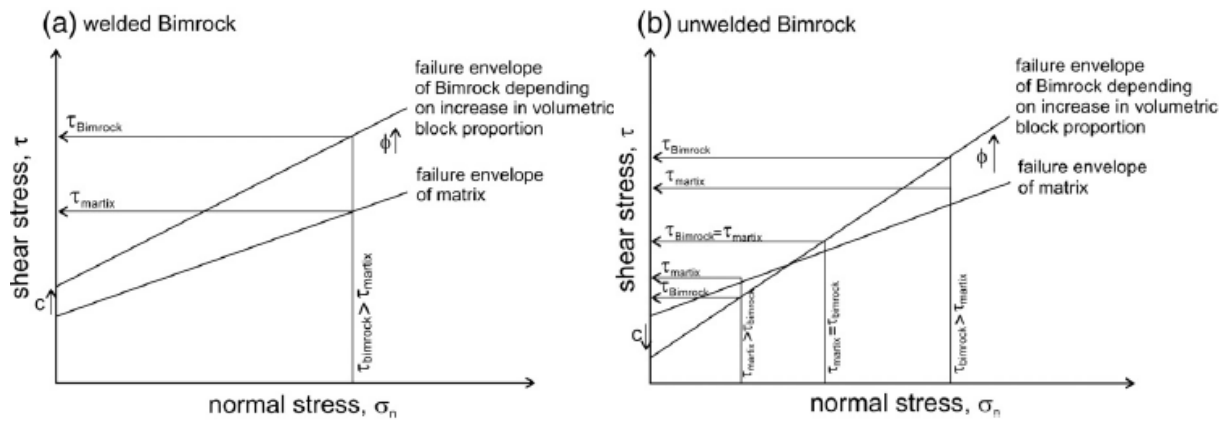


Figura 4-4. Comportamiento esquemático de resistencia al corte en Bimrock soldado (a) y no soldado (b). Tomado de Kalender et al. (2014).

De acuerdo con la literatura, este rango de proporción donde el contenido de bloques determina o condiciona la resistencia del material se encuentra entre:

Límite menor de VBP (%)	Limite mayor de VBP (%)	Autor
10	60-75	Kalender et al. (2014)
25	75	Medley & Sanz (2004)
15-25	65-75	Medley & Zekkos (2011)
25	-	Agrillo (2021)
-	75	Sonmez et al. (2009)

Tabla 4-2. Valores límites VBP influyentes en resistencia de Bimsoil. Elaboración propia

Por tanto, como regla general se puede definir que con porcentajes de VBP mayor 15% y menor que 75% el material tendrá una resistencia diferente a la matriz. Así, si se quiere ser preciso (no subestimando la resistencia del material) deberá ser evaluado como un Bimsoil utilizando las metodologías expuestas en este y otros trabajos. Por debajo de este rango el comportamiento será similar o igual al de la matriz, mientras que por encima del rango se puede asimilar o tratar como un enrocado o un macizo rocoso altamente fracturado.

4.3.2 Forma y disposición de las partículas gruesas:

La forma de las partículas gruesas o bloques tiene influencia en la resistencia del material. A mayor angulosidad y menor esfericidad, se consigue un mayor rozamiento interno en el material. De acuerdo con Marsal (1973), a mayor angulosidad de las partículas, se presenta una mayor resistencia en el suelo y dicha resistencia se incrementa con la rugosidad hasta alcanzar un punto óptimo (Morris, 1960).

Por otro lado, se ha demostrado que la disposición de los bloques, entendida como la orientación del eje de longitud máxima respecto a la horizontal, contribuye a dar una mayor o menor resistencia al material. Lindquist & Goodman (1994) y Medley & Sanz (2004) muestran que bloques orientados con altos ángulos respecto a las pendientes aumentan la estabilidad del talud, lo cual es debido al efecto que tiene sobre la tortuosidad o irregularidad en la superficie de rotura.

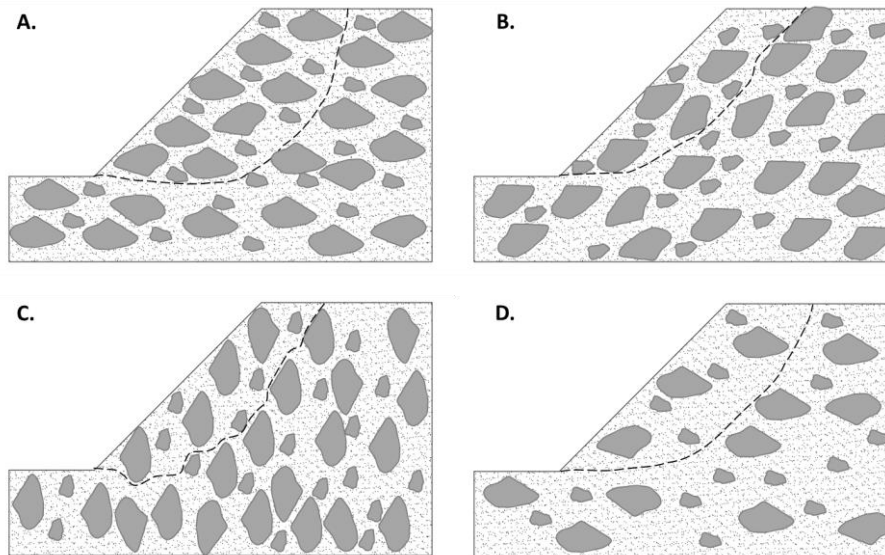


Figura 4-5. Influencia de disposición de los bloques en la estabilidad del talud. A. Bloques paralelos a horizontal. B. Bloques paralelos a superficie de talud. C. Bloques perpendicular a la horizontal. D. Bajo porcentaje de bloques. Basado en Medley & Sanz (2004).

Lindquist (1994) realizó ensayos de laboratorio sobre muestras preparadas con diferentes orientaciones de los bloques, encontrando las menores resistencias cuando la orientación del bloque era de 30° y mayor cuando era perpendicular al esfuerzo principal (90° respecto a la vertical).

Lo anterior es coherente en el sentido de que la superficie de rotura tenderá a rodear los bloques (ver página 18), dando un aporte mayor a la resistencia los bloques dispuestos perpendiculares al esfuerzo principal. A pesar de esto, esta orientación no representa el factor más influyente en la resistencia del material, ya que solo será influyente en el caso de porcentajes de bloques significativos y tamaño de los mismos suficientemente grandes para causar grandes desviaciones o irregularidades en la superficie de rotura.

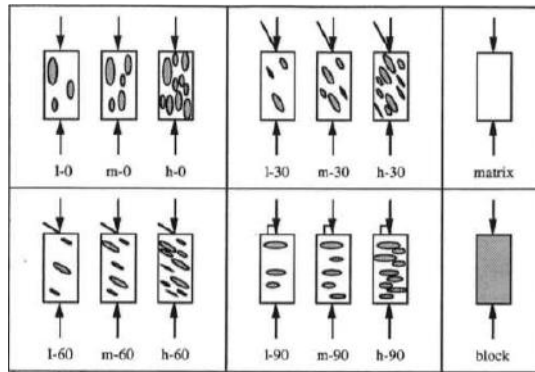


Figura 4-6. Representación de la orientación de los bloques en las muestras preparadas por Lindquist (1994).

4.3.3 Tamaño máximo de partículas:

Para materiales relativamente homogéneos conformados por el mismo tipo de suelo, es de esperarse que presente una mayor resistencia una masa de suelo grueso granular conformada por partículas de diámetro pequeño que una masa conformada por partículas de gran diámetro (Nanclares 2018), esto puede ser explicado debido a que con mayores tamaños de partícula aumentaría la relación de vacíos, disminuyendo los puntos de contacto entre partículas.

Así también, en dos muestras del mismo material, cuyo coeficiente de uniformidad es igual, la resistencia al corte de la muestra que presenta un tamaño mayor de grano es menor que la muestra que presenta un menor tamaño” (Marsal 1973).

En el caso de Bimsoils la superficie de debilidad se encuentra en el contacto o interfaz bloque-matriz, y con tamaños mayores de bloques esta superficie se haría menos irregular al rodear el bloque (explicando a mayor profundidad en página 18), cuyas caras en teoría son más regulares que el arreglo de varios bloques en contacto (ver Figura 4-7).

Por último, bloques de gran tamaño (en teoría más densos que la matriz) darían más peso mayorando la densidad del Bimsoil en general, haciéndolo más inestable al aumentar las fuerzas desestabilizadoras, y haciéndolo más susceptible a generar fenómenos de caídas de bloque.

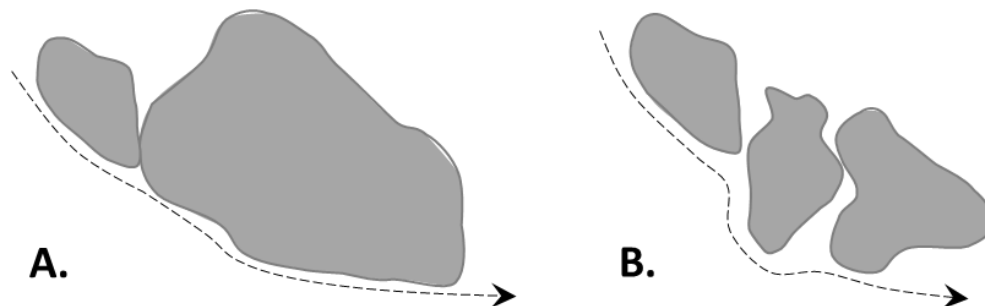


Figura 4-7. Influencia del tamaño de bloques en la tortuosidad de superficie de rotura. Elaboración propia.

Por otra parte, Wang et al. (2020) al llevar a cabo ensayos de laboratorio variando el tamaño de los bloques, obtuvieron un incremento en el ángulo de rozamiento interno y disminución de la cohesión al aumentar el tamaño de los bloques. Esto es aplicable cuando los tamaños de los bloques no difieren mucho entre sí y no se llega a diámetros métricos, donde el peso del bloque mayoraría considerablemente las fuerzas desestabilizadoras según su disposición.

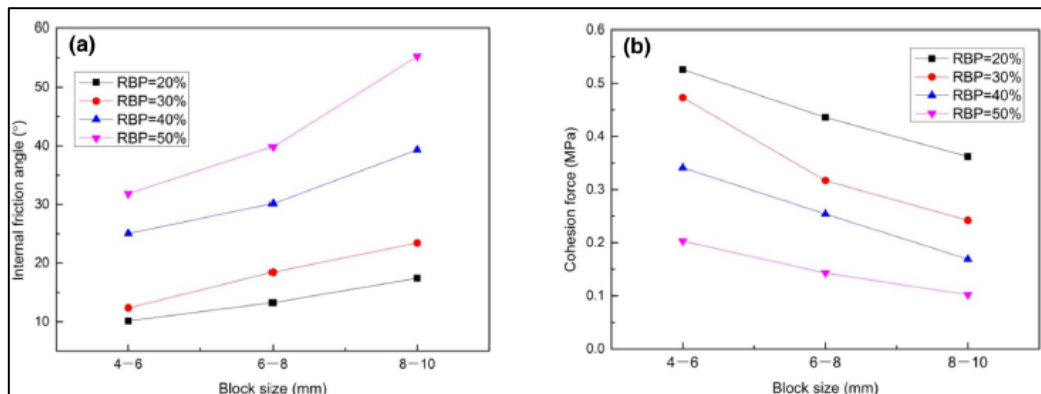


Figura 4-8. Influencia del tamaño de bloque en cohesión y ángulo de rozamiento interno del material. Tomado de Whang et al 2020.

Los límites de tamaños de bloques que presentan influencia en la resistencia de Bimsoils son presentados en el apartado 6. Análisis y discusión.

4.3.4 Influencia de resistencia de la matriz y erodabilidad:

Desde el enfoque clásico, la matriz es el elemento más importante en el comportamiento geomecánico del material. No obstante, dicho enfoque tiende a subestimar o sobrestimar la resistencia del Bimsoil. De acuerdo con lo planteado en Campos et al. (2018), considerar solo la resistencia de la matriz hace que los diseños se sobredimensionen, si la naturaleza de la matriz es cohesiva y el contenido de bloques es alto, o se subdimensionen cuando la naturaleza de la matriz es predominantemente granular y el grado de cementación entre bloque y matriz es bajo.

Sin embargo, es cierto que la matriz es la responsable de la adherencia y sostenimiento en gran parte de los bloques, relacionada entonces con la cohesión del material; lo cual queda demostrado con los resultados de Kalender et al (2014), Sonmez et al (2009), entre otros; donde a medida que aumenta el volumen de bloques, la cohesión tiende a disminuir, pues disminuye el porcentaje de matriz en el material.

Por tanto, la matriz juega un papel muy importante en la resistencia y deformación del material, y debido a esto las ecuaciones empíricas de Kalender et al. (2014) y Sonmez et al. (2009), entre otros, parten de la base del conocimiento de los parámetros resistentes de la matriz para calcular los parámetros globales del material.

En términos deformacionales, Campos et al. (2018) observó, a partir de modelos de elementos finitos, que inicialmente la resistencia, en el sentido de oposición del material a la deformación, es dominada por la matriz (deformaciones bajas) y posteriormente se presenta una zona dominada por los bloques de roca (deformaciones altas). Es decir, en proyectos donde se admiten pequeños asentamientos, los resultados son similares con solo matriz o incorporando a la mezcla bloque matriz, mientras que para proyectos que permitan asentamientos mayores, se puede realizar un análisis considerando los bloques, siempre que la rigidez de los bloques sea alta.

Otro factor muy importante dado por la matriz en la resistencia Bimsoils es debido a la erosión diferencial que actúa en estos materiales. En consecuencia, al contraste entre bloque y matriz, en general la matriz puede ser fácil y rápidamente erosionable al ser expuesta en un talud, mientras que los bloques tardarán mucho más en hacerlo.

De acuerdo con Suarez (2001) la erodabilidad en suelos granulares depende, entre otros aspectos, del peso de las partículas, siendo baja en gravas gruesas y alta en limos y arenas finas, mientras que en suelos cohesivos depende del tipo de arcilla y la cohesión del material (p.e. las esmectitas sufren ciclos de expansión contracción, generando agrietamiento, y consigo una pérdida de cohesión del conjunto, siendo fuerte el proceso de erodabilidad en el talud).

El resultado de la diferencia de erodabilidad, definida como “la susceptibilidad o facilidad con que un suelo es desprendido y transportado” (Suarez 2001), es la exposición o saliente de los bloques en el talud y la posible caída o desprendimientos de estos por acción de la gravedad.

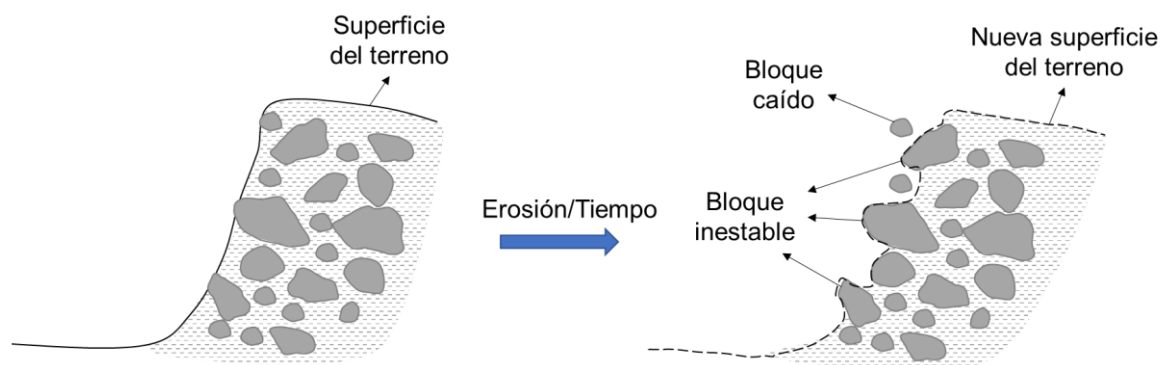


Figura 4-9. Fenómeno de desprendimiento de bloques

Es importante señalar que el fenómeno de desprendimiento de los bloques corresponde a uno de los fenómenos de inestabilidad de taludes más frecuente e importante en estos materiales. Sin embargo, en muchas ocasiones esto no es tenido en cuenta en los análisis de estabilidad realizados por los geotecnistas, quienes tienden a analizar deslizamientos al dar el enfoque

de un suelo, y los análisis de caída de bloque son normalmente solo estudiados en casos de taludes constituidos por un macizo rocoso.

Los ensayos de erodabilidad que pueden ser utilizados para evaluar este fenómeno de erosión diferencial son:

- Ensayo de desmoronamiento (Crumb test), el cual determina cualitativamente la dispersividad de un suelo. Este ensayo no es recomendable cuando la arcilla predominante es caolinita (Suarez 2001).
- Ensayo Pinhole, valido para limo arenoso, o arena limosa no representativo si se cuenta con una matriz compuesta de mezcla de todos los componentes: grava-arena-limo-arcilla;
- Ensayo de erosión por chorro de agua, desarrollado por Suarez (2001), sometiendo una muestra de suelo al ataque de un chorro de agua con diferentes ángulos de incidencia y presión de agua, y midiendo el volumen de suelo erosionado en el tiempo.

Es muy importante un estudio cuidadoso de desprendimientos de bloques, analizando la erodabilidad de la matriz y diseñando medidas que mitiguen la erosión de esta, utilizando protecciones como biomantos, mantos-sintéticos, tejidos y mantos orgánicos o hidrosiembra con el fin de proteger la capa superficial del suelo, e implementar drenajes que eviten el fenómeno de pérdida de finos por tubificación o “piping”.

En general las soluciones que restauren o creen una cobertura vegetal son ideales, pues esta capa vegetal opera como una capa protectora entre los agentes atmosféricos y el suelo mitigando sus efectos (Universidad de Córdoba 2014), aislando el suelo del impacto de las gotas de agua, incrementando con las raíces la resistencia al esfuerzo de corte de la escorrentía, mejorando la infiltración del suelo, disminuyendo la humedad por la transpiración de las plantas y disminuyendo la velocidad de escorrentía superficial.

4.3.5 Porosidad, permeabilidad y succión:

Las propiedades hidrogeológicas (porosidad y permeabilidad) de los materiales compuestos de una matriz con partículas gruesas, en general se suponen mayores que los de la propia matriz. Esto es lo observado en ensayos de permeabilidad en depósitos aluviales, coluviales, glaciales, etc.

Sin embargo, Vallejo & Mawby (2000), a partir de ensayos de laboratorio en muestras compuestas de mezcla de arena uniforme y arcilla, encontraron que la porosidad de la mezcla era menor que la de los dos componentes por separado, siendo mínima cuando el porcentaje de arena estaba entorno al 76%. Igualmente, Vallejo & Zhou (1994) obtuvieron un resultado de laboratorio que mostraban que la permeabilidad de una muestra constituida de matriz fina

con partículas gruesas (perlas de vidrio) disminuía a medida que aumentaba el volumen de las partículas gruesas.

Estos resultados resultan contradictorios con la práctica, pero pueden ser entendidos si se tiene en cuenta el fenómeno de la succión dentro del suelo, causante de la capilaridad o potencial matricial y del potencial osmótico.

La succión matricial o potencial matricial es definida de acuerdo con Alonso et al. (1987), como la diferencia entre la presión de aire de poros y la presión de agua de poros, dependiente de la tensión superficial, y el radio de la curvatura del menisco. Por tanto, es mayor en suelos granulares. Dicha succión es la causante de la retención de agua dentro de los espacios vacíos, generando una disminución en el resultado de la permeabilidad en los ensayos.

En suelos heterogéneos, la succión tenderá a ser mayor ya que estos presentan espacios vacíos en interagregados e intragregados. En este caso, los vacíos corresponden a los espacios existentes en el contacto bloque-matriz, dentro de fisuras entre los bloques y dentro de la misma matriz, dando como resultado poros pequeños que favorecen la succión capilar.

Además, de acuerdo con múltiples autores, Alonso et al (1987) expone que el incremento en la succión matricial resulta en un aumento de la cohesión efectiva y parece también aumentar el ángulo de rozamiento interno del material. Sin embargo, dicho aumento está limitado y no aumenta indefinidamente, mientras que el gradiente dado por la succión total suma de succión matricial y osmótica influye en el flujo de agua a través del material

De acuerdo con lo anterior, la succión presente en Bimsoils favorecería la resistencia al corte del material, siendo entonces un factor más que apoya la idea de que considerar solamente la resistencia dada por la matriz del material es una gran subestimación de la resistencia de éste.

4.4 Propagación irregular de la superficie de rotura

Como regla general para diferentes condiciones de carga o tensión en Bimrocks, la superficie de rotura depende de la proporción de bloques de roca, el contraste de bloques de roca y la matriz, y las propiedades geométricas de los bloques de roca (Afifipour & Moarefvand (2013), de acuerdo con Lindquist (1994); Medley (1994); Sonmez et al. (2009); Coli et al (2012); Afifipour & Moarefvand (2012)). Además, la superficie de rotura se propaga principalmente en el contacto o interfaz bloque-matriz.

De acuerdo con los resultados de simulaciones numéricas en ensayos de Xu et al. (2008), así como ensayos de laboratorio de otros autores (Afifipour & Moarefvand (2013); Lindquist (1994)), y ensayos de campo (Xu et al (2007), existen tres tipos de rotura posibles en materiales tipo Bimrock: (1) rotura que rodea una cara del bloque, (2) rotura que envuelve o

rodea dos caras del bloque y (3) rotura que pasa a través de los bloques débiles. (ver Figura 4-10).

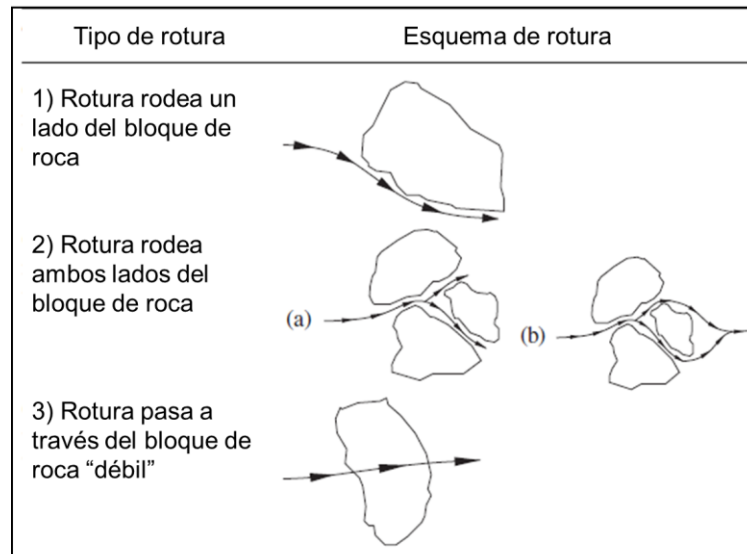


Figura 4-10. Tipos de rotura en Bimrocks. Tomado y modificado de Xu et al. (2008)

En los tres casos anteriores el resultado es una superficie de rotura irregular, controlada por la distribución y tamaño de los bloques, que se genera a tensiones mucho mayores que las que soporta un suelo homogéneo. En el caso de la rotura a través de bloques débiles, igualmente se debe superar la resistencia del bloque que será siempre mayor que la de la matriz.

De acuerdo con lo anterior, un análisis de estabilidad de taludes tradicional estaría no solo subestimando la resistencia global del material, al considerar los parámetros resistentes de la matriz, sino que a su vez el simplificar la superficie de deslizamiento a una rotura circular lleva a una mayor subestimación.

Un ejemplo de una metodología que tiene en cuenta la presencia de bloques en la desviación natural de la superficie de rotura es presentado en la "Guía para el proyecto y ejecución de muros de escollera en obras de carretera" del Ministerio de Fomento de España, en su apartado 4.2.2.4. En dicha guía se propone forzar la geometría de las superficies de deslizamiento en el análisis de estabilidad local, para que estas pasen a través del contacto de los bloques, de acuerdo con su disposición en contra pendiente del talud, no cortando los bloques como lo haría una superficie circular tradicional.

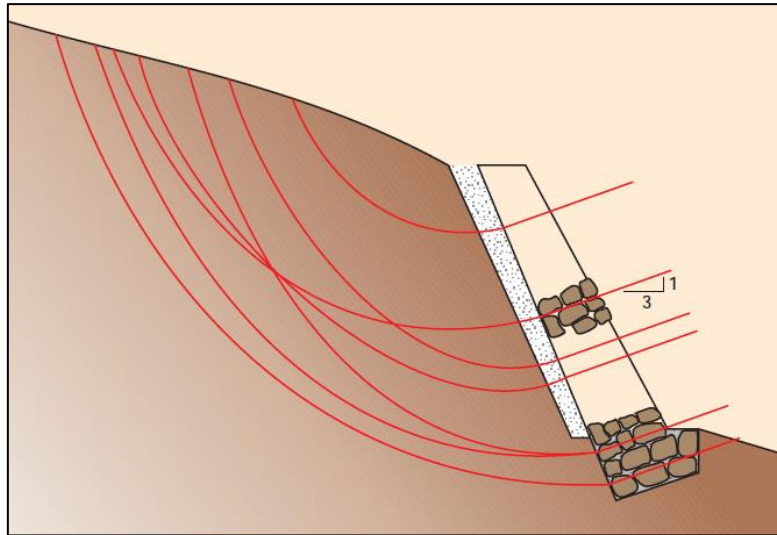


Figura 4-11. Ejemplo superficies de deslizamiento análisis de estabilidad local muro de escollera. Ministerio de Fomento de España 2006.

Estas metodologías que fuerzan las superficies de rotura según la disposición de los bloques pueden ser implementadas con éxito en casos donde se conozca la orientación general de los bloques, y estos tengan tamaños significativos.

4.5 Escenarios análisis de estabilidad

La necesidad de generar modelos sencillos que simulen lo más fielmente posible el comportamiento real lleva a la simplificación, dejando de lado los elementos menos relevantes o asumiendo generalidades, con el fin de poder dar solución al problema. En el análisis de estabilidad de taludes de terrenos tipo Bimsoils, es necesario realizar dichas simplificaciones, pero no se puede perder de vista los factores más relevantes ya mencionados. Zhou et al. (2020) menciona cuatro categorías para analizar la estabilidad de taludes en estos materiales:

- i) Modelo que asume un talud de suelo homogéneo donde la resistencia es principalmente controlada por la matriz. En este modelo, la minorización o incremento del coeficiente (calibración) se basa en la experiencia ingenieril, lo que lleva a una menor fiabilidad en los resultados, pudiendo subestimar los parámetros del material y dejando de lado los factores que controlan su comportamiento.
- ii) Modelo que asume un talud homogéneo de suelo-roca donde la resistencia del material en el talud se relaciona con el Bimsoil. Este modelo tiene pobre aplicabilidad en taludes que cuentan con grandes bloques y puede no considerar la dispersión o anisotropía en la resistencia del material. Puede ser usado cuando los bloques no son muy grandes y no difieren mucho entre sí, y se tiene en cuenta parámetros estimados del Bimsoil.

- iii) Modelo que considera el efecto resistente dado por las rocas. Este modelo considera una mejora en la resistencia dada por la roca dentro del material, pero ignora la debilidad de la interfaz suelo-roca y frecuentemente sobrestima la estabilidad del talud. Un ejemplo de este modelo es el desarrollado por Liu et al. (2018), que definió un medio de dos fases, suelo y roca, con diferentes resistencias, y aplicando modelamiento de elementos finitos con una distribución aleatoria de los bloques a partir de la estimación de VBP, obtuvo un incremento notable en el factor de seguridad.
- iv) Modelo que considera la dispersión de la resistencia dentro del Bimsoil, basado en un algoritmo Montecarlo. Este modelo tiene resultados más fiables porque tiene en cuenta la debilidad en la interfaz y la configuración de las rocas dentro del talud. Sin embargo, es el modelo más complicado de implementar. Este análisis puede ser el más preciso si se aplican practicas fiables en la realización de ensayos de laboratorio y muestreo, además de ser calibrado con la estimación de parámetros utilizando lo expuesto en los epígrafes subsiguientes. Por ejemplo, se tiene el modelo desarrollado por Zhou et al. (2020), quienes, con el fin de poder dar un rango de dispersión en la resistencia, realizaron ensayos triaxiales sobre Bimsoil, cortes directos en el contacto bloque-matriz y ensayos de carga puntual sobre los bloques.

Modelo	Parámetros de entrada	Método de cálculo	Deficiencias
Talud homogéneo matriz	$\phi^{\circ}_M C_M \gamma_M$	Equilibrio límite o Elementos finitos	- Subestima la resistencia del material - No reproduce fielmente el comportamiento del talud - Posición y geometría de superficie de deslizamiento poco confiable
Talud homogéneo suelo-roca	$\phi^{\circ}_{Bimsoil} C_{Bimsoil} \gamma_{Bimsoil}$	Equilibrio límite o Elementos finitos	- No aplicable con la presencia de bloques de gran tamaño - Factores de seguridad confiables pero geometría de rotura muy simplificada - Posición de superficie de deslizamiento poco confiable
Talud de dos fases suelo-roca	$E_M \nu_M \phi^{\circ}_M C_M \gamma_M ; E_{Br} \nu_{Br} \phi^{\circ}_{Br} C_{Br} \gamma_{Br}$	Elementos finitos	- Puede sobrestimar la resistencia, factores de seguridad poco confiables, pues ignora resistencia en interfaz bloque-matriz
Dispersión de resistencia	$E_M \nu_M \phi^{\circ}_M C_M \gamma_M ; E_{Br} \nu_{Br} \phi^{\circ}_{Br} C_{Br} \gamma_{Br} ; E_{Bimsoil} \nu_{Bimsoil} \phi^{\circ}_{Bimsoil} C_{Bimsoil} \gamma_{Bimsoil}$	Elementos finitos	- Requiere de muchos parámetros de entrada

ϕ° :Ángulo de rozamiento interno; C: Cohesión; E: Modulo de elasticidad; ν :Coeficiente de Poisson; γ : Densidad; Subfijos: M:Matriz; Br: Bloque de roca

Tabla 4-3. Modelos o escenarios de análisis de estabilidad de taludes en Bimsoil. Elaboración propia

5 CARACTERIZACIÓN GEOTECNICA DE BIMSOILS

Como se ha expuesto, existen varios elementos responsables del comportamiento geomecánico de un Bimsoil, haciéndose fundamental una determinación o estimación precisa de cada uno de ellos. En ingeniería geológica y geotécnica existen en general dos grandes grupos de técnicas para determinar las propiedades del terreno, ensayos in situ y ensayos de laboratorio. Los ensayos in situ pueden ser directos, cuando se tiene contacto físico o mecánico con el material ensayado, e indirectos cuando a partir de técnicas como la geofísica se calcula la respuesta del material ante un agente o fuente de energía.

Para materiales heterogéneos como Bimsoils, muchas técnicas tradicionales presentan limitaciones o errores debido a la anisotropía de éste. Por tanto, se debe tener una consideración especial y un diseño de campañas de exploración y ensayos acorde con la naturaleza del material. A continuación, se describen las técnicas más adecuadas para caracterizar un Bimsoil.

5.1 Exploración directa y ensayos In situ

La perforación o sondeo mecánico constituye la técnica más ampliamente utilizada en geotecnia para ejecución de ensayos in situ y recuperación de muestras que serán ensayadas en laboratorio. Cuando el terreno está constituido por un material compuesto de una matriz y bloques de roca rígidos en altas proporciones (>25%), comienzan a existir complicaciones en el trabajo de perforación y recuperación de muestras debido a la heterogeneidad en la resistencia y la cohesión.

Los objetivos principales de la exploración con **sondeos** en Bimsoils es la recuperación de muestras, que serán en su mayoría alteradas, así como la ejecución de ensayo de penetración estándar (SPT), que de ser posible de realizar serán una buena información que utilizar.

Agrillo (2021) expone los problemas de usar “drilling bit” en el caso de contar con una matriz arcillosa, debido a que el uso de agua durante la perforación podría destruir la matriz, situación que no es ideal, pues es fundamental la recuperación de ésta. El empleo entonces, de perforación en seco “dry drilling” es más adecuada, pero igualmente puede ser problemática por la destrucción de la muestra. Por otro lado, se ha reportado buen recobro de testigos usando barrenos saca testigos de triple tubo (Roadifer et al. 2009, citado por Medley y Zekkos 2011).

Si este material es trascendental para los diseños de la obra, es recomendable entonces una perforación mucho más cuidadosa, intentando trabajar enteramente con perforación en seco, con recuperación de testigo continua, y ejecutando maniobras de rotación en el caso de toparse con bloques de tamaño tal que impidan el avance a percusión. Idealmente, se debe realizar ensayo de **SPT** en segmentos donde predomine la matriz.

Por otra parte, la longitud y densidad de perforación en estos materiales tipo Bimrock/Bimsoil debe ser considerada de manera especial. Ramos et al. (2020) señala que “ni la longitud de la muestra, ni la forma de los bloques son factores que modulen la incertidumbre en la determinación de VBP, mientras que el número de perforaciones como la profundidad de muestreo es un aspecto que permite aumentar o disminuir la incertidumbre”. Dicha incertidumbre ya había sido reseñada por Medley (2002) y Medley & Zekkos (2011), la cual es mucho más relevante en el caso de contar con bloques de gran tamaño en vez de muchos bloques de menor tamaño, debido a que estadística y geoméricamente es más probable que la perforación no atraviese la longitud máxima del bloque, subestimando después la estimación del tamaño de bloques, así como la proporción de los mismos VBP.

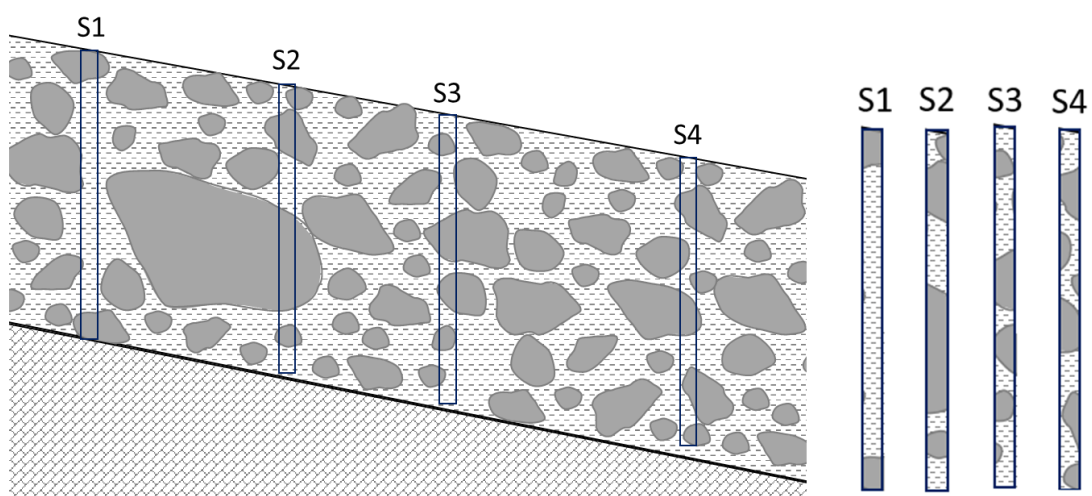


Figura 5-1. Ejemplificación incertidumbre exploración con sondeos. Elaboración propia

La Figura 5-1 muestra la importancia de la planificación y densidad en el número de perforaciones sobre estos materiales. En el caso de solo haber realizado el sondeo 1 (S1), la estimación de porcentaje de matriz sería sobrestimado. En el caso de que el sondeo 2 (S2) hubiera quedado a la mitad, falsamente se podría pensar que se llegó a un estrato de roca. En el caso de haber realizado los 4 sondeos (S1 a S4), las estimaciones finales serían mucho más representativas.

Como se puede observar, la incertidumbre al realizar una exploración 1D es grande. Por tanto, es recomendable siempre el estudio y **análisis de cortes** donde se cuenta con una visión bidimensional del material y su composición interna. Es ideal la realización de levantamientos detallados sobre taludes expuestos, determinando con cuidado las proporciones bloque-matriz, obteniendo muestras inalteradas de la matriz de ser posible, y realizando ensayos in situ simples, como penetrómetros de bolsillo en matriz y bloques blandos o vanetest sobre la matriz arcillosa poco firme o blanda (aplicado con éxito por Alejano & Carranza-Torre 2011).

También puede medirse la resistencia de los bloques con martillo de Schmidt, especialmente si son grandes, evitando los contornos, de rigidez grande.

En el caso de no contar con taludes expuestos, es recomendable la ejecución de **calicatas** que igualmente expongan y permitan visualizar el material, además de que en caso de ser posible permita recuperar muestras de la matriz. Sobre la recolección de muestras, Agrillo (2021) hace la toma utilizando cincel y martillo, y luego envolviendo en papel periódico y papel escocés con el fin de conservar la humedad.

Un ensayo específico que ha sido desarrollado en estos materiales es el denominado **Bimtest**, que en principio es un ensayo in situ de corte a gran escala. El ensayo Bimtest se realiza al tallar un bloque del material, manteniendo sus propiedades naturales, y sometiéndolo a un esfuerzo de manera controlada utilizando un cilindro hidráulico hasta conseguir el fallo del material (ver Figura 5-2). Las dimensiones del bloque tallado de este ensayo utilizados por Coli et al (2011) fueron de 80 cm de ancho y largo y 50 cm de alto. La principal ventaja de este ensayo es que no se fuerza el fallo por una superficie de rotura específica, como en un corte directo, por lo que el resultado es mucho más representativo del comportamiento del material.

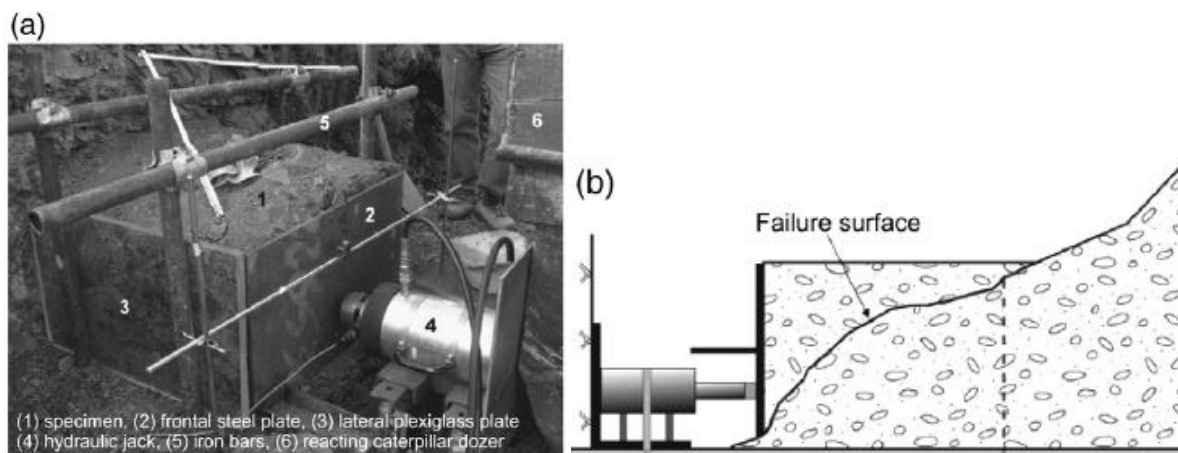


Figura 5-2. Bimtest. Tomado de Coli et al 2011.

Es importante comentar que la fuerza máxima alcanzada en el ensayo de Coli et al 2011 fue de 74.4 kN, que en términos de esfuerzo corresponde a 186 kN/m². En el caso de los ensayos de gran escala como triaxiales llevados a cabo por Nanclares (2018) el valor de esfuerzo normal máximo alcanzado es de 1000 kN/m². Estos valores de esfuerzos en los ensayos están ubicados en la región lineal de la curva esfuerzo tangencial vs esfuerzo normal, siendo válido el criterio de rotura lineal de Mohr-coulomb, además aplicable en estudio de estabilidad de taludes donde los esfuerzos involucrados se mueven en la zona plástica de la curva.

5.2 Exploración indirecta

Ante la incertidumbre en la exploración directa por medio de perforaciones mecánicas, los ensayos geofísicos resultan una herramienta valiosa que ante la heterogeneidad del material pueden mostrar tendencias o variaciones significativas en el mismo. Uno de los casos más relevante es la variación lateral o en profundidad del porcentaje de bloques, que por medio de sondeos es difícilmente detectado e interpretado, mientras que con ensayos geoléctricos o sísmicos principalmente, pueden ser bien detectados y modelados.

La resistividad eléctrica constituye uno de los parámetros físicos que revelan mejores variaciones internas en Bimsoil o contactos con otros materiales. Es recomendable apoyar la exploración con la ejecución de tomografías de resistividad eléctrica o sondeos eléctricos verticales, que a menor costo permiten cubrir mayor área y por tanto disminuyen la incertidumbre en la generación de modelos.

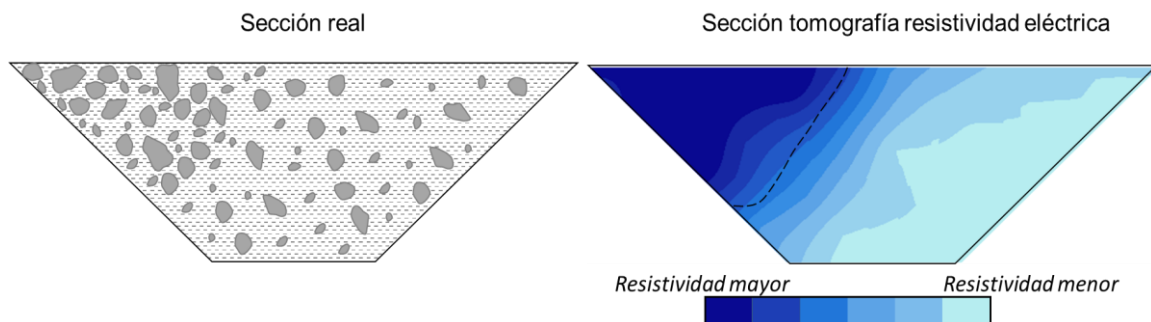


Figura 5-3. Ejemplo teórico aplicación Geoeléctrica en caracterización de Bimsoils

Trabajos como los de Abu-Hassanein et al (1996) y Abu-Hassanein (1994) muestran una relación entre la compactación o densidad del material y conductividad eléctrica (inversa de la resistividad), así como también una relación entre la conductividad eléctrica y porosidad del material.

A pesar de que estas relaciones no contienen muchos datos, y se necesita mayor investigación al respecto, es claro que la resistividad está influenciada por la cantidad de espacios vacíos rellenos de aire o agua (poros), relacionado a la compacidad del material, así como por la mineralogía que compone la estructura del mismo. En el caso de Bimsoils los bloques de roca serán probablemente mucho más resistivos que la matriz, y por tanto al variar su proporción en profundidad o lateralmente, puede ser detectado por ensayos eléctricos.

Por otra parte, los ensayos de sísmica de refracción y ensayos de análisis de ondas sísmicas superficiales como el método de análisis multiespectral de ondas superficiales (MASW), o sísmica pasiva tipo REMi, pueden no solo detectar los cambios de rigidez consecuencia de la estructura interna del Bimsoil (de nuevo están en función principalmente del porcentaje de bloques), sino que también a partir de correlaciones y ecuaciones empíricas permiten

determinar parámetros geotécnicos muy importantes del material, que apoyarían la caracterización de este.

A partir de ensayos sísmicos es posible la obtención de parámetros tales como la densidad (variable en las dimensiones del espacio), módulos de elasticidad dinámicos, coeficiente de Poisson y la velocidad de ondas P y ondas S que puede ser utilizada para estimar N de SPT, VBP, entre otros (y muy útil para la determinación de la aceleración de cálculo de la acción sísmica). La Tabla 5-1 presenta algunas correlaciones útiles, válidas para materiales grueso granulares y depósitos heterogéneos, que pueden ser utilizadas para estimar parámetros geotécnicos a partir de resultados de ensayos sísmicos.

Correlación	Autor/referencia
$VBP = 31.93V_p - 107.44; r = 0.57; V_p \text{ en km/s}; VBP \text{ en } \%$	Kahraman et al. (2015)
$VBP = 320.09d - 772.06; r = 0.93; d \text{ en g/cm}^3$	Kahraman et al. (2015)
$VBP = (V_B * (V_s - V_M)) / (V_s * (V_B - V_M))$	Mahdevari & Maarefvand (2017)
$E = 1.53V_p + 8.88q_G - 21.69P_M - 821.29$	Chang et al. (2015)
$V_s = 59.44N^{0.109}Z^{0.426}; r = 0.89; V_s \text{ en m/s}; Z \text{ en m}$	Akin et al. (2011)
$V_s = 84N^{0.31}$	Ohba & Toriumi (1970) en Hasancebi & Ulusay (2006)
$V_s = 76N^{0.33}$	Imai & Yoshimura (1970) en Hasancebi & Ulusay (2006)
$V_s = 68.3N^{0.292}$	Kiku et al. (2001) en Hasancebi & Ulusay (2006)
$V_s = 32.8N^{0.51}$	Sisman (1995) en Hasancebi & Ulusay (2006)
$V_s = 22N^{0.85}$	Jafari et al. (1997) en Hasancebi & Ulusay (2006)

Vs: velocidad ondas S; Vp: velocidad ondas p; Vb: velocidad ondas p en bloque; VM: velocidad ondas p en matriz; d: densidad; VBP: Proporción volumen de bloques; Z: profundidad en metros; qG: resistencia a compresión de gravas; PM: resistencia a penetración de la matriz en MPa; E: Modulo de Young; N: golpes SPT

Tabla 5-1. Algunas correlaciones entre parámetros sísmicos y parámetros geotécnicos

5.3 Ensayos de laboratorio

Como se ha descrito y es de conocimiento expandido, la realización de ensayos de laboratorios tradicionales sobre materiales con partículas de gran tamaño es en la mayoría de las veces inviable. Como los describe Hassan et al. (2021), la caracterización mecánica de estos materiales usando dispositivos de laboratorios clásicos es difícil por la presencia de elementos de gran tamaño que perturban el resultado del ensayo, ya que de acuerdo con las normas UNE y ASTM el diámetro máximo de partícula en un ensayo triaxial o corte directo es de 1/6 del diámetro de la célula o del lado de la caja de corte respectivamente (ver Figura 5-4 y Figura 5-5).

Ante esta problemática, existen dos soluciones generales que han sido implementadas: la primera es la realización de ensayos a gran escala, diseñando instrumentos de mayor tamaño, poco común debido a los costos o la poca oferta de laboratorios con estos equipos; la segunda corresponde a los métodos de sustitución, remplazo o descarte de grandes partículas (scalping/replacement methods).

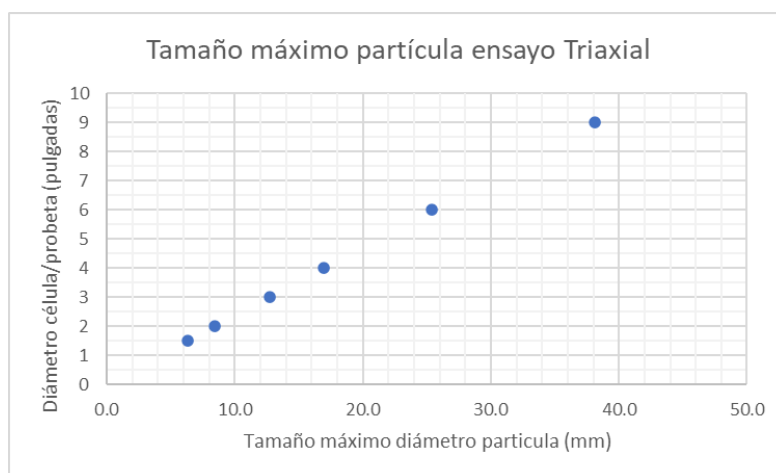


Figura 5-4. tamaño máximo partícula ensayable según diámetro de la célula en ensayo triaxial

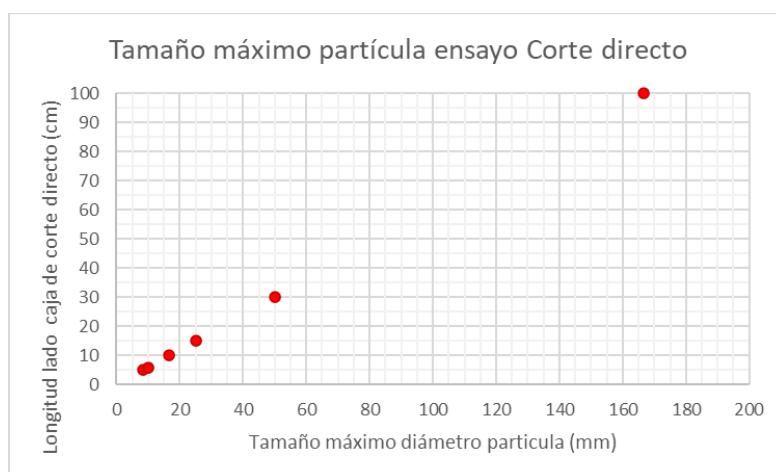


Figura 5-5. tamaño máximo partícula ensayable según longitud de caja de corte en ensayo corte directo

Dentro de los ensayos de laboratorio de gran tamaño destacan los trabajos de Nanclares (2018), Aguirre (2018) e investigaciones del CEDEX, quienes desarrollan instrumentación para la ejecución de ensayos triaxiales y de corte directo para este tipo de materiales gruesos.

Algunos ensayos de laboratorio clásicos que pueden realizarse y aportan valiosa información sobre el material son: ensayos de granulometría por tamizados, densidad aparente, densidad seca, densidad de distintas fracciones de las partículas sólidas y ensayos de caracterización sobre la matriz, mayormente usando muestras remoldeadas de la misma.

El trabajo sobre muestras remoldeadas es prácticamente igual al trabajo sobre muestras inalteradas. En estos materiales, la resistencia residual y pico pueden ser muy cercanas, debido a que el material rompe por el contacto entre la matriz y la roca, pero los fragmentos de roca seguirían intactos y ante una nueva carga estos tendrían más influencia en la resistencia en un ensayo triaxial. Ensayos triaxiales llevados a cabo por Agrillo (2021) muestran con un VBP de 25% que la presencia de bloques de roca provoca la curvatura e incrementa la resistencia al corte a lo largo de esta, permitiendo al material mantener un esfuerzo desviador residual post-pico muy cercano o casi igual que el pico.

Igualmente, este trabajo con muestras remoldeadas debe ser evaluado para cada caso específico, pues en ocasiones pueden perderse ciertas características como cementaciones existentes en el suelo natural, e incluso pérdida del efecto de succión ya comentado.

Las **técnicas de sustitución o corte** (scalping en inglés) y remplazamiento de las partículas de gran dimensión, corresponden en sacar estas partículas para permitir ensayos sobre el suelo reconstituido, de manera tal que la muestra ensayada conserve las propiedades más importantes del material original y sea lo más representativa posible. Esto implica el remplazo con partículas de menor tamaño o simplemente la eliminación de partículas de ciertos diámetros. Estos métodos tratan de conseguir muestras representativas controlando propiedades antes y después del corte o remplazo, como densidad seca, densidad relativa, grado de compactación o índice de poros.

De acuerdo con Dorador & Villalobos (2020), existen tres métodos:

- Método de corte (Scalping method) también llamado clipping o cut methods, consiste en eliminar las partículas de gran tamaño sin remplazo, ensayando el material fino restante por corte directo o ensayo triaxial.
- Método de corte y remplazo (scalping/replacement o Clipping-substitution), consiste en eliminar las partículas de gran dimensión remplazándolas por unas de menor diámetro, evaluando las características de compacidad del material, manteniendo la misma densidad que la muestra original.

- Método de la matriz, propuesto por Siddiqui (1984), el cual se basa en afirmar que la matriz controla la resistencia del material debido a que las partículas de gran tamaño están flotando en ella. Para ser aplicado se debe tener un gran contenido de finos, siendo ideal para muestras con contenido de finos mayor del 10% e hiatos o *gaps* importantes en la curva granulométrica, donde los finos y partículas grandes son claramente definidos. Como fue ya expuesto, este método puede resultar en una subestimación importante, pues las partículas de gran diámetro aumentan la resistencia del material.

Estos métodos tienen un rango de validez y aplicación, tanto en el porcentaje de partículas eliminadas y/o substituidas como en la relación de diámetros de partículas por las que se substituyen. La relación de corte o *Scalping ratio* (Sr) corresponde al tamaño máximo de partícula de la muestra original respecto al tamaño máximo de partícula de la muestra reconformada:

$$Sr = \frac{D_{\text{máx en muestra original}}}{D_{\text{máx en muestra reconformada}}}$$

De acuerdo con diferentes autores, el porcentaje de corte o substitución máximo recomendado para que la muestra siga siendo representativa está entre un 10 y 30%. De acuerdo con la relación de corte y el % de corte/sustitución Dorador & Villalobos (2020) proponen un gráfico que especifica el rango de validez de estas técnicas (ver Figura 5-6).

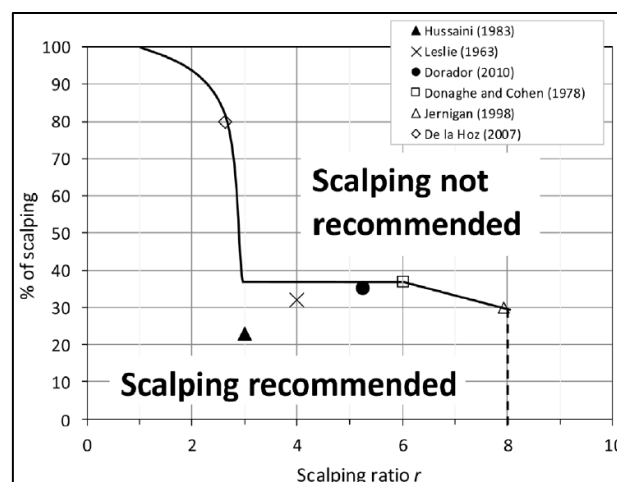


Figura 5-6. Rango recomendado de aplicación de técnicas de corte. Tomado de Dorador & Villalobos (2020).

Por otra parte El Dine et al. (2010) indican que el método de corte tiende a subestimar la resistencia de los suelos debido a que implica que la fracción volumétrica de las inclusiones y el parámetro de gradación ($d_{\text{min}}/d_{\text{max}}$) son disminuidos al mismo tiempo, las cuales son variables muy importantes en la resistencia del materiales; mientras que el método de corte y remplazo, el cual permite mantener el VBP igual, pero decreciendo el tamaño máximo (d_{max})

y su parámetro de gradación (d_{min}/d_{max}), resulta en un incremento de la resistencia al corte, y por tanto sobrestima las propiedades mecánicas del material.

5.4 Estimación de VBP (proporción volumétrica de bloques)

La estimación del parámetro VBP constituye uno de los trabajos más importantes en la caracterización de Bimsoils, así como una de las tareas más complejas de abordar. Esta se puede llevar a cabo con base a información de carácter: unidimensional, como perforaciones (Tiene et al., 2010); bidimensional, como levantamiento geológico en zona expuestas de corte y análisis de fotografías (Tiene et al., 2011; Colmenares et al., 2018); tridimensional, a partir de análisis granulométricos en laboratorio o in situ (Goodman y Ahlgren, 2000; Sonmez et al., 2004; Xu et al., 2007); o indirectos, como con relaciones de velocidad de propagación de ondas y densidad (Kahraman et al., 2015; Mahdevari y Maarefvand, 2017).

- Estimación en 1D: la estimación en una dimensión 1D se da en trabajos con sondeos o líneas de muestreo únicas (scan-line), en lo que se busca que mediante esta información unidimensional se pueda estimar la proporción volumétrica de los bloques. Como ya fueron planteadas las problemáticas en estas estimaciones, corresponde al método menos confiable, y es necesaria una gran cantidad de exploración de este tipo para disminuir la incertidumbre.

La perforación puede ser aprovechada aplicando técnicas complementarias en el sondeo realizado como registro de televiewer o ejecutando ensayos Downhole para obtener más información (Medley & Zekkos 2011).

- Estimación en 2D: se fundamenta en la aplicación de la estereología sobre registro fotográfico o directo de taludes o superficie que exponen el Bimsoil. Está basado en el trabajo de Rosiwal (1989), quien evaluó el contenido de un mineral en una roca usando transversas sobre sección delgada; se propone entonces como un método análogo para evaluar la proporción de volumen de bloques versus matriz.

Para realizar este procedimiento, se estiman las proporciones a partir del conteo del número de veces que se presenta la partícula a determinar (en este caso, los bloques), a distancias especificadas, de acuerdo con la escala de trabajo, sobre transversas a lo largo de toda la superficie (talud o imagen del mismo).

El más importante fundamento de la estereología es que incluso con muy poca o insuficiente muestra, proporciones lineares y areales de bloques son equivalentes a proporciones volumétricas de bloques (Ross 1986; Under Wood 1970; Weibel 1980; Medley 1994, citados por Medley & Zekkos 2011).

Se hace común el uso de imágenes digitales para realizar esta estimación (ver Figura 5-7), pues como expone Coli et al. (2012) esta técnica, es una forma relativamente rápida, no destructiva, y poco costosa para estudiar las variaciones de propiedades morfológicas, las cuales pueden ser descritas y cuantificadas a través de índices sintéticos. Dichos índices, cuando son correlacionados con los resultados de laboratorio o ensayos in situ, pueden servir como una rápida estimación indirecta de las propiedades del material.

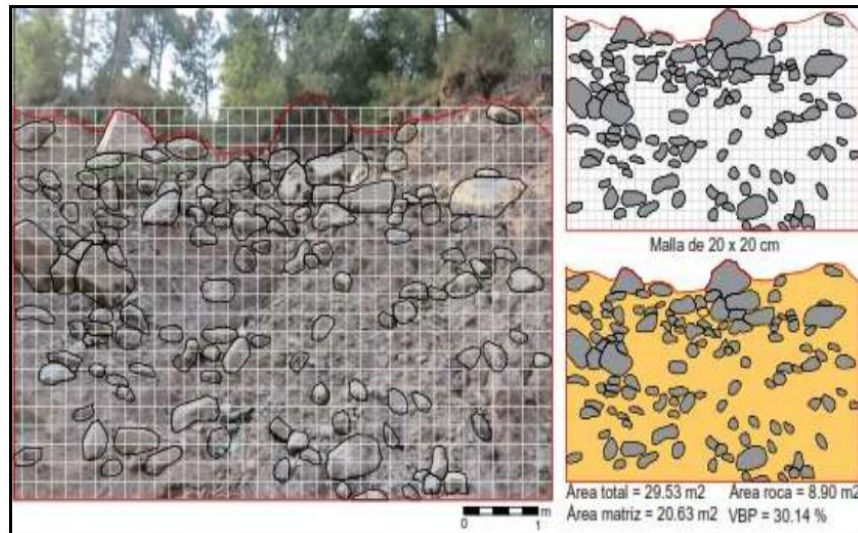


Figura 5-7. Ejemplo aplicación imagen 2D para estimación de VBP. Tomado de Pasato et al. (2019).

No solo es posible aplicar estereología sobre estas imágenes, sino que al digitalizarlas y utilizando técnicas computacionales es posible determinar directamente el área de bloques respecto al área total, y asumirlo como válido en volumen. Esto será posible siempre y cuando exista una resolución suficiente de la imagen respecto al tamaño de las partículas. Es recomendable a su vez, hacer la mayor cantidad de estimaciones visuales en campo posibles, utilizando tablas comparativas de referencias de porcentaje de partículas o minerales, como las utilizadas comúnmente en mineralogía y geología, con el fin de tener un rango y así poder calibrar los resultados de digitalización de imágenes.

- Estimación 3D: corresponde a la estimación de VBP a partir de relación de densidades de partículas gruesas y matriz respecto a la muestra en general, determinadas en laboratorio o directamente en campo. La ecuación propuesta por Lindquist (1994) es:

$$VBP = \frac{\text{densidad}_{general} - \text{densidad}_{matriz}}{\text{densidad}_{bloques} - \text{densidad}_{matriz}} * 100$$

Las densidades de matriz y bloques serán determinados en laboratorio a partir de técnicas clásicas, y si es posible el transporte de una muestra representativa del

material en general, la densidad relativa del mismo podrá ser igualmente determinada en laboratorio.

En caso de no poder recoger una muestra representativa del material, la densidad general relativa puede ser determinada in situ a partir del ensayo cono de arena (ASTM D1556) cuando las partículas gruesas no superen los 38 mm de diámetro; y en el caso de contar con partículas de mayor tamaño se puede ejecutar el método de prueba estándar para densidad de suelo y roca en su sitio por la sustitución de agua método en un hoyo de prueba (ASTM D5030), el cual es aplicable incluso cuando hay partículas mayores a 75 mm de diámetro.

Por último, otra alternativa puede ser la ejecución del pesaje del material compactado en un camión de carga con peso conocido y volumen de caja determinado

- Estimación a partir de relaciones empíricas: se basa en utilización de otros parámetros del material para determinar el VBP, como el caso de la densidad o velocidad de propagación de ondas P (ver Tabla 5-1), de acuerdo con correlación propuesta por algunos autores.

5.5 Estimación de parámetros resistentes

Como se ha definido, el comportamiento geomecánico de Bimsoil está influenciado por una gran cantidad de elementos, y dentro de su naturaleza heterogénea existen zonas de mayor resistencia (bloques) y zonas de gran debilidad (contacto bloque y matriz). “La definición del comportamiento de la interfaz entre bloque y matriz resulta extremadamente compleja” (Medley et al. 2011) y a su vez estimar los parámetros resistentes de ésta, la mayoría de las veces no es posible.

Algunos autores como Zhou et al. (2020) han determinado los parámetros de dicho contacto a través de ensayos de corte directo sobre la interfaz del bloque matriz, siendo una opción posible pero no sencilla. Igualmente asumir que un Bimsoil puede ser modelado en términos de los parámetros de esta zona de debilidad es una gran subestimación, por tanto, estos parámetros serán aplicados en modelos de dispersión de resistencia, en los cuales hay una distribución no uniforme de los parámetros de C y ϕ dentro del mismo material (ver página 20 modelo IV).

Comúnmente se hace necesario encontrar parámetros que representen lo más fiable posible el comportamiento general del material, existiendo dos maneras de determinarlos de acuerdo con el estado de arte actual. La primera a partir de ensayos de campo o laboratorio de gran escala, que permiten ensayar el material sin descartar ninguno de sus elementos, como a través de la ejecución de Bimtest, el cual, aunque no sea muchas veces viable en términos

de costos y logística, representa el ensayo más representativo del comportamiento de un Bimsoil.

La segunda opción es utilizar ecuaciones empíricas desarrolladas en base a parámetros de los componentes del Bimsoil (bloques y matriz) que tienen en cuenta aspectos importantes como VBP o la angulosidad de los bloques. Esta segunda opción es una buena estimación y en su mayoría queda del lado de la seguridad. La estimación de los parámetros de la matriz podrá llevarse a cabo utilizando ensayos de laboratorio sobre muestras remoldeadas, ensayos de campo como penetrómetro de bolsillo, vane test, SPT sobre la matriz, etc.

Sonmez et al. (2009) propone ecuaciones empíricas para estimar los parámetros de cohesión, ángulo de rozamiento interno y compresión simple de Bimrocks, basado en cinco aspectos: (1) el valor más bajo del ángulo de fricción corresponde al de la matriz, el cual se consigue cuando el porcentaje de bloques es nulo; (2) con el aumento en la proporción de bloques, aumenta el ángulo de rozamiento interno, estableciendo que esto es aplicable en un rango de VBP entre 25% y 75%; (3) a más de 75% de VBP, el incremento de ϕ es mínimo y se asemeja al ángulo de reposo de los bloques; (4) la cohesión disminuye con el aumento de VBP y esto es apreciable o significativo también en un rango de VBP entre 25 – 75%; y (5) la resistencia a compresión simple es inversa al VBP.

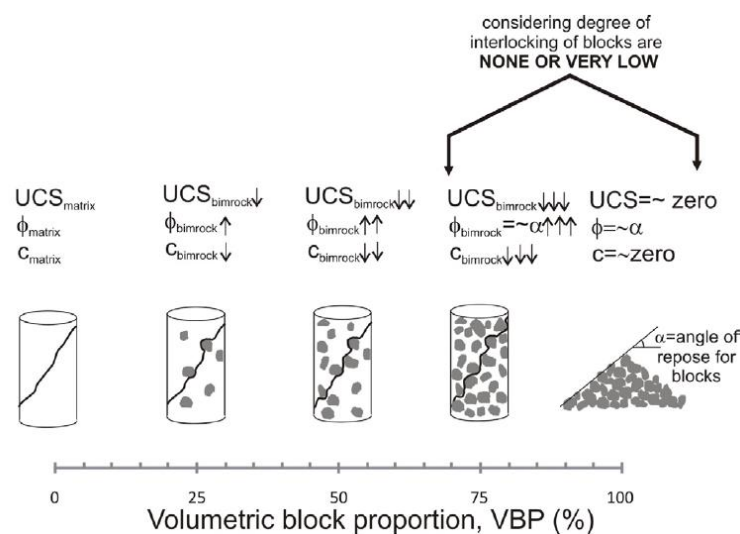


Figura 5-8. Esquema comportamiento parámetros resistentes en función de VBP (%). Tomado de Sonmez et al. (2009)

De acuerdo con estas consideraciones, utilizando parámetros de la matriz y definiendo un parámetro A, que tiene en cuenta la interfaz bloque-matriz de acuerdo con su adherencia de manera descriptiva, Sonmez et al. (2009) plantea las siguientes ecuaciones:

$$\varphi_{bimrock} = \varphi_{matriz} \left(1 + \frac{1000((\tan(\alpha)/\tan(\varphi_{matriz})) - 1)}{1000 + 5\left(\frac{1-VBP}{15}\right)} * \frac{VBP}{VBP + 1} \right)$$

$$RCS_{bimrock} = \frac{(A - A^{(VBP/100)})}{(A - 1)} * RCS_{matriz}; \quad 0 \leq A \leq 500$$

$$C_{bimrock} = \frac{RCS_{bimrock} * (1 - \text{sen}(\varphi_{bimrock}))}{2\text{cos}(\varphi_{bimrock})}$$

Donde $\varphi_{bimrock}$ corresponde al ángulo de rozamiento interno del Bimrock, $C_{bimrock}$ corresponde a la cohesión de Bimrock, $RCS_{bimrock}$ es la resistencia a compresión simple del Bimrock, y los valores del parámetro A son definidos como:

DESCRIPCIÓN	A
Casi ninguna adhesión (cohesión) entre bloque y matriz con bloques redondeados	0
Adhesión débil (cohesión) entre bloque y matriz con bloques semi redondeados	10
Adhesión moderada (cohesión) entre bloque y matriz con bloques semi angulares.	50
Adhesión fuerte (pero inferior a la cohesión de la matriz) entre bloque y matriz con bloques angulares.	500

Tabla 5-2. Parámetro A propuesto por Sonmez et al. (2009). Tomado de Nanclares (2018).

Posteriormente, Kalender et al. (2014), a partir de nuevos ensayos de compresión uniaxial y triaxial y la recopilación de resultados de muchos autores, propone nuevas ecuaciones que tienen en cuenta la forma de los bloques precisando el parámetro A, estableciendo el límite inferior donde los bloques influyen los parámetros del Bimrock en VBP(%) mayor del 10%, definiendo a su vez que sus ecuaciones son específicas para Bimrock no soldados o Bimsoils, ya que de acuerdo como se ilustra en la Figura 5-9 el comportamiento del material se da, de una resistencia dominada puramente por la matriz a VBP=0%, a un comportamiento de acumulación de rocas o enrocado cuando VBP \geq 75%.

Esta distinción entre el comportamiento de un Bimrock y un Bimsoil es significativa a esfuerzos bajos, ya que como se observa en la Figura 4-4, con bajas tensiones un Bimsoil presenta una menor resistencia al corte respecto a la matriz, mientras que un Bimrock tendrá siempre una resistencia mayor, debido a la ausencia en estos últimos de la zona de debilidad dada en el contacto.

Por otro lado, debido a la génesis de los Bimsoils, su fábrica es en general más semejante a la de un enrocado (caso Bimsoil con valores altos de VBP), y no tanto a la de un macizo rocoso (ver Figura 5-9). Sin embargo, en algunos casos como en saprolitos o rocas de falla que cumplan las condiciones de Bimsoil, donde se tienen clastos muy angulares y de tamaños uniformes, su comportamiento geomecánico con porcentajes altos de VBP podría llegar a ser similar a un macizo rocoso; por tanto, no son igualmente válidas las ecuaciones de Kalender et al. (2014).

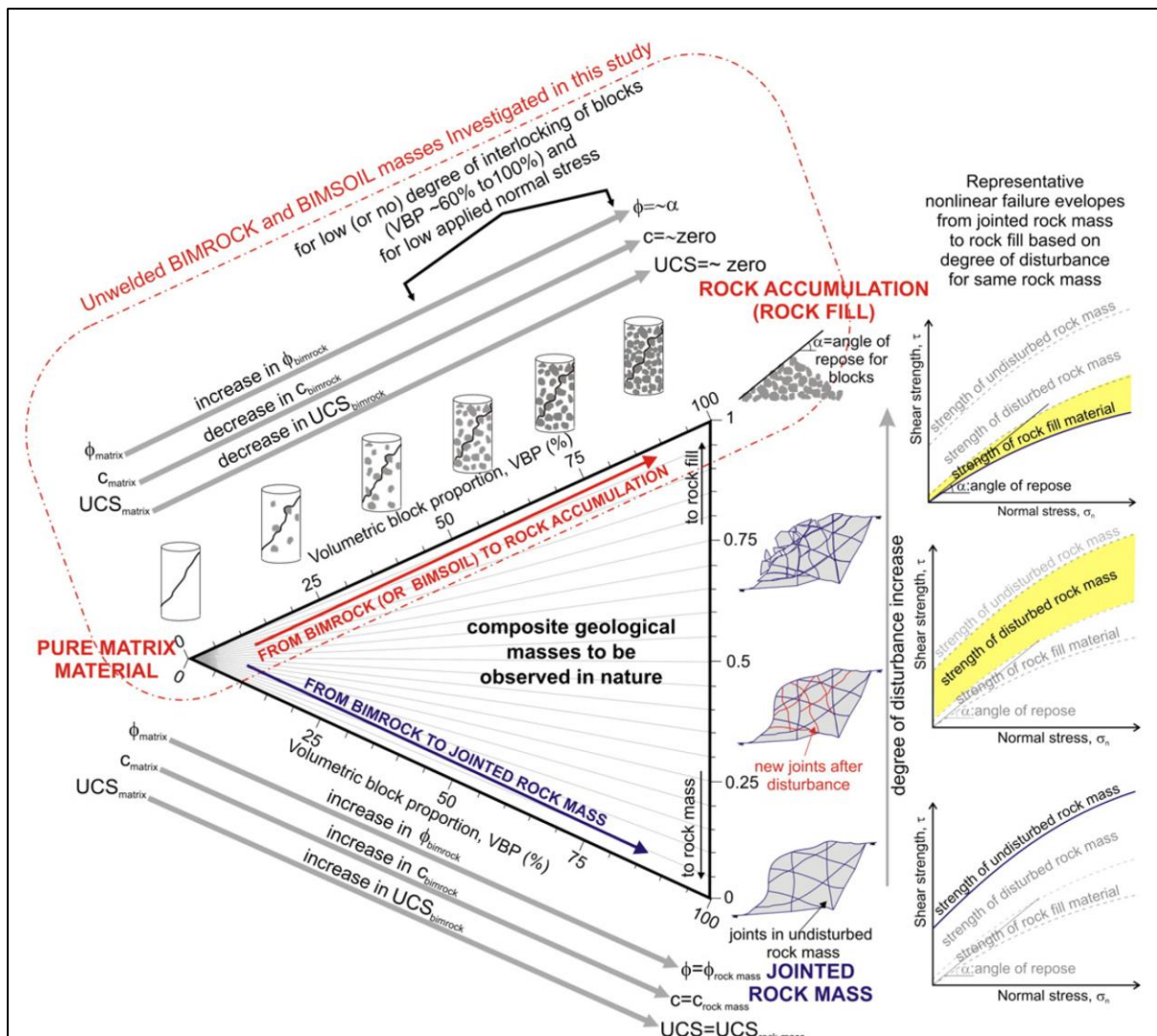


Figura 5-9. Comportamiento parámetros resistentes Bimsoil. Tomado de Kalender et al. (2014)

El valor del parámetro “A” de adhesión entre bloque-matriz se encuentra en el rango entre 0,1 y 500, siendo un gran aporte el gráfico generado por Kalender et al. (2014) pues otorga herramientas y mayor precisión en la definición de este parámetro, teniendo en cuenta aspectos como la resistencia a compresión simple de la matriz, la angulosidad de los bloques y el ángulo de reposo de los mismo (ver Figura 5-10).

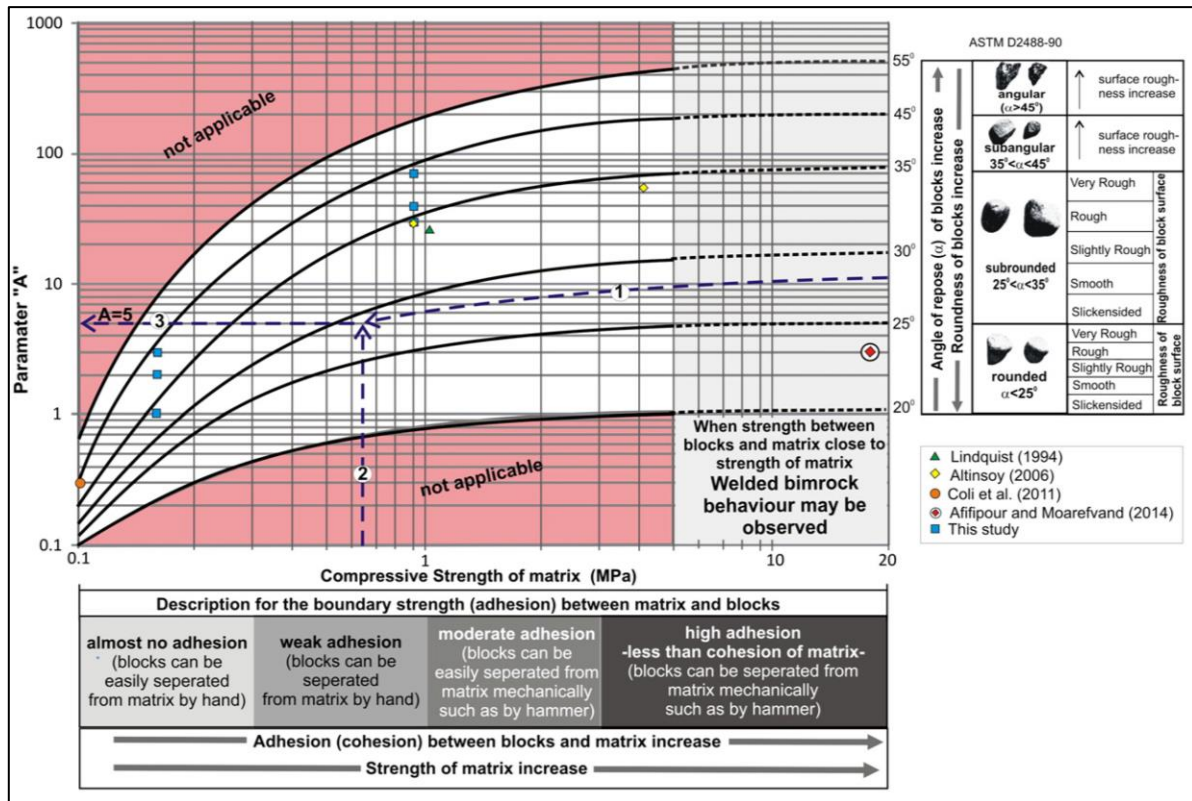


Figura 5-10. Definición parámetro "A". Tomado de Kalender et al. (2014)

Las ecuaciones propuestas por Kalender et al. (2014), en la que solo modifica la ecuación de ángulo de rozamiento interno del Bimrock, y establece rangos de A ligeramente diferentes respecto a Sonmez et al. (2009) son:

$$\varphi_{bimrock} = \varphi_{matriz} \left(1 + \frac{1000((\alpha/\varphi_{matriz}) - 1)}{1000 + 5 \left(\frac{100-VBP}{15} \right)} \right) * \frac{VBP}{VBP + 1}$$

$$RCS_{bimrock} = \frac{(A - A^{(VBP/100)})}{(A - 1)} * RCS_{matriz}; \quad 0.1 \leq A \leq 500; \quad \text{Si } A = 1 \text{ usar } 0.99$$

$$C_{bimrock} = \frac{RCS_{bimrock} * (1 - \text{sen}(\varphi_{bimrock}))}{2 \cos(\varphi_{bimrock})}$$

Por otra parte, teniendo en cuenta el comportamiento de estos materiales, es posible generar envolventes de rotura características a partir de ensayos a diferentes niveles de carga. Esto fue planteado por Sonmez et al. (2006B) en el que a partir de múltiples ensayos de laboratorio con muestras artificiales de Bimrocks, normalizó la envolvente resultante respecto a la envolvente de Mohr-Coulomb y Hoek & Brown, definiendo entonces los parámetros del Bimrock en términos de los parámetros de la matriz por el parámetro normalizado.

Para el criterio Mohr-Coulomb:

$$C_{bimrock} = C_N * C_{matriz}; \quad C_N = 1.25 - \exp\left(\frac{VBP - 100}{75}\right)$$

$$\varphi_{bimrock} = \varphi_N * \varphi_{matriz}; \quad \varphi_N = \exp\left(\frac{8 * VBP}{1000}\right)$$

$$RCS_{bimrock} = RCS_N * RCS_{matriz}; \quad RCS_N = 1 - \exp\left(\frac{VBP - 100}{25}\right)$$

$$RCS_{bimrock} = \frac{2C * \cos\varphi_{bimrock}}{1 - \sin\varphi_{bimrock}}; \quad \sigma_1 = RCS_{bimrock} + \left(\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}\right) * \sigma_3$$

Para el criterio Hoek & Brown:

$$m_{i_{bimrock}} = m_{i_N} * m_{i_{matriz}}; \quad m_{i_N} = \exp(0.015 * VBP)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + RCS_{bimrock} \sqrt{\left(m_{i_{bimrock}} * \frac{\sigma_3}{RCS_{bimrock}} + 1\right)}$$

A su vez Lindquist (1994) modifica el criterio de rotura de Mohr-Coulomb para Bimrocks induciendo el efecto de VBP, para asemejar estos materiales heterogéneos a su equivalente en un material homogéneo, resultando en:

$$\tau_{bimrock} = C_{matriz} * (1 - VBP) + \sigma * \tan(\varphi_{matriz} + \Delta\varphi(VBP))$$

Donde, $\Delta\varphi(VBP)$ representa el incremento del ángulo de rozamiento interno respecto a la matriz de acuerdo con el %VBP (valido para >25%), siendo mayor 3° por cada 10% de incremento en VBP (por ejemplo 3° para 35%; 6° para 45°, etc.).

Por último, unas ecuaciones empíricas de los parámetros resistentes (C y φ) utilizando parámetros granulométricos del material fueron propuestas por Nanclares (2018), a partir de ensayos triaxiales y de corte directo de gran escala (in situ y de laboratorio), sobre un material aluvial granular, con VBP entre 31 y 75%, son:

Parámetro	Ecuación	A partir de:
Fricción (°)	$\varphi = 2.256 * \ln(D_{60}) + 22.414$	Ensayos triaxiales
Fricción (°)	$\varphi = 4.8669 * \ln(C_u) + 22.391$	Ensayos triaxiales
Fricción (°)	$\varphi = 0.3855 * D_{60} + 39.513$	Ensayo corte directo
Cohesión (KPa)	$C = -9.98983 * C_u + 141.26$	Ensayo triaxial
Cohesión (KPa)	$C = -126.38 * C_c + 242.84$	Ensayo triaxial
Cohesión (KPa)	$C = 1.7709 * D_{60} + 82.976$	Ensayo corte directo
Cohesión (KPa)	$C = 30.141 * \ln(C_u) + 74.702$	Ensayo corte directo

Tabla 5-3. Ecuaciones empíricas estimación parámetros resistentes a partir de parámetros granulométricos propuestas por Nanclares (2018).

6 ANALISIS INTEGRADO Y DISCUSIÓN

6.1 Propuesta de clasificación de Bimsoil para establecer sus parámetros resistentes

De acuerdo con la cantidad de elementos involucrados en el comportamiento geomecánico de Bimsoils, y las limitaciones en la caracterización dada por sus características especiales, se propone una clasificación sencilla que permite dividir los Bimsoil según sus particularidades, y plantea algunas recomendaciones a la hora de caracterizar cada uno de los tipos o clases de Bimsoil presentados.

6.1.1 Parámetros considerados en la clasificación

Como fue anteriormente descrito, los parámetros que tienen una mayor influencia en el comportamiento de Bimsoils son la proporción volumétrica de bloques (VBP), forma y disposición de las partículas, tamaño de partículas o bloques, y resistencia de la matriz, así como su cohesión o adhesión con los bloques.

Según lo ya establecido, la proporción volumétrica de bloques incrementa el ángulo de rozamiento interno del Bimsoil, con VBP mayores a 15% y menores a 75%, y al realizar el gráfico de ϕ' vs VBP dicha correlación es corroborada, mostrando además datos que se salen de la tendencia general, debido principalmente al tamaño de bloque (ver Figura 6-1). La influencia de los tamaños de bloques será mostrada con mayor profundidad más adelante.

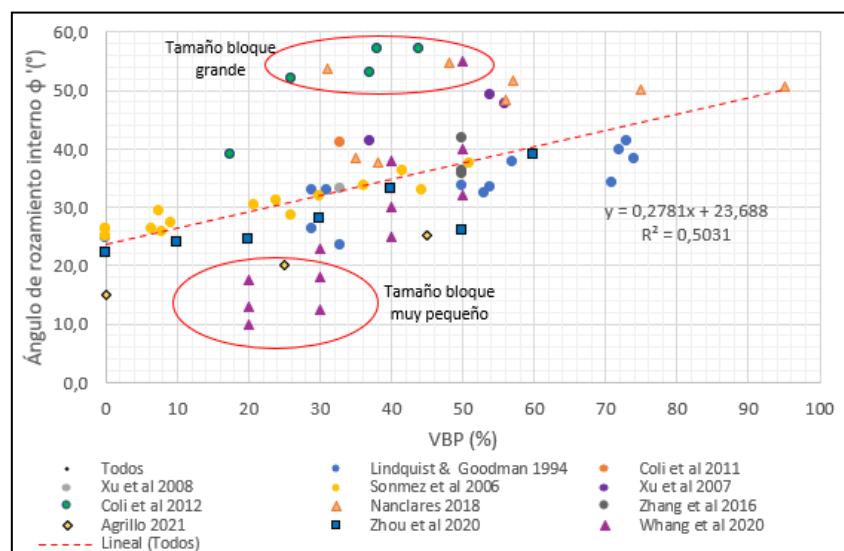


Figura 6-1. Relación ángulo de rozamiento interno vs VBP. Elaboración propia

A su vez la cohesión presenta una relación inversa respecto al VBP, siendo más fuerte la relación con valores de cohesión bajos y disminuyendo la influencia cuando la cohesión del material es mayor, esto debido a que los materiales con cohesión altas pasan a ser Bimrock soldados e incluso pueden llegar a comportarse como roca (ver Figura 6-2). Esto fue ya

expuesto por Kalender et al (2014), y tenido en cuenta para establecer el gráfico de estimación del Parámetro A de Bimsoils.

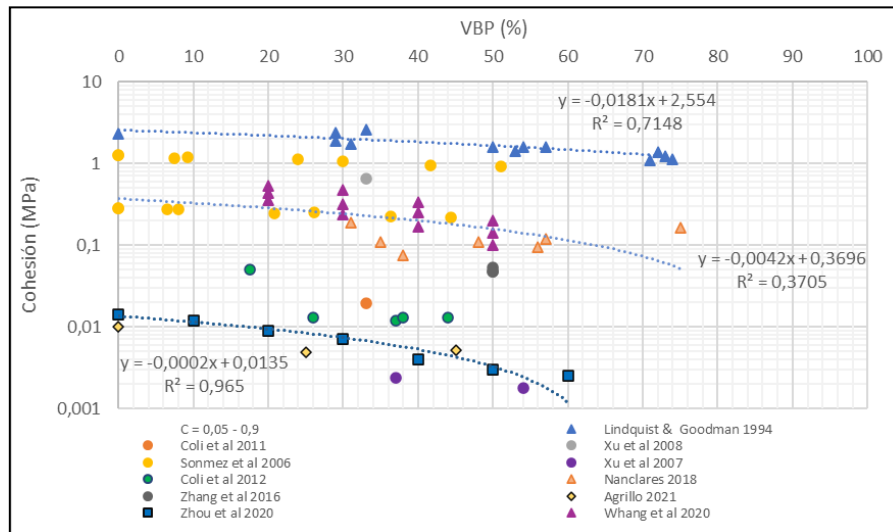


Figura 6-2. Relación cohesión vs VBP. Elaboración propia.

Debido a la fuerte influencia de la proporción volumétrica de bloques en los parámetros resistentes del material, este será el elemento principal para la clasificación de los Bimsoil, siendo los límites anteriormente planteados de ente 15 y 75% de volumen bloques.

El carácter de cohesión del Bimsoil o la adhesión dada entre la matriz y los bloques, es también un elemento muy importante pues, con adhesión nula el material se comportará como un enrocado, donde el comportamiento es gobernado totalmente por el contacto entre los bloques, con adhesiones bajas a moderadas el material se comportará como Bimsoil, y con adhesión muy fuerte se dará paso a Bimrock soldados y posteriormente rocas.

Dentro de este carácter de adhesión bloque matriz, Kalender et al (2014) señaló la importancia de la forma de la partícula, pues partículas de alta redondez generan menor adherencia que las de alta angulosidad. Es evidente la relación entre la forma de los bloques y los parámetros resistentes del Bimsoil (ver Figura 6-3-A-B), pues se observa que a mayor angulosidad mayor ángulo de rozamiento interno y menor cohesión.

En la gráfica de phi vs angulosidad es clara la relación que a mayor redondez menor ángulo de rozamiento interno. Por otra parte, en el gráfico cohesión-angulosidad, se observan dos líneas de tendencia, una con una fuerte relación lineal cuando se tienen suelos de alta cohesión, y otra donde prácticamente no hay influencia de la angulosidad si el material tiene cohesiones muy bajas o casi nulas.

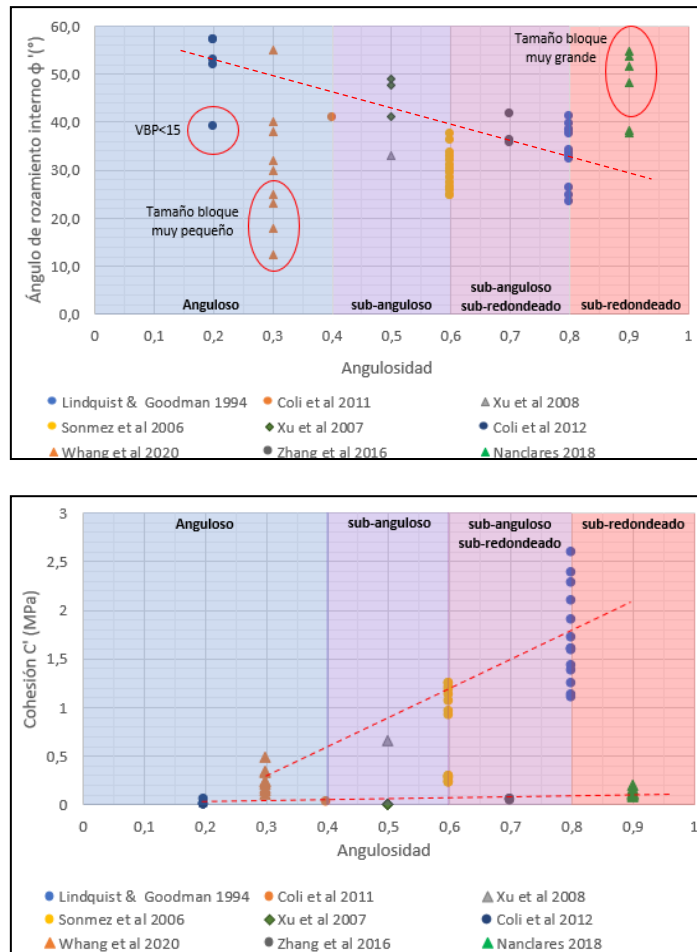


Figura 6-3. A) ángulo de rozamiento interno vs angulosidad-redondez. B) Cohesión vs angulosidad-redondez. Elaboración propia.

Un parámetro que permite tener en cuenta la angulosidad de las partículas y la adhesión de bloque y matriz es el ya mencionado parámetro A, el cual por tanto será utilizado para la clasificación de Bimsoils (ver Figura 6-4). De acuerdo con este parámetro se establecieron dos tipos principales de Bimsoil, denominados tipo I y tipo II, que tienen las siguientes características:

- Tipo I: Bimsoil de adhesión débil a moderada entre bloque y matriz, formas de los bloques angulares a subangulares, teniendo como límite un valor del parámetro A inferior a 400 y mayor a 35.
- Tipo II. Bimsoil de adhesión débil a casi nula entre bloque y matriz, valores de cohesión bajos cercanos a 10 KPa o menores, formas de los bloques subredondeadas a redondeadas, teniendo como límite un valor del parámetro A inferior a 35.

También se define el límite para enrocados, pues son materiales con casi nula adhesión, por tanto, el parámetro A no podrá superar el valor de 40.

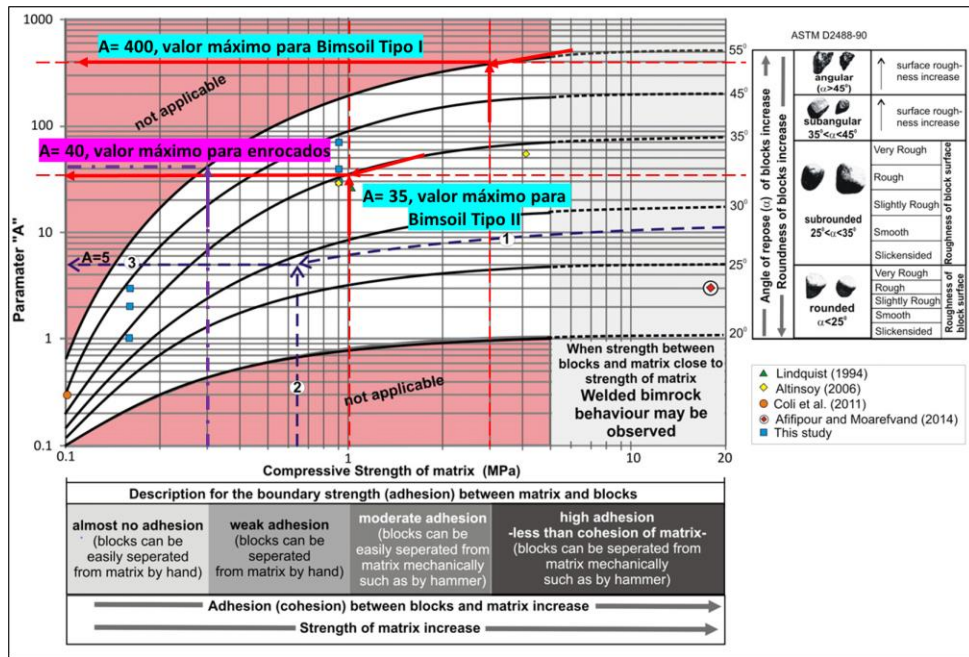


Figura 6-4. Límites establecidos con base en el parámetro "A" para clasificación de Bimsoil. Tomado y modificado de Kalender et al (2014).

Como fue señalado en figuras anteriores, parece existir una influencia del tamaño de los bloques al superar ciertos límites, que sacan de la tendencia general los datos, dichos límites pueden empezar a ser notados en la gráfica de ángulo de rozamiento interno versus tamaño medio de bloque, pues se observa que con tamaños pequeños no existe una relación importante, mientras que a mayores tamaños la relación tiende a existir (ver Figura 6-5).

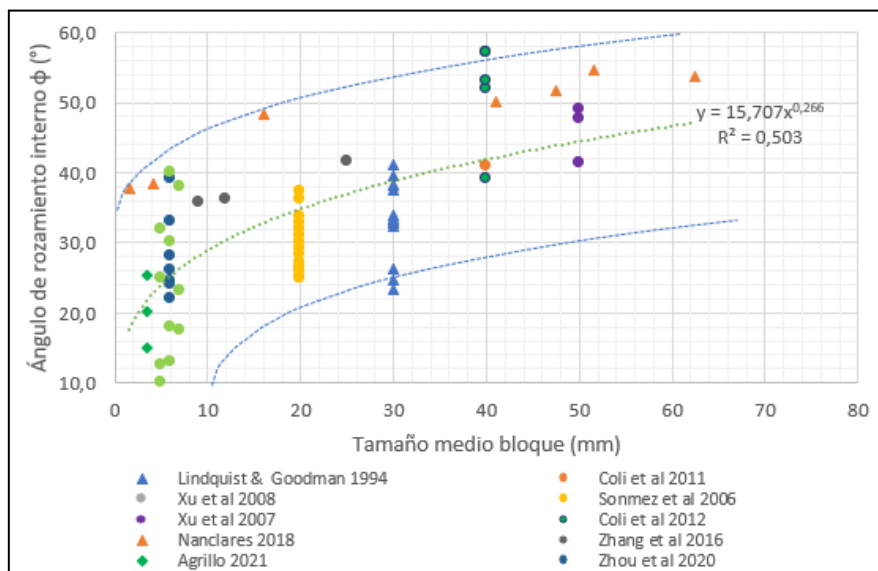


Figura 6-5. Relación tamaño medio de bloque con ángulo de rozamiento interno del Bimsoil. Elaboración propia

Dicha influencia es apreciada con mayor claridad al realizar el gráfico de ángulo de rozamiento interno vs VBP discriminando según el tamaño de los bloques, evidenciándose que materiales con bloques mayores a 32 mm de diámetro no siguen la tendencia lineal.

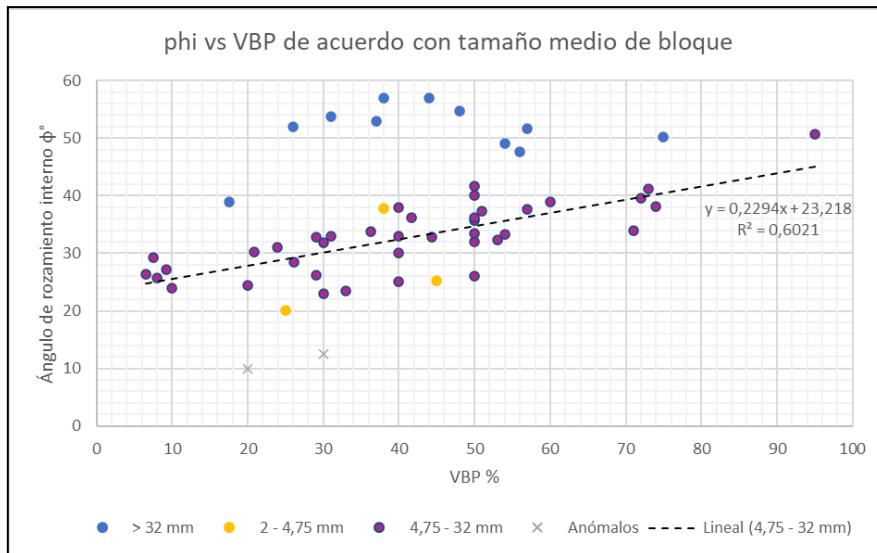


Figura 6-6. Influencia de tamaño bloque en la relación phi vs VBP. Elaboración propia.

Por otra parte, al analizar la presencia de bloques de gran diámetro se observa que cuando están presentes bloques mayores a 63 mm, la relación directa de ángulo de rozamiento interno vs VBP se hace más fuerte (ver Figura 6-7).

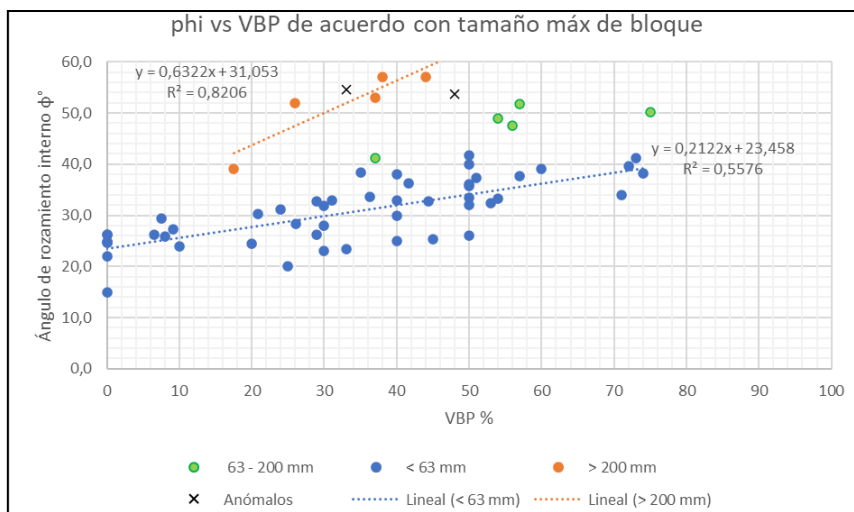


Figura 6-7. influencia de tamaño de bloque máximo en la relación phi vs VBP. Elaboración propia

Por lo tanto, de acuerdo con el tamaño de los bloques se genera una subdivisión de los dos tipos de Bimsoil ya planteados, estableciendo los límites en: 4,75 mm como valor mínimo, que corresponde al límite de arena y gravas según la ASTM; el valor de 32 mm y el valor de 63 mm, establecidos de acuerdo con los resultados vistos; dando lugar a tres subgrupos:

- A: bloques entre 4,75 y 32 mm
- B: bloques entre 32 mm y 63 mm
- C: bloques mayores a 63 mm

6.1.2 Clasificación de Bimsoil

Se propone una clasificación para Bimsoil que incluye 2 tipos principales y tres subdivisiones, dando lugar a 6 clases de Bimsoils, en función de VBP, angulosidad, cohesión o adherencia entre bloques-matriz y tamaño de las partículas gruesas.

- Bimsoil Tipo I-A: Corresponde a un material con VBP entre 15% y 75%, adherencia entre bloque y matriz de débil a moderada (principalmente matriz cohesiva), con bloques subangulosos a angulosos, parámetro A menor a 400, y tamaño de los bloques predominantemente entre 4,75 y 32 mm.
- Bimsoil Tipo I-B: Corresponde a un material con VBP entre 15% y 75%, adherencia entre bloque y matriz de débil a moderada (principalmente matriz cohesiva), con bloques subangulosos a angulosos, parámetro A menor a 400, y tamaño de los bloques entre 32 y 63 mm.
- Bimsoil Tipo I-C: Corresponde a un material con VBP entre 15% y 75%, adherencia entre bloque y matriz de débil a moderada (principalmente matriz cohesiva), con bloques subangulosos a angulosos, parámetro A menor a 400, y tamaño de los bloques mayores a 63 mm.
- Bimsoil Tipo II-A: Corresponde a un material con VBP entre 15% y 75%, adherencia entre bloque y matriz débil, con bloques subredondeados a redondeados, parámetro A menor a 35, y tamaño de los bloques predominantemente entre 4,75 y 32 mm.
- Bimsoil Tipo II-B: Corresponde a un material con VBP entre 15% y 75%, adherencia entre bloque y matriz débil, con bloques subredondeados a redondeados, parámetro A menor a 35, y tamaño de los bloques entre 32 y 63 mm.
- Bimsoil Tipo II-C: Corresponde a un material con VBP entre 15% y 75%, adherencia entre bloque y matriz débil, con bloques subredondeados a redondeados, parámetro A menor a 35, y tamaño de los bloques mayores a 63 mm.

La siguiente figura representa el cuadro de clasificación de Bimsoils propuesto, en el que además de las clases ya mencionadas se muestra los límites en el que el material se comportará como un suelo homogéneo ($VBP < 15\%$), un enrocado ($VBP > 75\%$ y casi nula adhesión), Welded Bimrock (adhesión alta, $A > 400$) y como un “macizo rocoso”.

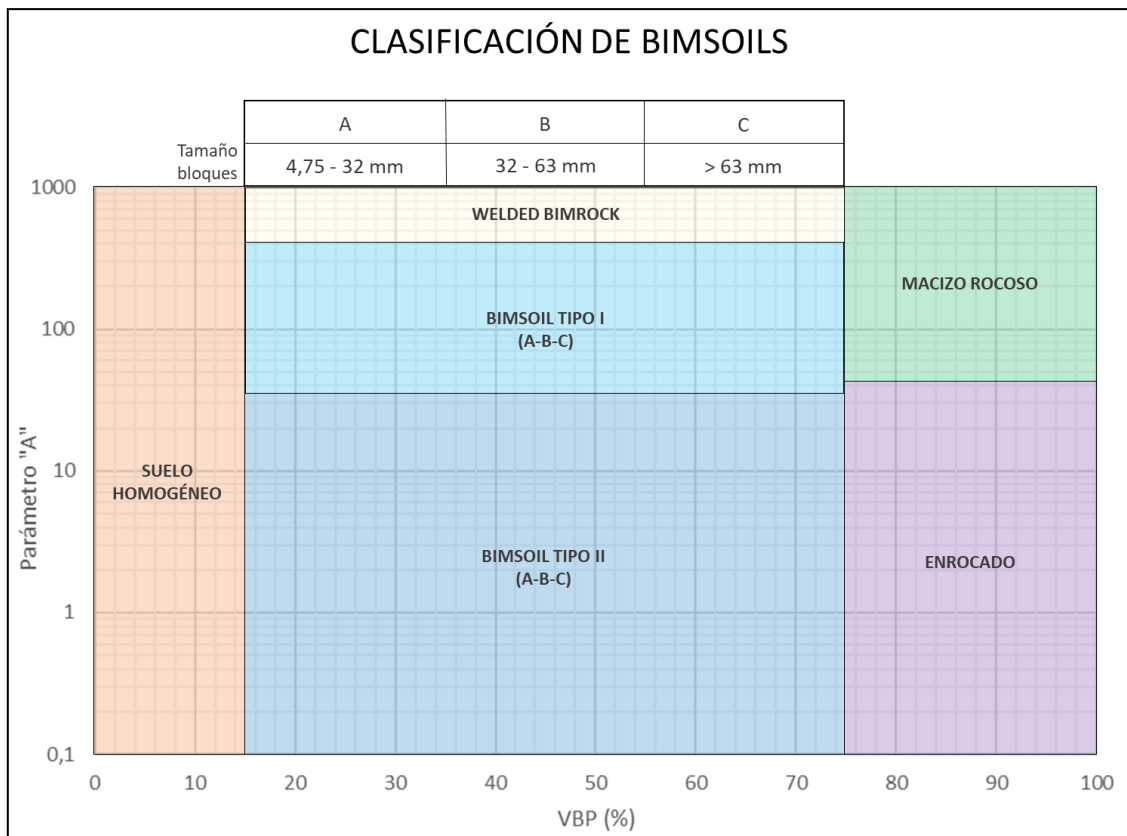


Figura 6-8. Clasificación de Bimsoils. Elaboración propia

Para llegar a clasificar preliminarmente el Bimsoil y diseñar una campaña de exploración y de caracterización acorde con sus características, es propuesto el siguiente cuadro de flujo, que conforma una guía de pasos simples y fundamentales con sus respectivas alternativas para cumplirlo (ver Tabla 6-1).

Paso 1: Verificar contraste bloque-matriz	Descripción de campo, ensayos de campo sencillo (martillo Schmidt, penetrómetro de bolsillo, pruebas de campo martillo y navaja)
Paso 2: Estima aproximadamente VBP	Usar tablas de ayuda visual porcentajes, realizar trinchera o limpieza de talud, realizar ensayos granulométricos, usar información secundaria
Paso 3: Define naturaleza de matriz	Definir si es cohesiva o granular, y la adherencia entre bloques y matriz a partir de descripción de material en campo
Paso 4: Estima tamaño y forma predominante de los bloques	Descripción y medición de campo, digitalización o escaneo de taludes expuestos, granulometría
Paso 5: Clasifica el Bimsoil	Usar cuadro parametro A, y cuadro clasificación propuesto en este trabajo
Paso 6: Diseña campaña de exploración y caracterización	Hacer uso de recomendaciones expuestas en este trabajo, así como información secundaria y casos de éxito sobre ese material

Tabla 6-1. Pasos que considerar para diseño de campaña de caracterización en Bimsoils

De acuerdo con la clasificación propuesta, el siguiente cuadro (ver Tabla 6-2) presenta las técnicas adecuadas y alternativas a la hora de abordar la caracterización de cada una de las clases de Bimsoils propuestas, el cual es un complemento a la base teórica y recomendaciones expuestas a lo largo de este trabajo.

6.1.3 Ejemplo uso de la clasificación

Dado un material con las siguientes características: Depósito compuesto por fragmentos subangulares a angulares de roca, con tamaños en promedio de 10 cm de diámetro, embebidos en una matriz areno limosa; con una proporción de bloques de 50% aproximadamente. Se realiza la clasificación, 1) estimando el valor del parámetro $A=50$, para bloques subangulares y matriz poco cohesiva (débil adhesión), 2) Se utiliza el cuadro de clasificación propuesto utilizando el valor de $A=50$ y de $VBP=50\%$, dando resultado Bimsoil tipo I. 3) Se clasifica como Tipo I-C de acuerdo con el tamaño de bloques=100 mm (>63 mm).

La clasificación anteriormente ejemplificada es preliminar, y debe ser revaluada posterior a los trabajos de exploración y ensayos de laboratorio, para poder realizar la estimación de los parámetros resistentes del material.

Clase Bimsoil	Campaña de exploración	Ensayos in situ	Ensayo laboratorio	Ecuaciones empíricas
Tipo I-A	-Sondeos mecánicos preferiblemente en seco, con recuperación continua de testigo -Calicatas y trincheras -Caracterización taludes expuestos cercanos	-Ensayo SPT -Ensayos sísmicos para determinar Vs	-Ensayo de granulometría por tamizado -Ensayos triaxiales con probetas de 6 o 9 pulgadas de diámetro (>15 cm) -Ensayo de corte directo cajas de 15x15 y 30x30 cm -Uso de técnicas de Scalping	-Ecuaciones de Kalender et al 2014 -Ecuaciones de Sonmez et al 2006B -Ecuaciones Sonmez et al 2009 -Ecuación Lindquist 1994
Tipo I-B	-Sondeos mecánicos preferiblemente en seco, con recuperación continua de testigo -Calicatas y trincheras -Caracterización taludes expuestos cercanos -Digitalización imágenes de talud o calicatas para estimar VBP	-Ensayo SPT -Vanetest en la matriz si es posible -Ensayos sísmicos para determinar Vs	-Ensayo de granulometría -Ensayo triaxial y corte directo de grandes dimensiones 9" o mayor -Posible uso de técnicas de scalping -Ensayos resistencia en la matriz	-Ecuaciones de Kalender et al 2014 -Ecuaciones de Sonmez et al 2006B -Ecuaciones Sonmez et al 2009
Tipo I-C	-Sondeo a rotación, con recuperación continua de testigos -Calicatas y trincheras -Caracterización taludes expuestos cercanos -Digitalización imágenes de talud o calicatas para estimar VBP	-Ensayo Bimtest -Ensayos sísmicos para determinar Vs -Ensayos de campo sobre matriz (vanetest y penetrómetro) -Tomografías eléctricas	-Granulometrías -Ensayos de resistencia en la matriz	-Ecuaciones de Kalender et al 2014 -Ecuaciones de Sonmez et al 2006B -Ecuaciones Sonmez et al 2009 -Correlaciones con Vs
Tipo II-A	-Sondeos mecánicos preferiblemente en seco, con recuperación continua de testigo. Uso barrenos saca testigos de triple tubo -Calicatas y trincheras -Caracterización taludes expuestos cercanos	-Ensayo SPT -Ensayos sísmicos para determinar Vs	-Ensayo de granulometría por tamizado -Ensayos triaxiales con probetas de 6 a 9 pulgadas de diámetro (>15 cm) -Ensayo de corte directo cajas de 15x15 y 30x30 cm -Ensayos de resistencia en la matriz	-Ecuaciones de Kalender et al 2014 -Ecuaciones de Nancleres 2018
Tipo II-B	-Sondeos mecánicos a rotación, con recuperación continua de testigo, uso de barrenos saca testigo de triple tubo -Calicatas y trincheras -Caracterización taludes expuestos cercanos -Digitalización imágenes de talud o calicatas para estimar VBP	-Ensayo Bimtest -Posible uso ensayo SPT -Ensayos sísmicos para determinar Vs -Tomografías eléctricas	-Ensayo de granulometría -Ensayo triaxial y corte directo de grandes dimensiones 9" o mayor -Ensayos resistencia en la matriz muestras probablemente remodeladas	-Ecuaciones de Kalender et al 2014 -Ecuaciones de Nancleres 2018 -Correlaciones con Vs
Tipo II-C	-Sondeo a rotación, con recuperación continua de testigos -Calicatas y trincheras, recuperando muestra de matriz para ensayos de laboratorio -Caracterización taludes expuestos cercanos -Digitalización imágenes de talud o calicatas para estimar VBP	-Ensayo Bimtest -Ensayos sísmicos para determinar Vs -Tomografías eléctricas	-Granulometrías -Ensayos de resistencia en la matriz con muestras posiblemente remodeladas	-Ecuaciones de Kalender et al 2014 -Ecuaciones de Nancleres 2018 -Correlaciones con Vs

Tabla 6-2. Recomendaciones para la caracterización de cada clase de Bimsoil

7 CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Los Bimsoil son geomateriales de difícil parametrización geotécnica, debido a su heterogeneidad, dada por la presencia de partículas de tamaños significativos con distintas propiedades mecánicas resistentes que la matriz. En estos materiales la zona de menor resistencia o debilidad se encuentra en el contacto “bloque”-matriz. Dicha interfaz se hace muy compleja de caracterizar y parametrizar en términos resistentes, y por tanto se recurre a ecuaciones empíricas que realizan una estimación.

El considerar la matriz como el principal o único elemento que gobierna la resistencia en Bimsoil representa una subestimación grande del material. Esto se debe a la influencia o aporte que dan las partículas gruesas o bloques, que no pueden ser despreciados cuando sus proporciones volumétricas son significativas.

Los principales elementos que gobiernan el comportamiento geomecánico de un Bimsoil son: i) La proporción volumétrica de bloques (VBP); ii) la forma y disposición de las partículas gruesas; iii) el tamaño de las partículas gruesas; iv) la resistencia y características de la matriz; y v) la succión y porosidad en el material.

Se generó una primera clasificación de 6 subtipos de Bimsoils de acuerdo con la forma de partículas gruesas o bloques, la adhesión o cohesión entre bloque y matriz, y el tamaño de los “bloques”. Se presentaron recomendaciones, metodologías generales y específicas para realizar una correcta caracterización geotécnica del material, y para cada uno de los subtipos de Bimsoil propuestos.

Este trabajo representa una herramienta bastante útil para ingenieros geólogos y geotecnistas a la hora de enfrentar la tarea de caracterizar geotécnicamente este tipo de geomateriales, pues aporta una base teórica importante, así como técnicas, metodologías y ecuaciones que permiten dar un mejor enfoque y resultado a la tarea; que en mi experiencia profesional hubiera sido de gran ayuda en proyectos previamente desarrollados, donde se echaron de menos los lineamientos metodológicos aquí expuestos.

Como futuras líneas de investigación se considera que deben ser realizados mayores investigaciones sobre materiales con bloques de gran dimensión (>63 mm), a partir de ejecución de ensayos de laboratorio de gran dimensión y ensayos de campo tipo Bimtest. A partir de dichas investigaciones debe ser generada una gran base de datos que permita afinar las ecuaciones empíricas para la estimación de parámetros resistentes.

Utilizando una gran base de datos se debe trabajar en la propuesta de ábacos que permitan estimar parámetros resistentes en función de los elementos principales como tamaño y forma de las partículas gruesas o bloques, la naturaleza de la matriz y la proporción volumétrica de bloques.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Abu-Hassanein, Z. (1994). Using electrical resistivity techniques as a quality control tool for compacted clay liners. M.S. thesis department of civil and environmental engineering, University of Wisconsin-Madison.
- Abu-Hassanein, Z., Benson, C., Wang, X., & Blotz, R. (1996). Determining bentonite content in soil bentonite mixtures using electrical conductivity. *Geotechnical testing journal*, volume 19, No 1, pp 51-57.
- Afifipour, M., Moarefvand, P., (2013). Failure patterns of geomaterials with block-in- matrix texture: experimental and numerical evaluation. *Arab J Geosci*.
- Agrillo, S., (2021). Study of the behaviour at failure of complex materials at different observation scales. Politecnico di Torino.
- Aguirre, U., (2018). Caracterización mineralógica y geotécnica de un depósito coluvial de la región de Pilbara, Australia (Tesis de grado). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Akin, M., Kramer, S., & Topal, T. (2011) Empirical correlation of shear wave velocity (V_s) and penetration resistance (SPT-N) for different soils in an earthquake-prone area (Erbaa-Turkey). *Engineering geology* 119, 1-17.
- Barbero, M., Bonini, M., Borri Brunetto, M., (2006). Analisi numeriche della stabilità di un versante in BIMROCK. Presented at the Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2006.
- Bin-Lin Chu, Jou, Y.-W., Weng, M.-C., (2010). A constitutive model for gravelly soils considering shear-induced volumetric deformation. NRC.
- Campos, D., Ramos, A., Prada, L., (2018). Evaluation of bearing capacity in Bimsoil under a shallow foundation using FEM. *Rev.Téc.Ing.Univ.Zulia* 41, 86–94.
- Chang, K.-T., Kang, Y.-M., Ge, L., Cheng, M.-C., (2015). Mechanical properties of gravel deposits evaluated by nonconventional methods. *J.Mater.CIV.Eng*.
- Coli, N., Berry, P., Boldini, D., Bruno, R., (2012). The contribution of geostatistics to the characterisation of some bimrock properties. *Engineering Geology* 137–138, 53–63.
- Coli, N., Berry, P., Boldini, D., Bruno, R., (2009). In situ large size non-conventional shear tests for the mechanical characterization of a bimrock in the Santa Barbara open pit mine (Italy). ARMA 09.
- Dorador, L., Villalobos, F., (2020). Scalping techniques in geomechanical characterization of coarse granular materials. *Obras y proyectos* 28, 24–34.

- El Dine, B., Dupla, J.C., Frank, R., Canou, J., Kazan, Y., (2010). Mechanical characterization of matrix coarse-grained soils with a large-sized triaxial device. *Canadian Geotechnical Journal* 47, 425–438.
- Hasancebi, N., & Ulusay, R. (2006). Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments. *Bull Engineering geology environmental* 66:203-2013.
- Hassan, N., Nguyen, N., Marot, D., Bendahmane, F., (2021). Effect of scalping on the mechanical behavior of coarse soils. *International Journal of Geotechnical and Geological Engineering* 15.
- Hernandez-Gutiérrez, L., Santamarta, J.C., (2015). *Ingeniería Geológica en terrenos volcánicos*, 1st ed. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos.
- Kahraman, S., Alber, M., Fener, M., Gunaydin, O., n.d. An assessment on the indirect determination of the volumetric block proportion of Misis fault breccia (Adana, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 74, 899–907.
- Kalender, A., Sonmez, H., Medley, E., Tunusluoglu, C., Kasapoglu, K.E., (2014). An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils. *Engineering Geology* 183, 65–79.
- Lindquist, E.S. (1994). The strength and deformation properties of melange. Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Univ. California at Berkeley, California, 262 p.
- Lindquist E.S, y Goodman R.E. (1994). Strength and deformation properties of a physical model melange. *Proceedings of the first North American rock mechanics symposium*. Balkema.
- Liu, S., Huang, X., Zhou, A., Hu, J., & Wang, W. (2018). Soil-rock slope stability analysis by considering the nonuniformity of rocks. *Mathematical problems in engineering*. Volume 2018, article ID 3121604, 15 pages.
- Mahdevari, S., Maarefvand, P., (2017). Applying ultrasonic waves to evaluate the volumetric block proportion of bimrocks. *Arab J Geosci*.
- Marsal, R.J. (1973). Mechanical properties of rock fill. In *Embankment Dam Engineering*, Casagrande Volume. John Wiley and Sons, pp 109-200.
- Medley, E., Lindquist, E., (1995). The engineering significance of the scale-independence of some Franciscan Mélanges of California, USA. In: Daemen JK, Schultz RA, editors, *Proceedings of the 35th US rock mechanics symposium*. Rotterdam Balkema, 907-14.

- Medley, E., Sanz, P., (2004). Characterization of Bimrocks (Rock/Soil Mixture) with application to slope stability problems. Presented at the Eurock 2004, Salzburg, Austria.
- Medley, E., Zekkos, D., (2011). Geopractitioner approaches to working with antisocial mélanges. The geological society of america 480.
- Ministerio de Fomento de España (2006). Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera. Dirección general de carreteras.
- Morris, H.C. (1960). Effect of particle shape and texture on the strength of noncohesive aggregates. Special Technical Publication, ASTM No. 264, p 350-364.
- Nanclares, F.J., (2018). Comportamiento mecánico de suelos granulares de origen aluvial (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Pasato, J.A., Cuesta, G.G., Toapanta, S.N., Granja, J.P., (2019). Criterios de diseño de estabilidad de taludes en coluviales de bloques (Bimrock o block in matrix). Ciencia Digital 3.1, 143–157.
- Ramos, A., Castro, Lady, Padilla, V., Vega, C., (2020). Incertidumbre en la determinación del porcentaje volumétrico de bloques de BIMrocks/BIMsoil a partir de información unidimensional. Boletín de Geología 42, 69–80.
- Sonmez, H., Gokceoglu, C., Tuncay, E., Medley, E. y Nefeslioglu, H.A. (2006 A). Estimating the uniaxial compressive strength of a volcanic bimrock. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 4: 554–561.
- Sonmez, H., Altinsoy H., Gokceoglu, C., y Medley, E.W. (2006 B). Considerations in developing an empirical strength criterion for bimrocks. In Proc. 4th Asian Rock Mechanics Symposium, Nov 6 -10, Singapore.
- Sonmez, H., Tunusluoglu, C., Medley, E., Zimmerman, R.W., (2009). A conceptual empirical approach for the overall strength of unwelded bimrocks, in: ISRM Regional Symp “Rock Eng. in Difficult Ground Conditions, Soft Rock and Karst.” Presented at the Rock Eng. in difficult ground conditions, soft rock and karst, Dubrovnik, Croatia.
- Suarez, J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. Instituto de investigaciones sobre erosión y deslizamiento – Ingeniería de suelos LTDA.
- Universidad de Córdoba; Instituto de agricultura sostenible; & paisajes del sur SL/Bonterra Ibérica (2014). Manual de técnicas de estabilización biotécnica en taludes de infraestructuras de obra civil. Proyectos de I+D+i 2012-2014.
- Vallejo, L., Mawby, R., (2000). Porosity influence on the shear strength of granular material-clay mixtures. Engineering Geology 58, 125–136.

- Vallejo, L.E., Zhou, Y., (1994). The mechanical properties of simulated soil-rock mixtures. Presented at the XII ICSMFE, New Delhi.
- Wang, Y., Feng, W.K., Li, C.H., Hou, Z.Q., (2020). An investigation into the effects of block size on the mechanical behaviors of bimsoils using variable-angle shear experiments. *Environmental Earth Sciences* 69–79.
- Wang, Y., Li, X., Zheng, B., He, J.M., Li, S.D., (2016). Macro-meso failure mechanism of soil-rock mixture at medium strain rates. *Géotechnique Letters* 6, 28–23.
- XU, W.-J., Hu, R.-L., TAN, R.-J., (2007). Some geomechanical properties of soil-rock mixture in the Hutiao Gorge area, China. *Géotechnique* 57, No. 3 57, 255–264.
- XU, W.-J., Yue, Z.Q., Hu, R.-L., (2008). Study on the mesostructure and mesomechanical characteristics of the soil-rock mixture using digital image processing based finite element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 45, 749–762.
- Zhang, S., Tang, H., Zhan, H., Lei, G., Cheng, H., (2015). Investigation of scale effect of numerical unconfined compression strengths of virtual colluvial-deluvial soil-rock mixture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 77, 208–2019.
- Zhou, A., Huang, X., Li, N., Jiang, P., Wang, W., (2020). A Monte Carlo approach to estimate the stability of soil-rock slopes considering the non-uniformity of materials. *Symmetry* 12.
- Zhou, H.W., Xie, H., (2003). Direct estimation of the fractal dimensions of a fracture surface of rock. *Surface Review and Letters* 10, 751–762.