

UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil



**CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE DISTINTAS BANDAS
GRANULOMÉTRICAS DE LA ARENA DE RAMADILLAS PARA SER
UTILIZADA COMO MATERIAL NATURAL DE SOPORTE EN LA
EXTRACCIÓN NO CONVENCIONAL DE GAS.**

KAREN ALEJANDRA SALGADO RIQUELME
INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía

José M. Montenegro C.

Profesor Informante

Robert King

Concepción, Abril 2017

A Patricio y Florencia.

Agradecimientos

Dedico de manera especial este trabajo a mi esposo Patricio Landabur y mi hija Florencia Landabur, los que forman mi base ante todo en esta vida, gracias a mi esposo por acompañarme y ayudarme durante todo este largo proceso, como todo lo vivido durante nuestra vida donde hemos ido creciendo juntos y formando una pequeña gran familia.

Agradecer durante el proceso de mi tesis al profesor Mauro Poblete, quien me guió durante mucho tiempo, siempre contando con buena voluntad para mis inquietudes, además a Don Mauricio Poblete, quien me ayudo a realizar todos los ensayos y que siempre tuvo una palabra de apoyo y ánimo. También agradecer a los profesores José Montenegro y Robert King, quienes amablemente aceptaron seguir con mi tema de tesis y ayudarme ante cualquier duda. Al Profesor Claudio Correa que hoy en día se desempeña como jefe de carrera quién siempre se mostró interesado y abierto a ayudar y solucionar cualquier problema presente.

Quiero agradecer a mis grandes amigos quienes fueron parte de mi recorrido por la universidad y que hoy en día se han convertido en esos amigos que ya son familia, Karla, Karen, Cesar, Nicole, Jean Pierre, Javiera y Luis, amigos los cuales son parte importante de mi vida, con los que vivimos muchos momentos de altos y bajos pero siempre ahí presentes, espero sigamos creando lindos recuerdos.

Finalmente pero no menos importantes quiero hacer un agradecimiento a mi familia, papas, suegra, hermanos, cuñados y sobrinos, los cuales siempre han estado presentes en mi vida dando siempre un empujón para seguir adelante con mis sueños, y ayudando de una u otra forma durante este y todos los procesos de mi vida.

RESUMEN

El proceso de extracción de gas en reservorios no convencionales requiere de la utilización de arena de sílice para la fractura y sostén de la roca en que se encuentra el gas natural, debido que ésta tiene una permeabilidad muy baja, casi nula, y se realiza a grandes profundidades, se necesita de un material el cual pueda resistir grandes presiones sin perder sus propiedades, como la dureza de éste.

A 70 km al sur de Concepción, cerca de la costa, en la localidad de Arauco, se encuentran importantes yacimientos de arena de sílice, con potencial de ser utilizados en el proceso de extracción de gas natural no convencional.

Se estudia en detalle la arena de sílice de Ramadillas, analizando su granulometría, esfericidad, redondez, densidad (bulk, absoluta y aparente), resistencia a la fracturación, conductividad hidráulica, resistencia a la calcinación y mineralogía.

La muestra obtenida en estado natural se divide en diferentes bandas granulométricas optimizando su uso como agente de sostén, maximizando su resistencia y conductividad hidráulica.

A partir de ensayos realizados en laboratorio, es posible determinar que en algunas de sus bandas granulométricas, el material de Ramadillas, puede ser un buen candidato para ser comercializado como material de soporte en faenas de extracción de gas no convencional, además de ser un material de bajo costo comparado con alternativas, como materiales resinados o sintéticos importados.

ABSTRACT

The gas unconventional reservoir of shale gas requires the use of silica sand for fracture and support of the rock in which the natural gas is found. Due to the low permeability of the rock, almost null, and since is performed at great depth, is needed a new material, which can withstand great pressures without losing properties, like it's hardness.

70 km south of Concepción, near the coast, in Arauco, important deposits of silica sand are found, with potential to be used in the process of natural gas extraction. Ramadillas' silica sand its studied in detail, analyzing its granulometry, sphericity, roundness, density (bulk, absolute and apparent), fracture resistance, hydraulic conductivity, calcination resistance and mineralogy.

The sample obtained in natural state is divided into different grain sizes, optimizing its use as a support agent, maximizing resistance and hydraulic conductivity.

Laboratory tests were performed to Ramadillas' material separated by granulometric bands that can be a good candidate to be marketed as a support material for non-conventional gas extraction. In addition this material has an lower cost than other alternatives, such as imported resin or synthetic materials.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1) INTRODUCCIÓN	1
2) REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1) Shale gas	11
2.2) Fracturamiento hidráulico.....	13
2.3) Material de soporte	15
3) ANÁLISIS DE LA ARENA DE RAMADILLAS COMO MATERIAL DE SOSTÉN.....	20
3.1) Granulometría	21
3.1.1) Metodología y procedimiento del análisis granulométrico.....	21
3.1.2) Análisis granulométrico del material en estado original.....	27
3.1.3) Análisis de otras bandas granulométricas	32
3.2) Redondez y esfericidad	35
3.2.1) Metodología y procedimiento del análisis de redondez y esfericidad	35
3.2.2) Resultados análisis de redondez y esfericidad	37
3.3) Densidad bulk	44
3.3.1) Metodología y procedimiento del ensayo de densidad bulk	44
3.3.2) Resultados densidad bulk.....	47
3.4) Densidad aparente.....	49
3.4.1) Metodología y procedimiento densidad aparente	49
3.4.2) Resultados densidad aparente	51
3.5) Densidad absoluta.....	53
3.5.1) Metodología y procedimiento densidad absoluta.....	53
3.5.2) Resultados densidad absoluta	54
3.6) Resistencia a la calcinación	55
3.6.1) Metodología y procedimiento ensayo de resistencia a la calcinación.....	55
3.6.2) Resultados resistencia a la calcinación	57
3.7) Resistencia a la fracturación	58
3.7.1) Metodología y procedimiento de la resistencia a la fracturación.....	58
3.7.2) Resultados resistencia a la fracturación	60
3.8) Conductividad hidráulica.....	69
3.8.1) Metodología y procedimiento conductividad hidráulica.....	69
3.8.2) Resultados conductividad hidráulica	73
3.9) Mineralogía.....	80
3.9.1) Metodología y procedimiento mineralogía	80
3.9.2) Resultados mineralógicos	81

4) ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LAS BANDAS GRANULOMÉTRICAS	83
5) CONCLUSIONES	87
6) REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Recurso de gas en trillones pies cúbicos (Tcf).....	7
Tabla 3.1 Juego de tamices por designación comercial.....	22
Tabla 3.2 Abertura tamiz ASTM en milímetros.....	22
Tabla 3.3 Tamaños máximos y mínimos en milímetros por banda granulométrica.....	23
Tabla 3.4 Tamices ASTM utilizados en la preparación del material para los ensayos.....	27
Tabla 3.5 Resultados granulometría láser.....	28
Tabla 3.6 Datos análisis granulométrico por tamizado.....	30
Tabla 3.7 Granulometría material 20/40 y 30/50.....	32
Tabla 3.8 Granulometría material 30/60 y 40/70.....	33
Tabla 3.9 Granulometría material 40/80 y 20/30-40/80.....	33
Tabla 3.10 Redondez y esfericidad del material 20/40.....	38
Tabla 3.11 Redondez y esfericidad del material 30/50.....	39
Tabla 3.12 Redondez y esfericidad del material 30/60.....	40
Tabla 3.13 Redondez y esfericidad del material 40/70.....	41
Tabla 3.14 Redondez y esfericidad del material 40/80.....	42
Tabla 3.15 Redondez y esfericidad del material 20/30-40/80.....	43
Tabla 3.16: Redondez y esfericidad de los granos por banda granulométrica.....	43
Tabla 3.17 Datos del recipiente acero utilizado en ensayo.....	47
Tabla 3.18 Datos densidad bulk material 20/40 y 30/50.....	48
Tabla 3.19 Datos densidad bulk material 30/60 y 40/70.....	48
Tabla 3.20 Datos densidad bulk material 40/80 y 20/30-40/80.....	48
Tabla 3.21 Densidad bulk por banda granulométrica.....	49
Tabla 3.22 Datos ensayo densidad aparente material 20/40 y 30/50.....	51
Tabla 3.23 Datos ensayo densidad aparente material 30/60 y 40/70.....	52
Tabla 3.24 Datos ensayo densidad aparente material 40/80 y 20/30-40/80.....	52
Tabla 3.25 Densidad aparente por banda granulométrica.....	52
Tabla 3.26 Resultados ensayo densidad absoluta.....	54
Tabla 3.27 Densidad absoluta por banda granulométrica.....	55
Tabla 3.28 Resultados ensayo resistencia a la calcinación.....	57
Tabla 3.29 Clasificación por resistencia al fracturamiento.....	59
Tabla 3.30 Resultado ensayos resistencia a la fracturación para una carga de 1000 psi.....	61
Tabla 3.31 Resultado ensayos resistencia a la fracturación para una carga de 2000 psi.....	62

Tabla 3.32 Resultado ensayos resistencia a la fracturación para una carga de 3000 psi.....	63
Tabla 3.33 Resultado ensayos resistencia a la fracturación para una carga de 4000 psi.....	64
Tabla 3.34 Resultado ensayos resistencia a la fracturación para una carga de 5000 psi.....	65
Tabla 3.35 Resultado ensayos resistencia a la fracturación para una carga de 6000 psi.....	66
Tabla 3.36 Resultado ensayos resistencia a la fracturación para una carga de 7000 psi.....	67
Tabla 3.37 Tabla resumen ensayo resistencia a la fracturación.....	67
Tabla 3.38 Clasificación del material dado el 10% de material triturado.....	68
Tabla 3.39 Datos ensayo de permeabilidad bandas granulométricas 20/40, 30/50 y 30/60.....	74
Tabla 3.40 Datos ensayo de permeabilidad bandas granulométricas 40/70, 40/80 y 20/30-40/80...	74
Tabla 3.41 Permeabilidad de las bandas granulométricas sometidas a 5000 psi.....	77
Tabla 3.42 Conductividad hidráulica por banda granulométrica.....	78
Tabla 3.43 Elementos presentes en el material y su concentración.....	81
Tabla 4.1 Cantidad de material disponible por banda granulométrica.....	84
Tabla 4.2 Tabla resumen ensayos redondez, esfericidad, resistencia a la fracturación y permeabilidad.....	85
Tabla 5.1 Resultados de resistencia a la fracturación a los 5000 psi y conductividad hidráulica para cada banda granulométrica.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Pozo de gas convencional y no convencional.....	1
Figura 1.2 Izquierda: Pozo de extracción no convencional de shale gas. Derecha: Detalle de la desviación de la tubería.....	4
Figura 3 Material de soporte posicionado en la fractura.....	5
Figura 1.4 Ramadillas, Arauco Región del Bio Bío.....	6
Figura 1.5 Mapa de las principales cuencas de shale gas en Sudamérica.....	7
Figura 2.1 Extracción shale gas.....	14
Figura 2.2 Fracturamiento hidráulico.....	15
Figura 2.3: Material de soporte ingresando en la grieta.....	16
Figura 2.4: Material de soporte natural (arena) y sintético (cerámica).....	17
Figura 2.5 Poros por los cuales fluye el hidrocarburo.....	18
Figura 3.1 Arena Ramadillas en su estado natural.....	20
Figura 3.2 Esquema general granulometría laser.....	24
Figura 3.3 Tamices ASTM.....	25
Figura 3.4 Curva granulométrica.....	26
Figura 3.5 Curva granulométrica del análisis láser.....	29
Figura 3.6 Curva granulométrica del análisis por tamizado.....	30
Figura 3.7 Curvas granulométricas láser y por tamizado del material original.....	31
Figura 3.8 Curva granulométrica de todas las bandas granulométricas preparadas para el estudio.....	34
Figura 3.9 Carta redondez y esfericidad.....	35
Figura 10 Lupa Leica EZ4 HD.....	36
Figura 3.11 Granos de arena del material de Ramadillas.....	37
Figura 3.12 Material 20/40.....	38
Figura 3.13 Material 30/50.....	39
Figura 3.14 Material 30/60.....	40
Figura 3.15 Material 40/70.....	41
Figura 3.16 Material 40/80.....	42
Figura 3.17 Material mezcla 20/30-40/80.....	43
Figura 3.18 Silo de almacenamiento de arena de sílice.....	44
Figura 3.19 Fractura saturada con el material de soporte.....	45
Figura 3.20 Materiales utilizados en el ensayo para determinar densidad bulk.....	46
Figura 3.21 Ensayo densidad bulk.....	47

Figura 3.22 Matraz Le Chatelier.....	50
Figura 3.23 Ensayo para determinar densidad aparente con querosén.....	51
Figura 3.24 Horno mufla.....	56
Figura 3.25 Material sin calcinar (izquierda), material calcinado (derecha).....	58
Figura 3.26 Materiales ensayo resistencia a la fracturación.....	59
Figura 3.27 Resultado resistencia a la fracturación de todas las bandas granulométricas.....	68
Figura 3.28 Daño en la fractura por rotura de material y otros factores.....	70
Figura 3.29 Celda utilizada para medir permeabilidad.....	70
Figura 3.30 Piedra porosa utilizada en el ensayo.....	71
Figura 3.31 Esquema general del equipo utilizado como permeámetro de carga variable.....	72
Figura 3.32 Curva ajustada a partir de datos de altura y tiempo en ensayo de carga variable.....	73
Figura 3.33 Curva ajustada de los datos de la banda granulométrica 30/50.....	75
Figura 3.34 Curva ajustada de los datos de la banda granulométrica 30/60.....	75
Figura 3.35 Curva ajustada de los datos de la banda granulométrica 40/70.....	76
Figura 3.36 Curva ajustada de los datos de la banda granulométrica 40/80.....	76
Figura 3.37 Curva ajustada de los datos de la banda granulométrica 20/30-40/80.....	76
Figura 3.38 Equipo Bruker D4 Endeavor utilizado para determinar la mineralogía, GEA Universidad de Concepción.....	80
Figura 3.39 Morfología de las partículas mediante microscopio de barrido SEM.....	82
Figura 4.1: Granos pequeños utilizando espacio entre granos más grandes.....	85

1) INTRODUCCIÓN

Existen dos tipos de reservorios de gas, los convencionales y los no convencionales, los cuales se diferencian en el yacimiento y forma de extracción de los hidrocarburos. Todos los yacimientos ya sea convencional o no convencional necesitan de una roca formadora para que puedan acumular hidrocarburos pero en los yacimientos no convencionales la roca formadora y el reservorio son el mismo (Boyer, 2006) por ende sus métodos de extracción son distintos. En los pozos convencionales la extracción de gas se realiza mediante una perforación vertical y a profundidades cercanas a los 1000 metros (Allix et al., 2011), en cambio los pozos de gas no convencional (shale gas) se realizan a profundidades mucho mayores ya que la roca generadora se encuentra a más profundidad, lo que muchas veces requiere de perforaciones horizontales o dirigidas hacia el estrato donde se encuentra. En la figura 1.1 se muestra la diferencia entre estos dos tipos de yacimientos y la diferencia en su extracción.

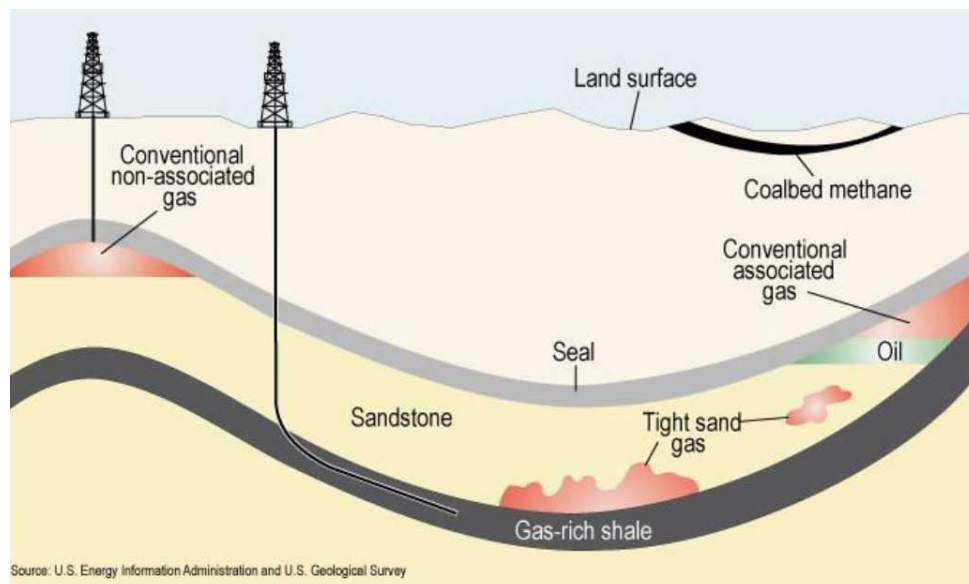


Figura 1.1 Pozo de gas convencional y no convencional. (Boyer et al., 2011)

La extracción de shale gas se realiza a profundidades que pueden ser superiores a los 5000 metros (*Duque, 2013*), profundidad a la que se puede encontrar la roca madre productora del shale gas. Este método de extracción consiste en una perforación vertical, la que se puede direccionar o volver horizontal hacia el yacimiento, que al momento de llegar a la profundidad deseada donde se encuentra la roca que se quiere explotar y extraer el gas. Se bombean fluidos fracturantes que crean canales por donde pueden circular los gases atrapados en la roca. Se utiliza esta técnica de perforación dado que la roca donde se encuentra el gas es de muy baja permeabilidad, la cual puede variar de 0,01 a 0,0000001 mD¹ (*Alexander, et al., 2011*). Para lograr conseguir la extracción de este gas se debe utilizar un método especial, donde se fractura la roca (*Boyer, et al., 2006*), este método es conocido como fracking. El método consiste en inyectar un fluido a altas presiones, para lograr fracturar la roca y así producir un aumento en la permeabilidad para poder extraer el gas contenido en ésta. Al momento de retirar la presión ejercida por el fluido las grietas formadas se cierran, es por esto que es necesario un material que pueda penetrar en la grieta y sea capaz de resistir grandes presiones sin perder propiedades como la resistencia a la fracturación. El material utilizado debe cumplir con diversos requerimientos, tales como redondez, esfericidad (de las partículas de arena), resistencia a la calcinación, densidad, resistencia a la fracturación y conductividad hidráulica. Estas exigencias al material de soporte, se deben a que una vez situado en las fracturas, éste debe resistir las presiones provocadas por el cierre de la roca, lo que puede inducir a la formación de material particulado, si es que éste no es apto para su uso. Esto podría originar un taponamiento en las grietas y así evitar un paso óptimo del gas.

La estimulación de una roca, es el término que hace referencia a como ésta es sometida a algún método que logre liberar los gases atrapados en ella, dado que estamos hablando de una roca que muy baja permeabilidad y que no permite extraer el gas sin una previa estimulación en la misma.

¹: mD es la unidad de medida utilizada comúnmente para la conductividad hidráulica en un pozo de extracción de gas. 1Darcy equivale a $9,869 \times 10^{-13} \text{m}^2$

El fracturamiento hidráulico, es el método utilizado desde los años 40 en Estado Unidos para reservorios convencionales de extracción de gas (*Smith et al., 2011*). Éste no era utilizado comúnmente para los reservorios convencionales, dado que no era necesario la mayoría de las veces, ya que la roca en los reservorios convencionales tienen una permeabilidad aceptable, sobre 0,1 mD (*Alexander, et al., 2011*), donde la extracción de los gases contenidos en éstas muchas veces lo hacen una técnica innecesaria. Con el paso de los años y la investigación de los gases contenidos en shale gas, roca madre de los hidrocarburos, la estimulación por fracturamiento hidráulico resulto ser la tecnología óptima para obtener el gas atrapado (*Boyer, 2011*).

El desarrollo de las investigaciones sobre fracturación hidráulica y pozos horizontales parte con el descubrimiento del yacimiento de Barnett shale en el centro de Texas, Estados Unidos, un depósito de shale gas con muy baja permeabilidad, y con un alto contenido de gas. En el año 1981 la empresa Mitchell Energy & Development Corporation, perforó un pozo exclusivamente para la producción de shale gas, el que era vertical, y se utilizó la fracturación hidráulica (*Boyer et al., 2011*), y así lograr liberar los gases que se encontraban atrapados en la roca.

La producción en los pozos en un comienzo era elevada, pero ésta tenía una rápida caída, es aquí donde los operadores dieron cuenta que se necesitaba abarcar un área mayor en el yacimiento, con lo que vino el desarrollo de pozos dirigidos u horizontales (Figura 1.2) que finalmente permitió abarcar un mayor área de la roca (*Alexander et al., 2012*).

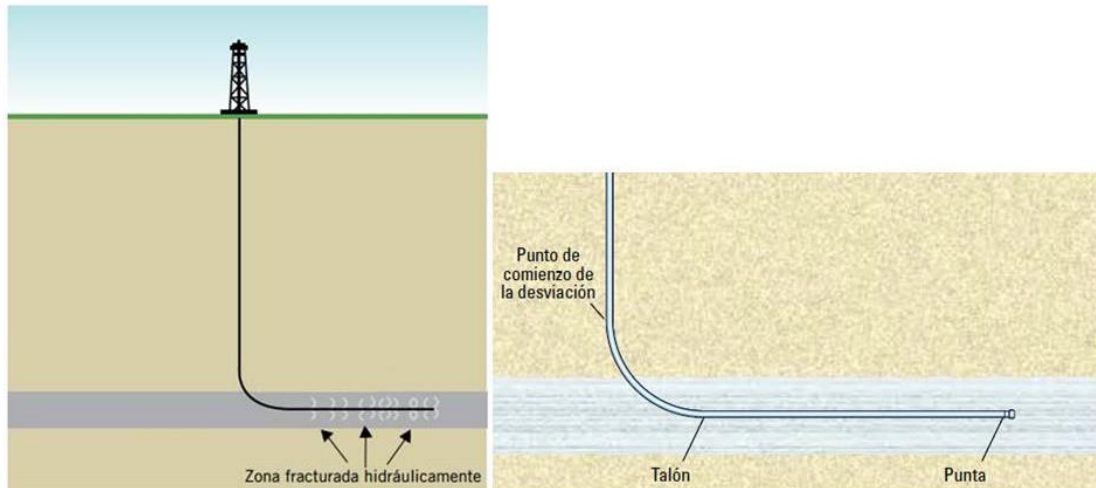


Figura 1.2 Izquierda: Pozo de extracción no convencional de shale gas. Derecha: Detalle de la desviación de la tubería (Blanco y Vivas, 2012).

En la fracturación hidráulica, la roca es estimulada con fluidos a grandes presiones lo que provoca grietas en la roca, que al momento de retirar dicha presión ésta tenderá a cerrarse (Estrada, 2012). Así es como se debió encontrar un material de soporte adecuado para ser utilizado en las fracturas de la roca para evitar su cierre y aumentar la permeabilidad de estos depósitos para extraer el shale gas (Figura 3), como partículas de arena que puedan ser depositadas en las fracturas. El material utilizado en este tipo de técnica debe tener propiedades que le permitan soportar las presiones de cierre de la roca y que al mismo tiempo permita un paso óptimo del gas, o sea que aumente la permeabilidad de la roca (Alexander et al., 2011). Lo que se utiliza en esta técnica de extracción de gas, es arena de sílice, arena resinada o material sintético hecho a partir de cerámica (Mader, 1989).

El material de soporte, nombre que lleva dado su uso, es el responsable de recibir la presión ejercida por la roca que ha sido fracturada con agua y fluidos fracturantes. Este material depositado en las fracturas de la roca, debe ser capaz de resistir las altas presiones ejercidas por ésta. La presión ejercida sobre el material de soporte puede variar, dependiendo de la roca y profundidad a la cual se fracture. Es por esto la importancia de este elemento dentro de la extracción del shale gas, ya que éste permitirá un paso óptimo del gas atrapado en la roca.



Figura 1.3 Material de soporte posicionado en la fractura (*Smith et al., 2011*).

El presente estudio se realiza con material extraído de la localidad de Ramadillas, en la comuna de Arauco (Figura 1.4), donde se encuentran depósitos de arena silícica en los yacimientos Conumo, Conumo A, Conumo B, Conumo C y Conumo D. Este tipo de material es utilizada comúnmente para diversos usos, como por ejemplo la elaboración de vidrio (*Bansal y Doremus, 2009*). Hace un par de años cuando se inició una investigación más fuerte sobre el shale gas en el mundo, se presentó la necesidad de un material que se pudiera utilizar en la fracturación hidráulica, donde comenzó la utilización de la arena de sílice, la cual contaba con estas características, además se comenzó a producir materiales resinados y artificiales de cerámica (*Mader, 1989*), por la necesidad de tener un material óptimo para ser utilizado como material de soporte. Estos materiales artificiales tienen un costo mucho mayor al de un material natural como lo es la arena de sílice, con valores aproximados de 230 USD/ton para arenas y 1000 USD/ton para material resinado importado en Argentina (*Peñaranda, 2014*), país de Sudamérica donde la extracción de shale gas se encuentra avanzada.



Figura 1.4 Ramadillas, Arauco Región del Bio Bío. (*Google earth*).

El shale gas se ha convertido en los últimos años en una alternativa rentable, dado que existen grandes reservas a nivel mundial, siendo Argentina uno de los países con mayores reservas de shale gas en Suramérica (Tabla 1.1). Actualmente en Chile se están realizando pozos exploratorios en Magallanes (cuenca Austral Magallanes, Figura 1.4), ya que según estudios realizados por la EIA, (*Energy Information Administration, 2013*), Chile contaría con una reserva importante de este hidrocarburo, lo que la situaría como la tercera a nivel sudamericano después de Argentina y Brasil (tabla 1.1). En la Figura 1.5 se muestra un mapa con las principales cuencas en América del Sur con reservas de shale gas registrado.

Tabla 1.1 Recurso de gas en trillones pies cúbicos (Tcf). (Advanced Resources International, 2011).

	País	Shale Gas, Tcf
Norte de Sudamérica	Colombia	78
	Venezuela	42
Sur de Sudamérica	Argentina	2732
	Bolivia	192
	Brasil	906
	Chile	287
	Paraguay	249
	Uruguay	83

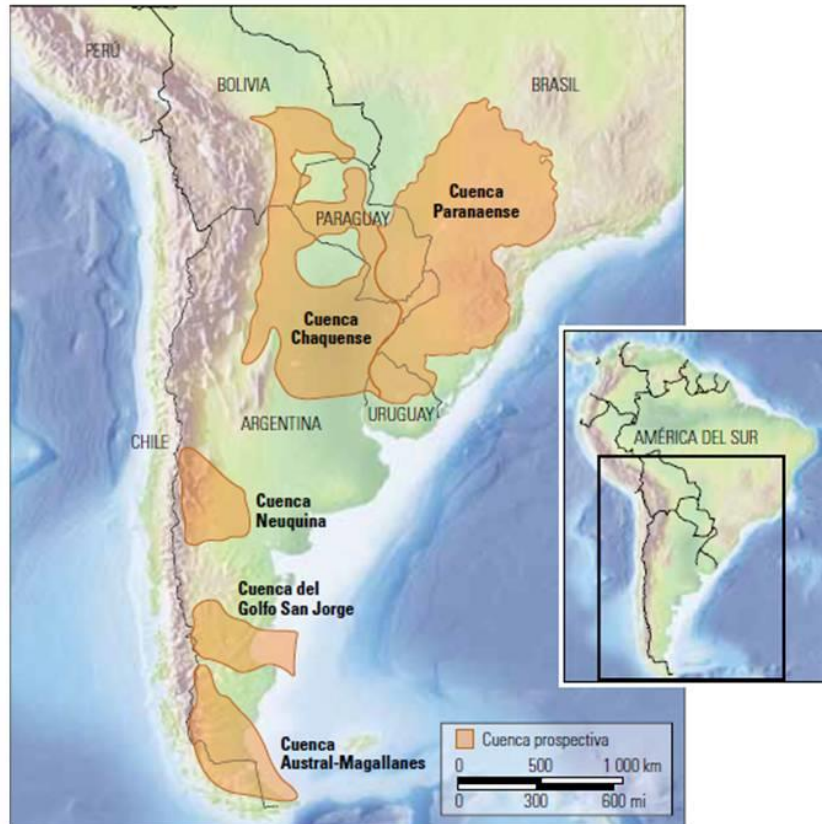


Figura 1.5 Mapa de las principales cuencas de shale gas en Sudamérica. (Kuuskraa, et al, 2011).

El material de soporte dentro de la extracción significa alrededor de un tercio de la inversión total (*Kuuskras et al, 2012*), por lo que es de suma importancia que éste cumpla con los requisitos como la redondez, esfericidad, granulometría (tamaño de las partículas según requerimiento del pozo), resistencia a la fracturación y conductividad hidráulica, dentro de los más importantes. Estos requisitos están regulados por la API RP 19C (2008) o su equivalente la ISO 13503/2 (2006). Una buena selección del material es crucial para el correcto funcionamiento del pozo, y que se cumpla con la cantidad de metros cúbicos de hidrocarburo extraído para el cual está diseñado el pozo, ya que si el material de soporte no es de calidad y no cumple con las especificaciones del cliente éste podría generar pérdidas económicas. El material de soporte utilizado en países como Argentina, son importados en su mayoría desde Estados Unidos (*Barzola, 2012*), siendo del tipo resinado y artificial en su mayoría (*Peñaranda, 2014*), por lo que su costo es mayor.

Para que el material natural extraído desde una mina, como lo es la arena de sílice, pueda ser utilizado como material de soporte, éste debe tener ciertas características y propiedades como, la redondez, esfericidad, resistencia a la fracturación, tamaño de las partículas, etc., las que no siempre se cumplen teniendo un material sin procesar, donde se mencionaba anteriormente, esto eleva su costo. La mejora del material se puede lograr encontrando una granulometría o una combinación de éstas, de manera que se llegue a una optimización del material. Es por esto que se debe realizar un análisis y estudio a diversas bandas granulométricas con el fin de encontrar una malla o una combinación de éstas que cumpla con propiedades tan importantes dentro del fracking como lo es la resistencia a la fracturación ó la conductividad hidráulica, dado que de esta última depende el rendimiento del pozo.

Para el mejoramiento del material encontrado en Ramadillas se analizaron 6 bandas granulométricas las cuales fueron escogidas dado el tamaño de partículas encontrado en este material, y tomando en cuenta algunas bandas granulométricas

existentes en el mercado actual. Estas bandas granulométricas se realizan considerando el tamaño de las partículas, donde se seleccionan por tamaño con tamices ASTM, por esto su nomenclatura ya que el primer número designa el material que pasa por ese tamiz y el segundo el material retenido por este último. Las bandas granulométricas, finalmente seleccionadas del material y utilizadas para este trabajo, fueron 20/40, 30/50, 30/60, 40/70, 40/80 y finalmente una mezcla 20/30-40/80, la que contiene los granos más grandes y más pequeños de la arena de Ramadillas, con el fin de optimizar la cantidad de arena disponible y llegar a una mejor resistencia del material. Teniendo las mallas, se analizó a partir de la ISO 13503/2 y la ISO 13503/5, donde dentro de los análisis más importantes solicitados por los usuarios de material de soporte están el granulométrico, densidad bulk, densidad aparente, densidad absoluta, redondez, esfericidad, resistencia a la calcinación, resistencia a la fracturación, estos ensayos son los normados por la ISO 13503/2, y la conductividad hidráulica normada por la ISO 13503/5. Además se le realizó un análisis químico para conocer el porcentaje de sílice en el material, y mineralogía de los granos de arena. Con estos ensayos se quiere conocer si el material es apto para su uso como material de soporte en pozos de extracción de shale gas, y optimizar el material existente para que cumpla con los requisitos.

En este trabajo se muestra una introducción sobre el shale gas, que es el gas atrapado en la roca madre que lleva el mismo nombre, y el fracturamiento hidráulico, que es la técnica utilizada para la extracción del gas, con el fin de conocer la utilidad del material de soporte para una exitosa extracción de hidrocarburos en grandes profundidades. Para el análisis se cuenta con material extraído de Ramadillas el cual cuenta con propiedades que podrían ser aceptables según la norma (ISO 13503/2) por lo cual se quiere encontrar una configuración de tamaños de partículas adecuadas con las que el material sea apto como material de soporte en pozos de extracción no convencional. El material es analizado en laboratorio con los ensayos más significativos solicitados por los usuarios de este material, como la granulometría, redondez, esfericidad, densidad bulk, densidad aparente, densidad absoluta, resistencia a la calcinación, resistencia a la fracturación

y conductividad hidráulica, además se agrega un análisis químico para conocer los componentes del material.

El material de Ramadillas es modificado en su granulometría, es decir que se seleccionan distintas bandas granulométricas según el tamaño de partículas disponibles para encontrar la distribución o mezcla óptima de material que cumpla con los parámetros determinados por la norma.

2) REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1) Shale gas

El shale es la roca madre de la mayoría de los depósitos de hidrocarburos en todo el mundo (*Blyth y de Freitas, 1984*). Estas son rocas generadoras de hidrocarburos como petróleo, tight gas y shale oil (*Boyer et al, 2011*). Son rocas con alto contenido de material orgánico y con tiempo geológico los estratos enterrados alcanzan grandes profundidades. El shale gas son rocas de granos finos que se forman por la compactación de partículas de tamaño de limos y arcillas (*Boyer et al., 2011*). Estas son rocas están en estratificaciones muy finas lo que significa que pueden quebrarse o separarse. Dependiendo de la madurez y mineralogía de la roca ésta puede fracturarse con mayor o menor esfuerzo, lo que influirá al momento de fracturar hidráulicamente la roca, por lo que es de suma importancia conocer en su mayoría el lugar que se quiere explotar.

El shale gas puede tener permeabilidades muy bajas casi nulas que son menores a $9,61 \times 10^{-10}$ m/s o 0,1mD (*Boyer et al, 2011*), la cual depende de la porosidad, saturación de hidrocarburo y la mineralogía de la roca (*Blyth, de Freitas, 1984*). Esto hace que la extracción del gas encapsulado en la roca sea de difícil extracción y se tenga que recurrir a métodos no convencionales como lo es la fracturación hidráulica.

Los pozos de extracción no convencionales llevan este nombre dado al método utilizado para la extracción del gas. El shale gas, es un material que se encuentra a grandes profundidades (*Álvarez, 2012*), y en una roca de permeabilidad muy baja o casi nula que puede ir de 0,01 a 0,0000001 mD (*Alexander, et al., 2011*). La forma de extraer éste gas es la conocida por no convencional dado los métodos utilizados.

La materia orgánica que ha sido depositada y madurada durante varias épocas geológicas, en las cuales ha estado expuesta a grandes temperaturas. A medida que se va acumulando este material, los sedimentos se van hundiendo a mayores

profundidades por lo que quedan sometidos a grandes presiones y temperaturas, aquí también es donde se generan las láminas de roca. Con el paso del tiempo la materia orgánica se transforma en kerógeno, lo que es un compuesto químico orgánico presente en las rocas sedimentarias (Boyer, 2006). Cuando se exponen a grandes temperaturas y presión generan productos específicos, dependiendo de sus características, como petróleo, gas húmedo, gas seco y elementos no hidrocarbúricos (Alexander, 2011). El shale gas ha sido sometido a mayores temperaturas y presiones son la de mayor interés ya que son las generadoras del gas.

Se necesitan de diversos tipos de análisis para conocer las propiedades de la roca, como los geoquímicos, petrofísicos y geomecánicos y así determinar la factibilidad de la exploración en un lugar dada a su elevada inversión (Kuuskraa et al., 2012) para así conocer el tipo, calidad y cantidad de shale gas contenido en la roca. Es por esto que tanto geólogos como ingenieros deben realizar un extenso análisis del lugar, teniendo datos históricos, análisis en el lugar y con muestras del mismo. Hoy en día existen variados tipos de análisis y tecnologías utilizadas para analizar la roca madre y extraer el gas contenido en ellas. Aunque se trata de una roca que solo lleva tres décadas siendo estudiada, por lo que se espera que con el avance de las investigaciones su extracción sea más eficiente.

Los yacimientos de gas no convencionales son aquellos que no pueden ser explotados de forma convencional, esto quiere decir que no se puede utilizar solo un pozo vertical en la extracción, ya que la roca donde se encuentra este gas está a grandes profundidades, además la roca tiene una permeabilidad reducida y la zona que contiene el gas es de un espesor estrecho, cercano a los 200 metros (Boyer et al., 2011), lo que hace imposible extraer el gas de manera convencional. Por esto se deben utilizar otros métodos como la perforación horizontal y la fracturación hidráulica, con lo que se aumenta la permeabilidad natural de la roca y se aprovecha el área de extracción con esta tubería que abarca una distancia mayor dentro de la roca a explotar, (Figura 1.1) (Allix et al., 2011).

2.2) Fracturamiento hidráulico

La fracturación hidráulica es una técnica utilizada para liberar los hidrocarburos no convencionales como el shale gas que se encuentran atrapados en rocas de muy baja permeabilidad (0,1-0,0000001 mD) y localizadas a gran profundidad (hasta 5000 metros). Con este método la roca es fracturada permitiendo así que el hidrocarburo se libere a través de las grietas formadas.

El método utilizado para la extracción de este tipo de hidrocarburo como el shale gas es de difícil ejecución comparado a uno de yacimiento convencional que se realiza con perforaciones menores a los 1000 metros (*Blanco, Vivas, 2011*) y no es necesaria una fractura de la roca ya que la permeabilidad de ésta no la hace necesario. Pero con el desarrollo de las nuevas tecnologías, como la fracturación hidráulica y los pozos horizontales o dirigidos, se ha llegado a buenos resultados. La forma de extracción consiste en la perforación vertical, la que muchas veces cuando se llega a la roca madre, que contiene el hidrocarburo a grandes profundidades, la perforación la vuelven horizontal o dirigida (Figura 2.1), siguiendo la forma del yacimiento de shale gas, con lo que se logra un mayor contacto con la roca que contiene el gas (*Al-Jubori et al., 2009*).

La fracturación hidráulica se realiza una vez que el pozo está concluido, esto quiere decir que se ha llegado a la profundidad necesaria donde se encuentra el shale gas y así comenzar la fractura de ésta, recordado que es una roca de mínima permeabilidad que no deja circular los gases presentes en ésta.

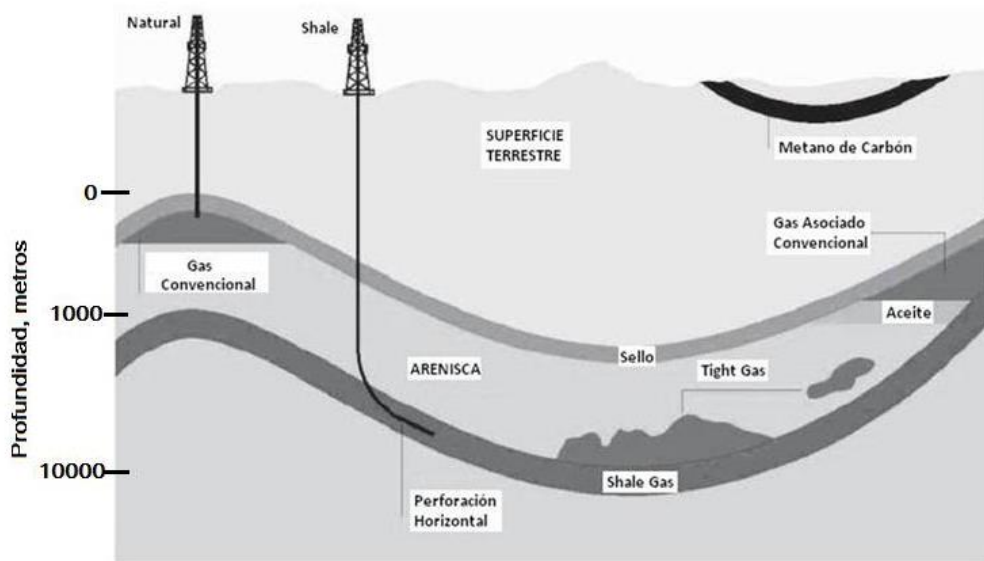


Figura 2.1 Extracción shale gas. (Álvarez, 2012).

La fractura en la roca, donde se almacena el hidrocarburo se realiza a partir de la inyección de fluidos densos a base de agua que es viscosificado con un polímero, como la goma guar refinado, aditivo natural tomado de una planta con su mismo nombre y utilizado por sus características espesantes, además elementos metálicos como el borato. El fluido finalmente es en más de un 90% agua (Blanco, Vivas, 2011). Este fluido viscoso en una primera etapa va solo para luego ser inyectado con material de soporte, los cuales combinados a grandes presiones, las que dependerán del tipo de roca y su profundidad, logran la fractura de la roca (Boyer et al., 2011). Las fracturas se extienden a lo largo de la tubería (Figura 2.2) donde se aumenta la permeabilidad de la roca dejando así pasar el gas atrapado.



Figura 2.2 Fracturamiento hidráulico. (Kraemer, et al, 2014).

En la Figura 2.2 se muestra esquemáticamente una tubería la cual lleva el fluido fracturante en su interior, el que es liberado estratégicamente a lo largo de ésta y provoca las grietas en la roca.

Cuando ya se inyectó el material de soporte en la grieta y se libera la presión ejercida por el fluido fracturante, el material de soporte queda insertado en las grietas para evitar que éstas se cierren y deje pasar el gas.

2.3) Material de soporte

Con el desarrollo del fracturamiento hidráulico en rocas de mínima permeabilidad, se encuentra prácticamente solucionado el problema del cierre de la roca cuando se retira la presión en ella. Con esto se debió pensar en una solución que evitará el cierre de las grietas pero que al mismo tiempo mantuviera los vacíos que dejaran pasar los hidrocarburos atrapados en la roca (Blyth, de Freitas, 1984). Así en la fracturación hidráulica se estimó el uso de material de soporte (Montgomer y Steanson, 1985). Aunque en los años 40 se realizó la primera fracturación hidráulica en la cual se utilizó cerca 10 toneladas de material de soporte (Smith et al., 2011), no fue hasta el año 1981 con el descubrimiento de Barnett Shale en Texas, Estados

Unidos, se realizó una fracturación exitosa con material de soporte (*Boyer et al, 2011*).

El material debe constar de partículas limpias, lo más esférica posible y con la dureza necesaria para resistir elevadas presiones sin fracturarse y así crear canales en las fracturas de la roca para aumentar su permeabilidad y dejar fluir los hidrocarburos confinados en ella. En la Figura 2.3 se muestra un resumen como se traslada el material de soporte por las fracturas de la roca.

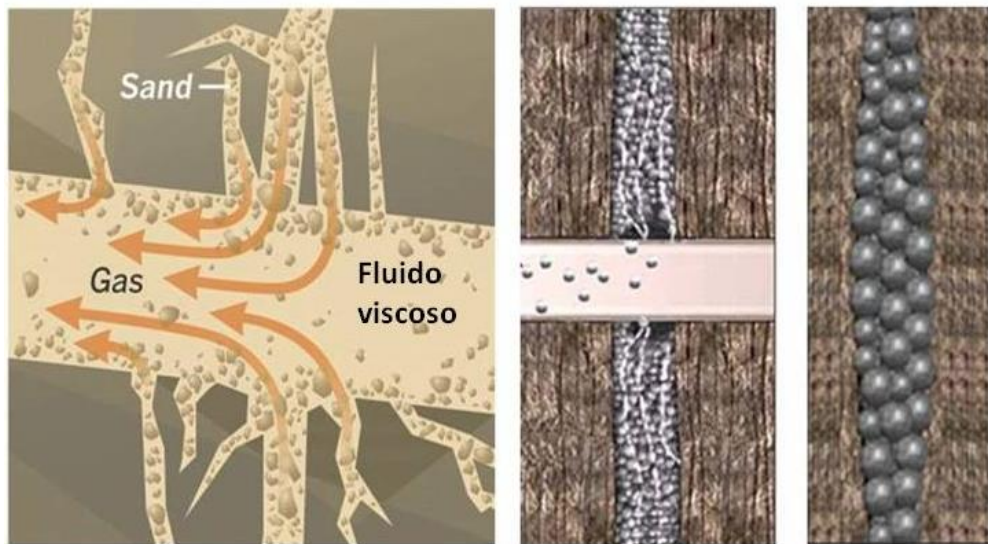


Figura 2.3: A la izquierda, se muestra el pozo y sus fracturas con el material de soporte y gas circulando por éstas. En el centro, material de soporte ingresando en la grieta. A la derecha, se muestra el material de soporte acomodado en la grieta. (*Allix et al, 2010*).

Con la utilización del material de soporte, que en un comienzo solo era arena, comenzaron a aparecer materiales resinados y sintéticos, que venían a suplir la necesidad de un material que resistiera mayores presiones, superiores a los 4000 psi. Se debe tener en cuenta que estos deben resistir grandes presiones que pueden llegar hasta los 82,8 MPa (12.000 Psi) (*d'Huteau, 2012*).

Actualmente los materiales de soporte más utilizados son la arena, para una presión máxima de 27,6 MPa y el material cerámico para presiones mayores a los 27,6 MPa

(Blanco, Vivas, 2011), aunque la arena sigue siendo la más utilizada actualmente (Peñaranda, 2014), dada a sus características como dureza, y bajo costo. En la figura 2.4 se muestra un material natural (arena) y otro sintético, hecho de cerámica, el cual se muestra a la izquierda de la imagen, se puede ver que este es homogéneo en tamaño y forma.



Figura 2.4: A la izquierda se muestra un material de soporte cerámico (GDG CERAMIC), y a la derecha se encuentra la imagen de un material de soporte de sílice natural (South Dakota Proppants, LLC). Las imágenes no se encuentran a la misma escala.

Las propiedades y requerimientos con los que debe cumplir el material de soporte está regulado y normado por la API RP 19C (2008) o su homónima la ISO 13503/2 (2006), éstas son utilizadas como referencia al momento de realizar los ensayos necesarios al material de soporte.

Dentro de estos requerimientos que debe cumplir el material se encuentran la redondez y esfericidad a la que se le atribuye en gran medida la resistencia a la fracturación, dado que el material entre más redondo y esférico sea, el contacto entre partículas será homogéneo lo que hace que la fuerza entre ellas se distribuya normalmente lo que favorecería en la resistencia a la fracturación para así evitar que el material se rompa, con lo que se producen finos que pueden tapan los poros por los cuales fluye el hidrocarburo (Figura 2.5) y causar una baja en el rendimiento del pozo (Marshall et al., 2014), esto quiere decir que la cantidad de gas que fluya por

las fracturas disminuye. Pero existe un estudio (*Peñaranda, 2014*) en el que se demuestra que la arena de sílice comparada con materiales cerámicos o resinados, que presentan mayor redondez y esfericidad, finalmente tienen una permeabilidad similar, siendo el material sometido a las mismas pruebas de presión y utilizando materiales del mismo tamaño para ser comparados, lo que demostraría que la redondez y esfericidad no estarían directamente relacionadas con la conductividad hidráulica del pozo, lo que se ve directamente relacionado con la productividad de éste.

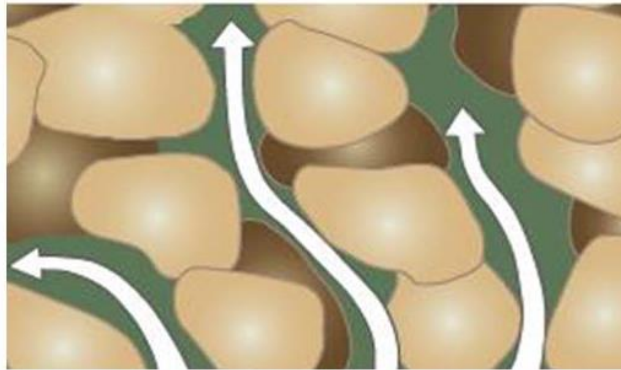


Figura 2.5 Poros por los cuales fluye el hidrocarburo. Fuente: Canadian Society for Unconventional Gas (www.csug.ca).

La granulometría es otro ensayo que está normado, el cual determina el tamaño de las partículas disponibles en el caso de materiales de soporte naturales como la arena de sílice, y en el cual se puede seleccionar el material para el cual puede ser comercializado, por ejemplo (20/40, 40/70, 40/80, etc.), esta designación es realizada a partir del tamaño de las bandas granulométricas ASTM utilizadas para seleccionar el tamaño de los granos, donde el primer número designa la banda por la que todo el material de soporte pasa y el segundo es la designación de la banda por la cual el material queda retenido, así se determina el rango de tamaño de las partículas a utilizar. El tamaño de los granos requerido en un pozo dependerá de las características de éste, como la permeabilidad y presión a la cual la roca tenderá a cerrarse o más conocida como presión de cierre (*Barreda, 2003*), dado que como se verá más adelante el material entre más pequeño, tiene una mayor resistencia a la

fractura. Además existen otros ensayos como los que determinan la densidad bulk, aparente y absoluta del material, necesarias al momento de considerar la cantidad de material empacado en el caso de la densidad bulk. Otro definido por la ISO 13503/2 (2006), es la resistencia a la calcinación necesario para conocer la pureza del material, ya que en este ensayo el material es llevado a grandes temperaturas cercanas a los 1000°C, que determina su resistencia a grandes temperaturas (*Alexander, 2014*).

Entre los ensayos más importantes realizados a este material se encuentran los de resistencia a la fracturación y el de conductividad hidráulica. La primera determina cual es la resistencia a la fractura, al ser sometido a grandes presiones (1000-12000 psi), lo cual revisa la cantidad de fino que queda del material luego de aplicada una carga determinada, ya que como se dijo anteriormente si el material se tritura se provocara un exceso de fino que tapara los canales por los cuales pasan los hidrocarburos. La conductividad hidráulica se refiere a la resistencia que ofrecerá el suelo al fluido que será transportado por el pozo.

Otro análisis que se tiene en consideración, es el análisis químico, donde se determina la cantidad sílice presente en este, ya que se busca que no contenga materiales que pueden interferir en sus propiedades físicas y químicas que tiene la arena de sílice (*Mitchell, 2014*).

3) ANÁLISIS DE LA ARENA DE RAMADILLAS COMO MATERIAL DE SOSTÉN

La arena es extraída de la localidad de Ramadillas en Arauco región del Biobío en los yacimientos Conumo, Conumo A, Conumo B, Conumo C y Conumo D. Aquí se encuentran grandes cantidades de este tipo de arena la cual es especial, ya que su alto contenido en sílice la hace un material resistente y que podría ser utilizado como material de soporte. En la Figura 3.1 se muestra la arena extraída de los depósitos de Ramadillas.



Figura 3.1 Arena Ramadillas en su estado natural.

Cualquier material que se quiera utilizar en faenas de extracción de shale gas no convencional debe ser analizado en laboratorio para conocer si sus propiedades son aptas para ser empleado como material de soporte en estas faenas. Los ensayos realizados al presente trabajo están normados por la ISO 13503/2 (2006) y la ISO 13503/5 (2006). Estas normas son utilizadas como una referencia en laboratorio para realizar los ensayos, como granulometría, redondez y esfericidad, densidad bulk, densidad aparente, densidad absoluta, resistencia a la calcinación, resistencia a la fracturación y conductividad hidráulica. Además se agregó un análisis químico para

conocer la cantidad de sílice. Así con estos ensayos poder llegar a una conclusión con el estudio de este material.

A continuación se muestran cada uno de los ensayos y análisis realizados en laboratorio, los cuales fueron realizados en su mayoría en el Laboratorio de Geomateriales de la UCSC a excepción del análisis granulométrico láser y químico los cuales fueron realizados en el Instituto de Geología Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción y el ensayo de resistencia a la calcinación el cual fue realizado en el laboratorio de la Facultad de Ciencias de la UCSC.

3.1) Granulometría

3.1.1) Metodología y procedimiento del análisis granulométrico

El ensayo granulométrico consiste en determinar el tamaño de los granos, con la finalidad de conocer su tamaño y distribución de éstos. El ensayo es ampliamente utilizado dentro de la geotecnia y geología dado que un parámetro importante es el tamaño y distribución de partículas.

El ensayo granulométrico para el análisis de un material que se quiere utilizar como material de soporte tiene dos puntos importantes. El primero consta en determinar si el material tiene partículas de un tamaño que pueda ser comercial, entre 0,1 y 3 mm aproximadamente (*Montgomery, Steanson, 1985*), esto dependerá del requerimiento del pozo, como las presiones debido a la profundidad y el ancho de las fracturas lo que condicionara el tamaño de partículas a ser utilizadas (*d'Huteau, 2012*). Lo segundo para lo cual es utilizado el ensayo granulométrico es para separar y clasificar el material por tamaño de granos ya que éste es comercializado por tamaño de granos los cuales son separados por un diámetro máximo y mínimo el cual es definido como se muestra en la Tabla 3.1, en ésta se muestran los juegos de tamices utilizados normalmente en un ensayo de granulometría para clasificación del material por tamaño comercial.

Tabla 3.1 Juego de tamices por designación comercial. Fuente: ISO 13503/02 (2006).

Pilas de tamices normalmente utilizados, N° tamiz ASTM.										
6/12	8/16	12/18	12/20	16/20	16/30	20/40	30/50	40/60	40/70	70/140
6	8	12	12	16	16	20	30	40	40	70
8	10	14	14	18	18	25	35	45	45	80
10	12	16	16	20	20	30	40	50	50	100
12	14	18	18		25		45	60	60	120
	16		20		30		50		70	140

En la tabla 3.1 se muestran los juegos de tamices por bandas granulométricas utilizadas de mayor a menor diámetro de abertura del tamiz, además en letra negrita se identifican los tamices por los cuales el material queda retenido, es decir para el caso de un material 20/40 el primer número es el tamiz de mayor diámetro por el cual el material debe pasar, por lo que todo lo que queda retenido en ese tamiz es desechado y el segundo número en negrita es el tamiz de abertura menor por el cual el material queda retenido, por lo que todo el material que pase el tamiz también es desechado, de esta manera los tamaños de los granos son definidos por un máximo y un mínimo de tamaño que puede tener por cada banda granulométrica. La Tabla 3.2 muestra los tamaños de aberturas de los tamices ASTM en mm.

Tabla 3.2 Abertura tamiz ASTM en milímetros.

Tamiz ASTM N°	Abertura [mm]	Tamiz ASTM N°	Abertura [mm]	Tamiz ASTM N°	Abertura [mm]
4	4,75	18	1	50	0,3
6	3,35	20	0,85	60	0,25
8	2,36	25	0,71	70	0,212
10	2	30	0,6	80	0,18
12	1,7	35	0,5	100	0,15
14	1,4	40	0,425	120	0,125
16	1,18	45	0,355	140	0,106

Las bandas granulométricas llevan esta designación (por ejemplo 20/40) porque tendrán un tamaño mínimo y máximo de las partículas de suelo, en la tabla 3.3 se muestran estos valores en milímetros.

Tabla 3.3 Tamaños máximos y mínimos en milímetros por banda granulométrica.

Banda granulométrica N° ASTM	Tamaño mínimo [mm]	Tamaño máximo [mm]
6/12	1	3,35
8/16	1,18	2,36
12/18	1	1,7
12/20	0,85	1,7
16/20	0,85	1,18
16/30	0,6	1,18
20/40	0,425	0,85
30/50	0,3	0,6
40/60	0,25	0,425
40/70	0,212	0,425
70/140	0,106	0,212

Como se decía la importancia del ensayo granulométrico está en conocer el tamaño de las partículas y cuál es la graduación del material, ya que la distribución comercial del material se hace por bandas granulométricas, donde las más utilizadas son 16/20, 20/40, 30/50, 40/60 y 40/70 (*Webber et al., 2004*). Estos tamaños de arena se utilizan dependiendo de los requerimientos del pozo, como la profundidad, tipo de roca, y cuanto gas se quiere extraer de éste. Ya que el material más pequeño resiste mejor la presión sin antes romperse que un material de mayor diámetro, esto se podrá ver más adelante con el resultado de ensayos.

Así esta graduación del material es importante ya que determina las bandas granulométricas que se pueden utilizar del material en bruto y para la cual el material será más rentable económicamente, dado que si se elige un tamaño de granos que no se encuentra en su mayoría en el material en bruto, la pérdida de material podría ser alta.

Existen diversos ensayos para determinar la granulometría de un suelo, entre los que se encuentran el láser (*Frías et al., 1988*) y por tamizado, siendo este último el más utilizado actualmente.

El ensayo granulométrico laser consiste en hacer pasar un rayo laser monocromático expandido a través de una muestra, la cual puede estar húmeda o en suspensión dentro de un líquido no reactivo (Frias et al., 1988). Esta luz es difractada a través de la muestra y provoca una figura en el plano focal del lente (Figura 3.2), ésta dependerá del tamaño de los granos. Este ensayo puede medir partículas aproximadamente desde 0,1 micras a 3 mm con una precisión de 0,01 micras, si se compara con un ensayo de tamizado el láser puede ser más preciso ya que la medición de tamaños de partículas es mayor, por ejemplo entre una malla ASTM N°100 (0,15 mm) y N°120 (0,125 mm) si se realiza con una granulometría laser podrían haber hasta 2500 lecturas dado por la precisión del ensayo de 0,01 micras.

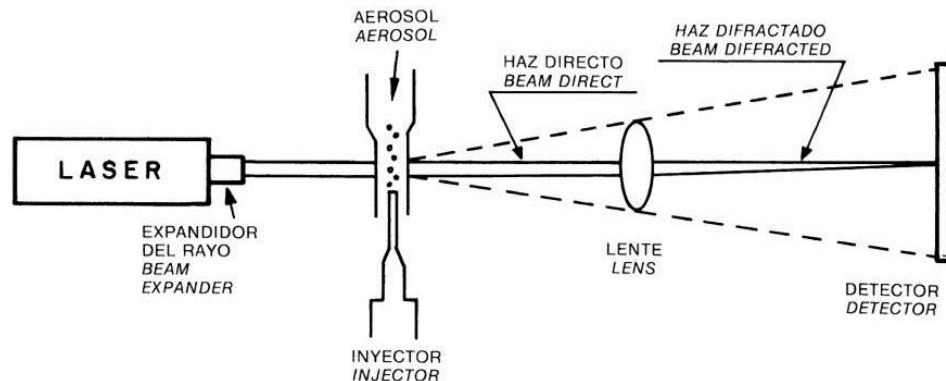


Figura 3.2 Esquema general granulometría laser. (Frias et al., 1988).

El ensayo de granulometría por tamizado es un ensayo mecánico que consiste en utilizar tamices con diversas aberturas las que dejan pasar material o lo retienen, estos son elegidos de acuerdo al tamaño del material que se va a analizar, es decir en este caso que se ensayará una arena los tamaños de tamices seleccionados se encontrarán entre el N°10 hasta el N°200 los cuales corresponden a 2 y 0,075 mm respectivamente. Las muestras son lavadas y secadas previamente para quitar los finos e impurezas que puedan estar presentes y se registra su masa. Se seleccionan los tamices y se ordenan de mayor a menor abertura (Figura 3.3), estos se sitúan en la caja vibratoria por al menos 10 minutos para que así las partículas de suelo logren pasar en su totalidad por la malla correspondiente a su tamaño.



Figura 3.3 Tamices ASTM.

Del material vibrado, se registra la masa que queda retenida por tamiz, con estos datos se puede realizar una curva granulométrica, al igual que con los datos registrados en el análisis granulométrico laser que a la diferencia con el ensayo granulométrico mecánico este no utiliza la masa si no imágenes de luz difractada en el ensayo. Esta curva se realiza con el porcentaje que pasa en la ordenada y la abertura del tamiz en mm en la abscisa para el caso del ensayo mecánico, la cual debe ir en escala logarítmica para dar suavidad a la curva y se identifiquen los valores de manera más clara es ésta. La figura 3.4 muestra una curva granulométrica como ejemplo.

Para el caso de esta investigación se eligieron algunas bandas granulométricas para ser analizadas en laboratorio. Estas fueron seleccionadas teniendo en cuenta tanto el tamaño disponible dentro del material en bruto o natural, que no ha sido variado en su granulometría, y además considerando algunas bandas granulométricas normalmente utilizada en pozos de extracción como las nombradas anteriormente 16/20, 20/40, 30/50, 40/60 y 40/70 (*Webber et al., 2004*).

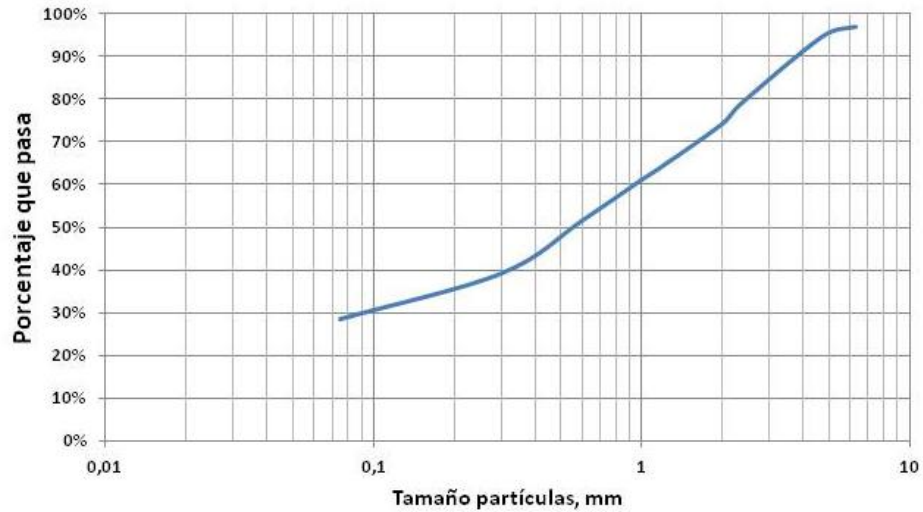


Figura 3.4 Curva granulométrica.

En este caso las bandas granulométricas seleccionadas para la investigación fueron las 20/40, 30/50, 30/60, 40/70, 40/80 y una mezcla de los materiales más finos y más gruesos la cual 20/30-40/80. Esta última mezcla se realiza con la finalidad de conocer el comportamiento del material si se tienen partículas de suelo más pequeño con otras partículas más grandes, dado que las otras bandas granulométricas tienden a tener partículas de un tamaño similar, lo que los hace más homogéneo. En la Tabla 3.4 se muestran los tamices utilizados para cada banda granulométrica. A partir de estas bandas granulométricas el material fue analizado en cada ensayo como redondez y esfericidad, densidad bulk, densidad aparente, densidad absoluta, resistencia a la calcinación, resistencia a la fracturación y conductividad hidráulica. Se realiza un análisis del material por banda granulométrica con la finalidad de conocer si existe una diferencia entre la distribución de las partículas y su resistencia a la fracturación.

Tabla 3.4 Tamices ASTM utilizados en la preparación del material para los ensayos.

Denominación del Material de Soporte					
20/40	30/50	30/60	40/70	40/80	20/30-40/80
Juego de Tamices ASTM					
16	20	20	30	30	16
20	30	30	40	40	20
30	40	40	50	50	30
40	50	50	60	60	40
50	60	60	70	80	60
		70	100	100	80
					100

3.1.2) Análisis granulométrico del material en estado original

Se le realiza un análisis granulométrico al material en su estado original, esto quiere decir que no ha sido intervenido en su granulometría como en el caso de las bandas granulométricas. Este análisis se le realiza al material en bruto para conocer el tamaño de partículas y distribución de éstas. Con estos datos se pueden determinar las bandas granulométricas posibles que se pueden formar dependiendo del tamaño de partículas disponibles. El material fue analizado con láser y por tamizado para poder comparar resultados.

En la Tabla 3.5 se muestran los resultados de la granulometría láser, donde se presenta el tamaño de las partículas en micrómetros y el porcentaje de material asociado a cada tamaño. En la Figura 3.5 se muestra la curva granulométrica asociada a estos datos.

Tabla 3.5 Resultados granulometría láser.

Tamaño Partículas [µm]	Porcentaje de Material [%]	Porcentaje Material Ac. [%]	Tamaño Partículas [µm]	Porcentaje de Material [%]	Porcentaje Material Ac. [%]	Tamaño Partículas [µm]	Porcentaje de Material [%]	Porcentaje Material Ac. [%]
0,09	0,03	0,03	2,59	0,14	2,11	76,06	0,25	10,33
0,10	0,02	0,05	2,86	0,15	2,26	84,01	0,28	10,61
0,11	0,02	0,06	3,16	0,15	2,41	92,78	0,33	10,94
0,12	0,02	0,08	3,49	0,15	2,56	102,48	0,39	11,33
0,13	0,01	0,09	3,86	0,15	2,71	113,18	0,45	11,78
0,15	0,01	0,10	4,26	0,15	2,86	125,01	0,52	12,30
0,16	0,01	0,11	4,71	0,15	3,01	138,07	0,56	12,86
0,18	0,01	0,12	5,20	0,15	3,16	152,50	0,58	13,44
0,20	0,01	0,13	5,74	0,15	3,30	168,43	0,56	14,01
0,22	0,01	0,15	6,34	0,15	3,45	186,03	0,50	14,50
0,24	0,01	0,16	7,00	0,15	3,59	205,46	0,40	14,91
0,26	0,02	0,17	7,74	0,15	3,74	226,93	0,32	15,23
0,29	0,02	0,19	8,54	0,15	3,90	250,64	0,30	15,53
0,32	0,02	0,21	9,44	0,16	4,06	276,82	0,44	15,97
0,36	0,03	0,24	10,42	0,18	4,24	305,75	0,86	16,84
0,39	0,03	0,27	11,51	0,19	4,43	337,69	1,73	18,57
0,43	0,04	0,31	12,72	0,22	4,65	372,97	3,09	21,66
0,48	0,04	0,35	14,04	0,24	4,89	411,94	4,84	26,50
0,53	0,05	0,40	15,51	0,27	5,16	454,98	7,02	33,52
0,58	0,06	0,46	17,13	0,30	5,47	502,51	9,10	42,63
0,65	0,06	0,52	18,92	0,34	5,81	555,02	10,84	53,47
0,71	0,07	0,59	20,90	0,37	6,18	613,00	11,68	65,15
0,79	0,08	0,67	23,08	0,39	6,56	677,05	11,33	76,47
0,87	0,09	0,76	25,49	0,39	6,96	747,79	9,68	86,15
0,96	0,09	0,85	28,16	0,39	7,35	825,91	7,05	93,20
1,06	0,10	0,95	31,10	0,40	7,75	912,20	4,21	97,41
1,17	0,11	1,06	34,35	0,37	8,12	1.007,51	1,92	99,33
1,29	0,11	1,17	37,94	0,36	8,48	1.112,77	0,59	99,92
1,43	0,12	1,29	41,90	0,32	8,80	1.229,04	0,08	99,99
1,58	0,13	1,42	46,28	0,29	9,09	1.357,44	0,00	99,99
1,74	0,13	1,55	51,11	0,26	9,35	1.499,27	0,00	99,99
1,92	0,14	1,68	56,45	0,25	9,60	1.655,91	0,00	99,99
2,13	0,14	1,83	62,35	0,24	9,84	1.828,92	0,00	99,99
2,35	0,14	1,97	68,87	0,24	10,07	2.020,00	0,00	99,99

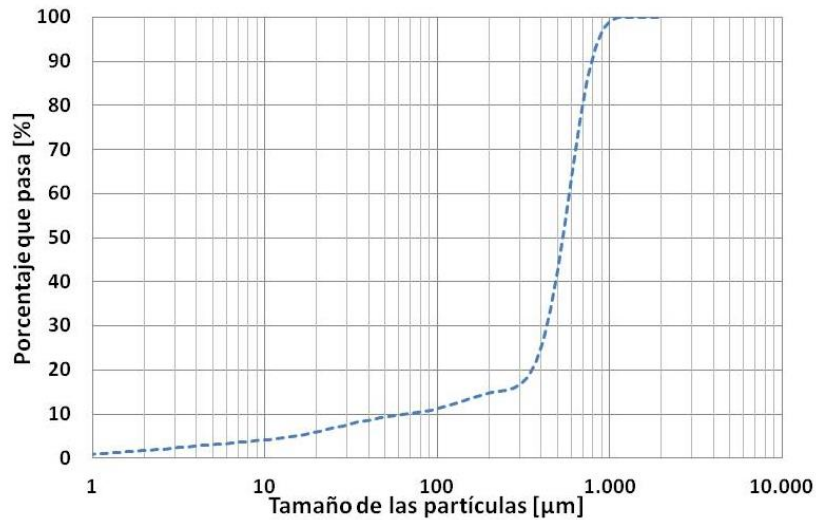


Figura 3.5 Curva granulométrica del análisis láser.

En la Figura 3.5 se puede ver que el tamaño predominante está entre 100 y 1000 micras (0,1-1 mm) con un porcentaje cercano al 90% del material, por lo que las bandas granulométricas seleccionadas deberían estar entre estos tamaños.

El material fue analizado además por el método de tamizado. Se toma una muestra de 151,5 gr el cual fue lavado en el tamiz ASTM N°200, correspondiente a 0,075 mm, para conocer la cantidad de fino presente en la muestra. Luego el material es secado a 105°C a masa constante. El material presentó una masa de 147,8 g posterior al lavado, lo que indica que la cantidad de fino (material menor a 0,075 mm) equivale a un 2,4% del total de la muestra. Finalmente se realiza el ensayo de granulometría por tamizado al material restante.

La tabla 3.6 muestra los datos obtenidos en laboratorio en el ensayo de granulometría por tamizado.

Tabla 3.6 Datos análisis granulométrico por tamizado.

Malla ASTM	Abertura mm	Masa retenida gr	P. Retenido %	P. que Pasa %
10	2	0	0	100
16	1,18	2,39	1,58	98,42
18	1	1,1	0,73	97,70
20	0,85	1,35	0,89	96,81
30	0,6	20,69	13,66	83,15
40	0,425	70,56	46,57	36,57
50	0,3	39,6	26,14	10,44
60	0,25	6,25	4,13	6,31
Fondo	<#60	5,85	3,86	
Fino		3,7	2,44	3,87
Masa Total		151,49	99,99	

En la Figura 3.6 se muestra la curva granulométrica asociada a los datos mostrados en la Tabla 3.6.

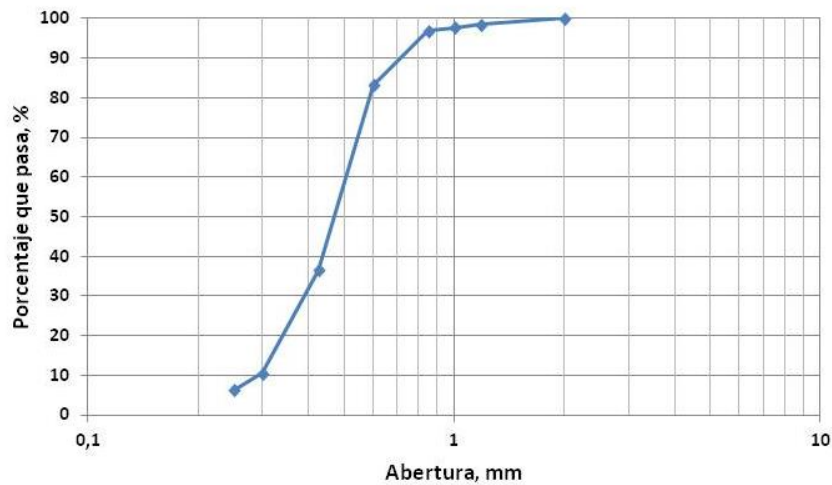


Figura 3.6 Curva granulométrica del análisis por tamizado.

La curva granulométrica mostrada en la figura (3.6) se puede ver que el material presenta un tamaño de partículas que en su mayoría está entre 0,3 y 1 mm.

La Figura (3.7) muestra ambas curvas granulométricas, láser y por tamizado.

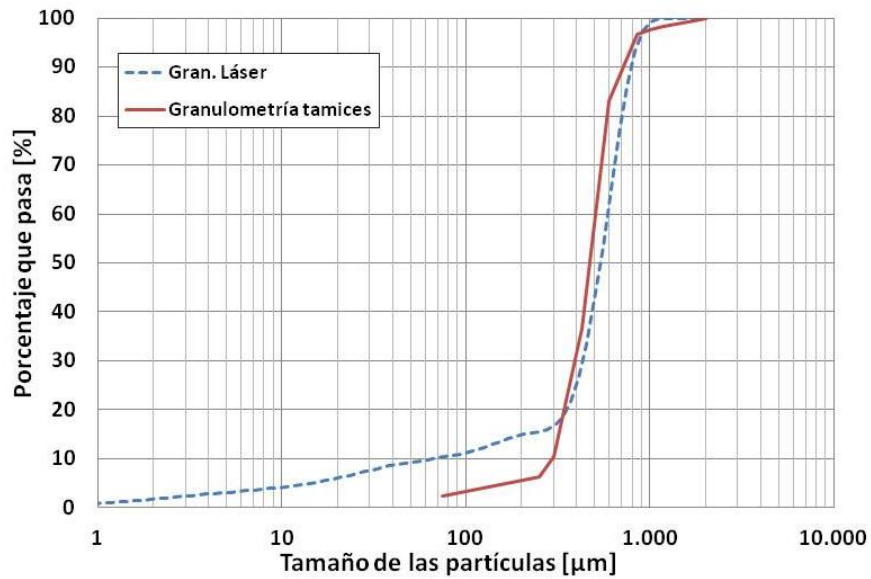


Figura 3.7 Curvas granulométricas láser y por tamizado del material original.

Se observa que el material es homogéneo y se encuentra bien acotado en sus tamaños máximos y mínimos, donde se puede identificar fácilmente el tamaño máximo y mínimo del material en bruto. Las curvas mostradas en la Figura 3.7 correspondientes al análisis láser y por tamizado se ajustan adecuadamente entre el tamaño de partículas 300 y 800 μm . Las curvas se separan desde las 300 micras hacia abajo, esta diferencia se puede atribuir a la diferencia de toma de datos en cada ensayo. Se puede decir que el material tiene partículas que están entre 0,1 y 1 mm, por lo que se pueden seleccionar bandas granulométricas que estén entre estos tamaños de partículas, aunque la mayor cantidad de material se encuentra entre los tamaños 0,3 y 0,8 mm en un porcentaje mayor al 80%, por lo que al momento de seleccionar las bandas que se pueden utilizar como material de soporte, se debe tener en cuenta el tamaño de las partículas, dado que se quiere aprovechar la cantidad de material disponible.

3.1.3) Análisis de otras bandas granulométricas

Se seleccionaron las bandas granulométricas a partir del tamaño de las partículas disponibles en el material original (figura 3.7), las que corresponden a 20/40 (0,841 mm/0,420 mm), 30/50 (0,595 mm/0,297 mm), 30/60 (0,595 mm/0,250 mm), 40/70 (0,420 mm/0,210 mm), 40/80(0,42 mm/0,170 mm) y una mezcla realizada con la parte fina y más gruesa del material que es 20/30-40/80 (0,841mm/0,595 mm-0,420 mm/0,170 mm). Esta mezcla utiliza la parte más fina y más gruesa del material original, para conocer su comportamiento como material de soporte y que diferencia puede tener en comparación a una banda granulométrica común como las otras analizadas, que tienen un tamaño de granos más bien homogéneos en su tamaño. La preparación de todas las bandas granulométricas es realizada por tamizado.

El material es lavado previamente por la malla ASTM N°200 (0,075 mm) para retirar el fino, luego se prepara con las bandas granulométricas, donde se retira el material que queda retenido sobre la malla de designación mayor y lo que pasa el tamiz de designación menor. Luego se realiza el análisis granulométrico al material preparado utilizando los tamices ASTM mostrados en la tabla 3.4. En las tablas 3.7 a la 3.9 se muestran los resultados del análisis granulométrico realizado a cada muestra.

Tabla 3.7 Granulometría material 20/40 y 30/50.

20/40				30/50			
Tamiz N°	Abertura, mm	Masa retenida, gr	P. pasa, %	Tamiz N°	Abertura, mm	Masa retenida, gr	P. pasa, %
16	1,18	0	100,00	20	0,85	0	100,00
20	0,85	2,45	98,66	30	0,6	40,5	88,89
30	0,60	58,97	66,48	40	0,425	234,4	24,56
40	0,43	120,85	0,52	50	0,3	85,2	1,18
50	0,30	0,86	0,05	60	0,25	3,1	0,33
Fondo	<#50	0		Fondo	<#60	1	

Tabla 3.8 Granulometría material 30/60 y 40/70.

30/60				40/70			
Tamiz N°	Abertura, mm	Masa retenida, gr	P. pasa, %	Tamiz N°	Abertura, mm	Masa retenida, gr	P. pasa, %
20	0,85	0	100,00	30	0,6	0	100
30	0,6	11,8	96,95	40	0,425	5,23	94,76
40	0,425	251,1	32,14	50	0,3	77,32	17,23
50	0,3	107,9	4,28	60	0,25	12,87	4,32
60	0,25	14,5	0,54	70	0,212	4,1	0,21
70	0,212	1,1	0,26	100	0,15	0,06	0,15
Fondo	<#70	0,5		Fondo	<#100	0	

Tabla 3.9 Granulometría material 40/80 y 20/30-40/80.

40/80				20/30-40/80			
Tamiz N°	Abertura, mm	Masa retenida, gr	P. pasa, %	Tamiz N°	Abertura, mm	Masa retenida, gr	P. pasa, %
30	0,6	0	100	16	1,18	0	100,00
40	0,425	10,1	95,95	20	0,85	11,62	94,72
50	0,3	199,1	16,09	30	0,6	142,86	29,88
60	0,25	30,4	3,89	40	0,43	2,17	28,89
80	0,18	9,7	0,00	60	0,25	51,39	5,57
100	0,15	0	0,00	80	0,18	11,96	0,14
Fondo	<#100	0		100	0,15	0	0,14
				Fondo	<#100	0	

En la Figura 3.8 se muestran las curvas granulométricas asociadas al análisis granulométrico mostrado en las Tablas 3.7 a 3.9.

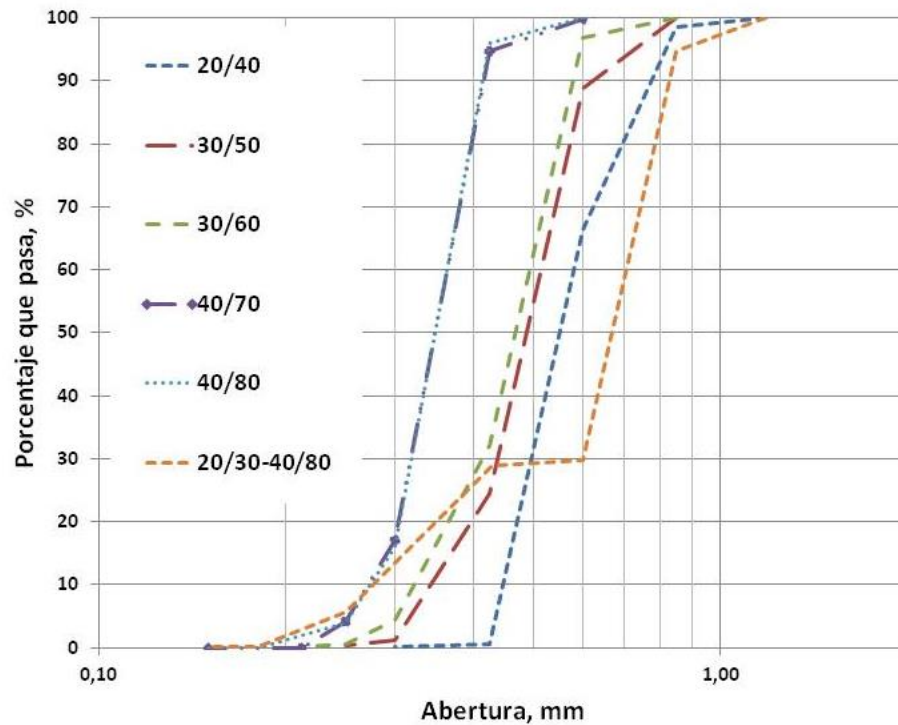


Figura 3.8 Curva granulométrica de todas las bandas granulométricas preparadas para el estudio.

Se puede observar en la Figura 3.8 que las curvas granulométricas por bandas están bien acotadas según el tamaño de banda granulométrica por el cual fue preparado, esto quiere decir que la cantidad de material que pasa y queda retenido por cada tamiz es efectivo. La norma ISO 13503/2, 2006, especifica que el material que pasa la malla de designación gruesa debe ser mayor al 90% y lo que pasa la malla de designación fina no debe ser mayor al 1% para que la muestra esté preparada adecuadamente.

De la Figura 3.8 también se puede ver que las granulometrías de las bandas 40/70 y 40/80 son similares, esto se debe a que la cantidad de material fino extra en esta banda es despreciable. La banda granulométrica 20/30-40/80 muestra una meseta en el centro dado que el material correspondiente a la malla N°40 es retirado quedando solo lo que pasa la malla N°20 y queda en la malla N°30 y se le agrega el material

que pasa la malla N°40 y queda retenido en la malla N°80, así formando una mezcla de material con la parte más fina y gruesa del material.

3.2) Redondez y esfericidad

3.2.1) Metodología y procedimiento del análisis de redondez y esfericidad

Para estimar la forma de los granos se debe considerar que tan angulosos y redondos son estos, por lo que se tiende a comparar con una esfera. Este ensayo se requiere dado que la forma de éstos se le asocia la capacidad de resistencia de la arena a la fractura, dado que si presenta menos angulosidades, éste al recibir altas presiones, el área de contacto entre partículas de suelo aumenta, por lo que éstas se distribuyen y disminuyen el impacto entre granos (*Marshall et al., 2014*).

Aunque según Peñaranda (2014) el material natural, o sea arena de sílice, comparada con materiales sintéticos como los de cerámica, que tienen una forma similar a una esfera, presentaron una resistencia a la fractura similar.

Krumbein y Sloss, (1963) presentaron una carta de redondez y esfericidad (Figura 3.9) la cual se basa en la forma 2D del grano.

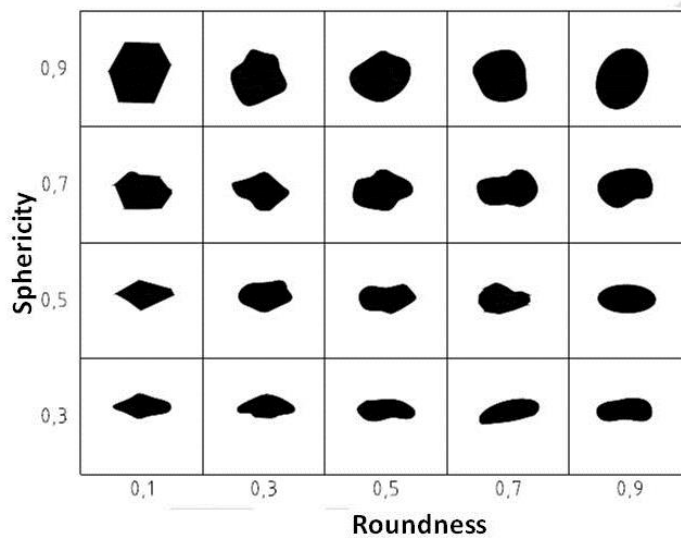


Figura 3.9 Carta redondez y esfericidad. (*Krumbein y Sloss, 1963*).

La Figura 3.9 muestra cómo se establecen la forma de los granos la cual comienza con un 0.1 para granos menos redondos hasta 0.9, y de un 0.3 para granos menos esféricos a 0.9. Según la norma ISO 13503/2 del 2006, pide seleccionar 20 granos al azar los cuales deben ser analizados por una lupa de alta resolución. Para los ensayos se utilizó una lupa Leica EZ4 HD (figura 3.10) para la toma de imágenes y analizar las muestras. Los granos son comparados uno a uno con la carta patrón (Figura 3.9) dándole así un valor tanto para su redondez como la esfericidad. Finalmente se obtiene el valor a partir de una media aritmética, como se muestra en las ecuaciones 1 y 2.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N r_i}{N} \quad (1)$$

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N s_i}{N} \quad (2)$$

Este ensayo es visual por lo que los resultados pueden variar dependiendo de la persona que realice el ensayo.



Figura 3.10 Lupa Leica EZ4 HD.

El ensayo es utilizado ya que permite ver que tan anguloso son las partículas de arena, con la finalidad de saber si esto tendrá una incidencia en los resultados de la resistencia a la fracturación. Como se dijo anteriormente esto puede influir en como la arena se situará en las fracturas y creará los canales para el paso del gas.

3.2.2) Resultados análisis de redondez y esfericidad

El material es analizado por su redondez y esfericidad según la carta mostrada en la Figura 3.9. En la Figura 3.11 se puede ver una muestra del material de Ramadillas en su estado natural el cual posteriormente es separado por las bandas granulométricas para analizar su redondez y esfericidad, de manera individual.



Figura 3.11 Granos de arena del material de Ramadillas.

Se tomaron muestras de 20 granos de cada banda granulométrica las que se muestran en las Figuras 3.11 a 3.16 los que se analizaron independientemente.



Figura 3.12 Material 20/40.

De la Figura 3.12 se analiza cada grano, los resultados son los mostrados en la tabla 3.10, en la imagen se muestran líneas negras espaciadas entre ellas, esta es una regla por lo que espacio entre líneas corresponden a 1 mm.

Tabla 3.10 Redondez y esfericidad del material 20/40.

	0,5	0,7	0,5	0,3	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,3
Redondez	0,3	0,7	0,5	0,7	0,7	0,3	0,3	0,5	0,7	0,5
	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7	0,7	0,9	0,7	0,7
Esfericidad	0,5	0,7	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,7	0,9	0,7

Tomando los datos de la Tabla 3.10 y calculando la media, el material 20/40 presenta una redondez de 0,5 y una esfericidad de 0,7 lo que dice que es un material medianamente redondo y de esfericidad más alta. Aunque estos resultados no cumplen con la norma API RP 19C (2008) que especifica que el material debe ser superior a 0,6 tanto en redondez como esfericidad, a pesar de esto se ha demostrado que la redondez y esfericidad no debería ser tan estricta (Peñaranda, 2014). Ya que al comparar material que presenta redondez y esfericidad menor a la requerida por

la norma con material resinado (arena con una capa de resina) éste presentó una resistencia a la fracturación semejante (Peñaranda, 2014).

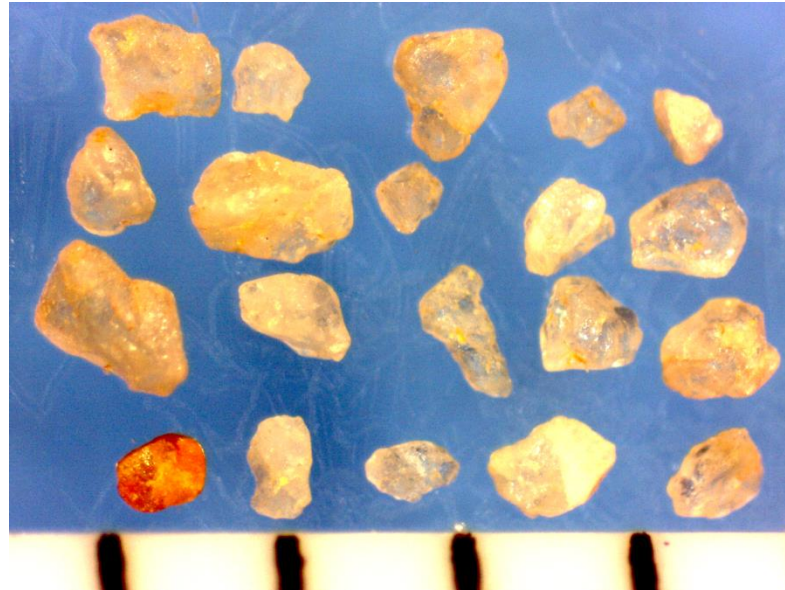


Figura 3.13 Material 30/50.

De la Figura 3.13 se analiza cada grano, los resultados son los mostrados en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Redondez y esfericidad del material 30/50.

Redondez	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,9	0,7	0,7	0,5
	0,7	0,5	0,5	0,9	0,7	0,9	0,5	0,5	0,5	0,3
Esfericidad	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7
	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

De la tabla 3.11 se puede decir que el material presenta una redondez media de 0,6 y una esfericidad media de 0,7. En este caso el material es más redondo que en el caso anterior.



Figura 3.14 Material 30/60.

De la Figura 3.14 se analiza cada grano, los resultados son los mostrados en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12 Redondez y esfericidad del material 30/60.

Redondez	0,7	0,7	0,9	0,5	0,3	0,7	0,3	0,5	0,3	0,5
	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,7	0,3	0,5
Esfericidad	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,7	0,9
	0,7	0,5	0,7	0,5	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,5

La redondez media del material 30/60 es 0,5 y la esfericidad media 0,7. Al igual que en el caso 20/40 la redondez es menor.



Figura 3.15 Material 40/70.

De la Figura 3.15 se analiza cada grano, los resultados son los mostrados en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Redondez y esfericidad del material 40/70.

Redondez	0,6	0,5	0,5	0,9	0,3	0,3	0,5	0,3	0,5	0,3
	0,3	0,5	0,5	0,7	0,3	0,7	0,3	0,7	0,3	0,7
Esfericidad	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,3
	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,7	0,7	0,9	0,9	0,7

De la Tabla 3.13 se puede decir que la redondez media del material es 0,5 y la esfericidad media es 0,7.

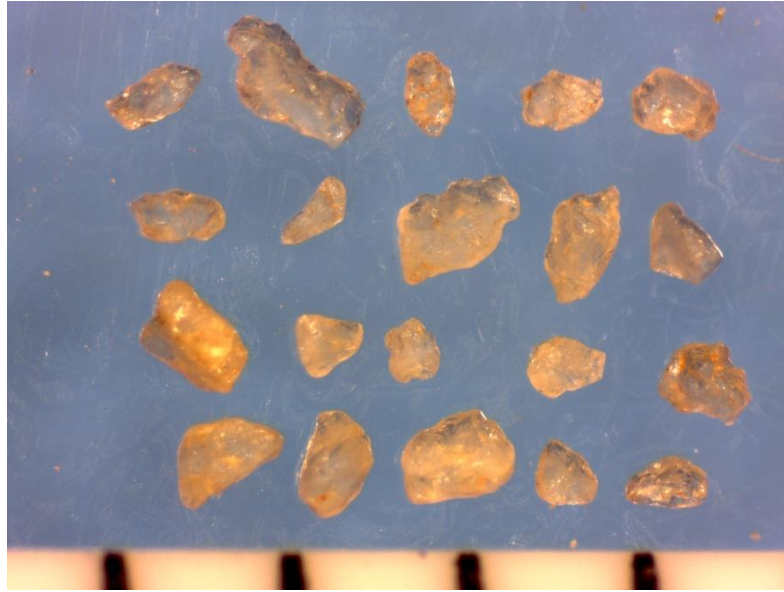


Figura 3.16 Material 40/80.

De la Figura 3.16 se analiza cada grano, los resultados son los mostrados en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14 Redondez y esfericidad del material 40/80.

Redondez	0,7	0,5	0,7	0,5	0,5	0,7	0,7	0,3	0,5	0,3
	0,7	0,7	0,5	0,7	0,3	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7
Esfericidad	0,7	0,9	0,9	0,7	0,9	0,9	0,9	0,7	0,5	0,7
	0,7	0,9	0,7	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9

De la tabla 3.14 se puede decir que el material 40/80 presenta una redondez de 0,5 y una esfericidad de 0,8, aquí la esfericidad de los granos es mayor, esto se puede atribuir a que están presentes los granos más grandes por lo que han sido menos desgastados.

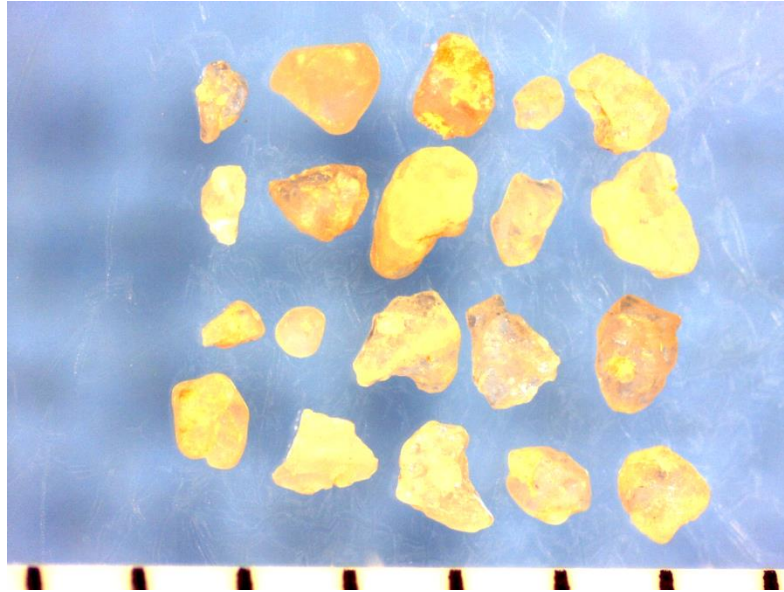


Figura 3.17 Material mezcla 20/30-40/80.

De la Figura 3.17 se analiza cada grano, los resultados son los mostrados en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15 Redondez y esfericidad del material 20/30-40/80.

Redondez	0,7	0,7	0,5	0,7	0,3	0,7	0,5	0,3	0,5	0,7
	0,3	0,7	0,7	0,5	0,3	0,7	0,7	0,7	0,3	0,5
Esfericidad	0,7	0,5	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7	0,9	0,5	0,7
	0,9	0,5	0,9	0,9	0,7	0,5	0,7	0,5	0,5	0,7

De la tabla 3.15 se puede decir que el material 20/30-40/80 presenta una redondez de 0,6 y una esfericidad de 0,7. La tabla 3.16 muestra una tabla resumen con los resultados de redondez y esfericidad por cada banda granulométrica.

Tabla 3.16: Redondez y esfericidad media de los granos por banda granulométrica.

Parámetro	20/40	30/50	30/60	40/70	40/80	20/30-40/80
Redondez	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6
Esfericidad	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7

3.3) Densidad bulk

3.3.1) Metodología y procedimiento del ensayo de densidad bulk

Se entiende por densidad bulk a la relación que existe entre el peso del material y el volumen que ocupa éste incluyendo los poros. La densidad bulk se utiliza para determinar la cantidad de material necesaria para llenar una fractura o un silo de almacenamiento (Peñaranda, 2014). La arena de sílice se almacenan en silos (Figura 3.18) donde se considera la densidad bulk, así con esta densidad se puede calcular la masa de material por volumen.



Figura 3.18 Silo de almacenamiento de arena de sílice. (Gure Artea SL, gurearteasl.cl)

Otra importancia de la densidad bulk, es la cantidad de material necesaria para ingresar en la fractura. Ya que a partir de estos datos se puede calcular la cantidad de material necesario para depositar en la fractura, una vez conocidas las dimensiones de ésta. El material es depositado como se dijo anteriormente bajo presión con fluidos, agua y densificadores (Trombetta, 2012) que logran llegar a la fractura (d'Huteau, 2012), por lo que se debe conocer tanto la densidad del fluido como la del material de soporte para saber la cantidad de material necesaria (Figura 3.19).

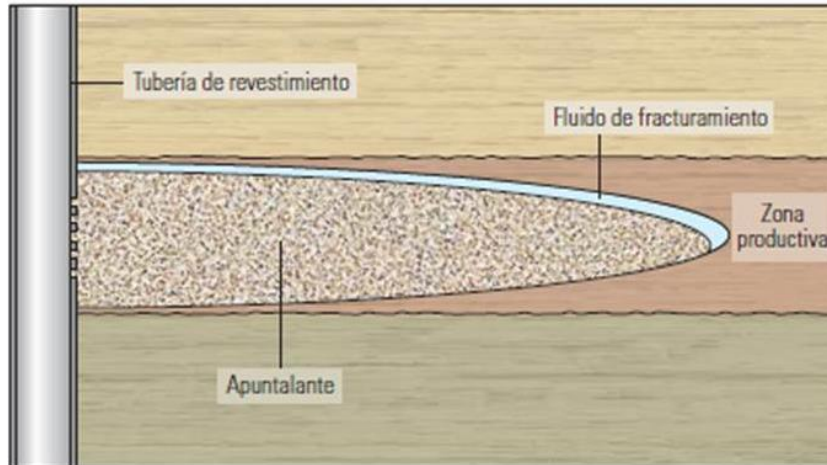


Figura 3.19 Fractura saturada con el material de soporte también conocido como apuntalante. (Bivins et al., 2005)

La densidad bulk esta normada por la ISO 13503/2-2006 la cual se basó en la ANSI B74.4-2002 (Bulk Density of Abrasive Grains) la que determina la densidad a partir del material necesario para llenar un cilindro de volumen conocido dejando caer material desde un embudo a una altura fija (Figura 3.20).

El ensayo comienza luego de haber preparado el material (lavado y tamizado) y definido las bandas granulométricas, ya que en éste se debe realizar para cada una, dado que la densidad del material deberá cambiar a medida que el material va variando el tamaño de las partículas (Montgomery y Steanson, 1985).

En la Figura 3.20 se muestran los materiales empleados en el ensayo los cuales constan de un embudo metálico que tiene un diámetro superior de 180 mm, un diámetro de salida de 30 mm, una base metálica regulable que lo sostiene, recipiente cilíndrico metálico de altura 100 mm y diámetro interior de 50 mm con un volumen aproximado de 196 cm^3 y una masa de 1790,1 gr, base de fibra de vidrio y además una balanza digital con una precisión de 0,01 gr.

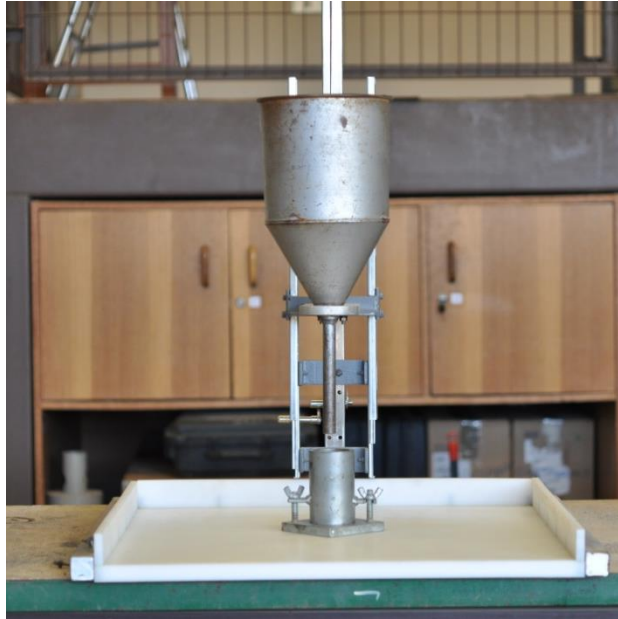


Figura 3.20 Materiales utilizados en el ensayo para determinar densidad bulk.

Se debe regular la altura del embudo para conseguir la altura que sugiere la ISO 13503/2-2006 de 112 mm entre la salida del embudo y la parte superior del cilindro, además el cilindro y embudo deben estar alineados para que la caída del material sea lo más homogénea posible dentro del cilindro. Se toma una cantidad de material para ingresar en el embudo, el cual debe estar cerrado en su salida, ésta debe ser suficiente para colmar el recipiente cilíndrico, en este caso se toman aproximadamente 250 ml de material. Se abre el embudo y se deja caer la totalidad del material e inmediatamente se enrasa con mucho cuidado evitando posibles vibraciones. Finalmente se registra la masa total de cilindro y material y se aplica la Ecuación 3.

$$\rho_{bulk} = \frac{m_p}{V_{cil}} \quad (3)$$

Donde,

ρ_{bulk} : Densidad bulk expresada en gr/cm^3

m_p : La masa neta del material de soporte expresada en gramos, o sea la masa total menos la masa del cilindro.

v_{cil} : Volumen del cilindro en cm^3

3.3.2) Resultados densidad bulk

El material es analizado por cada banda granulométrica (Tabla 3.4) para conocer su densidad bulk. Del material preparado se toma una muestra suficiente para realizar el ensayo como se describe en la sección 3.3.1.

En la Tabla 3.17 muestra los datos del cilindro utilizado en el ensayo de densidad bulk (Figura 3.21)

Tabla 3.17 Datos del recipiente acero utilizado en ensayo.

Datos Recipiente Cilíndrico	
Altura [mm]	100
Diámetro [mm]	50
Vol [cm ³]	196
masa [gr]	1790,1

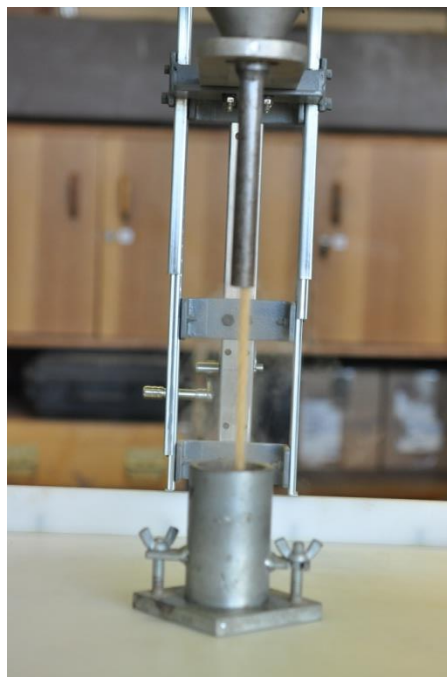


Figura 3.21 Ensayo densidad bulk.

El ensayo es realizado tres veces por muestra, para evitar un error en la toma de datos lo que se puede corroborar al comparar estos entre si y que la diferencia entre

estos sea mínima. Los resultados se muestran en las Tablas 3.18 a 3.20 analizados por banda granulométrica.

Tabla 3.18 Datos densidad bulk material 20/40 y 30/50.

20/40			30/50		
Masa cil+mat [gr]	masa material [gr]	Densidad [gr/cm ³]	Masa cil+mat [gr]	masa material [gr]	Densidad [gr/cm ³]
2069,8	278,6	1,419	2057,8	266,6	1,358
2069,4	278,2	1,417	2067	275,8	1,405
2069,5	278,3	1,417	2067,9	276,7	1,409

Tabla 3.19 Datos densidad bulk material 30/60 y 40/70.

30/60			40/70		
Masa cil+mat [gr]	masa material [gr]	Densidad [gr/cm ³]	Masa cil+mat [gr]	masa material [gr]	Densidad [gr/cm ³]
2065,5	274,3	1,397	2060,3	269,1	1,371
2066,1	274,9	1,400	2060,3	269,1	1,371
2066,3	275,1	1,401	2060,6	269,4	1,372

Tabla 3.20 Datos densidad bulk material 40/80 y 20/30-40/80.

40/80			20/30-40/80		
Masa cil+mat [gr]	masa material [gr]	Densidad [gr/cm ³]	Masa cil+mat [gr]	masa material [gr]	Densidad [gr/cm ³]
2061,9	270,7	1,379	2065,8	274,6	1,399
2062,2	271,0	1,380	2065,5	274,3	1,397
2061,4	270,2	1,376	2065,5	274,3	1,397

De los datos obtenidos en laboratorio a partir de los tres ensayos realizados a cada banda granulométrica se puede conocer la densidad bulk con la media aritmética de los tres resultados. En la Tabla 3.21 se muestra un resumen de la densidad bulk de cada banda granulométrica.

Tabla 3.21 Densidad bulk por banda granulométrica.

Banda granulométrica	Densidad bulk [gr/cm ³]
20/40	1,418
30/50	1,391
30/60	1,399
40/70	1,371
40/80	1,378
20/30-40/80	1,398

3.4) Densidad aparente

3.4.1) Metodología y procedimiento densidad aparente

Esta densidad es utilizada para la calibración de densitómetros utilizados durante la fracturación hidráulica (Peñaranda, 2014), lo cual consiste en instrumentos que miden las concentraciones de material de soporte en la mezcla con los fluidos e indican la estabilidad en las salidas del flujo de la tubería (d'Hueteau et al., 2011). Otro uso de la densidad aparente es para conocer el tiempo de sedimentación de las partículas (Peñaranda, 2014) ya que si el material entra más denso es más difícil el transporte de éste por el fluido, con lo que se deberá incrementar la potencia, caudal y presión para lograr transportarlo (Mader, 1989).

La densidad aparente es medida con un fluido de baja viscosidad como el Querosén de densidad 0,8 gr/cm³, el que moja las partículas incluyendo sus poros.

La densidad aparente se define como el peso seco de material por unidad de volumen sin incluir los poros.

Los materiales utilizados en el ensayo consisten en un matraz Le Chatelier (Figura 3.20), querosén, balanza y embudo.

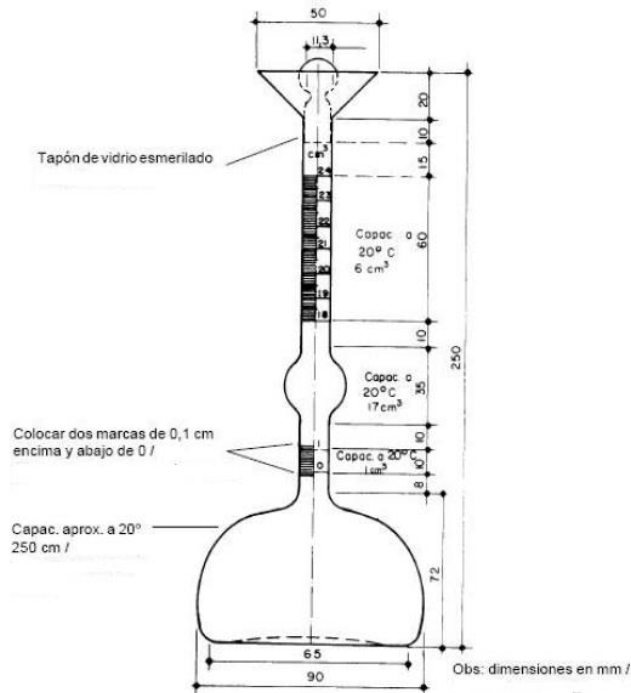


Figura 3.22 Matraz Le Chatelier. API RP 19C (2008).

Se debe llenar el matraz con querosén entre las marcas entre 0-1 ml que están en el primer cuello de éste (Figura 3.22), y se debe registrar como el volumen inicial (V_i). Luego con el material preparado y seco que ya ha sido pasado por las bandas granulométricas, se toma una muestra de material que debe estar entre 48-54 gramos la que se registra como W_p , se ingresa en el matraz con precaución de no derramar nada de material. Con el material en el interior del matraz se registra el volumen final del ensayo (V_f).

Así con estos datos se puede determinar la densidad aparente del material a partir de la Ecuación (4).

$$\rho_p = W_p / (V_f - V_i) \quad (4)$$

3.4.2) Resultados densidad aparente

En las Tablas 3.22 a 3.24 se muestran los datos registrados en laboratorio para cada banda granulométrica estudiada. El ensayo es realizado tres veces al igual que el de densidad bulk, para evitar errores en su lectura. La Figura 3.23 muestra el ensayo realizado en laboratorio.



Figura 3.23 Ensayo para determinar densidad aparente con querosén.

Tabla 3.22 Datos ensayo densidad aparente material 20/40 y 30/50.

20/40				30/50			
W_p [gr]	V_i [cm ³]	V_f [cm ³]	ρ_p [gr/cm ³]	W_p [gr]	V_i [cm ³]	V_f [cm ³]	ρ_p [gr/cm ³]
50,1	0,6	20,6	2,505	50,56	0,5	20,5	2,528
51,1	1	21,5	2,493	51,02	1	21,4	2,501
50,3	0,8	20,9	2,502	51,49	0,7	21	2,536

Tabla 3.23 Datos ensayo densidad aparente material 30/60 y 40/70.

30/60				40/70			
W_p [gr]	V_i [cm ³]	V_f [cm ³]	ρ_p [gr/cm ³]	W_p [gr]	V_i [cm ³]	V_f [cm ³]	ρ_p [gr/cm ³]
50,22	0,5	20,3	2,536	50,9	1	21	2,545
50,89	0,7	20,8	2,532	50,2	0,5	20	2,574
49,67	1	20,6	2,534	50,4	0,8	20,4	2,571

Tabla 3.24 Datos ensayo densidad aparente material 40/80 y 20/30-40/80.

40/80				20/30-40/80			
W_p [gr]	V_i [cm ³]	V_f [cm ³]	ρ_p [gr/cm ³]	W_p [gr]	V_i [cm ³]	V_f [cm ³]	ρ_p [gr/cm ³]
45,3	0,5	17,5	2,665	50,1	0,6	19,9	2,596
55,9	0,8	22,1	2,624	51,1	1	20,7	2,594
52,6	0,6	20,6	2,630	50,3	0,8	20,2	2,593

De los datos mostrados en las Tablas 3.22 a 3.24 se puede conocer la densidad aparente del material por banda granulométrica a partir de la media aritmética de los datos registrados. La Tabla 3.25 muestra un resumen de la densidad aparente de cada banda granulométrica.

Tabla 3.25 Densidad aparente por banda granulométrica.

Banda Granulométrica	Densidad aparente ρ_p [gr/cm ³]
20/40	2,500
30/50	2,522
30/60	2,534
40/70	2,564
40/80	2,640
20/30-40/80	2,594

De los datos mostrados en la Tabla 3.25, se puede concluir que las densidades aparente, para cada banda granulométrica estudiada, son bajas para las bandas 20/40, 30/50, 30/60, 40/70 y 20/30-40/80 y similares a diferencia de la banda 40/80, que presenta una densidad mayor, esto se puede deber a que el material presente en esta banda granulométrica es más pequeño y ocupa mayor espacio dentro de cierto volumen.

3.5) Densidad absoluta

3.5.1) Metodología y procedimiento densidad absoluta

La densidad absoluta es la densidad del grano sin considerar los poros entre partículas y poros en las mismas partículas, para esto el material es ensayado con agua destilada y con la ayuda de una bomba de vacío donde es extraído todo el aire que se pueda encontrar atrapado entre las partículas y así el agua ocupe este espacio.

El material es ensayado por banda granulométrica para diferenciar una de otra. Con el material preparado según el punto 3.1.3, así se toma una cantidad de material representativo de aproximadamente 120 gramos el cual debe estar seco y a temperatura ambiente. El material se ingresa dentro de un picnómetro y se registra su masa, luego se agrega el agua destilada hasta que sobrepase la arena dentro del picnómetro y se lleva a la bomba de vacío con la finalidad de retirar todas las burbujas que puedan estar presentes. Luego se rellena el picnómetro hasta la marca que tiene éste, el cual determina además el volumen que es conocido. Se registra la masa del picnómetro, con el material y el agua y se registra la temperatura a la cual se está realizando el ensayo para hacer el ajuste pertinente a la densidad del agua.

Con los datos registrados y realizados tres veces por muestra se puede calcular la densidad absoluta del material a partir de la (Ec. 5).

$$\rho_{ab} = \frac{m_s}{(m_s+m_a)-M_m} * \rho_{W_{te}} \quad (5)$$

Donde,

ρ_a : Densidad absoluta, gr/cm³

m_s : masa seca del material en gramos

m_a : masa del picnómetro más el agua a temperatura del ensayo

M_m : masa de la muestra, picnómetro y agua.

ρ_{w_t} : densidad del agua a la temperatura del ensayo

3.5.2) Resultados densidad absoluta

El material es analizado por banda granulométrica y según el punto 3.5.1. La Tabla 3.26 muestra los resultados obtenidos en laboratorio para todas las bandas granulométricas.

Tabla 3.26 Resultados ensayo densidad absoluta.

Ensayo	Datos	Banda granulométrica					
		20/40	30/50	30/60	40/70	40/80	20/30-40/80
1	Masa seca [gr]	111,5	135,4	152,2	101,3	132,1	111,5
	Masa picnómetro+muestra+agua [gr]	752,2	774,2	799,9	768,5	787	752,3
	Mas picnómetro+agua [gr]	683,1	690,9	706,4	706,4	706,4	683,1
	Temperatura [°C]	16,4	22	22,2	22,5	19,3	16,400
	Densidad absoluta [gr/cm3]	2,627	2,593	2,587	2,578	2,561	2,561
2	Masa seca [gr]	106,8	117,7	127,6	140,6	130,2	106,8
	Masa picnómetro+muestra+agua [gr]	766,8	778,5	767,7	768,5	768,8	767,3
	Mas picnómetro+agua [gr]	701	706,4	689,4	689,4	706,4	701
	Temperatura [°C]	16,6	21,4	22,4	22,5	19,3	16,6
	Densidad absoluta [gr/cm3]	2,602	2,576	2,582	2,578	2,559	2,634
3	Masa seca [gr]	106,4	132,8	131,1	108,9	126,1	106,4
	Masa picnómetro+muestra+agua [gr]	768,4	771,1	771,4	757,5	760,2	768,4
	Mas picnómetro+agua [gr]	702,4	689,4	690,9	690,9	683,1	702,4
	Temperatura [°C]	17	21,6	22	21,4	19,9	17
	Densidad absoluta [gr/cm3]	2,631	2,593	2,585	2,569	2,569	2,631

De los tres ensayos realizados a cada banda granulométrica la norma (ISO 13503/2) dice que se debe considerar una diferencia no mayor a 0,5% de lo contrario el ensayo es considerado no válido, dado que la mínima diferencia entre ensayo realizado al mismo material corrobora que no hayan errores que se puedan haber realizado en los ensayos y toma de datos. Así con los tres resultados para cada banda granulométrica se obtiene por media aritmética la densidad absoluta del material. La tabla 3.27 muestra la densidad del material para cada banda granulométrica.

Tabla 3.27 Densidad absoluta por banda granulométrica.

Banda granulométrica	Densidad Absoluta gr/cm³
20/40	2,620
30/50	2,587
30/60	2,585
40/70	2,575
40/80	2,563
20/30-40/80	2,608

3.6) Resistencia a la calcinación

3.6.1) Metodología y procedimiento ensayo de resistencia a la calcinación

El material es sometido a grandes temperaturas, cercanas a los 1000°C, con la finalidad conocer la resistencia de éste a grandes temperaturas sin que se vea afectado, dado que el material dentro de los pozos de extracción puede llegar a temperaturas muy elevadas, y éstas pueden influir en el comportamiento del material dentro del pozo.

Para realizar este ensayo se necesita un horno tipo mufla que alcance una temperatura máxima de 1000°C (Figura 3.24), crisoles de cerámica, desecador y una balanza 0,001 g de exactitud. La muestra debe haber sido secada a 105°C, luego enfriada en el desecador para evitar que tome humedad del ambiente. Luego la masa de los crisoles debe ser registrada y en ellos se debe colocar una muestra de material representativo, para esto se utiliza un instrumento divisor del material, y se toma una muestra de entre 6-10 gr, posteriormente se registra la masa del crisol (pocillo de cerámica) junto con el material. El horno debe ser precalentado a 927°C por 15 minutos antes de ingresar la muestra.



Figura 3.24 Horno mufla. Laboratorio de Ciencias UCSC.

El material es ingresado con el crisol al horno con la ayuda de pinzas, el horno es llevado nuevamente a 927°C , temperatura que se debe conservar por dos horas. El horno se deja enfriar hasta que sea posible retirar el crisol del horno para llevarlo al desecador para terminar de enfriar a temperatura ambiente.

Enfriado el material en el desecador se debe registrar su masa. Finalmente para conocer el material que ha sido calcinado se utiliza la ecuación 6. El ensayo debe ser realizado 3 veces, para evitar errores de lectura o ensayo, y se obtiene la media de estos. Se debe repetir el ensayo si los resultados difieren en más del 0,2%.

$$LOI = \Delta m \times 100/m \quad (6)$$

Donde,

LOI: Son las siglas en ingles de Loss on Ignition

Δm : Es la pérdida de masa durante el ensayo, es la diferencia de masa antes y después del ensayo.

m : Es la masa al comienzo del ensayo.

3.6.2) Resultados resistencia a la calcinación

El ensayo es realizado con una muestra de material el cual se encuentra en estado natural, esto quiere decir que no ha sido separado por bandas granulométricas. Por lo que los resultados obtenidos en este ensayo serán mayores a los que se pueden obtener con un material previamente lavado.

En la Tabla 3.28 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la calcinación.

Tabla 3.28 Resultados ensayo resistencia a la calcinación.

Masa antes de calcinar [gr]	Masa después de calcinar [gr]	Porcentaje material calcinado [%]
7,23	7,10	1,77
8,72	8,57	1,77
6,58	6,46	1,76

De los resultados mostrados en la tabla (3.28) se puede decir que la cantidad de material que fue calcinado corresponde a un 1,77% lo que corresponde al LOI (Loss on Ignition). Los ensayos no difieren en más de un 0,01% uno del otro por lo que se pueden considerar validos según la norma (ISO 13503/2-2006). También se debe recalcar que el ensayo fue realizado con el material en estado natural, por lo que si este se realiza con el material lavado se habría retirado parte de la materia orgánica presente en él, por lo que los resultados podrían cambiar. Este ensayo mide tanto la resistencia del material a altas temperaturas, como medir la cantidad de materia orgánica presente en éste.

La Figura 3.25 muestra el material antes de ingresar al horno (izquierda) y su aspecto luego (derecha). Esta diferencia de color se puede deber a las altas temperaturas a las que ha sido sometido puede generar una reacción en los minerales del material.



Figura 3.25 Material sin calcinar (izquierda), material calcinado (derecha).

3.7) Resistencia a la fracturación

3.7.1) Metodología y procedimiento de la resistencia a la fracturación

Las grandes presiones a las cuales puede estar sometido el material de soporte pueden hacer que éste se fracture. Debido a esta fractura el material se pulveriza y genera material de menor tamaño que puede llegar a obstruir los poros por los que circulan los hidrocarburos, lo que finalmente se ve reflejado en la tasa de producción del pozo (*Montgomer y Steanson, 1985*). El grado de rotura del material se puede ver afectado ya sea por el grado de esfuerzo al cual ha sido sometida la muestra, como también a la forma de los granos o su granulometría (*Peñaranda, 2014*). De este ensayo se puede medir la calidad del material de sostén dado que a partir de él se le designa un nombre el que depende de su resistencia medida en psi. Por ejemplo, para un material que resiste 3000 psi se designa como de calidad 3K (Tabla 3.29), esto quiere decir que el material que ha sido sometido a una presión de 3000 psi no se tritura en más de un 10% de su masa total, esto es medido en laboratorio con el tamiz de designación menor para la banda granulométrica correspondiente. Por ejemplo, si se analiza un material 20/40, luego de aplicada la carga se vuelve a pasar por el tamiz N°40 ASTM y todo el material que pase por esta malla será lo que se trituro durante la presión ejercida en el material. Esto se podría representar a baja escala lo que pasaría con el material en la fractura, ya que

si éste no resiste la presión, formara fino del mismo material que podría formar tapones en la fractura y evitar el paso del gas por esta misma.

Tabla 3.29 Clasificación por resistencia al fracturamiento.

Clasificación	Tensión [MPa]	Tensión [psi]
1K	6,9	1000
2K	13,8	2000
3K	20,7	3000
4K	27,6	4000
5K	34,5	5000
6K	41,4	6000
7K	48,3	7000

Para realizar este ensayo se necesita una prensa hidráulica, la que pueda aplicar grandes cargas, mayores a los 12000 psi, una celda de acero de dimensiones 100 mm de altura y 50 mm de diámetro, pistón de acero de altura 200 mm y 50 mm de diámetro (Figura 3.26), balanza y tamices correspondientes a la banda granulométrica a ensayar.



Figura 3.26 Materiales ensayo resistencia a la fracturación. Laboratorio de Geomateriales UCSC.

Se toma una muestra representativa de no más de 100 gr, la que ha sido lavada previamente por el tamiz ASTM N°200 para evitar finos e impurezas que puedan

estar presentes en el material. La muestra se pasa por los tamices superior inferior y medio del juego de tamices (Tabla 3.1), es decir para el material 40/70 se utilizarán los tamices N°40, 50 y 70, el N°50 se utiliza con el fin de evitar que demasiado material quede retenido por el último tamiz que no deje pasar correctamente el material fino menor a la malla más pequeña. El tamizado se debe realizar por al menos 15 minutos para lograr que todo el material menor a la designación fina quede fuera de la muestra que luego será ensayada en la prensa.

Con el material tamizado se selecciona una pequeña muestra, que depende de las dimensiones de celda y se registra su masa, ésta se ingresa en la celda de acero con cuidado de no perder muestra. La celda se lleva a la prensa, ésta se ajusta para que todo alineado (prensa, celda y pisón). Se aplica la carga a una velocidad de 2000 psi por minuto. Se mantiene la carga por dos minutos, luego se retira la celda de la prensa y se extrae la muestra minuciosamente para prevenir la pérdida de material, para esto se vuelve a registrar la masa para verificar que no existe pérdida de éste. El material se vuelve a pasar por los tamices antes utilizados y se lleva a la mesa vibratoria por 10 minutos. Se retira el material que pasa el último tamiz y queda en el fondo y se registra su masa. La ecuación (7) se utiliza para determinar el porcentaje de material que ha sido fracturado. El ensayo se debe efectuar tres veces y promediar su resultado, siempre considerando que estos no varíen en más del 0,5%.

$$m'_{pan} = \frac{m_{pan}}{m_s} \times 100 \quad (7)$$

Donde,

m_{pan} : Es la masa de finos generada en el ensayo, registrada en gramos

m_s : Es la masa total extraída de la celda

m'_{pan} : Porcentaje de finos generado en el ensayo

3.7.2) Resultados resistencia a la fracturación

El material es preparado según la Tabla 3.1 donde es separado por las bandas granulométricas y previamente lavado por la malla ASTM #200 para retirar los

finos y material orgánico existente. Es de suma importancia que el material sea bien preparado para conseguir un resultado aceptable en el ensayo

Las Tablas 3.30 a 3.36 muestran los resultados obtenidos en laboratorio por carga aplicada.

Tabla 3.30 Resultado ensayos resistencia a la fracturación para una carga de 1000 psi.

Banda granulométrica	Ensayo	Material seco [gr]	Mat. Triturado [gr]	Mat. Triturado [%]
20/40	1	50,12	2,264	4,518
	2	50,32	2,301	4,573
	3	50,2	2,283	4,548
30/50	1	50,15	1,306	2,604
	2	50,13	1,313	2,619
	3	50,27	1,321	2,628
30/60	1	50,13	0,875	1,746
	2	50,23	0,901	1,794
	3	50,13	0,882	1,759
40/70	1	50,03	0,725	1,449
	2	50,23	0,782	1,557
	3	50,05	0,731	1,461
40/80	1	50,08	0,553	1,105
	2	50,12	0,572	1,141
	3	50,01	0,563	1,126
20/30-40/80	1	50,31	0,547	1,088
	2	50,12	0,538	1,073
	3	50,02	0,542	1,084

Tabla 3.31 Resultado ensayos resistencia a la fracturación para una carga de 2000 psi.

Banda granulométrica	Ensayo	Material seco [gr]	Mat. Triturado [gr]	Mat. Triturado [%]
20/40	1	50,03	4,562	9,119
	2	50,35	4,588	9,112
	3	50,21	4,575	9,112
30/50	1	50,45	3,527	6,991
	2	50,03	3,473	6,942
	3	50,23	3,512	6,992
30/60	1	50,32	2,445	4,859
	2	50,22	2,431	4,841
	3	50,16	2,422	4,829
40/70	1	50,19	1,772	3,531
	2	50,24	1,782	3,547
	3	50,14	1,769	3,528
40/80	1	50,16	1,665	3,319
	2	50,39	1,687	3,348
	3	50,14	1,661	3,313
20/30-40/80	1	50,33	1,527	3,034
	2	50,23	1,521	3,028
	3	50,24	1,519	3,023

Tabla 3.32 Resultado ensayos resistencia a la fracturación para una carga de 3000 psi.

Banda granulométrica	Ensayo	Material seco [gr]	Mat. Triturado [gr]	Mat. Triturado [%]
20/40	1	50,14	7,313	14,585
	2	50,14	7,315	14,589
	3	50,11	7,299	14,566
30/50	1	50,2	6,706	13,359
	2	50,23	6,719	13,376
	3	50,13	6,701	13,367
30/60	1	50,21	4,979	9,916
	2	50,13	4,963	9,900
	3	50,23	4,981	9,916
40/70	1	50,21	2,889	5,754
	2	50,22	2,873	5,721
	3	50,12	2,897	5,780
40/80	1	50,26	2,395	4,765
	2	50,14	2,366	4,719
	3	50,14	2,361	4,709
20/30-40/80	1	50,21	2,324	4,629
	2	50,12	2,312	4,613
	3	50,02	2,301	4,600

Tabla 3.33 Resultado ensayos resistencia a la fracturación para una carga de 4000 psi.

Banda granulométrica	Ensayo	Material seco [gr]	Mat. Triturado [gr]	Mat. Triturado [%]
20/40	1	50,32	12,967	25,769
	2	50,03	12,889	25,763
	3	50,05	12,892	25,758
30/50	1	50,13	9,799	19,547
	2	50,21	9,821	19,560
	3	50,19	9,812	19,550
30/60	1	50,2	6,734	13,414
	2	50,23	6,756	13,450
	3	50,14	6,732	13,426
40/70	1	50,1	4,987	9,954
	2	50,11	4,979	9,936
	3	50,12	4,983	9,942
40/80	1	50,1	4,434	8,850
	2	50,24	4,469	8,895
	3	50,22	4,467	8,895
20/30-40/80	1	50,2	3,683	7,337
	2	50,21	3,689	7,347
	3	50,13	3,677	7,335

Tabla 3.34 Resultado ensayos resistencia a la fracturación para una carga de 5000 psi.

Banda granulométrica	Ensayo	Material seco [gr]	Mat. Triturado [gr]	Mat. Triturado [%]
20/40	1	50,13	16,243	32,402
	2	50,12	16,262	32,446
	3	50,23	16,275	32,401
30/50	1	50,03	12,773	25,531
	2	50,25	12,832	25,536
	3	50,17	12,812	25,537
30/60	1	50,19	9,972	19,868
	2	50,22	9,987	19,886
	3	50,2	9,972	19,865
40/70	1	50,13	7,443	14,847
	2	50,12	7,452	14,868
	3	50,34	7,498	14,895
40/80	1	50,26	7,312	14,548
	2	50,23	7,302	14,537
	3	50,22	7,311	14,558
20/30-40/80	1	50,15	5,133	10,235
	2	50,18	5,156	10,275
	3	50,12	5,131	10,237

Tabla 3.35 Resultado ensayos resistencia a la fracturación para una carga de 6000 psi.

Banda granulométrica	Ensayo	Material seco [gr]	Mat. Triturado [gr]	Mat. Triturado [%]
20/40	1	50,22	22,601	45,004
	2	50,12	22,589	45,070
	3	50,25	22,623	45,021
30/50	1	50,31	15,023	29,861
	2	50,15	14,988	29,886
	3	50,17	14,993	29,884
30/60	1	50,22	11,572	23,043
	2	50,32	11,612	23,076
	3	50,21	11,58	23,063
40/70	1	50,13	9,727	19,404
	2	50,19	9,782	19,490
	3	50,25	9,788	19,479
40/80	1	50,2	9,178	18,283
	2	50,22	9,18	18,280
	3	50,25	9,188	18,285
20/30-40/80	1	50,2	7,322	14,586
	2	50,19	7,319	14,583
	3	50,24	7,302	14,534

Tabla 3.36 Resultado ensayos resistencia a la fracturación para una carga de 7000 psi.

Banda granulométrica	Ensayo	Material seco [gr]	Mat. Triturado [gr]	Mat. Triturado [%]
20/40	1	50,1	26,751	53,395
	2	50,15	26,763	53,366
	3	50,01	26,703	53,395
30/50	1	50,05	16,921	33,808
	2	50,12	16,954	33,827
	3	50,1	16,961	33,854
30/60	1	50,24	13,878	27,623
	2	50,12	13,877	27,688
	3	50,1	13,873	27,691
40/70	1	50,11	11,142	22,235
	2	50,2	11,178	22,267
	3	50,23	11,181	22,260
40/80	1	50,15	10,992	21,918
	2	50,13	10,983	21,909
	3	50,1	10,979	21,914
20/30-40/80	1	50,11	9,208	18,376
	2	50,17	9,211	18,360
	3	50,2	9,234	18,394

Los datos mostrados en las Tablas (3.30) a (3.36) se resumen por carga y banda granulométrica en la Tabla (3.37).

Tabla 3.37 Tabla resumen ensayo resistencia a la fracturación.

Carga	Banda granulométrica					
	20/40	30/50	30/60	40/70	40/80	20/30-40/80
1000	4,55	2,62	1,77	1,49	1,12	1,08
2000	9,11	6,97	4,84	3,54	3,33	3,03
3000	14,58	13,37	9,91	5,75	4,73	4,61
4000	25,76	19,55	13,43	9,94	8,88	7,34
5000	32,42	25,53	19,87	14,87	14,55	10,25
6000	45,03	29,88	23,06	19,46	18,28	14,57
7000	53,39	33,83	27,67	22,25	21,91	18,38

De los datos mostrados en la Tabla (3.37) se muestran de manera gráfica en la Figura (3.27).

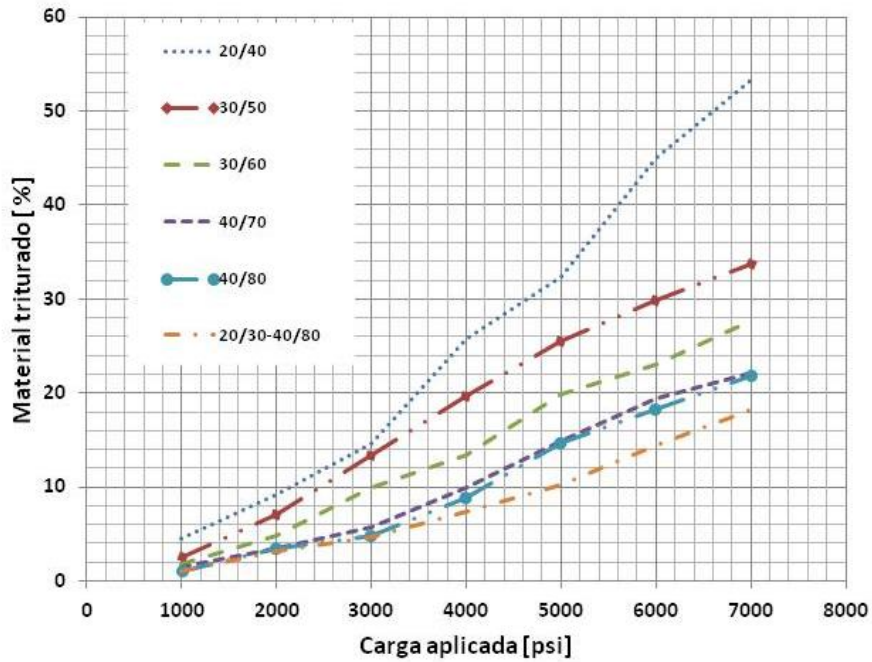


Figura 3.27 Resultado resistencia a la fracturación de todas las bandas granulométricas.

La Tabla 3.38 muestra la clasificación que se le da al material según la Tabla 3.29.

Tabla 3.38 Clasificación del material dado el 10% de material triturado.

Banda granulométrica	Clasificación
20/40	2K
30/50	2K
30/60	3K
40/70	4K
40/80	4K
20/30-40/80	4K

Como se muestra en la Tabla 3.38 los material 40-70, 40/80 y 20/30-40/80 son los con mejor resistencia a la fracturación, esto se puede atribuir a que el material en estos casos tiene partículas más pequeñas que deja menos vacíos por lo que la presión se distribuye mejor entre partículas de suelo y hace que éste tenga una mayor resistencia a triturarse.

3.8) Conductividad hidráulica

3.8.1) Metodología y procedimiento conductividad hidráulica

Los hidrocarburos deben circular con mayor fluidez una vez montado el material de soporte en las fracturas de la roca, el material de soporte crea canales dentro de la fractura lo que permite que los hidrocarburos fluyan con mayor facilidad y aumenta la permeabilidad de la roca (*Reinicke et al., 2010*).

El ensayo para determinar la conductividad hidráulica es considerado uno de los más complejos, dentro de los realizados al material de soporte, dado el tiempo y equipos que se deben considerar para su ejecución (*Peñaranda, 2014*). Para el desarrollo de este ensayo se debe simular lo más cercano posible a una fractura y como se comportaría el material al ser sometido a grandes presiones dentro de la grieta. La ISO 13503-5 (2006) describe el ensayo para determinar la conductividad hidráulica del material. La norma considera que este ensayo es de referencia ya que mide las pérdidas por fricción correspondientes a un flujo laminar por lo que los valores determinados no son absolutos. Dado que el material dentro de la fractura con el tiempo y otros factores como la temperatura y fluidos de distinta viscosidad pueden dañar aun más el material de soporte (Figura 3.28) lo que podría afectar la conductividad en la fractura.

Se entiende como conductividad hidráulica en el material de soporte a la permeabilidad por ancho de la fractura, y su unidad de medida más utilizada es el milidarcy pie (md-ft) (*Mader, 1989*). Así para su cálculo se debe determinar la permeabilidad del material bajo presiones específicas asociadas a las tensiones de cierre de la roca utilizando la ley de Darcy la que está restringida a un flujo laminar, lo que quiere decir es que el flujo no debe mover las partículas de suelo.

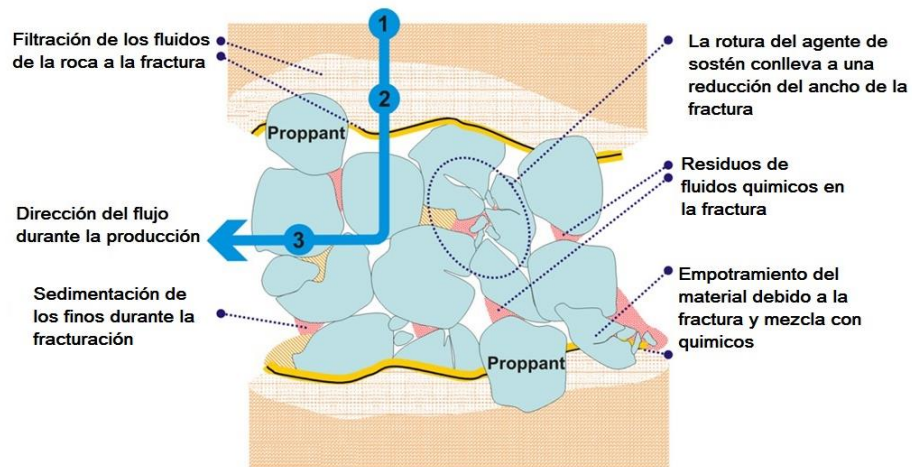


Figura 3.28 Daño en la fractura por rotura de material y otros factores. (Reinicke et al., 2010).

Para realizar las mediciones de la permeabilidad del material se utilizó un permeámetro de carga variable modificado, el cual es más pequeño, donde la celda utilizada tiene un diámetro de 50 mm y 20 mm de altura (Figura 3.29). Se utiliza un permeámetro de carga variable ya que el material a ensayar se encontrará triturado luego de aplicada la carga, por lo que se considera como una arena fina.



Figura 3.29 Celda utilizada para medir permeabilidad.

El permeámetro consiste en una celda (Figura 3.29) y dos tuberías, una en la parte superior y otra en la parte inferior para dejar salir el flujo. La tubería que queda en la parte superior lleva una huincha para poder registrar la caída del flujo de agua a tiempos que serán registrados. Junto con la celda se utilizarán piedras porosas

(figura 3.28) en la parte superior e inferior para evitar que el fluido pase de manera puntual sobre la muestra sino más bien distribuido, lo que además ayuda a que el flujo circule de forma homogénea por la muestra. En la figura 3.31 se muestra un esquema del equipo utilizado.

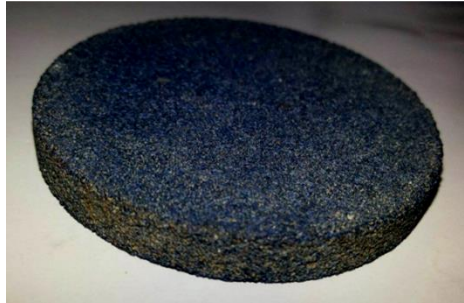


Figura 3.30 Piedra porosa utilizada en el ensayo.

El material debe estar ya preparado por las bandas granulométricas a la cual se desea medir, se lleva en la celda (Figura 3.29) con el material de soporte dentro de la prensa (Figura 3.26, izquierda), donde se le aplica la carga para la cual se desea registrar los datos. El material es llevado a la prensa con la finalidad de medir cual es el resultado del ensayo si este ha sido sometido a una gran carga, como influirá en el paso del fluido por la muestra. Por ejemplo para un material 20/40, se medirá la conductividad hidráulica después de haber aplicado 5000 psi.

Luego de aplicada la presión en la muestra la celda es retirada de la prensa y se montan las piedras porosas. Con el equipo armado se pueden comenzar las lecturas.

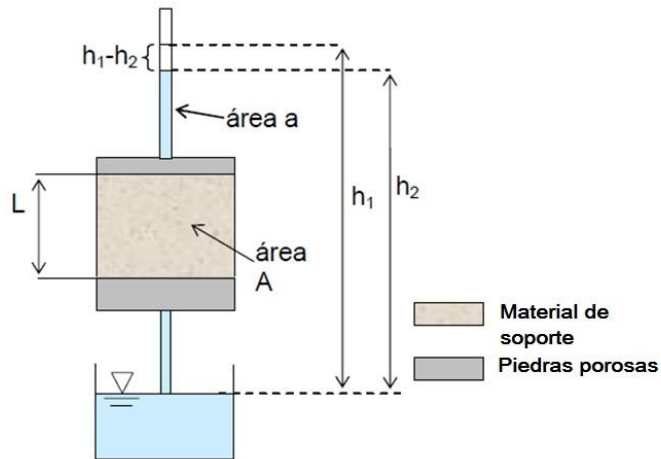


Figura 3.31 Esquema general del equipo utilizado como permeámetro de carga variable.

Para el registro de los datos se debe considerar el largo L de la muestra, el área transversal de la muestra y del tubo por el cual circula el fluido. Antes de comenzar con las mediciones se debe procurar que la muestra se encuentre 100% saturada para evitar burbujas que puedan intervenir en los resultados (Villalobos, 2014).

Se abren las válvulas que dejan pasar el fluido por la muestra y se registra el tiempo t para el cual pasa desde h_1 a h_2 . Y así esto se repite de manera consecutiva hasta tener la mayor cantidad de datos los que son posteriormente graficados, donde el tiempo en segundos va en la abscisa y la altura h en la ordenada. La curva que mejor se ajusta a estos datos estará dada por la Ecuación 8, en la Figura 3.32 se muestra una curva en forma de ejemplo.

$$h = h_0 e^{-\frac{Ak}{aL}t} \quad (8)$$

La que viene de Ecuación 9,

$$k = \frac{aL}{A} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (9)$$

Finalmente con los datos graficados y la función asociada a esta se puede deducir el coeficiente de permeabilidad de la muestra.

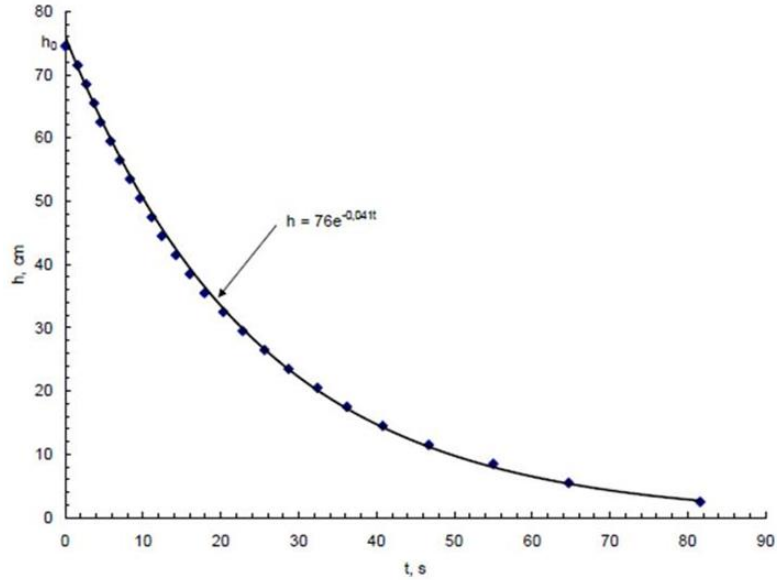


Figura 3.32 Curva ajustada a partir de datos de altura y tiempo en ensayo de carga variable. (Villalobos, 2014).

3.8.2) Resultados conductividad hidráulica

El material preparado por cada banda granulométrica es sometido a una carga como se especifica en la sección 3.8.1. La carga aplicada es de 5000 psi para conocer como varía la permeabilidad del material cuando este ha sido fracturado, se eligió esta presión ya que de las bandas granulométricas estudiadas la que mayor presión resistió fue a 5000 psi.

Las Tablas 3.39 y 3.40 muestran los resultados de los ensayos realizados en laboratorio, además las Figuras 3.33 a 3.37 muestran las curvas ajustadas de los datos medidos.

La probeta utilizada tiene un área transversal de $19,6 \text{ cm}^2$, un largo 2 cm, el tubo por el cual entra el fluido tiene un área de $0,031 \text{ cm}^2$. La lectura inicial h_0 es de 0,7 m para todas las mediciones realizadas.

Tabla 3.39 Datos ensayo de permeabilidad bandas granulométricas 20/40, 30/50 y 30/60.

Medición	h [m]	20/40		30/50		30/60	
		t [s]	t [s]acumulado	t [s]	t [s]acumulado	t [s]	t [s]acumulado
1	0,7	0	0	0	0	0	0
2	0,6	2	2	0,8	0,8	0,2	0,2
3	0,5	4,2	6,2	1,6	2,4	1,6	1,8
5	0,4	6,3	12,5	2,1	4,5	2	3,8
6	0,3	8,3	20,8	2,6	7,1	2,7	6,5
7	0,2	11,5	32,3	3,7	10,8	3,6	10,1
8	0,1	19,9	52,2	6,3	17,1	6,3	16,4
9	0	20,1	72,3	11,3	28,4	8,2	24,6

Tabla 3.40 Datos ensayo de permeabilidad bandas granulométricas 40/70, 40/80 y 20/30-40/80.

Medición	h [m]	40/70		40/80		20/30-40/80	
		t [s]	t [s]acumulado	t [s]	t [s]acumulado	t [s]	t [s]acumulado
1	0,7	0	0	0	0	0	0
2	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
3	0,5	0,8	1	0,6	1	0,6	1
5	0,4	0,9	1,9	0,9	1,7	0,7	1,6
6	0,3	1,2	3,1	1,2	2,9	1	2,6
7	0,2	1,7	4,8	1,7	4,6	1,3	3,9
8	0,1	2,9	7,7	2,9	7,5	2,3	6,2
9	0	5,5	13,2	5,9	13,4	5	11,2

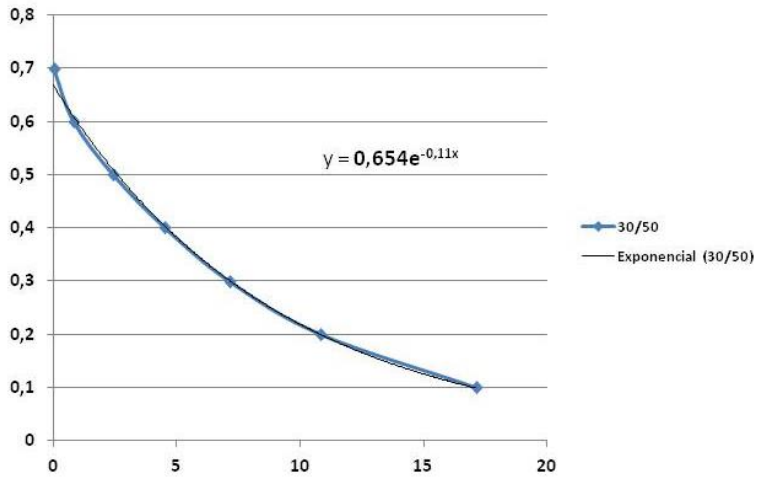


Figura 3.33 Curva ajustada de los datos de la banda granulométrica 30/50.

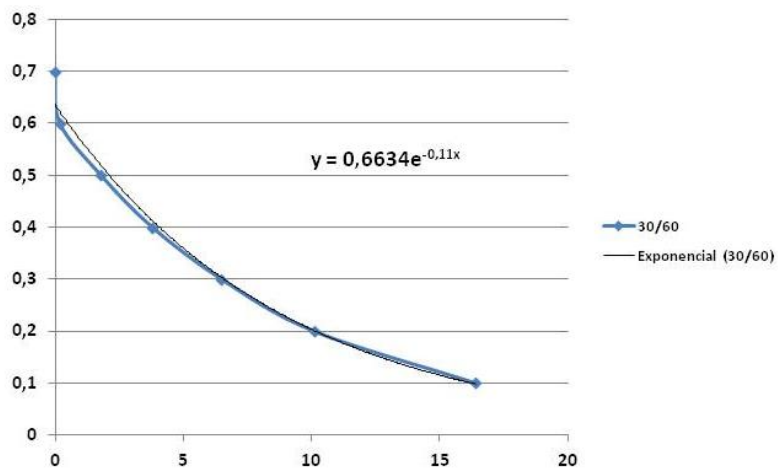


Figura 3.34 Curva ajustada de los datos de la banda granulométrica 30/60.

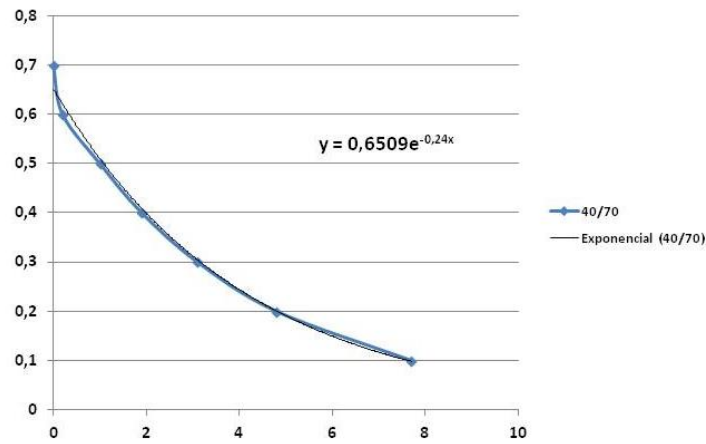


Figura 3.35 Curva ajustada de los datos de la banda granulométrica 40/70.

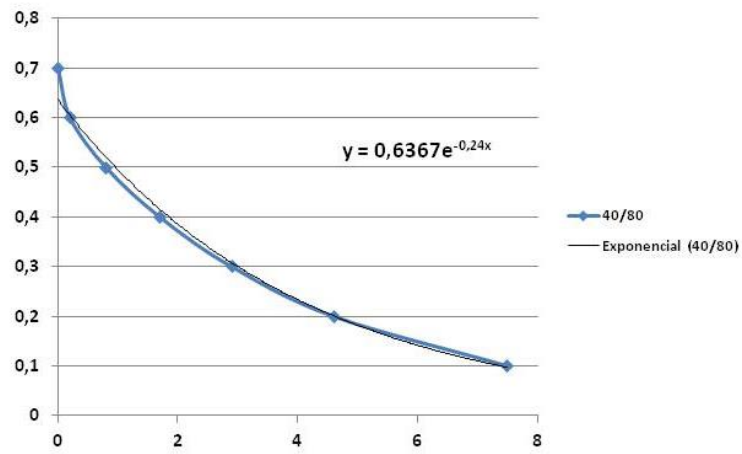


Figura 3.36 Curva ajustada de los datos de la banda granulométrica 40/80.

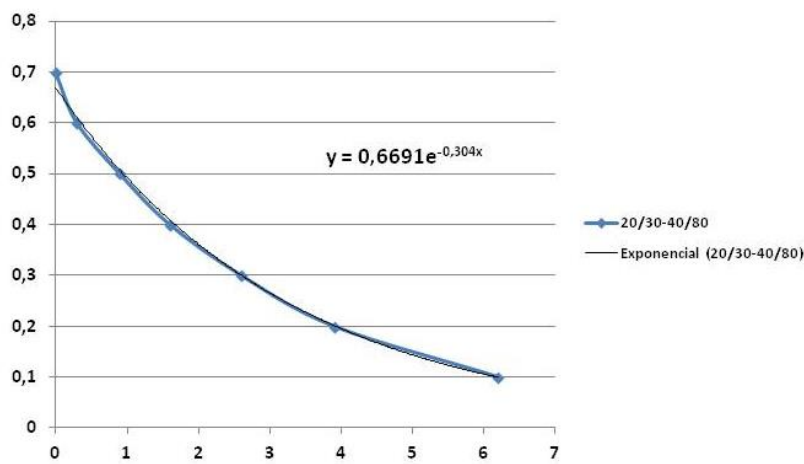


Figura 3.37 Curva ajustada de los datos de la banda granulométrica 20/30-40/80.

De los datos obtenidos en laboratorio y ajustados en las curvas exponenciales se puede conocer la permeabilidad del material. La Tabla 3.40 muestra la permeabilidad de cada una de las bandas granulométricas.

Tabla 3.41 Permeabilidad de las bandas granulométricas sometidas a 5000 psi.

Banda granulométrica	Permeabilidad [m/s]
20/40	1,12E-06
30/50	3,52E-06
30/60	3,52E-06
40/70	7,68E-06
40/80	7,68E-06
20/30-40/80	9,72E-06

De los datos obtenidos para la permeabilidad del material, se puede calcular la conductividad hidráulica, que se encuentran relacionadas a partir de la ecuación 10. Hubbert (1956) demostró que la conductividad hidráulica es una función de propiedades del medio poroso y el fluido que pasa a través de él. Por ejemplo un fluido viscoso como el petróleo se moverá a una tasa menor que por ejemplo el agua en un mismo tipo de suelo.

$$K = k \times \frac{\rho \cdot g}{\mu} \quad (10)$$

Donde,

K: conductividad hidráulica

k: Permeabilidad

ρ : Densidad del fluido

g: aceleración de gravedad

μ : viscosidad dinámica

Así considerando los datos del agua mostrados en la Tabla 42, para el agua a 20°C, temperatura media registrada al momento de realizar los ensayos.

Tabla 3.42 Densidades y viscosidad para el agua a distintas temperaturas. (Sánchez, 2014)

temp (°C)	Densidad (10 ³ Kg/m ³)	Viscosidad dinámica (10 ⁻³ .Kg/(m.s))	Viscosidad cinemática (centistokes =10 ⁻⁶ m ² /s)	temp (°C)	Densidad (10 ³ Kg/m ³)	Viscosidad dinámica (10 ⁻³ .Kg/(m.s))	Viscosidad cinemática (centistokes =10 ⁻⁶ m ² /s)
0	0,99982	1,792	1,792	20	0,99829	1,003	1,005
1	0,99989	1,731	1,731	21	0,99808	0,979	0,981
2	0,99994	1,674	1,674	22	0,99786	0,955	0,957
3	0,99998	1,620	1,620	23	0,99762	0,933	0,935
4	1,00000	1,569	1,569	24	0,99738	0,911	0,913
5	1,00000	1,520	1,520	25	0,99713	0,891	0,894
6	0,99999	1,473	1,473	26	0,99686	0,871	0,874
7	0,99996	1,429	1,429	27	0,99659	0,852	0,855
8	0,99991	1,386	1,386	28	0,99631	0,833	0,836
9	0,99985	1,346	1,346	29	0,99602	0,815	0,818
10	0,99977	1,308	1,308	30	0,99571	0,798	0,801
11	0,99968	1,271	1,271	31	0,99541	0,781	0,785
12	0,99958	1,236	1,237	32	0,99509	0,765	0,769
13	0,99946	1,202	1,203	33	0,99476	0,749	0,753
14	0,99933	1,170	1,171	34	0,99443	0,734	0,738
15	0,99919	1,139	1,140	35	0,99408	0,720	0,724
16	0,99903	1,109	1,110	36	0,99373	0,705	0,709
17	0,99886	1,081	1,082	37	0,99337	0,692	0,697
18	0,99868	1,054	1,055	38	0,99300	0,678	0,683
19	0,99849	1,028	1,030	39	0,99263	0,666	0,671

Así considerando una temperatura de 20°C la densidad del agua es 998,29 kg/m³, y una viscosidad dinámica 0,001003 kg/(m.s), la Tabla 3.42 muestra los resultados obtenidos para la conductividad hidráulica para el material por banda granulométrica y ensayado luego de aplicar 5000 psi. Este resultado se muestra en m², pero para representarlo como se utiliza comúnmente para los pozos de gas se utiliza los Darcy o mDarcy, donde 1Darcy equivale a 9,87x10⁻¹³m².

Tabla 3.43 Conductividad hidráulica por banda granulométrica.

Banda granulométrica	Conductividad hidráulica(m ²)	Conductividad hidráulica (Darcy)	Conductividad hidráulica (mD)
20/40	1,14x10 ⁻¹³	0,1162	116,22
30/50	3,605x10 ⁻¹³	0,3653	365,26
30/60	3,605x10 ⁻¹³	0,3653	365,26
40/70	7,866x10 ⁻¹³	0,7969	796,93
40/80	7,866x10 ⁻¹³	0,7969	796,93
20/30-40/80	9,955 x10 ⁻¹³	1,0086	1008,61

De la Tabla 3.40 y 3.42 se puede ver que tanto la permeabilidad como la conductividad hidráulica del material aumentan a medida que el tamaño de los granos es menor, lo que tiene directa relación la cantidad de material que es triturado. Ya que a menor tamaño de las partículas menor cantidad de material que ha sido triturado y puede tapar los poros lo que conlleva a una mayor permeabilidad.

Cabe señalar que estos resultados son solo para tener una idea de cómo variaría la conductividad hidráulica en estos casos, ya que el ensayo que se realizó en base al ensayo de permeabilidad de carga variable modificado en las dimensiones de los instrumentos utilizados, además durante la medición de datos no existe una presión ejercida en el material simulando ser la presión de cierre de las fracturas en el material de soporte. El ensayo que se encuentra normado para el material de soporte (ISO 13503-5 (2006)) este es realizado bajo presiones que simulan la fractura. Sin embargo el material fue ensayado luego de aplicar la presión de 5000 psi con la cual el material fue triturado y se podía considerar los finos que se formarían bajo dicha presión.

Los resultados obtenidos en la Tabla 3.42 muestran un evidente aumento en la permeabilidad a medida que la banda granulométrica es más pequeña o considera granos más pequeños. Además sabemos por los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la fracturación entre más pequeños los granos de suelo existe una menor fractura de éstos, lo que se traduce en menos material particulado que pueda tapar los canales entre granos por donde circula el fluido.

3.9) Mineralogía

3.9.1) Metodología y procedimiento mineralogía

La pureza de sílice en el material está muy ligada a la calidad de éste (*Mitchell, 2015*). La arena utilizada como material de soporte tiene como principal elemento el sílice por sus propiedades físicas y químicas de lo que derivan sus usos industriales de las que destacan su dureza y resistencia química. La arena de sílice es resultante de la combinación del sílice con oxígeno (SiO_2), es insoluble en agua y en la naturaleza se encuentra en forma de cuarzo.

El ensayo de fluorescencia de rayos x (XRF) permite identificar los componentes presentes en el material.

El equipo utilizado en este procedimiento es un Bruker D4 Endeavor (Figura 3.38).



Figura 3.38 Equipo Bruker D4 Endeavor utilizado para determinar la concentración de los componentes del material, GEA Universidad de Concepción.

El material debe ser pulverizado antes de colocarlo en la cápsula que irá en el equipo, éste hace una fluorescencia de rayos X en la muestra para luego arrojar los

datos en un computador, donde se deben analizar para conocer la concentración de los componentes en el material.

3.9.2) Resultados mineralógicos

La tabla 3.43 muestra los resultados obtenidos en laboratorio.

Tabla 3.44 Elementos presentes en el material y su concentración a partir del ensayo XRF.

Compuestos	Concentración [%]
SiO ₂	94,516
Al ₂ O ₃	2,674
Fe ₂ O ₃	0,358
CaO	0,026
MgO	0,05
K ₂ O	0,054
Na ₂ O	<0,006
TiO ₂	0,13

De los resultados obtenidos en el ensayo mineralógico se encontró que la muestra presenta cuarzo (SiO₂) casi en su totalidad, pero muy bajo en cuanto a estándares internacionales, por lo que podríamos hablar de un material quizás pobre en sílice, ya que en países como el Reino Unido consideran que un 99% de sílice es una cantidad aceptable para considerarlo un material de buena calidad (Mitchell, 2015).

Además se realizó un análisis de la morfología del material a partir de un microscopio de barrido (SEM) lo que complementa el ensayo de redondez y esfericidad antes analizado en la sección 3.2.2. La Figura 3.39 muestra las imágenes extraídas desde el microscopio.

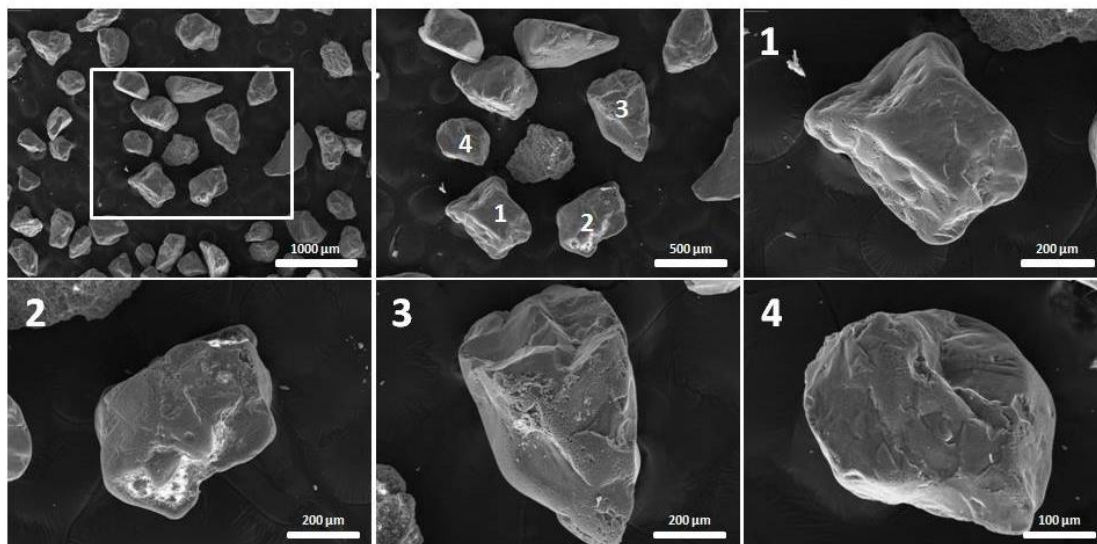


Figura 3.39 Morfología de las partículas mediante microscopio de barrido SEM.

Son analizados 4 granos de los cuales se puede observar que tienen cantos redondeados lo que ratifica lo mencionado anteriormente en el análisis de redondez y esfericidad.

4) ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LAS BANDAS GRANULOMÉTRICAS

Se seleccionaron 6 bandas granulométricas las que fueron analizadas con los distintos ensayos en laboratorio con el fin de conocer cual es el tamaño de partículas que podría ser utilizado como material de soporte en faenas de extracción de gas. Estas fueron seleccionadas dado el tamaño de partículas disponibles en el material (Figura 3.7).

Dentro de las bandas granulométricas utilizadas comúnmente se encuentran los tamaños 16/20, 20/40, 30/50, 40/60, 40/70 y 70/140 (*Webber et al., 2004*). Por lo que se tomaron en cuenta estos tamaños como los disponibles en el material para seleccionar las mallas analizadas en este trabajo que fueron 20/40, 30/50, 30/60, 40/70 y 40/80, también se analizó la mezcla de material 20/30-40/80. Esta última se analizó dado que se utiliza la parte más gruesa de material con la más fina con la finalidad de que los vacíos que quedan en el material más grueso fueran ocupados por el material más fino provocando que el área de contacto entre partículas sea mayor lo que ayudaría en la resistencia a la fracturación del material lo que se podría ver reflejado en la conductividad hidráulica.

Las bandas granulométricas se pueden comparar y evaluar entre ellas para determinar si pueden ser utilizadas como material de soporte y cual de estas cumple con los requisitos de la norma (*ISO 13503/2, 2006*). También conocer cual es la relación entre el tamaño del material y su calidad como material de soporte, si pueden ser utilizadas como tal.

Dentro de los parámetros a tener en cuenta al momento de elegir una banda granulométrica para trabajar, se debe considerar la cantidad de material disponible de estos tamaños dado que si la cantidad es demasiado pequeña se podría incurrir en una pérdida importante de material. De la Figura 3.7 se puede deducir la cantidad de material disponible para cada banda granulométrica, en la Tabla 4.1 se muestra en

forma de resumen la cantidad de material aproximado para cada banda granulométrica extraído de la Figura 3.7.

Tabla 4.1 Cantidad de material disponible por banda granulométrica.

Banda granulométrica	% material del total disponible
20/40	58
30/50	70
30/60	73
40/70	32
40/80	30
20/30-40/80	45

La cantidad de material disponible para las bandas 30/50 y 30/60 es considerablemente mayor dado que el tamaño del material se encuentra en su mayoría en estas bandas granulométricas, pero para las bandas granulométricas restantes la cantidad de material disponible no es despreciable. Además se debe considerar que el material restante puede tener otros usos como la fabricación de vidrios y utilización en filtros de agua (*Bansal y Doremus, 1986*).

Ensayos como los de resistencia a la calcinación y mineralógicos no pueden ser comparados entre bandas granulométricas dado que se realizaron al material completo sin ser separado en bandas.

En la Tabla 4.2 se muestra en forma de resumen ensayos que pueden ser analizados y comparados por bandas granulométricas y que puedan tener relación entre ellos, como la redondez y la esfericidad con la resistencia a la fracturación y la conductividad hidráulica.

Tabla 4.2 Tabla resumen ensayos redondez, esfericidad, resistencia a la fracturación y permeabilidad.

Análisis	Banda granulométrica					
	20/40	30/50	30/60	40/70	40/80	20/30-40/80
Redondez	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6
Esfericidad	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7
Resistencia Fracturación 1000 psi [%]	4,55	2,62	1,77	1,49	1,12	1,08
Resistencia Fracturación 2000 psi [%]	9,11	6,97	4,84	3,54	3,33	3,03
Resistencia Fracturación 3000 psi [%]	14,58	13,37	9,91	5,75	4,73	4,61
Resistencia Fracturación 4000 psi [%]	25,76	19,55	13,43	9,94	8,88	7,34
Resistencia Fracturación 5000 psi [%]	32,42	25,53	19,87	14,87	14,55	10,25
Permeabilidad a 5000 psi [m/s]	1,12E-06	3,52E-06	3,52E-06	7,68E-06	7,68E-06	9,72E-06

En la Tabla 4.2 se puede ver que la relación entre la redondez y esfericidad con la resistencia a la fracturación no tiene una directa relación como se podría pensar ya que si el material presenta cantos agudos el área de contacto entre granos es menor lo que conlleva a un material más frágil a la fractura. El material muestra que a menor tamaño de los granos la resistencia a la fractura aumenta, esto se debe a que los vacíos disminuyen y los granos se encuentran más juntos (*d'Huteau, 2012*), esto se ve evidenciado también en la banda granulométrica 20/30-40/80 donde su resistencia a la fracturación aumenta debido a que el material más pequeño ocupa los vacíos que quedan del material más grande disminuyendo los vacíos (Figura 4.1).

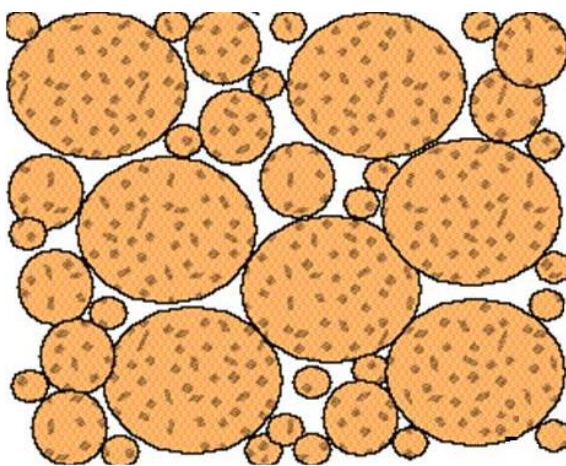


Figura 4.1: Granos pequeños utilizando espacio entre granos más grandes.

Esta resistencia a la fracturación del material se ve reflejado en la permeabilidad del material como se ve en la Tabla 4.2, en este caso el material fue sometido a una misma carga (5000 psi), con la cual se pudo analizar cada banda, dando como resultado mayor permeabilidad aquellas que tenían mayor resistencia a la fracturación, por lo que se puede decir que a menor tamaño de partículas mayor es su resistencia a la fracturación.

5) CONCLUSIONES

El material encontrado en Ramadillas es un material alto en sílice (95%) pero no necesario, según estándares europeos, para ser utilizado como material de soporte, dado que se necesitan las propiedades del sílice para ser utilizado como tal (*Marshall et al., 2014*).

La cantidad de material que se puede extraer por banda granulométrica es considerable en las bandas granulométricas 20/40, 30/50, 30/60 y 20/30-40/80 siendo superiores a 45% del total del material en estos casos. Las bandas granulométricas 40/70 y 40/80 tienen cantidades aproximadas de 30 y 32% lo que no se consideran despreciables. Si se considera que el material puede tener otros usos esto no se debería ver como una pérdida si no que una oportunidad para darle otra función al material (*Bansal y Doremus, 1986*), como se nombró anteriormente el vidrio y filtros entre otros.

Cabe destacar que para un buen resultado de los ensayos es de suma importancia la preparación del material. Es decir un buen lavado para lograr extraer la mayor cantidad de material orgánico presente en la arena y quitar el fino presente, ya que para este caso no es utilizado, además de una buena preparación de las bandas granulométricas que se quiera analizar, es decir utilizar las mallas, cantidad de material y tiempo de tamizado adecuados. Considerando que este proceso (lavado) se está realizando a nivel de laboratorio, las cantidades que se utilizan son pequeñas, si esto lo trasladamos a nivel industrial, el proceso resultará no tan prolijo como el realizado en el laboratorio, por lo que siempre se debe tener en cuenta una mínima variación en los resultados obtenidos a nivel industrial.

La redondez y esfericidad del material para las bandas granulométricas seleccionadas si se evalúan por la ISO 13503/02, la cual especifica que éstas deben ser iguales o mayores a 0,6 en ambos parámetros, ya que considera granos más bien redondeados y esféricos, solo cumplirían las bandas 30/50 y 20/30-40/80. Pero

como se puede ver al relacionar este parámetro con la resistencia a la fracturación y la conductividad hidráulica no tiene mayor relevancia. Peñarda en el 2014, también analizó material de soporte del tipo arena comparándolo con material importado desde Estados Unidos. El material de sílice presentaba redondez y esfericidad que no cumplía con la norma (*ISO 13503/02, 2006*) comparada con el material sintético importado el cual era completamente esférico y cumplía a cabalidad con este parámetro, pero al compararlo en otros como la resistencia a la fracturación y conductividad hidráulica este material presenta la misma o mayor. Por lo que comparando con aquella investigación y los resultados obtenidos en la presente se podría inferir que la redondez y esfericidad del material estaría sobreestimada. Se puede concluir que la norma (*ISO 13503/02, 2006*) considera este parámetro porque se quiere utilizar un material redondo y esférico porque lo relaciona directamente con la resistencia a la fracturación y que formen canales óptimos para el paso del gas.

La densidad bulk de las bandas granulométricas va desde 1,371 gr/cm³ a 1,418 gr/cm³ para 40/70 y 20/40 respectivamente. Esta densidad dependerá de cómo se acomodan los granos al caer dado que es un ensayo donde el material cae por gravedad siendo medido como la masa de material que ocupa un volumen por lo que se consideran los vacíos. La densidad aparente del material fue analizada con un fluido de baja viscosidad como lo es el kerosén. Con esto se logro medir el volumen ocupado por una cantidad de material sin considerar sus vacíos por lo que esta densidad será mayor a la bulk. Las densidades aparente van desde los 2,5 gr/cm³ a los 2,65 gr/cm³ para los materiales 20/40 y 40/80 respectivamente. La densidad absoluta del material tuvo valores entre 2,563 gr/cm³ a los 2,62 gr/cm³ correspondientes a las bandas granulométricas 40/80 y 20/40 respectivamente. De las bandas granulométricas estudiadas se puede ver que las densidades no varían considerablemente entre ellas, por lo que se puede decir que el cambio del tamaño de las partículas es mínimo para este parámetro.

El material presento una resistencia a la calcinación aceptable, menor al 3%, la cual fue de 1,77% a una temperatura de 927°C, esto quiere decir que solo esta cantidad de material se perdió en el ensayo, este fue ensayado en su forma natural, esto quiere decir que no fue lavado previamente ni separado por bandas granulométricas. El material no presento un cambio notorio en su masa aunque visualmente presento un cambio de color, que puede ser por la oxidación del Fe presente. Se recomienda hacer un análisis del material luego de pasar por la mufla para conocer si éste tiene un cambio en su resistencia luego de ser sometido a altas temperaturas. Este resultado está siendo conservador dada las condiciones del material al ser analizado no son las mismas que cuando se analizó el material por banda granulométrica, el cual fue lavado y preparado para ser estudiado.

La resistencia a la fracturación es uno de los parámetros con mayor importancia dado que es éste el cual mide la calidad del material y lo clasifica. La importancia se da ya que a menor material fracturado a grandes presiones éste se verá reflejado en la conductividad del material lo que conlleva a la productividad del pozo (Tabla 5.1) por lo que hay una directa relación entre el material triturado y la conductividad hidráulica.

Tabla 5.1 Resultados de resistencia a la fracturación a los 5000 psi y conductividad hidráulica para cada banda granulométrica.

Banda granulométrica	Material triturado en ensayo de resistencia a la fracturación (5000 psi)	Conductividad hidráulica (mD)
20/40	32,42	116,22
30/50	25,53	365,26
30/60	19,87	365,26
40/70	14,87	796,93
40/80	14,55	796,93
20/30-40/80	10,25	1008,61

El material fracturado durante la presión de cierre se queda en los vacíos del material provocando un taponamiento de los canales antes creados por el material de soporte que dejaba pasar los hidrocarburos. El material de soporte de Ramadillas

analizado por bandas granulométricas muestra que cuanto menor es el tamaño de las partículas este tienen una mayor resistencia a la fracturación, así como también la banda granulométrica hecha con la mezcla de la parte más fina y gruesa del material mostró un mejor resultado (banda granulométrica 20/30-40/80), esto dado a que el material más pequeño se introduce en los vacíos del material más grueso, esto hace que el área de contacto entre partículas de suelo sea mayor provocando una mayor resistencia a la fractura. Aunque este tipo de material hecho con mezclas de tamaños de partículas no es comercial se recomienda ser analizado, ya que puede ser una buena alternativa, dado que finalmente lo importante es el buen funcionamiento del pozo, además la cantidad de material aprovechado es mayor.

La conductividad hidráulica se puede deducir a partir de la permeabilidad, ensayo que se realizó al material. Las bandas granulométricas fueron analizadas para una presión de 5000 psi que fue producida antes de realizar el ensayo de permeabilidad. Se consideró esta presión dado que el material cumplió como máximo para esta siendo el material 20/30-40/80 que resultó con un 10,25% del material fracturado a esta presión de cierre. Por esto se decidió analizar todas las bandas a esta presión de cierre y así hacer una comparación entre éstas. Como se podía prever el material con mayor resistencia a la fractura fue el que tuvo mayor permeabilidad y así el material con menor resistencia a la fractura tuvo menor permeabilidad, esto se debe por lo antes mencionado con respecto al material triturado que se provoca y crea tapones en los canales. Cabe destacar que este ensayo fue una adaptación al ensayo real propuesto por la ISO 13503/5 (2006), donde se utilizó una probeta de menor tamaño que la presentada en la norma, por lo que los resultados son solo una aproximación. Pero al igual que el ensayo propuesto por la norma los valores obtenidos no son absolutos, dado que las condiciones reales en un pozo pueden tener diferentes y están más allá del alcance del procedimiento.

Dentro de las recomendaciones que se pueden realizar está el poder ahondar en el análisis de la conductividad hidráulica dado que de este parámetro dependerá la productividad del pozo en el cual se quiera utilizar el material, como también la

relación que puede existir entre la resistencia a la fractura con la conductividad hidráulica, ya que se puede encontrar una relación directa con ésta.

Finalmente se puede decir que el material de Ramadillas podría ser utilizado en faenas de extracción de shale gas donde las presiones de cierre no sean mayores a 4000 psi para las bandas granulométricas 40/70, 40/80 y 20/30-40/80. Además se puede recomendar realizar un mayor análisis de ésta banda granulométrica y otras mezclas posible con el material que puedan tener buenos resultados con el fin de que puedan ser comercializados y probados materiales compuestos de mezclas donde se aprovecha mejor el material y sus resultados pueden mejorar en comparación con otras bandas granulométricas.

6) REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexander, T., Baihly, J., Boyer, C., Clark, B., Waters, G., Jochen, V., Le Calvez, J., Lewis, R., Miller, C., Thaeler, J., Toelle, B. (2011). Revolución del Gas de Lutitas. Oilfield Review, Vol 23, n°3.
- Al-Juborni, A., Johnston, S., Boyer, C., Lambert, S., Bustos, O., Pashin, J., Wray, A. (2009). Metano en capas de carbón: Energía limpia para el mundo. Oilfield Review. 18 n°2.
- Allix, P., Burnha, A., Fowler, T., Herron, M., Kleinberg, R., Symington, B. (2011). Extracción del Petróleo Contenido en las Lutitas. Oilfield Review,
- Allix, P., Burnham, A., Fowler, T., Herron, M., Kleinberg, R. (2011). Coaxing Oil from Shale. Journal Oilfield Review. Schlumberger, USA. Vol 22, n°4.
- Álvarez, B. (2012). Fracturamiento Hidráulico Multietapas. Tesis pregrado. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- ANSI B74.4 (2002). Bulk Density of Abrasive Grains. American National Standards Institute, New York, USA.
- API 19D (2009). Recommended practice for measuring the long-term conductivity of proppants. American Petroleum Institute, N. W., Washington, D.C. USA.
- API RP 19C (2008). Measurement of properties of proppant used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations. 1st edition, American Petroleum Institute, N. W., Washington, D.C. USA.
- Bansal, N., Doremus, R. (1986). Handbook of Glass Properties. Academic Press INC. (London) LTD.
- Barrera, N.E., Muñoz, J.A. (2003). Análisis de la influencia de la distribución de tamaño de partículas en la conductividad hidráulica de arenas limpias. Trabajo de grado de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C., Colombia.
- Barzola, G. (2012). La arena II, Revista del Instituto Argentino del Petróleo y Gas, Petrotecnia, Argentina no.4, 2012, p. 70-72.

- Bivins, C., Boney, C., Fredd, C., Lassek, J., Sullivan, P., Engels, J., Fielder, E., Gorham, T., Judd, T., Sánchez, A., Tabor, L., Valenzuela, A., Willberg, D. (2005). Nuevas Fibras para Tratamientos de Fracturamiento Hidráulico. *Oilfield Review*, 17, no. 3.
- Blanco, A. (2010) Fractura Hidráulica: El Proceso Completo. *Revista del Instituto Argentino del Petróleo y Gas, Petrotecnia, Argentina.*
- Blanco, A., Vivas, J. (2011). Shale Frac: Un Acercamiento a una Nueva Tecnología. *Revista del Instituto Argentino del Petróleo y Gas, Petrotecnia, Argentina*, no
- Blanco, A., Vivas, J. (2012). Nociones de Ingeniería a Reservorios no Convencionales. *Revista del Instituto Argentino del Petróleo y Gas, Petrotecnia, Argentina.*
- Boyer, C., Clark, B., Jochen, V., Lewis, R. (2011). Shale gas: A Global Resource. *Oilfield Review*,
- Boyer, C., Kieschnick, J., Suárez-Rivera, R., Lewis, R., Waters, G. (2006). Producción de gas desde su origen. *Oilfield*, 18, no. 3.
- Boyer, Ch., Clark, B., Lewis, R., Miller, C. (2011). Gas de lutitas: Un recurso global. *Oilfield Review*, Vol 23, no.3.
- Chebli, G., Mendiberri, H., Giusano, A., Ibáñez, G., Alonso, J. (***). El Shale Gas en la Provincia de Neuquén. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Argentina.
- d'Huteau, E. (2012). La arena I, Características del agente de sostén utilizado en reservorios no convencionales. *Revista del Instituto del Petróleo y Gas, Petrotecnia, Argentina* no.4, 2012, p. 66-68.
- d'Huteau, E., Gillard, M., Miller, M., Peña, A., Johnson, J., Tunner, M., Medvedev, O., Rhein, T., Willberg, D. (2011). Fracturamiento con Canales de Flujo Abiertos: Una Vía Rápida para la Producción. *Oilfield Review*, Vol 23, n°3.
- Duque, G. (2013). Manual de Geología para Ingenieros. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. Cap. 9.

- Estrada, J. (2013). Desarrollo del Gas Lutita (Shale Gas) y Su Impacto en el Mercado Energético de México: Reflexiones para Centroamérica. Editorial CEPAL, Sede Subregional CEPAL en México (Estudios e Investigaciones).
- Frías, M., De Luxan, M. P., Sánchez, M. I. (1988). Diffraction spectrometry by laser beams. Revista Materiales de Construcción. Instituto Técnico de la Construcción y el Cemento. Madrid, España.
- Frías, M., Sánchez, M., Luxan, M., García, N. (1990). A Comparative Study The Techniques of Sieving and Elutriation Applied to Pozzolan Materials. Revista Materiales de Construcción. Vol 40, n°217.
- Galván, S. (2011). Herramienta de análisis para las pruebas de inyección y minifrac. Tesis pre grado. Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz, México.
- ISO 13503/2 (2006). Petroleum and natural gas industries, Completions fluids and materials, Part 2, Measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations. International Organization for Standardization, New York, USA.
- ISO 13503/5 (2006). Procedures for measuring the long-term conductivity of proppants. International Organization for Standardization, New York, USA.
- Kraemer, C., Lecerf, B., Peña, A., Usoltsen, D., Parra, P., Valenzuela, A., Watkins, H. (2014). Revelación del Potencial de los Yacimientos no Convencionales. Oilfield Review Vol 26, n°4.
- Krumbein, W.C., Sloss, L.L. (1963). Stratigraphy and Sedimentation, Second Edition, W.H. Freeman and Company, San Francisco, p. 660.
- Kuuskraa, V., Stevens, S., Van Leeuwen, T., Moodhe, K. (2012). World Shale Gas Resources, Advance Resources International, Inc., U.S. Department of Energy Washington, DC.
- Mader, D. (1989). Hydraulic Proppant Fracturing and Gravel Packing. Editorial Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam.
- Marshall, T., Johnson, D., Chadima, S., Schulz, L., Fahrenbach, M., Herrig, K. (2014). Assesment of South Dakota's Sand and Alumina Resources for as Proppant. Geological Survey Program, Department of Environment and Natural Resources, Akeley-Lawrence Science Center, Vermillion South Dakota.

- Mitchell, C. (2015). Strict Specifications: UK Frac Sand Potential. 18th Extractive Industry Geology (EIG) Conference at the University of St. Andrews 2014. Scotland.
- Montgomery, C., Steanson, R. (1985). Proppant Selection: The Key to Successful Fracture Stimulation. Journal of Petroleum Technology, USA. Vol 37.
- Peñaranda, V. (2014). Arenas, más allá del acatamiento a las normas. Revista del Instituto Argentino del Petróleo y Gas, Petrotecnia, Argentina no.3, 2014, p. 66-68.
- Reinicke, A., Rybacki, E., Stanchits, S., Huenges, E., Dresen, G. (2010). Hydraulic Fracturing Stimulation Techniques and Formation Damage Mechanisms-Implications from Laboratory Testing og Tight Sandstone-Proppant systems. Journal Chemie der Erde-Geochemistry, Germany. Vol 70, n°3, pp 107-117.
- Romero, J. (2012). Experimental Investigation of Propped Fracture Conductivity in Tight Gas Reservoirs Using the Dynamic Conductivity Test. Thesis By Master of Sciece. Texas A&M University.
- Smith, C., DeHoratiis, G., Duda, J., Yost, A., Long, R., Guthride, G. (2011). Shale Gas: Applying Technology to Solve America's Energy Challenges. The National Energy Technology Laboratory. U.S. Department of Energy. United State,
- Tarbuck, E., Lutgens, F. (2005). Ciencias de la Tierra, Una Introducción a la Geología Física. Editorial Pearson Educación S.A., Madrid. Ed. 8, p. 255-278.
- Trombetta, J. (2012). El Agua En La Explotación De Yacimientos No Convencionales. Revista del Instituto Argentino del Petróleo y Gas, Petrotecnia, Argentina no 4.
- Villalobos, F. (2014). Mecánica de suelos. Editorial Universidad Católica de la Santísima Concepción, p. 159-161.Chile.