



# **ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

Trabajo Fin de Grado

## **ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE FABRICACION SOBRE LAS PROPIEDADES DE LA PIEDRA ARTIFICIAL**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

Universidad de La Laguna

Alumno: Kevin Martín Pérez

Tutores: María Milagros Laz Pavón

María Hernández Molina

**Junio de 2017**



## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradecer la ayuda prestada por parte del Grupo Antonio Afonso y su implicación para la elaboración de este proyecto. En especial al arquitecto Juan José Afonso, por el continuo interés en el desarrollo del mismo.

Agradecer también la ayuda proporcionada por parte del área de materiales de la Escuela de Ingeniería Industrial de la ULL.

Al personal del laboratorio de Caracterización de Partículas y Microsuperficies del SEGAI por la participación en el análisis de las muestras.

A mi familia por el constante apoyo y motivación dada durante la elaboración de este proyecto. Y también a mis amigos por estar presentes en los momentos más difíciles. Muchas gracias a todos.





## Índice de contenidos

1. Objetivo.....	12
Español.....	12
English .....	12
2. Introducción.....	14
3. El vidrio .....	16
3.1. Materias primas para la fabricación del vidrio .....	16
3.2. Proceso de elaboración del vidrio .....	17
3.2.1. Fabricación del vidrio.....	17
3.2.2. Estirado mecánico .....	18
3.2.3. Colado discontinuo.....	20
3.2.4. Laminado continuo.....	20
3.2.5. Flotado.....	21
3.3. Reciclado del vidrio .....	22
4. Áridos para piedra artificial.....	24
4.1. Arena africana.....	24
4.1.1. Granulometría de la arena. ....	25
4.2. Procesamiento del vidrio .....	26
4.2.1. Búsqueda y recolección de cristales.....	26
4.2.2. Selección y lavado del vidrio .....	26
4.2.3. Trituración.....	27

4.2.4. Tamizado.....	28
4.2.5. Almacenamiento e inventariado.....	29
4.3. Producción de arena de vidrio plano a nivel industrial.....	31
5. Componentes de la piedra artificial.....	33
5.1. Piedra aglomerada.....	36
5.2. Cementos.....	36
5.3. Fibra de vidrio.....	39
5.3.1. Procesos de fabricación.....	40
6. Proceso de fabricación de la piedra.....	42
6.1. Mezcla de ingredientes.....	43
6.2. Proyección mezcla.....	44
6.3. Desencofrado.....	48
6.4. Curado.....	49
7. Ensayos.....	50
7.1. Resistencia a flexión.....	50
7.1.1. Procedimiento y resultados ensayo a flexión.....	52
7.2. Densidad aparente y absorción de agua.....	64
7.2.1. Procedimiento y resultados del ensayo.....	65
7.3. Dureza Knoop.....	70
7.3.1. Procedimiento y resultados del ensayo.....	72
7.4. Porosimetría por inyección de Mercurio.....	80
7.5. Densidad absoluta en picnómetro de helio.....	86

7.6. Microscopía digital. ....	88
7.6.1. Procedimiento y resultados. ....	88
8. Análisis de resultados. ....	93
9. Conclusiones.....	98
9.1. Español.....	98
9.2. English .....	100
10. Bibliografía.....	102
11. Normativas .....	104
Anexos.....	106

## Índice de figuras

Figura 3.1. Sistema Colburn-Libbey-Owens de estirado de vidrio plano. ....	18
Figura 3.2. Sistema Fourcault de estirado de vidrio plano. ....	19
Figura 3.3. Sistema Pittsburg de estirado de vidrio plano. ....	19
Figura 3.4. Procedimiento Bicheroux de colado discontinuo.....	20
Figura 3.5. Procedimiento Boudin de colado continuo. ....	20
Figura 3.6. Procedimiento Pilkington de fabricación de vidrio laminado armado.....	21
Figura 3.7. Procedimiento de flotado. ....	22
Figura 4.1. Transporte de árido... ..	24
Figura 4.2. Almacenamiento.....	24
Figura 4.3. Curva granulométrica arena africana. ....	25
Figura 4.4. Máquina trituradora de mandíbulas. ....	27
Figura 4.5. Máquina trituradora de rodillos.....	28
Figura 4.6. Disposición de tamices.....	28
Figura 4.7. Paquetes para almacenamiento del vidrio según tamaño .....	29
Figura 4.8. Balanza.....	30
Figura 4.9. Arena de vidrio mezclada.....	31
Figura 5.1. Panel sandwich .....	34
Figura 5.2. Stud frame .....	34
Figura 5.3. Lámina rebordeada.....	35
Figura 5.4. Placa simple .....	35
Figura 5.5. Panel nervado .....	35
Figura 5.6. Fundición directa .....	40
Figura 5.7. Fundición indirecta.....	40
Figura 5.8: Bushing con doble plato base .....	41

Figura 5.9. Salida del vidrio fundido de las boquillas.....	41
Figura 6.1. Diferentes lotes de piedra.....	42
Figura 6.2. Moldes de madera .....	42
Figura 6.3. Batidora (vista lateral).....	44
Figura 6.4. Batidora (vista frontal).....	44
Figura 6.5. Mezcla hacia la máquina de proyección. ....	45
Figura 6.6. Malla de protección.....	45
Figura 6.7. Pistola de proyección .....	45
Figura 6.8. Proyección sin fibra de vidrio. ....	46
Figura 6.9. Proyección con fibra de vidrio.....	46
Figura 6.10. Enrasar muestras con cuchara .....	47
Figura 6.11. Homogeneizar muestras con cepillo .....	47
Figura 6.12. Molde para mezcla sobrante.....	47
Figura 6.13. Desencofrado.....	48
Figura 6.14. Piezas a la mitad.....	48
Figura 6.15. Curado.....	49
Figura 7.1. Disposición de la probeta sobre los rodillos de carga. ....	51
Figura 7.2. Máquina de ensayos mecánicos Shimadzu Autograph .....	52
Figura 7.3. Pie de Rey o calibrador.....	53
Figura 7.4. Comienzo del ensayo .....	55
Figura 7.5. Pieza doblada y agrietada durante el ensayo de flexión.....	55
Figura 7.6. Piezas seccionadas tras el ensayo.....	55
Figura 7.7. Aspecto de las fibras de vidrio en la piedra. ....	56
Figura 7.8. Ajuste para obtener la pendiente, probeta C.1. ....	58
Figura 7.9. Gráfica de fuerza VS deflexión, serie A . ....	59
Figura 7.10. Gráfica de fuerza VS deflexión, serie B. ....	60

Figura 7.11. Gráfica de fuerza VS deflexión, serie B corta .....	61
Figura 7.12. Gráfica de fuerza VS deflexión, serie C .....	62
Figura 7.13. Gráfica de fuerza VS deflexión, serie D. ....	63
Figura 7.14. Balanza Pioneer OHAUS.....	64
Figura 7.15. Muestras representativas. ....	65
Figura 7.16. Pesada.....	65
Figura 7.17. Muestras en el horno .....	65
Figura 7.18. Muestras en tanque vacío. ....	66
Figura 7.19. Piedras cubiertas de agua. ....	67
Figura 7.20. Pesada hidrostática. ....	68
Figura 7.21. Indentador Knoop y su indentación .....	70
Figura 7.22. Microdurómetro Struers Duramin -50 .....	71
Figura 7.23. Struers Labapol – 5 . ....	71
Figura 7.24. Struers SiC-Paper 800. ....	72
Figura 7.25. Paños para pulido. ....	72
Figura 7.26. Cuadrado para ensayo de dureza.....	72
Figura 7.27. Máquina de corte.....	73
Figura 7.28. Corte de la piedra. ....	73
Figura 7.29. Rascador de vidrios.....	73
Figura 7.30. Cera desmoldeante. ....	74
Figura 7.31. Poliéster y catalizador. ....	74
Figura 7.32. Moldes circulares .....	74
Figura 7.33. Secado en los moldes .....	75
Figura 7.34. Piezas desmoldeadas .....	75
Figura 7.35. Diagrama de distribución de dureza, serie A. ....	78

Figura 7.36. Diagrama de distribución de dureza, serie B. ....	78
Figura 7.37. Diagrama de distribución de dureza, serie C.....	79
Figura 7.38. Diagrama de distribución de dureza, serie D.....	79
Figura 7.39. Líquidos sobre una superficie sólida.....	80
Figura 7.40. Líquidos que no mojan la superficie .....	81
Figura 7.41. Fuerzas aplicadas mecánicamente.....	81
Figura 7.42. Curva de intrusión acumulativa VS presión.....	83
Figura 7.43. Curva de intrusión diferencial VS tamaño de los poros.....	84
Figura 7.44. Picnómetro de helio.....	87
Figura 7.45. Microscopio óptico digital Dino-Lite .....	88
Figura 7.46. Serie A, sin pulir .....	89
Figura 7.47. Serie B, sin pulir.....	89
Figura 7.48. Serie C, sin pulir.....	90
Figura 7.49. Serie D, sin pulir .....	90
Figura 7.50. Serie A, pulida.....	91
Figura 7.51. Serie B, pulida.....	91
Figura 7.52. Serie C, pulida.....	92
Figura 7.53. Serie D, pulida.....	92

## 1. Objetivo

### **Español**

La finalidad de este proyecto es el estudio de la fabricación de piedra artificial sustituyendo los áridos naturales por residuos de vidrio plano, actualmente no reciclable.

Para el desarrollo del mismo es necesario la recolección de cierta cantidad de vidrio plano que fácilmente puede obtenerse en cristalerías y empresas del sector. Luego, tras la producción de la arena de vidrio y una vez fabricada la piedra utilizando el aglomerante correspondiente, se procede a realizar los diferentes ensayos que determinarán las características mecánicas de la misma. En base a los resultados obtenidos, se pueden deducir unas conclusiones referentes a las propiedades y posible viabilidad de la misma en el mercado.

En este estudio, se hará una comparativa de cuatro lotes de piedra diferentes fabricados bajo las mismas condiciones. Dos lotes de piedras se fabrican a partir de áridos naturales procedentes del desierto del Sáhara. En los otros dos lotes se sustituye ese árido por arena de vidrio plano.

Además, se añade fibra de vidrio en uno de los lotes de cada árido, de modo que se pueda estudiar los efectos de la misma sobre la piedra. La piedra fabricada a partir de arena africana y fibra de vidrio (también algunos aditivos) está patentada con el nombre de “Glassydur”, actualmente producida por la compañía Antonio Afonso S.L.

Este trabajo intenta también contribuir con el proceso de reciclaje del vidrio plano, proponiendo su utilización y aprovechamiento en la fabricación de piedra artificial. De este modo, ayuda también a reducir la explotación de canteras de áridos naturales y a reducir vertidos, con el consecuente y positivo desarrollo sostenible.

### **English**

The purpose of this project is to produce artificial stone using flat glass waste, currently not recyclable, instead of natural sand and gravel.

Its development involves recollecting a certain amount of flat glass that can be easily obtained in glassware and similar companies. Then, after producing sand glass and once the stones have been made, several essays will be performed. Thus, we will be able to know its mechanical properties and in addition to predict the possible way out to market.

In this research, four different stone batches, made under the same conditions, will be compared. Two of the four batches are made with sand and gravel from Sahara Desert. The other two are made using flat glass sand.

Besides, fiberglass will be added in two of the batches with different sand and gravel, i.e. in one made with sand from Sahara Desert and in other made with sand glass. So that, the effects of adding fiberglass to the samples will be also studied. The stone made with sand



from Sahara Desert and fiberglass (and some additives) is patented by the name of “Glassydur”, currently produced by the company Antonio Afonso S.L.

Also, this work tries to contribute with the recycling process of the flat glass, proposing its use in the production of artificial stone. Thus, it will help to lower this kind of wastes and to reduce the exploitation of aggregate quarries, with the consequent and positive sustainable development.

## 2. Introducción

Se ha demostrado en estudios anteriores que la utilización de residuos para la fabricación de piedra artificial es viable, obteniéndose unos resultados positivos en cuanto a resistencia, durabilidad y características mecánicas. En estos estudios se han utilizado diferentes tipos de residuos como sustitutos de los áridos y aglomerantes hidráulicos o sintéticos.

El material objeto de estudio en este trabajo son los residuos de vidrio. Se puede encontrar documentado su uso como árido en, por ejemplo, morteros con sustitución total de los áridos naturales por arena de vidrio de envase reciclado [1]. También en la preparación de asfaltos donde se sustituye los áridos de arenas naturales por áridos de vidrio reciclado [2], y en hormigones donde se sustituye parcialmente los áridos naturales [3]. En otros estudios se ha elaborado piedra artificial utilizando residuos de vidrio de envase y como aglomerante resinas poliméricas [4] y en la elaboración de morteros de albañilería con sustitución total de los áridos por arenas de vidrio plano reciclado [5]. Esto demuestra que el vidrio es un sustituto válido a los áridos naturales, y es en lo que se centrará el estudio.

En el presente estudio se trabaja conjuntamente con la empresa del sector Antonio Afonso, S.L. la cual elabora piedra artificial utilizando como árido, arena procedente del desierto del Sáhara y, como aglomerante, cemento puzolánico 42.5R resistente al agua de mar. La finalidad del estudio sería, por tanto, la sustitución de ese árido natural, por arena de vidrio plano de composición granulométrica similar en la fabricación de dicha piedra artificial. Con esta aportación intentaremos verificar esta posible alternativa de utilización de residuos de vidrio plano, además de contribuir en la reducción de estos residuos que actualmente no tienen vía de reciclado específica.

El vidrio plano está compuesto principalmente por sílice (óxido de silicio,  $\text{SiO}_2$ ), caliza (carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$ ) y carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), productos que se encuentran fácilmente en la naturaleza. Los materiales son fundidos a alta temperatura y, una vez homogeneizada la mezcla, vertidos sobre una superficie para que se enfríen. Este material se destina principalmente para la fabricación de vidrios de ventanas, enmarcado de cuadros o lunas de coches.

Actualmente este tipo de vidrio no tiene vía de reciclaje, y es clasificado como residuo de construcción y demolición (RCD). De acuerdo a la definición de residuo incluida en el artículo 2.a) del Real Decreto 105 / 2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, un RCD es cualquier sustancia u objeto que se genera en una obra de construcción y demolición como material no valorizable.

La piedra que se pretende elaborar a partir de vidrio plano reciclado puede tener diversos usos dentro del mundo de la construcción como, por ejemplo, revestimiento de estructuras, elementos decorativos en fachadas e interiores, pavimento o paramento, pudiendo adaptarse a diferentes necesidades. En este trabajo solo se estudiarán las características de la piedra mediante una serie de ensayos. La forma o acabado final que

se quiera dependerá del molde utilizado, colorantes o pigmentos, etc. quedando fuera del objetivo de este proyecto. A través de las referencias [6, 7] de la bibliografía, se puede acceder a la página web de la empresa y de su producto donde se puede obtener más información sobre distintos acabados y formas.

### 3. El vidrio

Se conoce como vidrio [8] a una disolución de varios silicatos de sodio, calcio, plomo, etc. obtenidos por fusión a elevada temperatura. Una vez enfriada la masa adquiere el estado amorfo, es dura, transparente o translúcida, frágil y resistente mecánica y químicamente. A pesar de que a temperatura ambiente los vidrios parecen ser cuerpos sólidos con rigidez mecánica, no pueden ser considerados como tales, ya que no poseen la estructura cristalina que caracteriza y define al estado sólido. Por la estabilidad de su forma los vidrios podrían asimilarse a sólidos, pero desde el punto de vista de su desorden estructural sus semejanzas con los líquidos son mucho mayores.

Se ha estudiado que los vidrios presentan mayor grado de ordenación estructural que los cuerpos amorfos. Esta ordenación se limita a un pequeño entorno alrededor de cada uno de los iones que forman el retículo, a diferencia de la periodicidad de largo alcance que guarda la estructura de los sólidos cristalinos. Por eso, para establecer esta diferencia, se emplea también para los vidrios el nombre de sólidos no cristalinos.

La congelación de una sustancia en estado vítreo se debe al progresivo aumento de la viscosidad que se produce durante su enfriamiento, impidiendo la agrupación ordenada de sus elementos constituyentes para formar una red cristalina. Los vidrios pueden mantenerse indefinidamente a temperatura ambiente sin presentar cristalización debido a que básicamente la alta viscosidad impide su desvitrificación.

#### 3.1 Materias primas para la fabricación del vidrio

Las materias primas utilizadas se clasifican en cuatro grupos:

1. **Vitrificantes.** Son los óxidos formadores de la red del vidrio. Proporcionan sus características principales y son mayoritarios en la composición. Estos son sílice, anhídrido bórico y anhídrido fosfórico.
2. **Fundentes.** Son los óxidos modificadores de la red que van a facilitar la formación del vidrio reduciendo la temperatura de fusión, a costa de una reducción en la calidad del vidrio. Algunos de estos óxidos son: óxido de sodio, de potasio, de litio, etc.
3. **Estabilizantes.** Aportan una mayor viscosidad y estabilidad química. Mejoran la resistencia mecánica y brillo, reparando los daños de la red. Algunos son el óxido de aluminio, óxido de cinc, óxido de plomo, etc.
4. **Componentes secundarios.** No son fundamentales, pero sí importantes para conseguir determinadas características, como colorantes, decolorantes, oxidantes, fluidificantes, etc.

### 3.2 Proceso de elaboración del vidrio

El proceso de elaboración del vidrio comienza con la introducción en el horno de la mezcla y termina con la salida del producto frío a la desembocadura del túnel o del arca de recocido. El proceso se puede dividir en seis etapas:

- 1- Reacción de los componentes y formación del vidrio
- 2- Disolución del excedente de sílice sin reaccionar
- 3- Afinado y homogeneización
- 4- Reposo y acondicionamiento térmico
- 5- Conformación
- 6- Enfriamiento y recocido

Las cuatro primeras etapas, donde tiene lugar la fusión del vidrio, ocurren dentro del horno de acuerdo a un programa térmico establecido que, a rasgos generales, comprende un aumento gradual de la temperatura hasta unos 1550°C, seguido de un enfriamiento y de una fase de estabilización en el que la masa vítrea debe alcanzar una estricta homogeneidad térmica para su posterior conformación.

#### 3.2.1 Fabricación del vidrio [9].

Vidrio plano se considera a todo aquél que haya sido conformado laminarmente. Las láminas no tienen que ser estrictamente planas, sino que pueden estar curvadas o presentar un relieve impreso en su superficie. Por el contrario, se considera como vidrio hueco al vidrio moldeado con formas tales que permiten contener productos, como botellas, tarros, frascos, aplicaciones artísticas o decorativas.

En la siguiente tabla (tabla 3.1) se puede clasificar el vidrio plano según el método de fabricación empleado:

Procedimiento	Tipo de vidrio	Sistema
<b>Soplado a boca</b>	Coronas, manchones	Lubber, Sievert
<b>Soplado – estirado mecánico</b>	Manchones	Lubber, Sievert
<b>Estirado mecánico</b>	Lámina continua	Colburn-Libbey-Owens, Fourcault, Pittsburgh
<b>Laminado discontinuo</b>	Láminas discontinuas	Bicheroux
<b>Laminado continuo</b>	Lámina continua, impresa, armada o pulida	Boudin, Ford, (D.P.C) (twin), (Delloye), (Duplex), (Jusant)
<b>Flotado</b>	Lámina continua pulida	Pilkington

*Tabla 3.1. Procedimientos de fabricación del vidrio plano. [9]*

Los métodos descritos en la tabla anterior hacen referencia a la fabricación del vidrio plano, pero son los cuatro últimos los que se utilizan hoy en día para su producción, por lo que a continuación se detalla más información sobre los mismos. No obstante, cabe

destacar que es el procedimiento de flotado el más empleado actualmente y mediante el cual se consiguen resultados de mayor calidad, suponiendo más del 90 % de la producción mundial actual.

### 3.2.2 Estirado mecánico

El objetivo era conseguir extraer verticalmente una lámina de vidrio, a partir de un baño de vidrio fundido que, inmediatamente después de emerger, fuese cuidadosamente enfriada para evitar su deformación.

#### 3.2.2.1 Sistema Colburn – Libbey – Owens

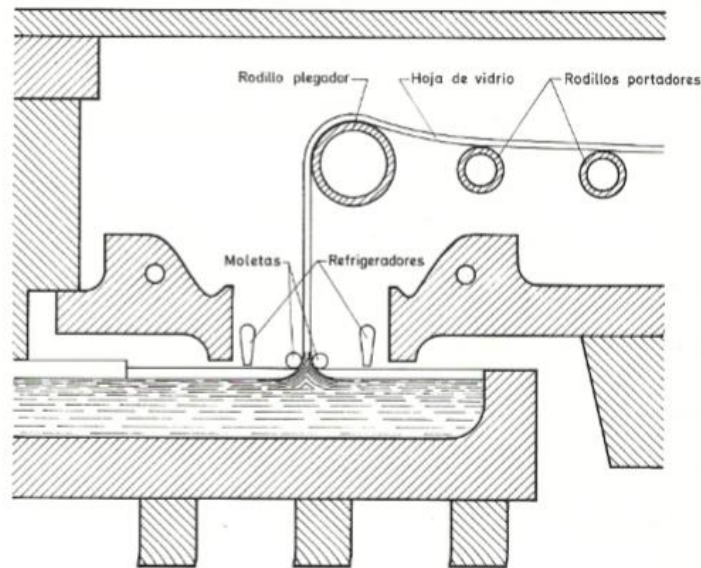


Figura 3.1. Sistema Colburn-Libbey-Owens de estirado de vidrio plano. [9]

A partir del vidrio fundido, se extrae una lámina por medio de dos pares de rodillos dentados refrigerados, ejerciendo sobre ella una tracción ascendente. La hoja disipa parte de su calor al circular entre dos pantallas metálicas refrigeradas y, seguidamente, es doblada sobre un rodillo de acero, para continuar su recorrido mientras se va enfriando al deslizarse sobre una serie de rodillos forrados de asbesto.

#### 3.2.2.2 Sistema Fourcault

La lámina de vidrio surge del vidrio fundido, a partir de un distribuidor (rejilla de material refractario) que se encuentra parcialmente sumergido (figura 3.2) y que, por efecto de la presión hidrostática del vidrio, se forma una cresta de donde se extrae la lámina de vidrio.

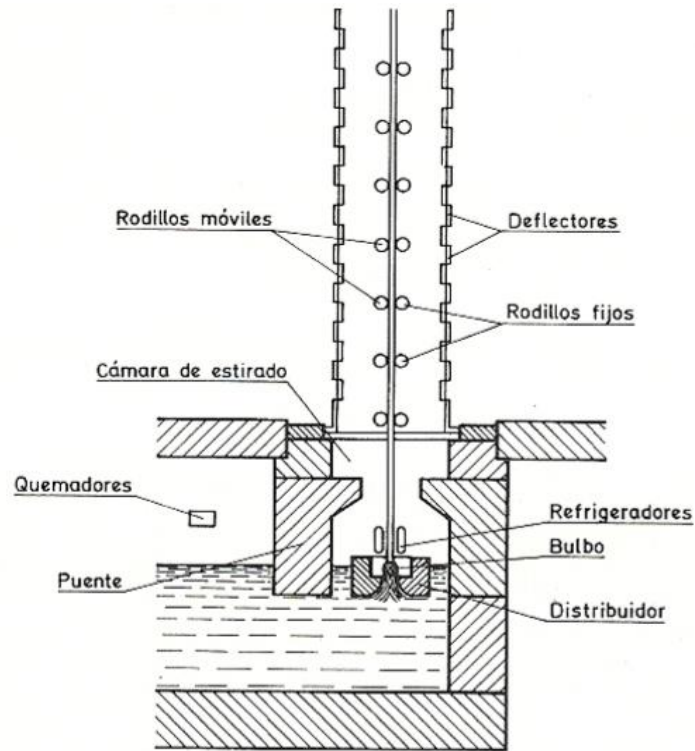


Figura 3.2 Sistema Fourcault de estirado de vidrio plano. [9]

### 3.2.2.3 Sistema Pittsburg

Similar al procedimiento anterior, pero en este caso no se dispone de distribuidor. Se ha sustituido por una barra de estirado, que se encuentra completamente sumergida en el vidrio y situada debajo de la línea de estirado (figura 3.3). Esta pieza actúa como pantalla térmica, protegiendo la lámina de vidrio en el inicio y manteniendo una temperatura más elevada, reduciendo el riesgo de desvitrificaciones.

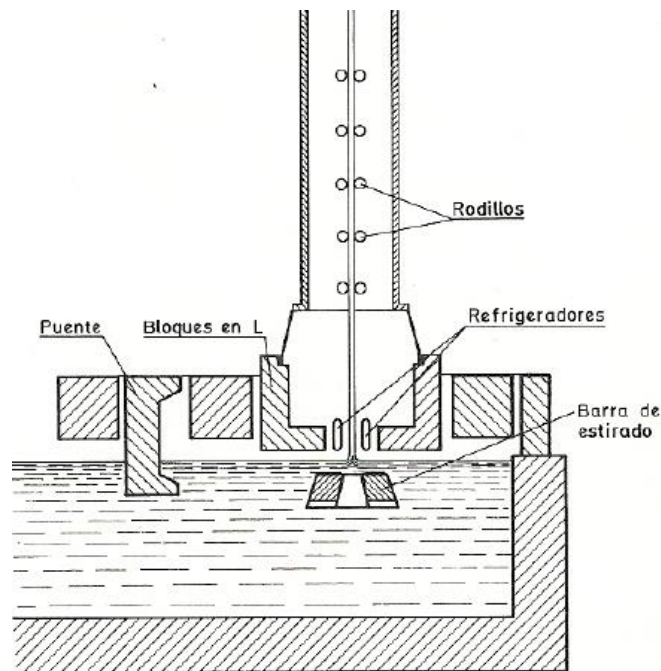


Figura 3.3: Sistema Pittsburg de estirado de vidrio plano. [9]

El procedimiento Pittsburg es el que proporciona mejor calidad y rendimiento de los métodos descritos de estirado mecánico del vidrio.

### 3.2.3 Colado discontinuo

Este procedimiento consiste en colar el vidrio fundido contenido en un crisol basculante entre dos cilindros laminadores (figura 3.4). Con este método se obtienen láminas de poco espesor y más uniformes, facilitando la posterior operación de desbaste y pulido y reduciendo el tiempo de la misma.

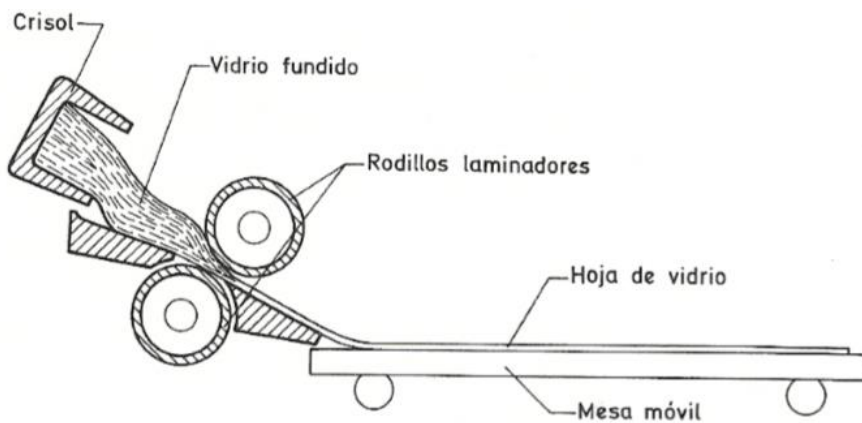


Figura 3.4: Procedimiento Bicheroux de colado discontinuo [9]

### 3.2.4 Laminado continuo

El vidrio fundido contenido en el horno, sale al exterior por rebosamiento, tras haber sido afinado. Se desliza por una pieza refractaria situada antes de los rodillos laminadores y, seguidamente, circula a través de éstos repartiéndose uniformemente la masa de vidrio. La lámina de vidrio conformada avanza sobre una serie de rodillos donde se produce el recocido y enfriamiento.

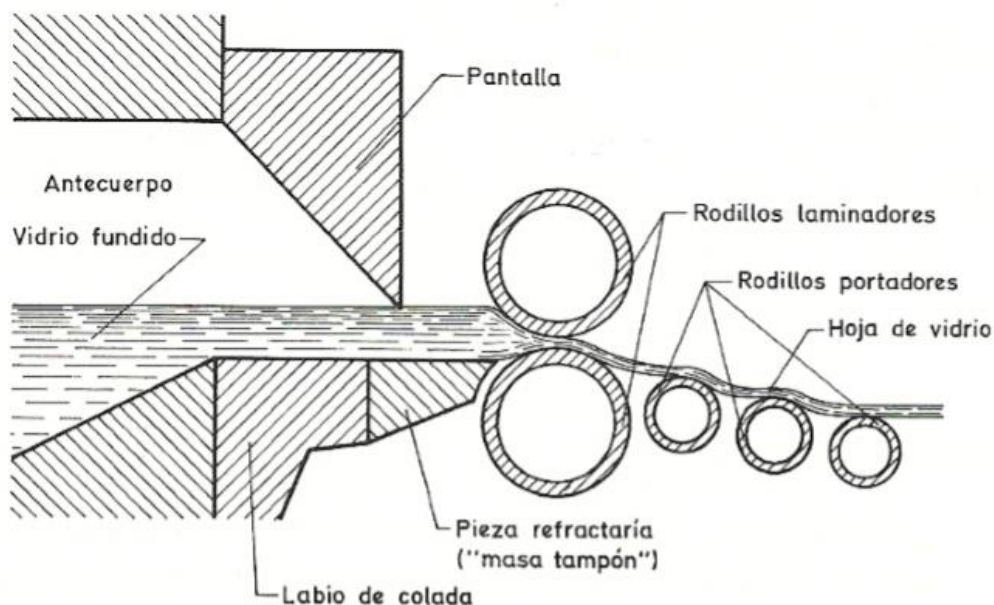


Figura 3.5: Procedimiento Boudin de colado continuo. [9]



Dentro del vidrio laminado existen variantes, como pueden ser el laminado impreso, el laminado armado o el laminado pulido. En el laminado impreso el rodillo inferior lleva gravado sobre su superficie el dibujo que se desea grabar sobre la lámina de vidrio en estado plástico. En el laminado armado se pretende embutir una malla metálica sobre el vidrio en estado viscoso, para mantener unidos los fragmentos de vidrio en caso de rotura. La figura 3.6 muestra el método Pilkington de laminado armado, donde el vidrio sufre dos laminaciones consecutivas, entre las cuales recibe la tela metálica.

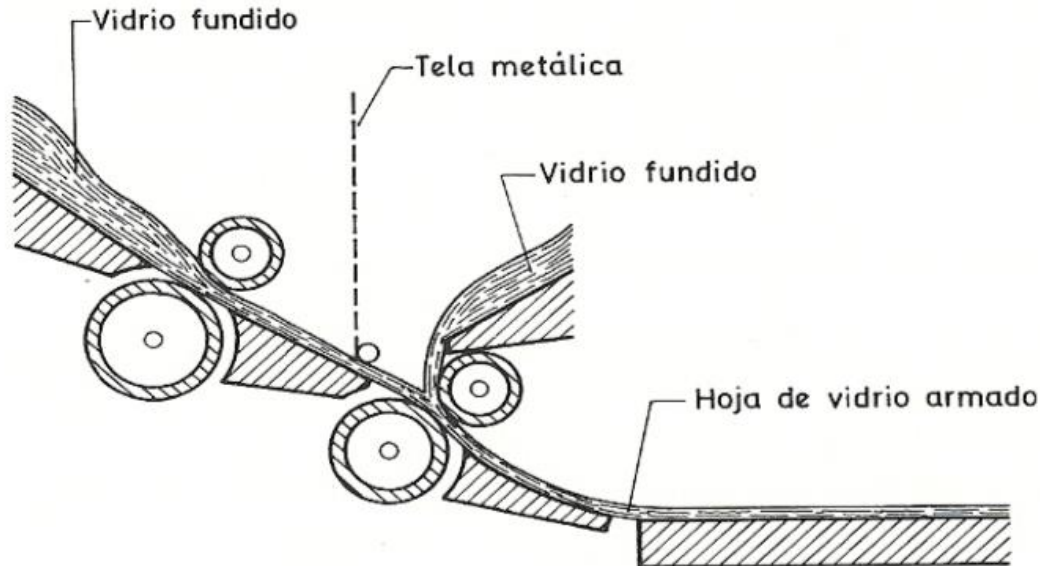


Figura 3.6: Procedimiento Pilkington de fabricación de vidrio laminado armado. [9]

Tras el proceso de colado y laminado, el vidrio resulta traslúcido y con numerosas irregularidades superficiales. Por tanto, es necesario someter posteriormente al vidrio a un proceso de desbaste y pulido para conseguir la calidad superficial requerida. Sin embargo, este sistema requiere una elevada inversión económica, rigurosas exigencias de funcionamiento, grandes costes de mantenimiento y un alto consumo energético.

### 3.2.5 Flotado

La fabricación de vidrio plano mediante el proceso de flotado o “Float” consiste en una lámina de vidrio en estado de fusión que flota a lo largo de una superficie de estaño líquido. En el baño, la masa vítrea permanece confinada en un medio carente de oxígeno, en una atmósfera químicamente controlada, a una temperatura suficientemente elevada y durante un tiempo prolongado para eliminar irregularidades y nivelar sus superficies hasta volverlas planas, paralelas y brillantes. Debido a que la superficie del estaño es plana, la de la lámina de vidrio obtenida también lo es. La lámina sigue flotando sobre el estaño mientras se va enfriando lentamente, hasta que con las superficies lo suficientemente endurecidas, emerge del mismo y continúa avanzado sobre rodillos sin que éstos afecten a su cara inferior. Mediante este procedimiento se puede obtener directamente una lámina de vidrio pulida por ambas caras, sin necesidad de ser sometida a ninguna operación posterior.

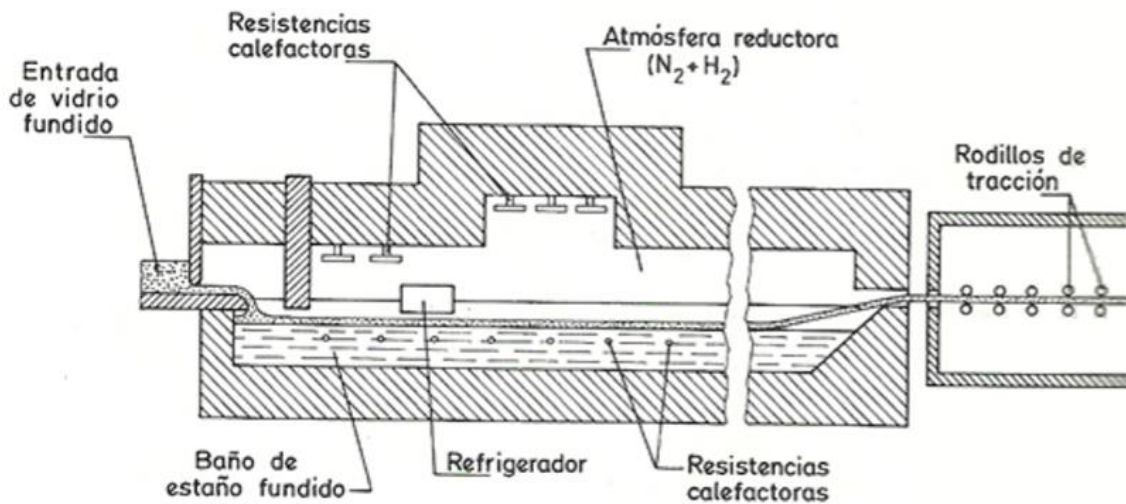


Figura 3.7: Procedimiento de flotado. [9]

### 3.3 Reciclado del vidrio

El vidrio es un material habitual, con el que tenemos contacto diariamente. Se fabrica a partir de un recurso natural procedente de minas de arena. A lo largo del tiempo, ha demostrado ser uno de los materiales de envase más respetuoso con el medio ambiente. Este tipo de vidrio es completamente reciclable y en un número ilimitado de veces sin perder propiedades o prestaciones. Esto resulta ventajoso tanto de cara al aspecto ambiental como económico, al permitir ahorrar recursos, energía y reducir la contaminación. Se requiere menos energía para fundir el vidrio que las materias primas y, por lo tanto, menos gases de efecto invernadero son enviados a la atmósfera. Además, menor consumo de los recursos naturales.

Otras posibilidades de reciclado del vidrio son:

- Árido en la fabricación de mortero o piedra artificial.
- Árido para la producción de asfalto de carreteras.

El vidrio plano, sin embargo, no entra en el procedimiento de reciclado del denominado vidrio hueco (envases), por lo que cuando ya no es útil, este material se retira y clasifica como residuo de construcción y demolición (RCD), vertiéndose en zonas aptas para ello.

El 40% de los residuos en Europa es originado por la industria de la construcción. El destino común de los RCD eran los vertederos o escombreras. La continua saturación de estos espacios, más los obstáculos que hallan los municipios para lograr la habilitación de vertederos nuevos, han provocado la adopción de medidas para el tratamiento de este tema. En 2001, se publicó el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (PNRCD) 2001-2006, en el que se fijan las bases para una gestión más sostenible de los RCD.

En el Informe de Sostenibilidad Ambiental (ISA) del Plan Nacional Integrado de Residuos (2008 – 2015) (PNIR), cuya función es evaluar los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente, se resume que de los casi 40 millones de

toneladas de RCD que se producen anualmente, se someten a tratamiento de valorización menos de 15 millones (37 %). Pero finalmente, de forma directa o como rechazo, acaban en el vertedero más de 35 millones de toneladas, lo cual supone más del 90 % generado. Una cantidad significativa todavía hoy en puntos de vertido incontrolado. El balance de materiales refleja que efectivamente se valoriza menos de 5 millones de toneladas, de las que se obtienen unos 3 millones de toneladas de árido reciclado.

Una de las tareas que garantizan un resultado favorable en todo el proceso, es la separación y recogida selectiva de los residuos. El objetivo es facilitar el reciclaje y la reutilización de los residuos. Cuando se finaliza el proceso de separación, se buscan los que son valorizables e integrables al circuito de reciclaje, y los que no, se destinan al vertedero.

Desde la etapa de proyecto, tienen que tenerse en cuenta criterios constructivos y funcionales aptos que impulsen el uso de técnicas constructivas y materiales que sirvan para su valorización. La reutilización, por sus beneficios económicos y ambientales, es la mejor manera para valorizar los residuos, mediante la recuperación de elementos constructivos completos reutilizables con la menor cantidad de alteraciones.

Es muy importante integrar criterios de construcción que faciliten el uso de materiales que generen residuos fácilmente valorizables, en la gestión de los RCD. Las acciones de derribo de un edificio que posibilitan una gran recuperación de materiales, se denominan deconstrucción. Las edificaciones nuevas deben ser diseñadas para una deconstrucción, no para una demolición. De esta manera se impedirán canalizaciones de servicios empotrados, se utilizarán techos falsos, suelos flotantes, etc.

Todos los RCD se pueden reciclar, excepto los que necesitan tratamiento específico. Los generados en la fabricación se reciclan de un modo más fácil que los de la demolición. Reciclar el vidrio en este caso resulta muy simple, así sea el proveniente del proceso de fabricación como el de la puesta en obra, por medio de la fusión. Suelen terminar en vertedero porque no hay circuitos de reciclaje. Son menos fáciles de reciclar los que están formados por varias hojas y los de color.

El precio que la entidad explotadora cobre por la eliminación de los residuos en el vertedero cubrirá, como mínimo, los costes que ocasionen su establecimiento y explotación, en el caso de vertederos de residuos peligrosos, el seguro de responsabilidad civil, por la cantidad que determine la administración autorizante; además, antes de que den comienzo las operaciones de eliminación, se depositarán las fianzas o garantías exigidas en la Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y suelos contaminados, y en sus normas de desarrollo, en la forma y cuantía que en la autorización se determine, así como los costes estimados de la clausura y el mantenimiento posterior de la instalación y el emplazamiento durante el plazo que fije la autorización.

En el proyecto de Alejandro Orta Rodríguez, “residuos de construcción y demolición (RCD). Una propuesta de reciclado: obtención de materiales cerámicos a partir de residuos de vidrio plano”, se encuentra una amplia documentación sobre los RCD. [10]

## 4. Áridos para piedra artificial

Este proyecto pretende sustituir árido de origen natural por arena de vidrio plano reciclado, en la fabricación de piedra artificial. De este modo contribuimos a un desarrollo sostenible, proponiendo una vía de reciclado a un material que de momento no la tiene, y además contribuyendo a una menor explotación de recursos naturales y menor contaminación por emisión de gases contaminantes durante la extracción y transporte de dicho árido.

El proceso de producción de arena de vidrio será fácil y rápido, ya que actualmente los negocios que generan residuos de vidrio plano tienen que pagar para verter los residuos y generan grandes cantidades continuamente.

Se elabora, por tanto, nuestra propia arena de vidrio plano de distribución granulométrica idéntica a la arena africana que actualmente la compañía utiliza en la fabricación de su piedra. Así se garantiza que ambas piedras sean las más similares posible para poder contrastar mejor las diferencias tras los ensayos que se efectuarán.

### 4.1 Arena africana.

Se trata del árido que el Grupo Antonio Afonso utiliza en la fabricación de su piedra artificial, una arena amarilla de grano fino y baja presencia de cloruros, lo que hace especial su uso para la construcción.

La extracción de la arena tiene lugar en el desierto de El Aaiún, con un control de calidad en todos los pasos del proceso, donde se comienza por asegurar la localización de las materias primas. Mediante barcos areneros con capacidad de carga de más de 1300 toneladas, se transporta desde el puerto de El Aaiún hasta Canarias (figura 4.1). Luego, se descarga en los almacenes de las empresas encargadas de su comercialización (figura 4.2).



Figura 4.1. Transporte de árido [11].



Figura 4.2. Almacenamiento [11].

Las posibles aplicaciones de esta arena son:

- Hormigones
- Morteros
- Construcción en general
- Prefabricados industriales
- Césped artificial
- Filtros de depuradoras industriales y piscinas
- Campos de golf
- Pistas de tenis y drenaje
- Pavimentos

Esta arena es distribuida por Proyecto Dover S.L.

#### 4.1.1. Granulometría de la arena.

Para poder producir nuestra arena de vidrio plano es necesario conocer de antemano la distribución granulométrica de la arena amarilla utilizada por la compañía. Para ello, nos basamos en la curva granulométrica de la misma (figura 4.3). La información fue facilitada por la propia empresa que se encarga de su comercialización en Tenerife.

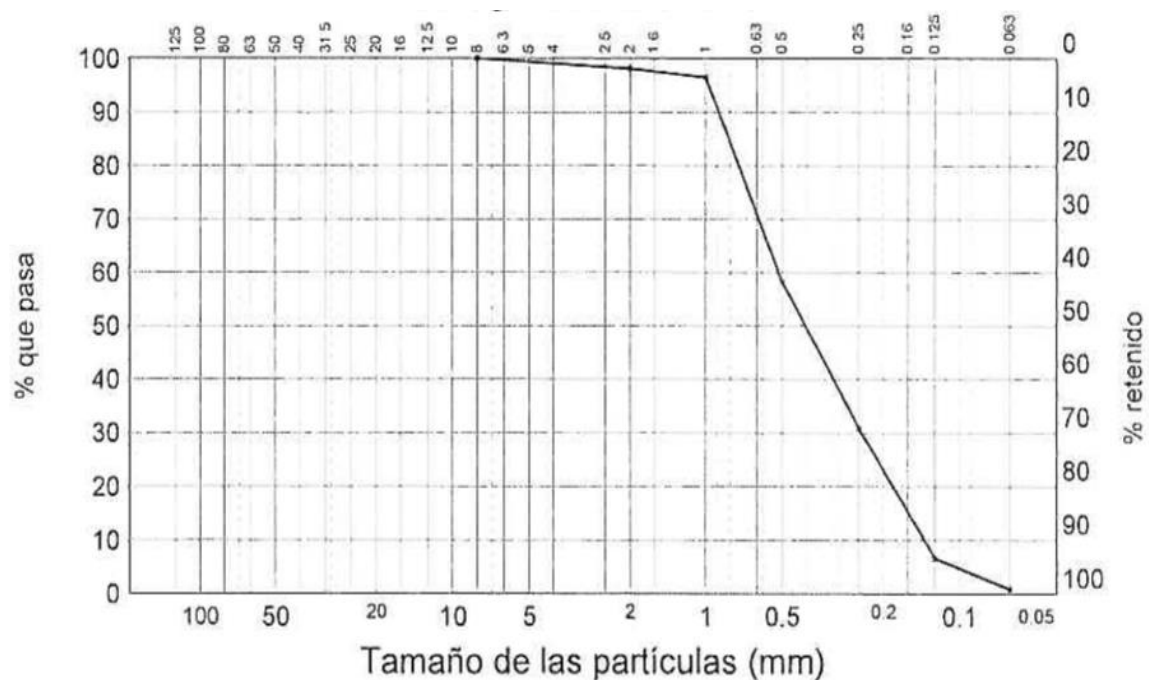


Figura 4.3. Curva granulométrica arena africana [fuente: Proyecto Dover, S.L.].

En la siguiente tabla se representa el porcentaje de partículas que atraviesan el tamiz correspondiente:

Tamiz (mm)	Pasa (%)
8	100
2	98
1	96
0,5	58
0,25	31
0,125	7
0,063	0,9

Tabla 4.1: Distribución granulométrica de la arena africana.

## 4.2 Procesamiento del vidrio

El proceso llevado a cabo para obtener la arena de vidrio plano se puede resumir en los siguientes pasos:

- 1) Búsqueda y recolección de cristales.
- 2) Selección y lavado del vidrio.
- 3) Trituración.
- 4) Tamizado.
- 5) Almacenamiento e inventariado.

### 4.2.1 Búsqueda y recolección de cristales

Para elaborar la arena de vidrio plano se requiere como primer paso buscar el vidrio necesario. Para ello se ha procedido a la búsqueda en diferentes empresas del sector. Cabe destacar la aportación realizada por Cristalería Drago y Criscasa (ambas situadas en Icod de los Vinos). Todo este vidrio puede tener diferente procedencia, como el desmantelamiento de ventanas y mamparas, sobras de vidrio nuevo, lunas de coches o muebles. Cuando se dispuso de una cantidad razonable, se lleva al laboratorio para el posterior procesamiento del mismo.

### 4.2.2 Selección y lavado del vidrio

Entre todo el vidrio, había partes de espejos, vidrio opaco o con tinte, que contienen fracciones de otros minerales que pueden alterar los resultados. Por tanto, sólo se utilizó vidrio plano transparente y liso en la elaboración de la arena.

Una vez clasificado, se procedió con el lavado del mismo para eliminar restos de polvo o suciedad. Luego, el secado se realizó una parte al aire y otra parte con ayuda de papel.

Tras esto, lo más adecuado habría sido introducir el vidrio en una estufa a  $70 \pm 5$  °C, hasta peso constante, de acuerdo a la norma UNE-EN 722-11. “Método de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 11: Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería, en hormigón, piedra natural y artificial,



y de la tasa de absorción de agua inicial de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería”. Pero por falta de medios, se ha saltado este paso.

#### 4.2.3 Trituración

Una vez seleccionados los materiales, se deben acondicionar los mismos para la elaboración de la arena de vidrio. Por ello, lo que se debe hacer es reducir su tamaño hasta el deseado. Primero, para aquellas muestras de mayor tamaño, se hacen pasar a través de una máquina trituradora de mandíbulas (Figura 4.4). Esta máquina ejerce una acción mecánica, haciendo que una cara de la mandíbula choque contra la otra, entre las cuales circula el vidrio. Así se consigue romper el vidrio y reducirlo a un tamaño considerablemente pequeño.



*Figura 4.4. Máquina trituradora de mandíbulas [4].*

Tras esto, se hace circular el vidrio a través de una segunda máquina, la trituradora de rodillos (Figura 4.5). Como su propio nombre indica, está compuesta por dos rodillos que giran uno próximo al otro y entre los cuales se hace circular el vidrio. De esta manera, se consigue un tamaño de partícula mucho menor que con la anterior. Los tamaños de partícula oscilan entre 4 mm y hasta 0,063 mm e incluso inferior.



Figura 4.5 Máquina trituradora de rodillos [4].

#### 4.2.4. Tamizado

Una vez triturado el vidrio, se procedió al tamizado del mismo, con objeto de separar la arena en sus diferentes tamaños. Para ello se vierten pequeñas cantidades de vidrio sobre los tamices (Figura 4.6), dispuestos de manera vertical y por orden descendente de tamaño, según indica la figura 4.6. Esto sería en el siguiente orden: 4 mm / 2 mm / 1 mm / 0,5 mm / 0,250 mm / 0,125 mm / 0,063 mm.



Figura 4.6. Disposición de tamices [4].



El tamizado se llevó a cabo en seco y de forma manual, de modo que era necesario agitar manualmente el sistema de tamices para que la arena de vidrio circule a través de ellos y quede retenida en el tamiz con el tamaño de partícula correspondiente. Así se logra separar granulométricamente el material. Las fracciones de vidrio que no atravesaron el primer tamiz de 4 mm fueron desechadas o se volvieron a hacer pasar por la trituradora de rodillos.

#### 4.2.5 Almacenamiento e inventariado

Una vez el vidrio se tamizaba, era necesario separarlo según su tamaño de partícula. Por ello, a medida que se tamizaba, se almacenaban en pequeños paquetes de plástico, previamente etiquetados (Figura 4.7).



Figura 4.7. Paquetes para almacenamiento del vidrio según tamaño [Fuente propia].

Cada uno de estos paquetes lleno pesa en torno a 2 kg. Para la elaboración de nuestra piedra era necesario unos 25 kg de arena de vidrio, separada según la tabla 4.1 que representa la distribución granulométrica de la misma. Para asegurar esta cantidad, se ha fabricado más arena de vidrio de la necesaria, teniendo en cuenta los tamaños de partícula de los que se requieren mayor cantidad, es decir, los que representan un mayor porcentaje en la distribución granulométrica de la arena africana.

Una vez separada toda la arena, se ha transportado hacia el lugar donde la empresa está ubicada (en el polígono industrial de Las Almenas, en Icod de los Vinos). Allí se ha mezclado la arena de vidrio, atendiendo a la distribución granulométrica, dada en la tabla 4.2.:

Tamiz (mm)	Retenido (%)	Acumulado (%)	Pasa (%)	Peso (kg)	Porcentaje
4	0	0	100	0	
2	2	2	98	0.5	2%
1	2	4	96	0.5	2%
0.5	38	42	58	9.5	38%
0.25	27	69	31	6.75	27%
0.125	24	93	7	6	24%
0.063	6.1	99.1	0.9	1.525	6%
<63	0.9	100	0	0.225	1%
<b>Total</b>				25	100%

Tabla 4.2.: Distribución granulométrica arena de vidrio.

Con ayuda de una balanza, como la de la imagen 4.8, se procede a pesar la arena de vidrio contenida en cada uno de los paquetes, para posteriormente verter la cantidad correspondiente en un recipiente de mayor tamaño y poder así obtener los 25 kg de arena de vidrio mezclada con las diferentes granulometrías. La precisión de la balanza es de  $\pm 1$  gr.



Figura 4.8. Balanza [Fuente propia].

El procedimiento seguido para mezclar las diferentes fracciones de arena de vidrio ha sido el siguiente:

1. Colocar un recipiente sobre la balanza y tararla, de modo que el peso de dicho recipiente sea descontado.
2. A continuación, se vierte cada uno de los paquetes de la figura 4.7 sobre el recipiente cuyo peso había sido previamente descontado. Esta operación se realiza primero con la arena de vidrio contenida en un solo paquete, se obtiene el valor de su masa y seguidamente se vierte sobre un recipiente de mayor tamaño como el de la figura 4.9. Así con cada uno de los paquetes hasta obtener la cantidad correspondiente a cada tamaño dada en la tabla 4.2. Por ejemplo, si al pesar un

paquete de tamaño de árido de 0.5 mm se obtiene 2.0 kg de masa, éste se vierte sobre el recipiente de mayor tamaño y quedan pendiente  $9.5 - 2.0 = 7.5$  kg, repitiéndose la operación hasta obtener los 9.5 kg correspondientes a ese tamaño.

3. La figura 4.9 muestra la arena de vidrio plano una vez se ha obtenido la masa de cada uno de los paquetes y se han mezclado atendiendo a la tabla 4.2.
4. Por último, se cubre el recipiente con un plástico para conservar la arena hasta el día de elaboración de la piedra.



*Figura 4.9. Arena de vidrio mezclada [Fuente propia].*

El hecho de necesitar 25 kg de arena se debe al método empleado en la fábrica, detallado en el capítulo 6. Se trata de un método de proyección, en donde un chorro de mortero pulverizado con aire a presión es proyectado sobre unos moldes que definirán su forma final. El equipo de proyección necesita una cantidad mínima de material para que pueda funcionar con normalidad sin riesgo de atasco o averías.

### **4.3 Producción de arena de vidrio plano a nivel industrial**

El proceso anteriormente descrito para producción de arena de vidrio plano no resultaría viable en caso de requerirse grandes cantidades. En este caso, hay mucha mano de obra y el proceso de tamizado es manual. Por ello, en caso de que el vidrio plano pudiera ser reutilizado como árido en morteros o piedra artificial para la construcción, se debería de mejorar y agilizar el proceso de producción de dicha arena de vidrio plano.

Se sugiere, por tanto, un proceso a nivel industrial automatizado y eficiente. Dicho proceso comienza con la recolección de las materias primas, en este caso, el vidrio plano procedente de cristalerías que generan continuamente deshechos, desmantelamiento de ventanas, muebles, lunas de viejos coches, etc. Todo el vidrio podría ser fácilmente transportado en camiones hacia la fábrica y almacenado en contenedores. Para evitar que la futura arena de vidrio contenga impurezas de otros elementos, solo se recogería el

vidrio plano transparente o translúcido evitando los espejos o tintados. En este caso se podría estudiar si existiera inconveniente o no.

De esos contenedores donde se almacena el vidrio, pasan a una cinta transportadora donde realmente daría comienzo con el proceso de fabricación de arena de vidrio. El primer paso en la industria sería lavar el vidrio para evitar suciedad o impurezas que puedan contaminar el producto final. Para ello, a medida que el vidrio avanza por la cinta, entra en un tren de lavado especialmente diseñado para este propósito. De forma continua, se secaría y entraría en un horno que elimine los restos de humedad de modo que el vidrio mantenga su masa constante tras 24 horas entre pesadas.

El siguiente paso en el proceso consistiría en triturar el vidrio para obtener la arena de vidrio de diferentes tamaños. Para ello se emplea una máquina diseñada y adaptada al proceso de producción que, en primer lugar, triture el vidrio de modo que se obtengan fracciones muy pequeñas y, seguidamente, se hagan circular esos fragmentos a través de una segunda etapa de trituración que termine la transformación del vidrio en árido de diferentes tamaños. La arena de vidrio volvería a pasar por un horno que elimine cualquier posible resto de humedad, evitando así que se apelmace, lo cual dificultaría el siguiente paso correspondiente a la tamización.

De forma continua y automatizada, se haría circular hacia un sistema de tamices, adecuados al proceso, que separarían la arena en los diferentes tamaños. Una vez separada la arena de vidrio en distintas granulometrías, el último paso sería su almacenamiento en recipientes aptos para ello, para su posterior transporte a los lugares donde se requiera.

Lo mejor de utilizar esta arena como árido en el campo de la construcción es que es 100 % ecológica, contribuyendo a un desarrollo sostenible y a una menor explotación de áridos en canteras, reduciendo también la cantidad de residuos que de esta clase se generan. Además, el proceso podría estar alimentado mediante energías renovables, tales como placas solares fotovoltaicas, lo cual contribuye a una menor emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Toda esta información sería conveniente acompañarla de datos, dimensiones, especificaciones de la maquinaria que interviene en el proceso, etc. Lo cual queda fuera del alcance de este proyecto y que podría ser objeto de un trabajo exclusivo de diseño y dimensionado de la instalación requerida.

## 5. Componentes de la piedra artificial

En este trabajo lo que se pretende es buscar una posible vía de reciclado a un material que de momento no la tiene como es el vidrio plano. Para ello, se propone sustituir la arena africana que utiliza la compañía Antonio Afonso S.L para la fabricación de su producto Glassydur por arena de vidrio plano reciclado.

El Glassydur es una piedra artificial fabricada a partir de cemento, árido (arena procedente del desierto del Sáhara), agua y aditivos para la mezcla, combinado con fibra de vidrio que aporta mayor resistencia. Por secreto de patente, no puede revelarse el o los aditivos que utilizan en la mezcla. Estos aditivos van a ayudar en el posterior desencofrado, controlar la evaporación de agua, entre otros beneficios. También se utilizan colorantes para aportar el color deseado al producto final. Por tanto, se puede concluir que este material es un tipo de GRC.

El GRC (Glass Reinforced Concrete) o en español hormigón reforzado con fibra de vidrio es un composite o material compuesto en el que las fibras de vidrio se proyectan sobre una base de cemento en varias capas, creando un material final que reúne las cualidades de ambos. Debido a que la finalidad de las piezas de GRC es la creación de paneles de cara vista, en el mortero se suele emplear hormigón blanco (más claro que el genérico), y arenas de granulometría fina; razón por la que también se le denomina micro-hormigón. También admite el empleo de colorantes en la mezcla. Se ha descubierto que la fibra de vidrio reacciona con los álcalis del hormigón, por lo que se prefiere un hormigón de baja alcalinidad, y se emplea un tipo de fibra de vidrio resistente a los álcalis.

Los procesos de fabricación de GRC son [12]:

- **Procesos de proyección simultánea.** Es un proceso de fabricación mediante el cual obtendremos piezas de GRC reforzadas de forma bidireccional (en el plano). La fabricación consistirá en la proyección de capas que posteriormente se irán compactando entre sí hasta formar el espesor total de la lámina o panel de GRC. Dentro de este método se incluye:
  - Proyección simultánea manual
  - Proyección simultánea automática
  - Proyección simultánea robotizada
- **Procesos de premezcla.** El proceso de premezcla consta, normalmente, de dos etapas. En la primera se mezclan y amasan los componentes del mortero y se adicionan los de vidrio y en la segunda se aplica la mezcla al molde. Por lo general las resistencias obtenidas con los procesos de premezcla son inferiores a las obtenidas por proceso de proyección simultánea.
- **Proceso de colado-vibrado.** Las fases de realización de un colado vibrado son: realización de la premezcla, colado en un molde, vibrado, fraguado, desmoldeo y

curado. Este proceso se emplea para la fabricación de un gran número de piezas tanto ornamentales como arquitectónicas.

- **Proyección de premezcla:** Esta aplicación ha tenido gran aceptación en los últimos años pues el nivel de resistencia que las piezas de GRC adquieren con él está entre las grandes resistencias del GRC procedente de proyección simultánea y las de un GRC procedente de un colado-vibrado.

Como las piezas de GRC se emplean en construcción prefabricada, suelen incorporar además diversos anclajes, normalmente de acero galvanizado, para facilitar su montaje en obra. Estos anclajes pueden adoptar la forma de bulones, raíles, u otras, en función del sistema elegido.

Los tipos más conocidos de paneles de GRC son:

- **Panel Sandwich.** El panel consta de tres hojas: una exterior de GRC, diseñada para ser cara vista; una intermedia de aislante térmico (normalmente poliestireno expandido), y una interior también de GRC, que puede ser también para cara vista.



*Figura 5.1. Panel sandwich [13].*

- **Stud Frame.** Este panel consta únicamente de la placa exterior cara vista, que se monta sobre una estructura de acero galvanizado. Estos paneles asumen la existencia posterior de una hoja interior. La ventaja de estos paneles es que pueden adoptar mayores tamaños que los tipos sandwich, con tamaños máximos que puede oscilar entre 16 a 30 m<sup>2</sup>.



*Figura 5.2. Stud frame [13].*



- **Lámina rebordeada.** Es igual que el Stud Frame, pero el bastidor se ejecuta con el propio material. Suelen ser tamaños muy pequeños, normalmente no superiores a 2 m<sup>2</sup>.



*Figura 5.3. Lámina rebordeada [13].*

- **Placa simple.** Es un panel laminar de GRC con un espesor de 10 a 20 mm. Se especifica para pavimentos que pueden ir pegados sobre una base rígida o para ser emplazados sobre bandejas estructurales a modo de suelo técnico. Su tamaño no suele exceder 1 m<sup>2</sup>.



*Figura 5.4. Placa simple [13].*

- **Panel nervado.** Se trata de una placa simple rigidizada mediante nervios de material ligero y recubierto con el propio GRC, aportando mayor resistencia al panel.



*Figura 5.5. Panel nervado [13].*

El GRC se emplea típicamente en formato de panel autoportante de fachada. Puede constituir el cerramiento de fachada por sí mismo, como en el caso de algunos paneles sandwich, o como hoja exterior del cerramiento en el caso de stud frame o láminas rebordeadas. También se puede usar GRC para otro tipo de estructuras autoportantes como muretes de jardín o plafones. El panel puede pintarse, y es un material que admite muy bien las texturas, ya que su granulometría fina se adapta con facilidad a los relieves que se deseen colocar en el molde.

## 5.1 Piedra aglomerada

La norma UNE-EN 14618:2011 (1), define como piedra aglomerada a los productos manufacturados en proceso industrial a partir de una mezcla de agregados, aditivos y el aglomerante. El aglomerante puede ser resina, cemento hidráulico, o una mezcla de ambos. Por tanto, de acuerdo a esta norma, se puede clasificar la piedra aglomerada según el aglomerante empleado, ya que en los distintos casos se obtendrán unas características diferentes.

Por definición, los aglomerantes son aquellos materiales capaces de unir fragmentos de una o varias sustancias y aportar cohesión. En el caso de la piedra aglomerada la norma UNE-EN 14618 (1) contempla dos tipos de aglomerantes: el cemento hidráulico y las resinas poliméricas.

Al fabricar piedra aglomerada, estamos generando un material compuesto. Pues debemos tener en cuenta que los materiales compuestos, se obtienen al unir dos o más materiales con el fin de conseguir una combinación de propiedades que no es posible obtener de los materiales originales. El aglomerante no solo se encarga de la unión de los agregados, sino que además aporta a la piedra sus propiedades mecánicas.

## 5.2 Cementos

Para la fabricación de nuestra piedra artificial se ha utilizado como aglomerante cemento, producto resultante de la cocción de caliza y arcilla [14]. Se trata del conglomerante más importante que podemos encontrar en la actualidad. Los cementos se emplean principalmente en la fabricación de Morteros y Hormigones. También se utiliza mezclado con agua en pequeños trabajos y reparaciones.

### ▪ Cementos Naturales

Son los resultantes de la calcinación de Margas a unos 1000°C. De composición química muy variable, suelen tener más sílice y alúmina y menos cal que los Cementos Artificiales. Pueden utilizarse en obras de albañilería, pero debido a su baja resistencia no son apropiados para elementos estructurales. Pueden ser:

- Cemento Natural Lento
- Cemento Natural Rápido



### ▪ Cementos Artificiales

Son aquellos que se obtienen a partir de Arcilla y Caliza convenientemente preparadas y dosificadas. Son más constantes en su composición que los Cementos Naturales. La cocción de la mezcla se realiza a una temperatura de entre 1.450 y 1.480 °C. La masa homogénea obtenida se denomina clínquer, la cual, después de ser triturada finamente, se convierte en el componente básico para la fabricación del Cemento. Podemos clasificar en los siguientes tipos:

- Cemento Portland
- Cemento Puzolánico
- Cemento Aluminoso

También se pueden encontrar las siguientes variedades:

- Cemento Blanco
- Cemento Cola
- Cemento con Aditivos

Los cementos se clasifican en tipos, según sus componentes, y en clases según su resistencia. El número que identifica a la clase corresponde a la resistencia mínima a compresión a 28 días. Cuando el cemento contiene adiciones y su contenido de clínquer es superior al 65 por 100 se le denomina “cemento portland con adiciones” y forman la familia de cementos comunes.

Tipos de cementos	Denominaciones	Designaciones
<b>I</b>	Cemento Portland	CEM I
<b>II</b>	Cemento Portland con adiciones	CEM II
<b>III</b>	Cemento Portland con escorias de horno alto	CEM III
<b>IV</b>	Cemento puzolánico	CEM IV
<b>V</b>	Cemento compuesto	CEM V

Tabla 5.1: Tipos de cemento según su composición [15].

### Adiciones

Denominaciones	Designaciones
Escoria de horno alto	S
Humo de sílice	D
Puzolana natural	P
Puzolana natural calcinada	Q
Ceniza volante silíceo	V
Ceniza volante calcárea	W
Esquisto calcinado	T
Caliza L	L
Caliza LL	LL

Tabla 5.2: Componente adicionales que acompañan al clínquer [15].

Son cementos unitarios (CEM I), binarios (CEM II y CEM III), ternarios, cuaternarios, quinarios e incluso senarios, en función del número de componentes de que pueden constar.

Algunos de los tipos se subdividen en subtipos, según el contenido de la adición o mezcla de adiciones presentes en el cemento. Estos subtipos, según dicho contenido creciente, pueden ser A, B o C [15].

Tipo de cemento	Subtipo	Denominación	Designación
<b>CEM I</b>	Sin subtipo	Cemento Portland	CEM I
<b>CEM II</b>	A	Cemento Portland con escorias de horno alto	CEM II/A-S
	B		CEM II/B-S
	Sólo A	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/A-D
	A	Cemento Portland con puzolana natural	CEM II/A-P
	B		CEM II/B-P
	A	Cemento Portland con puzolana natural calcinada	CEM II/A-Q
	B		CEM II/B-Q
	A	Cemento Portland con ceniza volante silíceas	CEM II/A-V
	B		CEM II/B-V
	A	Cemento Portland con ceniza volante Calcárea	CEM II/A-W
	B		CEM II/B-W
	A	Cemento Portland con esquisto calcinado	CEM II/A-T
	B		CEM II/B-T
	A	Cemento Portland con caliza L	CEM II/A-L
B	CEM II/B-L		
A	Cemento Portland con caliza LL	CEM II/A-LL	
B		CEM II/B-LL	
A	Cemento Portland mixto con todas las adiciones	CEM II/A-M	
B		CEM II/B-M	
<b>CEM III</b>	A	Cemento con escoria de horno alto	CEM III/A
	B		CEM III/B
	C		CEM III/C
<b>CEM IV</b>	A	Cemento puzolánico con D, P, Q, V, W	CEM IV/A
	B		CEM IV/B
<b>CEM V</b>	A	Cemento compuesto con S, P, Q, V	CEM V/A
	B		CEM V/B

Tabla 5.3: Tipos y subtipos de cementos [15].

El criterio de subclasificación basado en las “Categorías resistentes” se basa en la resistencia normal del cemento, que es la resistencia mecánica a compresión, determinada de acuerdo con la Norma Europea EN 196.1, a los 28 días.

Se contemplan tres clases de resistencia normal: clase 32.5 (Media), clase 42.5 (Alta) y clase 52.5 (Muy alta). La clasificación de un cemento de acuerdo con la resistencia normal se indica por los valores 32.5, 42.5 ó 52.5.

La resistencia inicial de un cemento es la resistencia mecánica a la compresión a los 2 días o a los 7 días. Para cada clase de resistencia normal, se definen dos clases de resistencias iniciales: una clase con resistencia inicial ordinaria, indicada por N, y una clase con resistencia inicial elevada indicada por R.

Clase de resistencia	Resistencia a compresión (MPa)				Tiempo de principio de fraguado (min)	Expansión (mm)
	Resistencia inicial		Resistencia normal			
	2 días	7 días	28 días			
<b>32,5 N</b>	-	$\geq 16,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$	$\geq 75$	$\leq 10$
<b>32,5 R</b>	$\geq 10,0$	-				
<b>42,5 N</b>	$\geq 10,0$	-	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$	$\geq 60$	
<b>42,5 R</b>	$\geq 20,0$	-				
<b>52,5 N</b>	$\geq 20,0$	-	$\geq 52,5$	-	$\geq 45$	
<b>52,5 R</b>	$\geq 30,0$	-				

Tabla 5.4. Exigencias mecánicas y físicas de los cementos [15].

El conglomerante utilizado para la fabricación de la piedra artificial ha sido el cemento común (CEM), siendo este un conglomerante hidráulico formado, básicamente, por mezclas de caliza, arcilla y yeso y es el que utiliza la empresa para la fabricación de su producto.

Más concretamente, se ha utilizado el cemento puzolánico CEM IV/ A (P) con resistencia 42,5 R. Las clases resistentes de los cementos puzolánicos son las mismas que las correspondientes a los cementos Portland.

Los cementos puzolánicos endurecen más lentamente, en especial en ambiente frío, y requieren en general más agua de amasado que el Portland normal; pero a largo plazo llegan a superar las resistencias de éste. Son resistentes a los agentes químicos agresivos tales como los contenidos de sales en el agua de mar, los sulfatos y las aguas ligeramente ácidas, teniendo además un comportamiento muy bueno frente a las aguas muy puras por no lixiviar la cal al quedar ésta fijada por la sílice.

### 5.3 Fibra de vidrio

La fibra de vidrio [16], tal y como indica su nombre, es un material que consiste en numerosos y extremadamente finas fibras de vidrio. Tiene múltiples usos dentro del campo de la ingeniería. Así puede ser un material aislante, lo que se conoce como lana de vidrio, o también puede actuar como agente de refuerzo en muchos productos poliméricos como el PRFV, o en este caso, para aumentar la resistencia del hormigón (GRC). Es por esto que, en este estudio, a dos de los cuatro lotes de piedra elaborados se les han añadido fibra de vidrio con objeto de comparar resultados y poder observar los beneficios de la

misma en la piedra artificial. Las fibras de vidrio que se han utilizado son del tipo álcalis – resistentes (véase anexo II), siendo las mismas resistentes a los álcalis liberados con la hidratación del cemento y durante la vida del composite. Son las denominadas Cem-Fil AR y el componente que otorga a la fibra su poder de álcali – resistencia es el Circonio (Zr). Los principales componentes de esta fibra son:

- Óxido de Circonio ( $ZrO_2$ )  $\geq 15\%$
- Sílice ( $SiO_2$ )
- Alúmina ( $Al_2O_3$ )
- Óxido de Sodio ( $Na_2O$ )
- Óxido de Titanio ( $TiO_2$ )
- Óxido de Calcio ( $CaO$ )

La fibra de vidrio se forma cuando el vidrio es extruido en muchos filamentos de diámetro pequeño adecuado para el procesamiento textil.

### 5.3.1 Procesos de fabricación

#### 5.3.1.1 Fusión

Hay dos métodos principales de fabricación de fibra de vidrio y dos tipos principales de productos de fibra de vidrio. La fibra se puede hacer por un proceso de fusión directa o por un proceso de refundición. Ambos comienzan con las materias primas en estado sólido. Los materiales se mezclan y se funden en un horno. Entonces, para el proceso de refundición, el material fundido es cortado y enrollado en bolitas, que son enfriados y envasados. Estas canicas son llevadas a las instalaciones de fabricación de fibra en el que se insertan en un cilindro y el material es refundido. El vidrio fundido se extruye a través de un cabezal con boquillas, denominado bushing, que lo conforma en filamentos. En el proceso de fusión directa, el vidrio fundido del horno va directamente al buje de conformación.

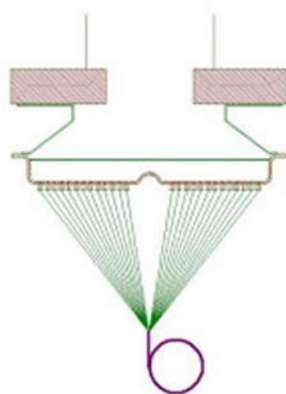


Figura 5.6: fundición directa [16].

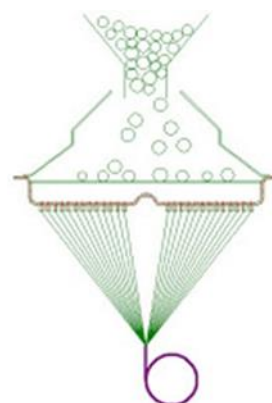


Figura 5.7: fundición indirecta [16].

#### 3.5.1.2 Conformación

La placa del bushing es la parte más importante de la maquinaria para la fabricación de la fibra. Se trata de un cabezal calefaccionado de metal que contiene las boquillas para que los filamentos se formen a través de éstas.

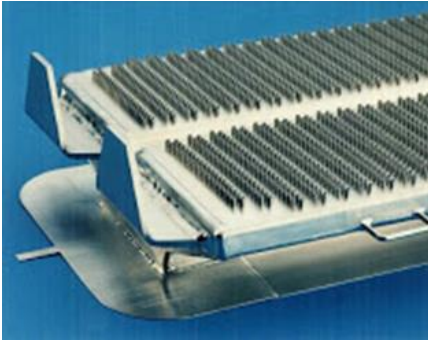


Figura 5.8: Bushing con doble plato base [16]

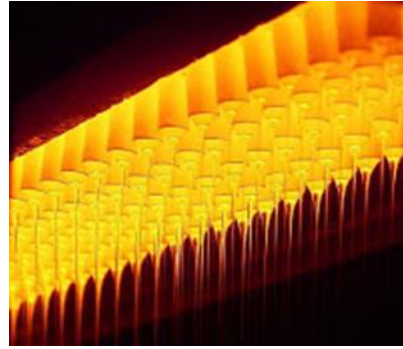


Figura 5.9: Salida del vidrio fundido de las boquillas [16].

El bushing es casi siempre hecho de platino aleado con rodio para una mayor durabilidad debido a que se encuentra expuesto a elevadas temperaturas.

Hoy en día, las boquillas están diseñadas para tener un espesor mínimo a la salida. Al fluir el vidrio a través de la boquilla se forma una gota que está suspendida de la boquilla. A medida que cae, va formando un hilo, siempre y cuando la viscosidad este en el rango correcto para la formación de fibras. Los filamentos obtenidos al salir de las boquillas son enfriados al pasar por aletas de enfriamiento (refrigeradas con agua) para luego ser enrollados en bobinas (fibra continua) o tratados mediante una corriente de aire para la obtención de una felpa.

## 6. Proceso de fabricación de la piedra

A lo largo del trabajo sólo se ha hablado sobre los diferentes componentes de un material compuesto como es la piedra artificial y sus propiedades. En este apartado se hablará sobre el proceso llevado a cabo en la fábrica para la elaboración de la piedra artificial. Se ha empleado el mismo método que el Grupo Antonio Afonso utiliza para la fabricación del Glassydur y ha sido personal experimentado el encargado de realizar la mezcla y proyección en los moldes de la figura 6.2. En este caso, todos los lotes de piedra se han producido de la misma manera, siguiendo los mismos pasos y utilizando la misma maquinaria y cantidad de materiales.

Se han confeccionado cuatro lotes de piedra (figura 6.1), para posteriormente ser sometidos a diferentes ensayos y poder así evaluar sus propiedades. Los lotes se han clasificado de la siguiente manera:

- Lote A.1 a A.6: Cemento + agua + arena africana.
- Lote B.1 a B.6: Cemento + agua + arena de vidrio
- Lote C.1 a C.6: Cemento + agua + arena africana + fibra de vidrio (Glassydur)
- Lote D.1 a D.6: Cemento + agua + arena de vidrio + fibra de vidrio.



Figura 6.1: Diferentes lotes de piedra [Fuente propia].

En la siguiente figura se observan los moldes donde se ha proyectado la mezcla, y las dimensiones de los mismos se corresponden con las dimensiones de las probetas elaboradas. Las mismas son 200 mm de longitud x 50 mm de ancho x 10 mm de espesor. Sin embargo, las dimensiones reales pueden haber variado ligeramente, debido a las contracciones que sufre el cemento durante el proceso de fraguado y curado.



Figura 6.2. Moldes de madera [Fuente propia].

El proceso de fabricación de la piedra está dividido en los siguientes pasos:

1. Mezcla de los ingredientes.
2. Proyección de la mezcla.
3. Desencofrado.
4. Curado.

### **6.1 Mezcla de ingredientes**

Lo primero es tener cada uno de los materiales necesarios para la fabricación de la piedra, los cuales recordamos son:

- Cemento puzolánico CEM IV/ A (P) con resistencia 42,5 R.
- Áridos: Arena africana o arena de vidrio plano.
- Agua
- Aditivo.

Además, las series C y D incluirán fibra de vidrio como agente de refuerzo.

El proceso de mezcla de ingredientes se puede separar en cuatro pasos, según orden en el que se han añadido:

- 1) Agua.
  - 2) Aditivo.
  - 3) Árido.
  - 4) Cemento.
- 
- 1) El proceso comienza añadiendo en primer lugar agua en un recipiente con una capacidad suficiente para almacenar todos los materiales. La cantidad de agua ha diferido ligeramente para ambas mezclas (arena africana y arena de vidrio), debido a las diferencias existentes entre los áridos. En el caso de la mezcla con arena africana han sido necesarios 12 litros de agua. Con arena de vidrio plano se han necesitado 13 litros para una mezcla correcta. Esta diferencia se debe principalmente a que el árido natural contiene un mayor porcentaje de humedad, por tanto, absorbe menor cantidad de agua de amasado en la mezcla. También es posible que la diferencia de densidades entre ambos áridos haya significado una ligera variación en la dosificación.
  - 2) A continuación, se agrega el aditivo utilizando una jeringa graduada, de modo que pueda conocerse la cantidad exacta, en este caso 125 cm<sup>3</sup>. Por secreto de la compañía no puede revelarse de qué material se trata. Este aditivo hace que se reduzca la cantidad de agua necesaria, facilite el desencofrado, etc. Normalmente la cantidad de aditivo necesaria suele ser el 1% del peso del cemento.
  - 3) El siguiente paso ha sido añadir el árido correspondiente, en la cantidad requerida, en este caso 25 kg.



- 4) Por último, se vierte la misma cantidad de cemento. La relación árido/cemento es 1:1.

Una vez todos los ingredientes fueron añadidos, se ha utilizado una batidora automática (figuras 6.3 y 6.4) para mezclar todos los ingredientes. Este equipo, fabricado en el Reino Unido por la compañía K. & C. Mouldings LTD, gira a 3000 rpm, así se obtiene una mezcla homogénea.



*Figura 6.3. Batidora (vista lateral).  
[fuente propia].*

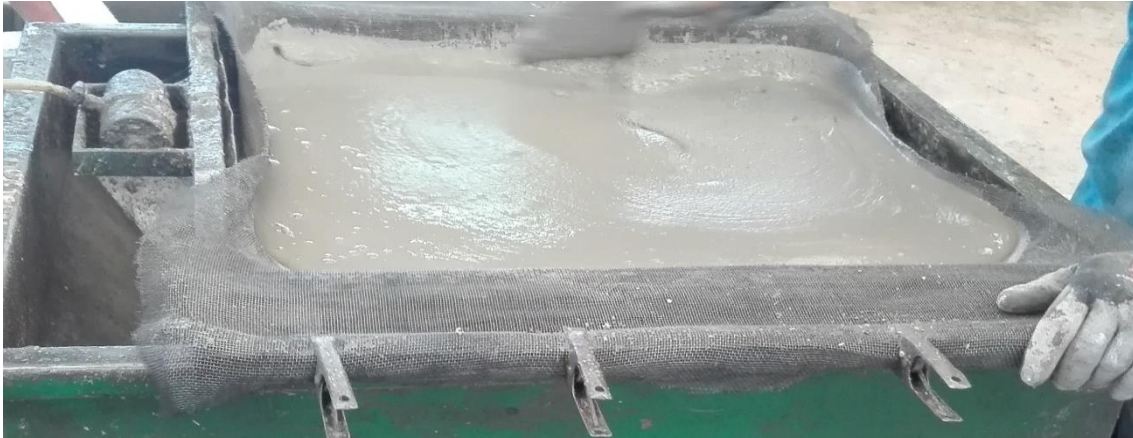


*Figura 6.4. Batidora (vista frontal)  
[fuente propia].*

## **6.2 Proyección mezcla**

Una vez se han mezclado todos los ingredientes, el siguiente paso es proyectar el mortero por medio de un equipo especial diseñado para tal propósito. Para ello, primero se vierte la mezcla, con ayuda de un pequeño montacargas, sobre una malla que sirve de colador hacia el depósito del equipo, como se observa en la figura 6.5.





*Figura 6.5. Mezcla hacia la máquina de proyección [Fuente propia].*

Cuando toda la mezcla ha sido vertida, con una cuchara se facilita su paso a través de la malla hacia el depósito de la máquina. Esta malla evita que partículas de mayor tamaño se cuelen y produzcan una avería en el equipo.



*Figura 6.6. Malla de protección [Fuente propia].*

Tras este paso, se proyecta la mezcla hacia los moldes, por medio de una “pistola” de proyección conectada a través de unas tuberías al depósito de la máquina (figura 6.7).



*Figura 6.7. Pistola de proyección [Fuente propia].*

En este caso, se trata de un sistema de proyección simultánea que consiste en proyectar, desde toberas independientes, un chorro de mortero pulverizado con aire a presión y otro de fibra de vidrio cortada con hebras de longitud prefijada. Por secreto de patente, se desconocen datos técnicos referentes a la misma. En este punto se decide si añadir la fibra de vidrio a las probetas o no. La fibra proviene de un paquete donde viene arrollada en filamento continuo y la propia herramienta la va cortando a su paso. Mediante este método, al estrellar las partículas de mortero contra la superficie, se consigue una reproducción con total precisión. Para que no se observen en la superficie vista de las piezas las fibras de vidrio, la primera capa proyectada se efectúa sin fibra, a unos 2 o 3 mm como máximo. Al desconectar el filamento continuo de fibra durante todo el proceso de proyección, se obtienen las muestras sin el refuerzo, en este caso correspondiente a las series A y B.



*Figura 6.8. Proyección sin fibra de vidrio.  
[fuente propia].*



*Figura 6.9. Proyección con fibra de vidrio.  
[fuente propia].*

La cantidad de fibra añadida depende del proceso de fabricación empleado. En el caso de proyección simultánea supone el 5% en peso total de la mezcla realizada. La longitud de las fibras oscila entre los 30 y 45 mm y las mismas se encuentran orientadas de forma bidireccional (en el plano). Por tanto, la fabricación consiste en la proyección de capas que se van compactando entre sí hasta formar el espesor final de la probeta.

La mezcla se proyecta contra los moldes fabricados con madera y clavos (figura 6.2). La base es lisa, así se obtienen las probetas con superficie lisa y no es necesario pulirlas posteriormente. En los laterales la madera es más rugosa y por tanto las probetas presentan una mayor rugosidad en esta zona.

Una vez la mezcla fue proyectada contra los moldes, se termina de enrasar todas las muestras con ayuda de una cuchara de obra (figura 6.10), de modo que quede todo al mismo nivel y sin irregularidades. Cuando se proyecta además con fibra de vidrio, se ejerce algo de presión sobre la mezcla con ayuda de un cepillo para compactar y homogeneizar la mezcla (figura 6.11).





*Figura 6.10. Enrasar muestras con cuchara [Fuente propia].*



*Figura 6.11. Homogeneizar muestras con cepillo [Fuente propia].*

Tras la proyección de la mezcla con arena africana, es necesario un proceso de limpieza de toda la maquinaria, para evitar que haya restos de ésta en la siguiente, en la que se utilizó arena de vidrio plano. Para la limpieza completa de la máquina se requirió aproximadamente una hora y personal cualificado.

Una vez se elaboraron todas las probetas, debido a los requisitos de los medios empleados en la empresa, sobra una gran cantidad de material que es proyectada sobre un molde como el de la figura 6.12.



*Figura 6.12. Molde para mezcla sobrante [Fuente propia].*

### 6.3 Desencofrado

Una vez todos los moldes fueron rellenos con la mezcla correspondiente, se debe esperar al menos un día para retirar las probetas de los mismos, de modo que el cemento haya endurecido. Por lo tanto, al día siguiente se desencofraron todas las muestras con ayuda de una espátula que servía de palanca (Figura 6.13).



*Figura 6.13. Desencofrado [Fuente propia].*

Durante el proceso de desencofrado, tres de las seis muestras del lote B (cemento + agua + arena de vidrio) se agrietaron aproximadamente por la mitad de la pieza, lo cual iba a influir notablemente en los ensayos que se le practicarían. Estas fisuras aparecieron debido a que la mezcla todavía estaba fresca, y la tensión ejercida en el desencofrado fue superior a la resistencia que presentaban las piezas en ese momento. Por tanto, aprovechando que se disponía una máquina de corte (radial), se decide separar las mismas en dos partes iguales, de modo que se obtuvieron seis muestras de menor tamaño. Cabe destacar, que se podría haber esperado un día más antes de retirar las probetas de los moldes, pero esto supondría una desventaja de cara a un proceso de producción más agilizado y económico.



*Figura 6.14. Piezas a la mitad [Fuente propia].*

## 6.4 Curado

Una vez todas las probetas fueron retiradas de sus respectivos moldes, se almacenan en un lugar seguro y tapadas con un plástico para conservar la humedad (figura 6.15), durante al menos 28 días, que es el tiempo que necesita el cemento para conseguir su máxima resistencia. La condición de curado recomendadas para este tipo de materiales suele ser de 15 °C y una humedad  $\geq 95\%$  HR. Al no disponer de un equipo donde se pudiera controlar con precisión estas variables, las condiciones ambientales locales pueden modificar las condiciones expuestas. En este caso, la temperatura media máxima en Icod de los Vinos durante el mes de octubre (mes de curado) es de 23 °C y la media mínima de 18 °C.



Figura 6.15. Curado [Fuente propia].

## 7. Ensayos

La caracterización de la piedra artificial se realiza mediante los ensayos específicos para la piedra aglomerada, incluidos en el paquete de normas UNE EN 14617 referente a los métodos de ensayo de piedra aglomerada.

La norma exige que se elaboren todos los ensayos para determinar las características de la piedra aglomerada. De los ensayos que se incluyen en la norma se han seleccionado cuatro, que podían ser realizados en el laboratorio de Materiales del Dpto. de Ingeniería Industrial y que son importantes en la caracterización de la piedra. En base a los resultados de estos ensayos se obtienen unas conclusiones.

Se llevan a cabo los ensayos de resistencia a flexión, microdureza Knoop, densidad aparente y absorción de agua. La norma de piedra aglomerada no especifica el ensayo de dureza que se debe realizar, por lo que se sigue el ensayo de dureza para la piedra natural. Además, se realizan los ensayos de porosimetría y densidad absoluta en picnómetro de helio, así como microscopía digital en algunas de las probetas.

Los equipos utilizados se encuentran todos disponibles en el Laboratorio de Materiales del Departamento de Ingeniería Industrial de la ULL. Los ensayos de porosimetría y densidad mediante picnómetro de helio han sido realizados en el Laboratorio de Caracterización de Partículas y Microsuperficies del Servicio General de Apoyo a la Investigación (SEGAI).

### 7.1 Resistencia a flexión.

Los ensayos a flexión son ensayos sencillos que permiten determinar la respuesta a flexión de diferentes materiales. El ensayo consiste en la aplicación de una fuerza en el centro de la probeta a ensayar, situándose sobre dos rodillos de apoyo, tal y como se muestra en la Figura 7.1, incrementando la carga gradualmente hasta que la probeta se fracture y separe en dos partes. Este ensayo permite determinar la resistencia a flexión, así como el módulo a flexión, entre otros parámetros.

Todos los datos referentes a este tipo de ensayo sobre piedra aglomerada quedan recogidos en la norma EN 14617-2, Métodos de ensayo para piedra aglomerada. Determinación de la resistencia a flexión. Aenor Ediciones 2008 (2). Cabe destacar que esta norma está anulada y sustituida por una versión más reciente del año 2016.

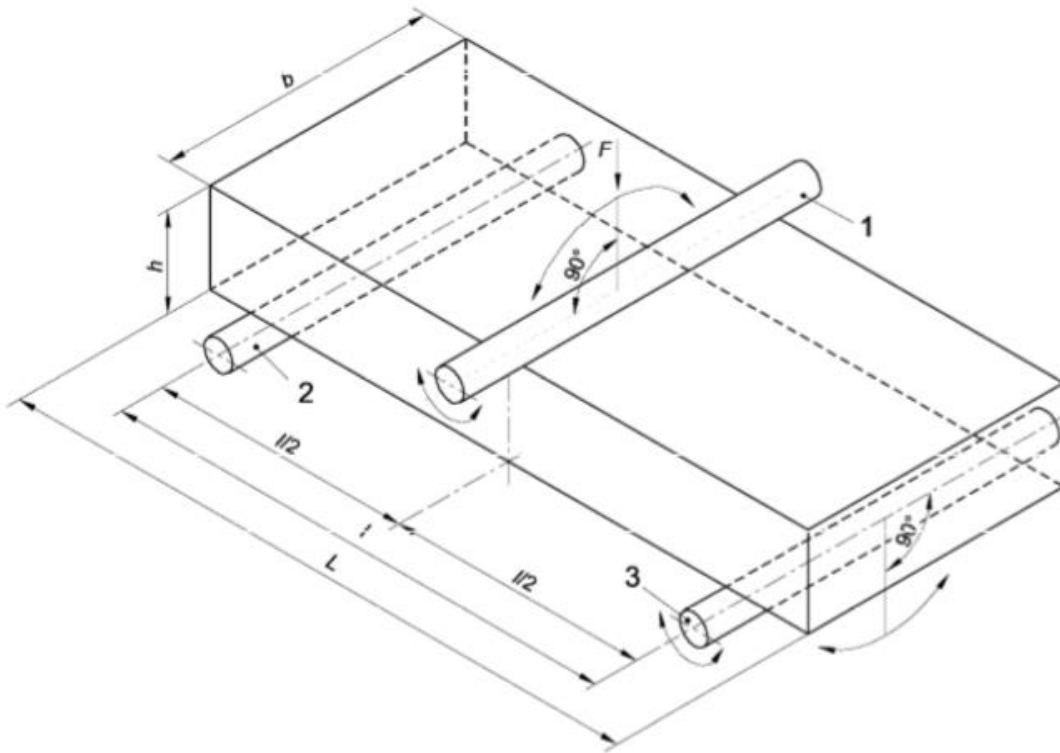


Figura 7.1. Disposición de la probeta sobre los rodillos de carga. (2)

Para obtener la resistencia a flexión la norma indica el uso de la siguiente ecuación:

$$R_{tf} = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad [\text{ec.1}]$$

- En donde:
  - h, espesor de la muestra.
  - l, distancia de apoyo de los rodillos.
  - b, ancho de la muestra.
  - F, carga de rotura.

Para calcular el módulo a flexión se toma la siguiente ecuación:

$$E_{fl} = \frac{l^3 m}{4bh^3} \quad [\text{ec.2}]$$

- Donde:
  - l, distancia de apoyo de los rodillos.
  - m, pendiente de la curva a flexión.
  - b, ancho de la muestra.
  - h, espesor de la muestra.

La deflexión o flecha de la probeta se toma como el desplazamiento del travesaño de la máquina de ensayos en el ensayo de flexión y la velocidad del mismo se ajusta de manera que cumpla con los requisitos que dice la norma EN 14617-2 (2), es decir, una velocidad de  $(0.25 \pm 0.05)$  MPa/s.

Para realizar el ensayo se ha utilizado la máquina de ensayos mecánicos Shimadzu Autograph con capacidad máxima de carga de 50kN y accionamiento electromecánico, controlada mediante el sistema informático Trapezium de Shimadzu (Figura 7.2).



Figura 7.2. Máquina de ensayos mecánicos Shimadzu Autograph [4].

### 7.1.1 Procedimiento y resultados ensayo a flexión.

Tras 28 días de la fabricación de las diferentes muestras de piedra artificial, se procede a la realización del ensayo de flexión. Una vez todas las probetas han sido ensayadas, a partir de los valores obtenidos, se representan los valores de fuerza frente a deflexión. A partir de estas representaciones gráficas se calculan los parámetros de resistencia a flexión ( $R_{fl}$ ) y módulo a flexión ( $E_{fl}$ ), según las ecuaciones mostradas [ec.1] y [ec.2].



Se comienza primeramente ensayando la serie A, que corresponde a la piedra fabricada a partir de cemento y arena africana. Se continúa con las series B, C y D respectivamente. Antes de comenzar el ensayo, se han tomado las medidas de las probetas en el ancho, longitud y espesor de las mismas, usando un calibre para ello, como muestra la figura 7.3.

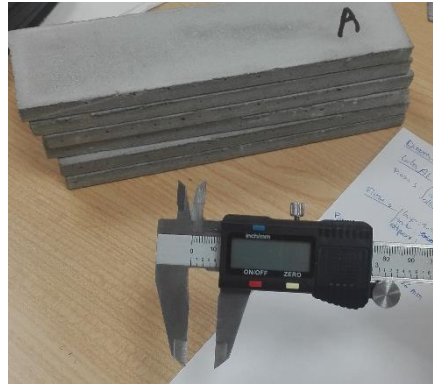


Figura 7.3. Pie de rey o calibrador [Fuente propia].

Dichas dimensiones se encuentran detalladas en las siguientes tablas para cada serie (tablas 7.1 a 7.5). La longitud de las probetas es de 200 mm, pero en este caso se especifica 180 mm lo cual se corresponde con la separación entre los rodillos de apoyo, ya que tal y como indica la norma, la separación debe ser 20 mm menor a la longitud total de la muestra. En cuanto al espesor de cada una de las probetas, se han tomado varias medidas a lo largo de la longitud y se ha realizado una media, debido a que durante el proceso de fraguado y curado del cemento, se producen contracciones que dan lugar a pequeñas irregularidades que se traducen en variaciones de espesor. Y para el ancho, se han tomado las dimensiones en cada uno de los extremos y se ha hecho la media, siendo ese el valor reflejado en las tablas.

- **Serie A.** Cemento + árido natural.

	Longitud (mm)	Anchura (mm)	Espesor (mm)	Pendiente
<b>A.1</b>	180	51.10	10.92	599.28
<b>A.2</b>	180	51.10	11.48	727.66
<b>A.3</b>	180	51.10	10.98	808.15
<b>A.4</b>	180	51.10	11.39	946.66
<b>A.5</b>	180	51.10	11.36	902.08
<b>A.6</b>	180	51.10	11.07	806.57

Tabla 7.1. Dimensiones serie A.

- **Serie B.** Cemento + arena de vidrio plano.

	Longitud (mm)	Anchura (mm)	Espesor (mm)	Pendiente
<b>B.1</b>	180	51.35	12.11	772.65
<b>B.2</b>	180	51.53	11.63	660
<b>B.3</b>	180	51.34	11.31	821.61

Tabla 7.2. Dimensiones serie B.

- **Serie B corta.** Cemento + arena de vidrio plano.

	Longitud (mm)	Anchura (mm)	Espesor (mm)	Pendiente
<b>B.1 corta</b>	70	51.31	11.57	3143.3
<b>B.2 corta</b>	70	51.22	11.89	-
<b>B.3 corta</b>	70	51.58	12.73	1527
<b>B.4 corta</b>	70	51.32	11.20	3013
<b>B.5 corta</b>	70	51.42	11.92	2646.7
<b>B.6 corta</b>	70	51.43	11.97	3609.9

Tabla 7.3. Dimensiones serie B corta.

- **Serie C.** Cemento + árido natural + fibra de vidrio.

	Longitud (mm)	Anchura (mm)	Espesor (mm)	Pendiente
<b>C.1</b>	180	51.66	11.02	905.31
<b>C.2</b>	180	51.35	11.44	811.55
<b>C.3</b>	180	51.68	10.87	633.15
<b>C.4</b>	180	51.34	11.55	351.8
<b>C.5</b>	180	51.44	11.22	865.5
<b>C.6</b>	180	50.97	10.96	773.54

Tabla 7.4. Dimensiones serie C

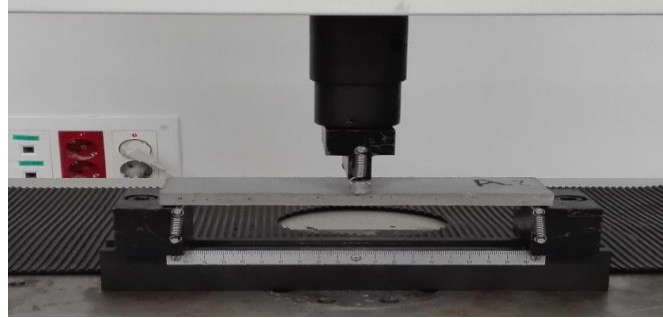
- **Serie D.** Cemento + arena de vidrio plano + fibra de vidrio.

	Longitud (mm)	Anchura (mm)	Espesor (mm)	Pendiente
<b>D.1</b>	180	51.66	11.47	614.34
<b>D.2</b>	180	51.66	12.34	939.62
<b>D.3</b>	180	51.66	10.71	652.65
<b>D.4</b>	180	51.66	11.28	442.23
<b>D.5</b>	180	51.66	11.46	361.05
<b>D.6</b>	180	51.66	11.57	694.31

Tabla 7.5. Dimensiones serie D.

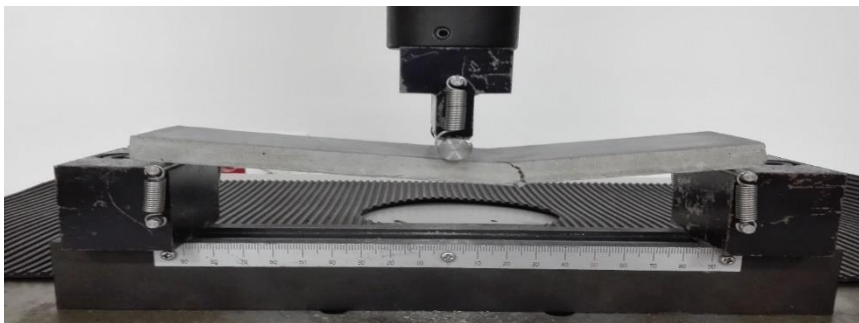
Con las dimensiones de las piezas y el valor de carga máxima obtenido tras el ensayo de flexión, se calcula la resistencia a flexión mediante la ecuación [ec.1] y el módulo de flexión mediante la ecuación [ec.2] mostradas en el apartado 7.1. Para el cálculo del módulo a flexión, es necesario además la pendiente de la curva de flexión en la región elástica. La pendiente se ha obtenido a partir de las gráficas de flexión, estableciendo una línea de tendencia en la región elástica de la curva y presentando su ecuación. Dicha ecuación, en la forma  $y = mx + n$ , proporciona el valor de la pendiente  $m$ . En las tablas 7.1 a 7.5 se recoge los valores de pendiente para cada probeta. Para las probetas B.2 y B.3 de la serie corta, no aparece pendiente reflejada en la tabla 7.3 o se desvía considerablemente del resto, debido a que durante el ensayo algo no ha salido correctamente y las mismas se han fracturado mucho antes de lo esperado. Por ese motivo se ha considerado descartarlas en el posterior cálculo de resistencia a flexión y módulo a flexión.

Tras obtener cada una de las dimensiones, se introducen los datos por ordenador a la máquina, y se sitúa la probeta sobre los rodillos de apoyo a la distancia correspondiente, según especifica la norma EN 14617-2, verificando que quede bien centrada y colocada para que no resbale. Se acerca manualmente el travesaño de la máquina de ensayos a la pieza, para que pueda comenzar el ensayo (figura 7.4) y se ajusta el indicador de deformación, carga a cero.



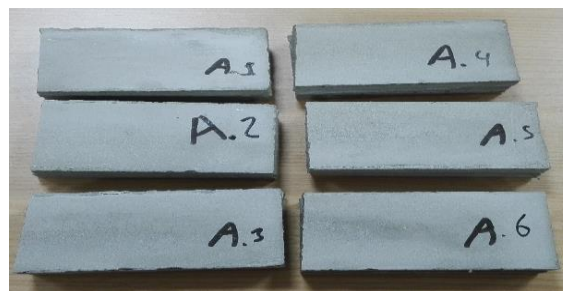
*Figura 7.4. Comienzo del ensayo [Fuente propia].*

Una vez se indica al equipo el comienzo del ensayo, el travesaño se desplaza verticalmente a una velocidad de  $(0.25 \pm 0.05)$  MPa/s según indica la norma, provocando un incremento progresivo de la carga y la consecuente flexión de la probeta, hasta provocar su fractura (figura 7.5), recabando los datos según el intervalo de tiempo indicado, en este caso, 0.25 segundos.



*Figura 7.5. Pieza doblada y agrietada durante el ensayo de flexión [Fuente propia].*

Tras la fractura, la máquina se detiene automáticamente y el ensayo concluye, quedando las probetas divididas en dos partes, como se observa en la figura 7.6.



*Figura 7.6. Piezas seccionadas tras el ensayo [Fuente propia].*

Las piedras a las cuales se les añadieron fibra de vidrio durante su elaboración, presentan el siguiente aspecto tras el ensayo de flexión.



Figura 7.7. Aspecto de las fibras de vidrio en la piedra [Fuente propia].

El equipo de ensayos mecánicos “Shimadzu Autograph” recoge los valores de carga y deflexión cada 0.25 segundos. Cuando el ensayo concluye, se dispone de una gran cantidad de datos, siendo el más importante el valor de carga máxima. Por tanto, para la representación gráfica se eligen aquellos valores que describen el comportamiento de la curva de flexión. Es decir, se escogen los valores de carga y deflexión que describan, en primer lugar, la parte ascendente del gráfico, hasta el valor de máxima carga con su respectivo desplazamiento. Y, por último, los valores que representan la parte descendente, después de la fractura de la pieza y hasta que concluye el ensayo.

La deflexión de las piezas se corresponde con el desplazamiento del travesaño de la máquina de ensayos. En ocasiones existía una pequeña separación entre el travesaño y la pieza a ensayar al comienzo del ensayo, lo cual generaba valores de carga que oscilan en torno al cero a medida que el travesaño avanzaba, hasta que se producía el contacto con la pieza, momento en el cual la carga comenzaba a aumentar. Para que la gráfica de flexión no quede desplazada del origen, es necesario restar este valor de desplazamiento, es decir, la separación existente entre el travesaño y la pieza en el momento cuando se inicia el ensayo.

La tabla 7.6 muestra un ejemplo de los valores sin corregir de la probeta B.1 entre el tiempo  $t_1 = 79\text{ s}$  y  $t_2 = 82\text{ s}$  comprendidos en torno al valor de máxima carga. Para el resto de probetas se ha seguido el mismo procedimiento.

Tiempo (t) en segundos	Deflexión ( $\delta$ ) en mm	Fuerza (F) en Newton
<b>79.00</b>	1.316	234.375
<b>79.25</b>	1.321	239.063
<b>79.50</b>	1.325	240.625
<b>79.75</b>	1.329	246.875
<b>80.00</b>	1.333	251.563
<b>80.25</b>	1.337	251.563
<b>80.50</b>	1.341	246.875
<b>80.75</b>	1.346	251.563
<b>81.00</b>	1.350	251.563
<b>81.25</b>	1.354	54.688

<b>81.50</b>	1.358	51.563
<b>81.75</b>	1.362	46.875
<b>82.00</b>	1.366	46.875

Tabla 7.6. Tabla de valores  $t - \delta - F$  sin corregir.

Los valores de la misma probeta (B.1) tras haber descontado el desplazamiento inicial, es decir, los valores de deflexión corregidos, se muestran en la tabla 7.7. En la tabla sólo se representan los valores en torno al valor de máxima carga y no todos los que se han tenido en cuenta para hacer la posterior representación gráfica.

<b>Deflexión (<math>\delta</math>) en mm</b>	<b>Fuerza (F) en Newton</b>
0.275	192.188
0.283	200.000
0.312	218.750
0.346	240.625
0.350	246.875
0.354	251.563
0.358	251.563
0.367	251.563
0.371	251.563
0.375	54.688
0.379	51.563
0.383	46.875
0.387	46.875

Tabla 7.7. Valores de  $\delta$  corregidos.

Como se ha especificado, el valor de la pendiente se obtiene directamente del gráfico que describe el comportamiento a flexión de cada una de las probetas, pero sólo en la región elástica. Sin embargo, en esta región también existen zonas inestables, principalmente al comienzo del ensayo, donde transcurre un pequeño periodo transitorio y la pendiente de la curva puede ser diferente. Por tanto, para obtener el valor de pendiente más exacto posible, se han escogido los datos en una región intermedia de la curva, donde las variaciones son menores. A continuación, se representa un ejemplo de este ajuste para obtener la pendiente en la probeta C.1. En la figura 7.8 se muestra el valor de la ecuación de la recta, con su correspondiente pendiente y en la tabla 7.8 los valores en torno a los cuales se ha realizado el ajuste. La pendiente en todas las probetas se ha obtenido siguiendo el mismo procedimiento y su valor se encuentra adjunto en las tablas 7.1 a 7.5.

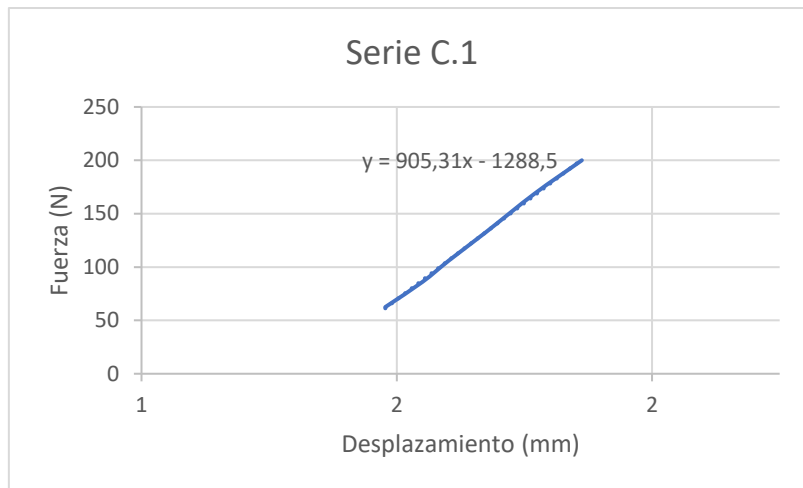


Figura 7.8. Ajuste para obtener la pendiente, probeta C.1 [Fuente propia].

Deflexión ( $\delta$ ) en mm	Fuerza (F) en Newton
1.491	62.500
1.520	85.938
1.541	106.250
1.570	132.813
1.608	168.750
1.645	200.000

Tabla 7.8. Valores para realizar ajuste, probeta C.1

Tras el correspondiente tratamiento, se efectúan los cálculos por medio de las ecuaciones [ec.1] y [ec.2], detallando los resultados a continuación.

### Resultados

- **Serie A.** Corresponde a la piedra fabricada a partir de cemento y arena africana como árido.

	Max. Carga (N)	$R_{tf}$ (MPa)	$E_{fl}$ (MPa)
<b>A.1</b>	203.1	9.0	13131.0
<b>A.2</b>	181.3	7.3	13722.7
<b>A.3</b>	197.9	8.6	17418.9
<b>A.4</b>	218.8	8.9	18279.3
<b>A.5</b>	209.4	8.6	17556.9
<b>A.6</b>	168.8	7.3	16964.3
<b>MEDIA</b>	196.4	8.3	16178.8
<b>Desviación estándar</b>		0.7	1991.1

Tabla 7.9. Resultados por muestra, ensayo a flexión, serie A.

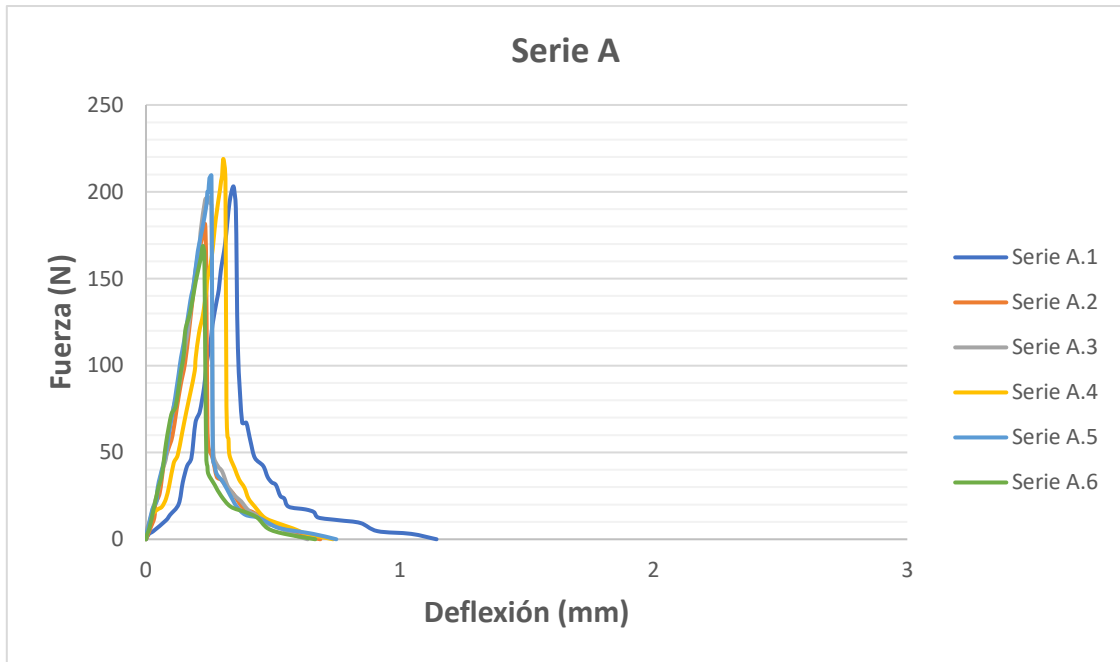


Figura 7.9. Gráfica de fuerza VS deflexión, serie A [Fuente propia].

Como se observa en el gráfico, los valores de fuerza máxima son muy similares entre sí y las probetas siguen el mismo comportamiento. Lo que significa que los valores de resistencia a flexión y módulo a flexión son también muy similares. El comportamiento es el típico para materiales cerámicos, los cuales presentan una fractura frágil en el valor de máxima carga, disminuyendo rápidamente hasta cero.

- **Serie B.** Corresponde a la piedra fabricada con cemento y arena de vidrio plano como árido. En este caso, sólo ha sido posible ensayar tres muestras debido a que las otras tres se fracturaron durante el proceso de desencofrado, explicado en el apartado 6.3.

	Max. Carga (N)	$R_{if}$ (MPa)	$E_{fl}$ (MPa)
<b>B.1</b>	251.6	9.0	12352.9
<b>B.2</b>	201.6	7.8	11871.4
<b>B.3</b>	287.5	11.8	16128.0
<b>MEDIA</b>	246.9	9.5	13450.7
<b>Desviación estándar</b>		1.7	1903.3

Tabla 7.10. Resultados por muestra, ensayo a flexión, serie B.

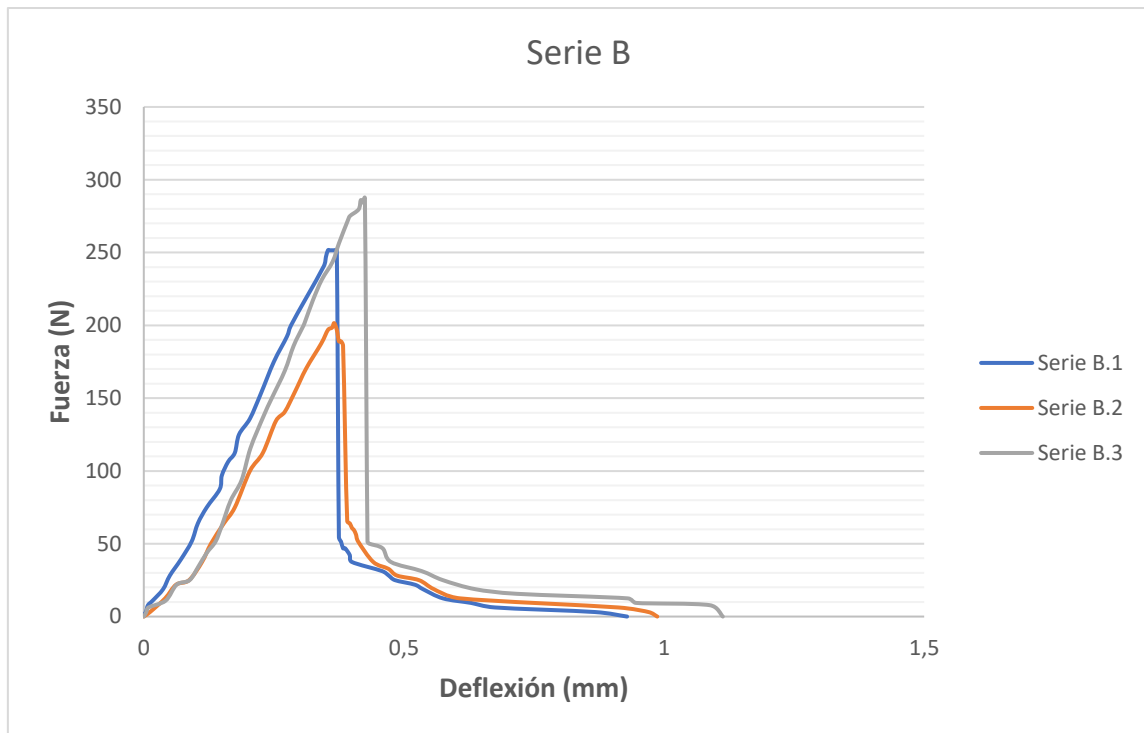


Figura 7.10. Gráfica de fuerza VS deflexión, serie B [Fuente propia].

Como se observa en este gráfico, los valores de fuerza máxima son similares a los del caso anterior, lo cual indica que los valores de resistencia a flexión son del mismo orden. Sin embargo, el número de muestras ensayado aporta una estadística muy pobre y, por lo tanto, no se puede concluir con seguridad que las piedras elaboradas con arena de vidrio plano presenten una resistencia a flexión equiparable a aquellas con árido natural.

- **Serie B corta.** Corresponde al mismo tipo de piedra que el caso anterior, pero se ha denominado de esta manera por ser de menor tamaño. Se trata de las mitades de las piedras que se fracturaron en el proceso de desencofrado. En este caso, la longitud de cada una es de 90 mm y, por tanto, la distancia entre rodillos de apoyo es de 70 mm. Sólo se han reflejado los resultados de cuatro de las seis muestras ensayadas. Esto es debido a que durante el ensayo algo no ha salido correctamente y las piedras se han fracturado antes de los esperado, por lo que los valores de resistencia a flexión de las mismas se desviaban demasiado del resto de valores, lo cual influía notablemente en la media, reduciéndola.

	Max. Carga (N)	$R_{tf}$ (MPa)	$E_{fl}$ (MPa)
<b>B.1</b>	621.9	9.5	3391.7
<b>B.4</b>	523.4	8.5	3583.4
<b>B.5</b>	517.2	7.4	2606.0
<b>B.6</b>	532.8	7.6	3509.4
<b>MEDIA</b>	548.8	8.3	3272.6
<b>Desviación estándar</b>		0.8	390.9

Tabla 7.11. Resultados por muestra, ensayo a flexión, serie B corta.



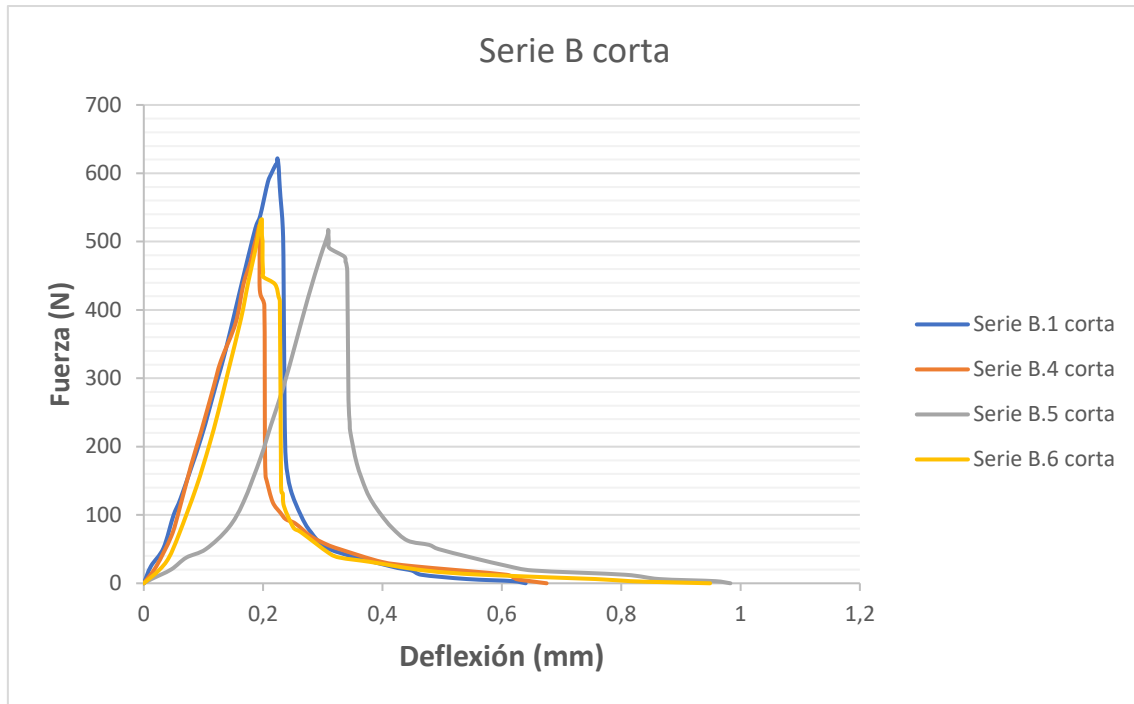


Figura 7.11. Gráfica de fuerza VS deflexión, serie B corta [Fuente propia].

Como puede observarse en la figura 7.10, los valores de fuerza máxima son considerablemente mayores a los de la serie B, debido básicamente a que su longitud es menor. Pero eso no quiere decir que su resistencia a flexión sea mayor, ya que para su cálculo se deben tener en cuenta las dimensiones de la pieza. Esto se puede comprobar fácilmente al comparar los resultados de las tablas 7.2 y 7.3, donde se observa que los valores son similares. Obteniéndose una media de resistencia a flexión de 9.5 MPa para la serie B y de 8.3 MPa para la serie B corta. Concluimos, por tanto, que una mayor fuerza no significa directamente una mayor resistencia a flexión, pues las dimensiones de la pieza son también fundamentales. Por último, destacar que para una buena estadística sería necesario tener al menos seis valores según indica la norma EN 14617-2 (2).

- **Serie C.** Corresponde al lote de piedras fabricadas con cemento, arena africana y fibra de vidrio.

	Max. Carga (N)	$R_{if}$ (MPa)	$E_{fl}$ (MPa)
<b>C.1</b>	504.7	21.7	19092.2
<b>C.2</b>	537.5	21.6	15390.6
<b>C.3</b>	410.9	18.1	13907.6
<b>C.4</b>	440.6	17.4	6484.1
<b>C.5</b>	575.0	24.0	17367.8
<b>C.6</b>	392.2	17.3	16807.1
<b>MEDIA</b>	476.8	20.0	14841.6
<b>Desviación estándar</b>		2.5	4068.9

Tabla 7.12. Resultados por muestra, ensayo a flexión, serie C.

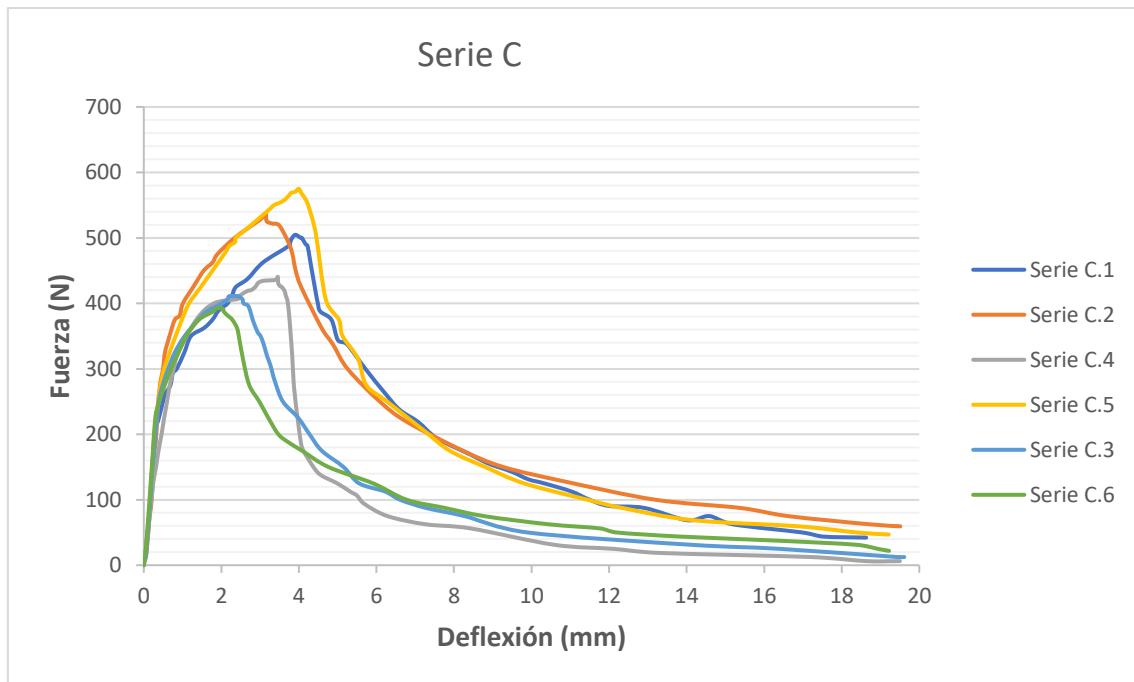


Figura 7.12. Gráfica de fuerza VS deflexión, serie C [Fuente propia].

Se observa en este gráfico, que los valores de fuerza máxima se encuentran en torno a los 500 N. Puede verse como antes de alcanzarse los valores máximos de fuerza, las piedras presentan un comportamiento plástico, similar al de los metales, por la deflexión que sufren. Esto es debido al hecho de haberle añadido fibra de vidrio a las muestras, la cual no sólo aumenta su resistencia máxima, sino que también le confiere propiedades plásticas, siendo capaces de resistir una mayor tensión. Una vez se ha alcanzado la máxima fuerza, la carga disminuye en un principio rápidamente, y luego se mantiene en valores cercanos al cero, mientras la deflexión sigue aumentando, debido una vez más a la fibra de vidrio, la cual mantenía unidas las dos mitades de la piedra, a pesar de que ésta ya se había roto.

- **Serie D.** Corresponde a la serie de piedras fabricadas con cemento, arena de vidrio plano y fibra de vidrio.

	Max. Carga (N)	$R_{if}$ (MPa)	$E_{if}$ (MPa)
<b>D.1</b>	523.4	20.8	11490.0
<b>D.2</b>	492.2	16.9	14112.7
<b>D.3</b>	367.2	16.7	14993.9
<b>D.4</b>	418.8	17.2	8696.1
<b>D.5</b>	256.3	10.2	6770.5
<b>D.6</b>	498.4	19.5	12651.9
<b>MEDIA</b>	426.0	16.9	11452.5
<b>Desviación estándar</b>		3.3	2903.4

Tabla 7.13. Resultados por muestra, ensayo a flexión, serie D.

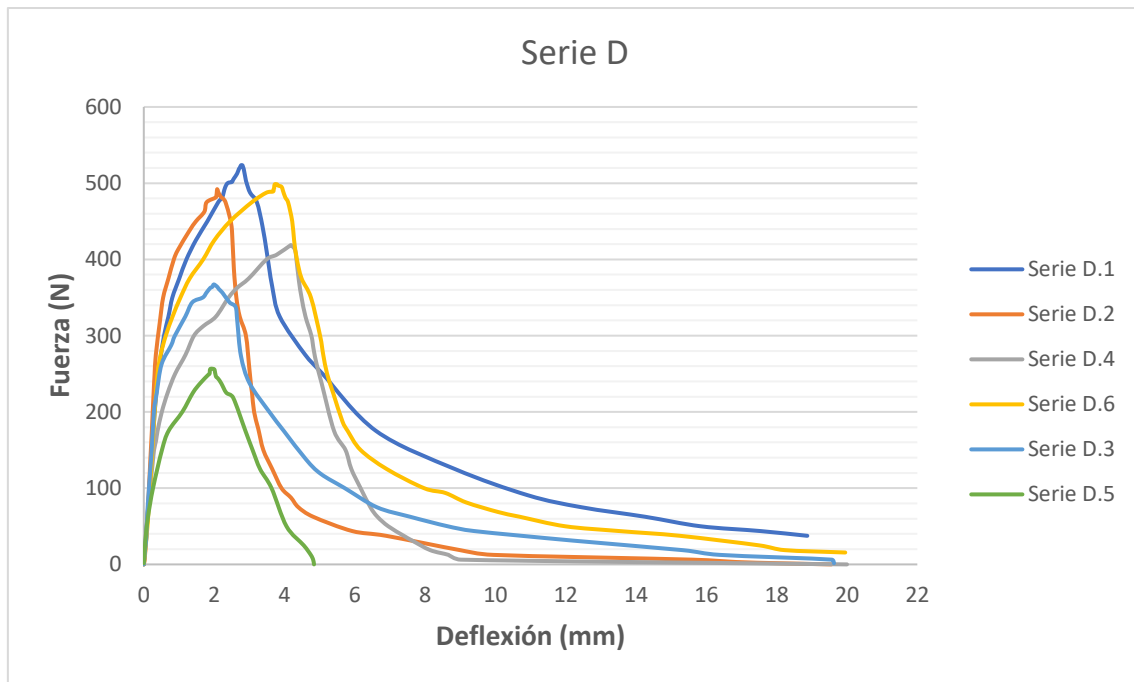


Figura 7.13. Gráfica de fuerza VS deflexión, serie D [Fuente propia].

Como se observa en este gráfico, el comportamiento es muy similar al de la serie C, presentando algo de plasticidad antes de romper, algo inusual en los cerámicos, pero propiedad que ha adquirido gracias a la fibra de vidrio. Tras la fractura, la carga disminuye hasta valores próximos al cero, y al igual que en el caso anterior la deflexión continua aumentando sin llegar a separar las piedras en dos mitades porque la fibra de vidrio las mantiene unidas.

En cuanto a los valores representados en la tabla 7.13, se aprecian unos resultados ligeramente inferiores, con una resistencia a flexión media de 16,9 MPa, en comparación con los representados en la tabla 7.12. Por tanto, se puede concluir que utilizar arena de vidrio plano como árido en la fabricación de piedra artificial no va a suponer una mayor resistencia a flexión que, en este caso, al emplear el árido procedente del desierto del Sáhara.

Sin embargo, esto no significa que en un futuro no pudiera ser utilizado como árido por muchas compañías constructoras, fabricantes de prefabricados, etc. Su uso está siendo todavía objeto de estudio y las ventajas tanto económicas como medioambientales apuntan a su favor.

## 7.2 Densidad aparente y absorción de agua.

Este ensayo se realiza mediante la norma EN 14617-1, Métodos de ensayo para piedra aglomerada. Determinación de la densidad aparente y la absorción de agua (3). Tras la realización del ensayo a flexión, se toma la mitad de una muestra representativa de cada una de las series y se acondicionan tal y como indica la norma. Éstas se secan hasta peso constante, en condiciones de humedad y temperatura controladas. Las masas de las probetas después del secado se denominan  $M_0$ . Se sumergen las probetas en agua a  $20 \pm 2$  °C, de forma que queden totalmente cubiertas.

Se toman datos de las masas de las muestras fuera del agua ( $M_t$ ), previamente secadas con un paño húmedo. Estos datos se toman en intervalos de 1h, 8h y 24h, y posteriormente en intervalos de 24h desde el inicio del ensayo, hasta que durante tres pesadas consecutivas la variación de pesos sea menor del 0,1%. Inmediatamente después de la última pesada, se pesará con una balanza hidrostática la muestra sumergida en agua ( $M_a$ ).

Se determinarán los parámetros de densidad aparente ( $M_v$ ), absorción de agua (C) empleando las siguientes ecuaciones:

$$M_v = \frac{M_0 \cdot \rho_{H_2O}}{M_t - M_a} \quad [\text{ec.3}]$$

$$C = \frac{100(M_t - M_0)}{M_0} \quad [\text{ec.4}]$$

Siendo:

$\rho_{H_2O}$ , la densidad real del agua a 20 °C. [17]

Para este ensayo se ha utilizado una balanza de precisión Pioneer de OHAUS, con una sensibilidad de 0,001 gramos y capacidad máxima de 3,5 kilogramos. Permite el pesaje sobre el plato, y por debajo suspendiendo la muestra.



Figura 7.14. Balanza Pioneer OHAUS [4].

### 7.2.1 Procedimiento y resultados del ensayo

Para realizar este ensayo, lo primero que se debe hacer es acondicionar las muestras, tal y como indica la norma. Para ello se han pesado antes de secarlas utilizando la balanza Pioneer OHAUS.

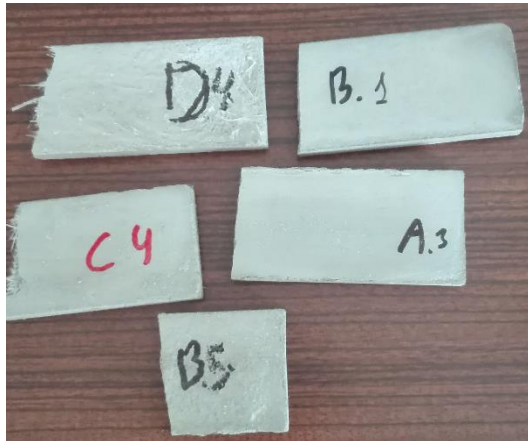


Figura 7.15. Muestras representativas [Fuente propia].



Figura 7.16. Pesada [Fuente propia].

A continuación, se introducen en el horno a  $70 \pm 5$  °C durante 24 h y se vuelven a tomar medidas de la masa, hasta que la diferencia entre dos pesadas consecutivas sea menor a un 0.1% de la masa de la muestra.



Figura 7.17. Muestras en el horno [Fuente propia].

Los resultados de las masas en las distintas pesadas se muestran en la tabla 7.14.

Serie	Pesada 1 (g)	Pesada 2 (g)	Pesada 3 (g)	Pesada 4 (g)	Pesada 5(g)
<b>A</b>	122.141	109.434	108.840	108.815	108.777
<b>B</b>	108.387	96.313	95.606	95.597	95.582
<b>B corta</b>	59.192	53.004	52.627	52.623	52.615
<b>C</b>	100.688	91.635	91.196	91.189	91.189
<b>D</b>	108.084	97.710	97.072	97.064	97.043

Tabla 7.14. Masa de las muestras previas al ensayo ( $M_0$ ).

Tras conseguir que la masa de cada muestra sea constante se procede con el ensayo de densidad aparente y absorción de agua, siguiendo el procedimiento que indica la norma (UNE – EN 14617-1).

Primeramente, se han colocado las muestras en un tanque sobre dos soportes, de modo que se reduzca al máximo la superficie de contacto con el apoyo, tal y como puede observarse en la figura 7.18.



Figura 7.18. Muestras en tanque vacío [Fuente propia].

Y, a continuación, se vierte el agua hasta que estén completamente sumergidas y cubiertas por 2 cm de agua.

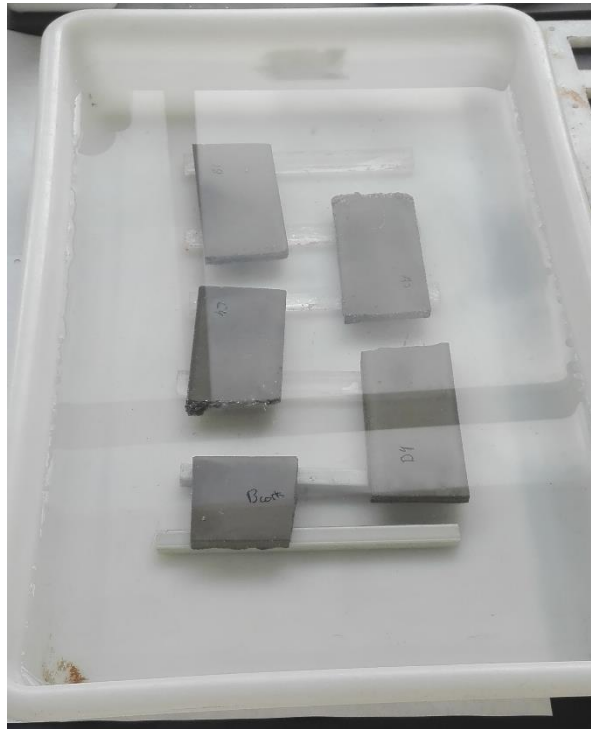


Figura 7.19. Piedras cubiertas de agua [Fuente propia].

Tras esta operación, se toman medidas de la masa de cada piedra después de estar sumergidas 1h, 8h y 24h, aproximadamente desde el inicio del ensayo y así sucesivamente hasta que la variación de peso en las probetas saturadas en agua durante tres pesadas consecutivas sea menor al 0.1% de la masa. Estas masas quedan reflejadas en la tabla 7.15.

Serie / masa	1 h (g)	8 h (g)	24 h (g)	48 h (g)	72 h (g)
<b>A</b>	123.584	124.260	124.625	124.800	125.282
<b>B</b>	110.397	110.862	111.382	111.710	112.170
<b>B corta</b>	60.685	60.850	61.184	61.318	61.557
<b>C</b>	103.730	104.296	104.550	104.691	104.989
<b>D</b>	111.722	112.202	112.687	112.959	113.152

	96 h (g)	120 h (g)	144h (g)
	125.590	125.675	125.686
	112.407	112.455	112.476
	61.708	61.742	61.772
	105.268	105.278	105.289
	113.397	113.490	113.512

Tabla 7.15. Masa de las muestras empapadas en agua y secadas con un paño (Mt).



Inmediatamente después de la última pesada y estando la masa de las probetas constante, se determina la masa aparente de cada muestra ( $M_a$ ) pesando cada muestra en agua, empleando para ello una balanza hidrostática, como se aprecia en la figura 7.20. Dicha masa por muestra se refleja en la tabla 7.16.



Serie	Masa (g)
<b>A</b>	69.417
<b>B</b>	59.638
<b>B corta</b>	32.938
<b>C</b>	58.405
<b>D</b>	59.008

Tabla 7.16. Masa aparente ( $M_a$ ).

Figura 7.20. Pesada hidrostática [Fuente propia].

Una vez se tienen todas estas medidas, se procede con el cálculo de la densidad aparente  $M_v$  y la absorción de agua  $C$  en porcentaje (%) por medio de las ecuaciones [ec.3] y [ec.4] descritas en 7.2. Se puede conseguir una información más completa sobre la absorción de agua de las piedras, calculando la cantidad de agua absorbida transcurridas 1 h, 8 h, 24 h, 48 h, 78 h, etc. Se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$C_i = \frac{100(M_i - M_0)}{M_0} \quad [\text{ec.5}]$$

Donde:

$M_i$  es la masa de la muestra pesada al aire después de un tiempo  $t_i$  de absorción de agua.

Los resultados por muestra de la densidad aparente y la absorción de agua se reflejan en la tabla 7.17:

Serie	Densidad aparente $M_v$ ( $\text{kg/m}^3$ )	Absorción de agua $C$ (%)
<b>A</b>	1929.855	15.545
<b>B</b>	1805.870	17.675
<b>B corta</b>	1821.635	17.404
<b>C</b>	1941.666	15.462
<b>D</b>	1777.430	16.971

Tabla 7.17. Resultados densidad y absorción de agua.

La absorción de agua de las muestras transcurridas 1 h, 8 h, 24 h, etc. hasta las 144 h se muestra más detalladamente en la tabla 7.18.



<b>Serie/horas</b>	<b>1 h (%)</b>	<b>8 h (%)</b>	<b>24 h (%)</b>	<b>48 h (%)</b>	<b>72 h (%)</b>
<b>A</b>	13.612	14.234	14.569	14.730	15.173
<b>B</b>	15.500	15.986	16.530	16.874	17.355
<b>B corta</b>	15.338	15.651	16.286	16.541	16.995
<b>C</b>	13.753	14.373	14.652	14.807	15.133
<b>D</b>	15.126	15.621	16.121	16.401	16.600

	<b>96 h (%)</b>	<b>120h (%)</b>	<b>144h (%)</b>
	15.456	15.535	15.545
	17.603	17.653	17.675
	17.282	17.347	17.404
	15.439	15.450	15.462
	16.852	16.948	16.971

*Tabla 7.18. Absorción de agua de las muestras en diferentes periodos.*

Observando la tabla 7.17, se comprueba que las densidades de las muestras fabricadas a partir de arena africana como árido (series A y C) es ligeramente superior a aquellas que se han fabricado con arena de vidrio plano (series B, B corta y D). Al comparar estas series entre sí, se aprecia valores homogéneos al presentar una variación menor al 4%. Los valores de densidades de las series B y B corta están muy próximos entre sí, algo de esperar pues la composición de ambos es exactamente la misma.

La absorción de agua en las piedras es bastante considerable, con valores que oscilan entre el 15.4 y el 17.7 %. Sus valores son también homogéneos si se comparan con las series que tienen el mismo árido, es decir, la serie A con la C y la B con la D.

### 7.3 Dureza Knoop.

El ensayo de dureza Knoop se realiza siguiendo la norma UNE EN 14205 (4). Si bien se ha seguido el procedimiento descrito en dicha norma, la misma se encuentra anulada y actualizada por una versión más reciente del año 2014. Para la realización de los ensayos de microdureza Knoop, se utiliza un Microdurómetro Struers Duramin (Figura 7.22). Este ensayo consiste en la realización de una serie de hendiduras sobre la muestra previamente pulida, empleando para ello un indentador piramidal de diamante (Figura 7.21).

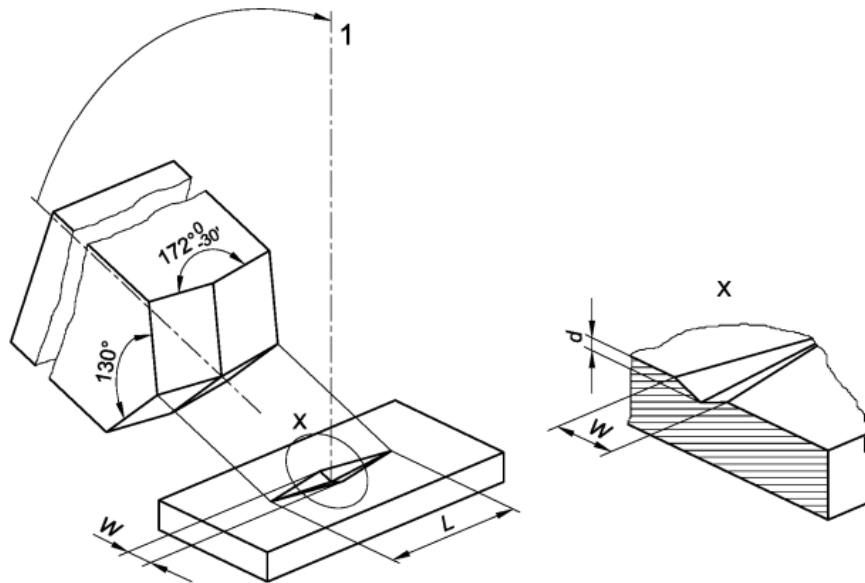


Figura 7.21. Indentador Knoop y su indentación (4).

Antes de la realización del ensayo se debe preparar las probetas, para ello, se emplea una pulidora automática Struers Labapol-5 (Figura 7.23), con discos abrasivos de grado 100, 220, 320, 800, 1000 y 1200 para el desbaste y pasta de alúmina de 5µm y 1µm para el pulido (Figuras 7.24 y 7.25), realizándose sobre una de las caras de la muestra.

Se establece en el sistema del microdurómetro el número de indentaciones, que en este caso será un total de 20 por muestra, separadas 1 mm entre ellas. La carga sobre el indentador se ajusta para obtener una huella de fácil lectura, que permita medir la longitud de la diagonal de la hendidura. Con estos parámetros se obtiene el valor de la dureza Knoop (HK) para cada indentación, por medio de la siguiente expresión:

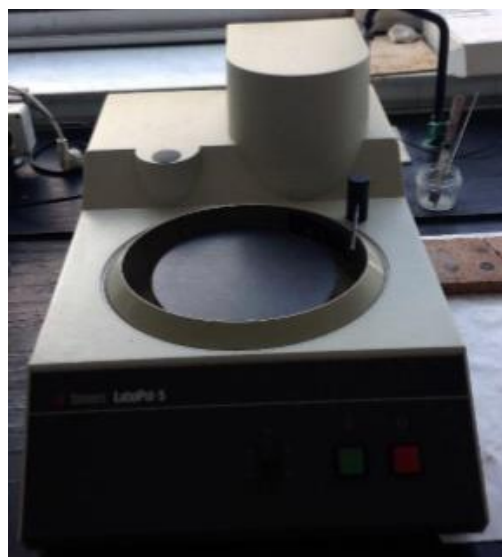
$$HK = 14.23 \frac{P}{L^2} \quad [\text{ec.6}]$$

Donde:

- P es la carga sobre el indentador, en N
- L es la longitud de la diagonal más larga de la indentación dejada por el indentador, en mm.



*Figura 7.22. Microdurómetro Struers Duramin -50. [4]*



*Figura 7.23. Struers Labapol - 5. [4]*



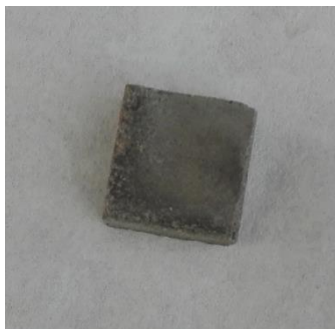
*Figura 7.24. Struers SiC-Paper 800 [4].*



*Figura 7.25. Paños para pulido [4].*

### **7.3.1. Procedimiento y resultados del ensayo**

Antes de proceder con el ensayo, ha sido necesario preparar las muestras para el mismo. Para ello, tras el ensayo de flexión, con una de las mitades de las muestras representativas de cada serie, se ha cortado un cuadrado de dimensiones  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ , como el de la figura 7.26.



*Figura 7.26. Cuadrado para ensayo de dureza [Fuente propia].*

El corte de la piedra en esas dimensiones se ha realizado en la fábrica donde la compañía Antonio Afonso, S. L. tiene su sede, utilizando una cortadora de disco de diamante como el de las figuras 7.27 y 7.28.



Figura 7.27. Máquina de corte [Fuente propia].



Figura 7.28. Corte de la piedra [Fuente propia].

Durante el corte, se hace circular agua constantemente contra la muestra y el disco para evitar que se calienten en exceso y además para que la piedra no se desmenuce. Realizar estos cortes no ha sido tarea sencilla, pues esta máquina fue diseñada para el corte de piezas de gran tamaño y no de tamaño tan reducido.

Una vez se obtuvieron los cuadrados de cada muestra, se llevaron al laboratorio donde el siguiente paso previo al ensayo de dureza era embutirlos en poliéster. Para preparar las muestras de esta manera, se han seguido los siguientes pasos:

- 1- Limpiar bien el vidrio que hace de fondo en el proceso. Para ello se ha utilizado un rascador de vidrios.



Figura 7.29. Rascador de vidrios [Fuente propia].

- 2- Luego se aplica cera desmoldeante por la superficie del vidrio y de los moldes que contiene el poliéster y las muestras de piedra para facilitar el posterior desmolde.



Figura 7.30. Cera desmoldeante [Fuente propia].

- 3- Se vierte 50 ml de poliéster en un vaso de plástico y a continuación unas 25 gotas del catalizador (endurecerá y solidificará el poliéster).

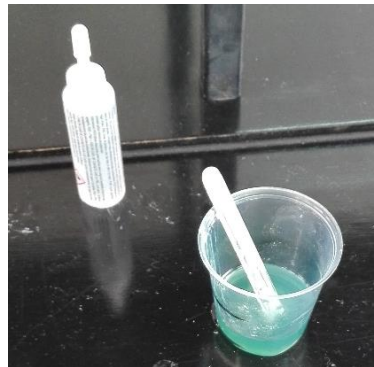


Figura 7.31. Poliéster y catalizador [Fuente propia].

- 4- El siguiente paso es verter la mezcla en los moldes circulares, donde previamente se habían colocado los cuadrados de cada muestra de piedra.



Figura 7.32. Moldes circulares [Fuente propia].



## 5- Esperar para el secado y curado del poliéster



Figura 7.33. Secado en los moldes  
[Fuente propia].

## 6- Desmoldeo.



Figura 7.34. Piezas desmoldeadas  
[Fuente propia].

Durante todo este proceso fue necesario usar equipos de protección individual, tales como guantes y mascarilla.

Tras preparar las muestras de esta manera, el siguiente paso antes de realizar el ensayo es pulir según se indica en el apartado 7.3. El número de probetas preparadas de esta manera para el ensayo de dureza Knoop es de 4, una de cada serie de piedras (A, B, C y D). Habría sido conveniente también aplicar una capa de brillo sobre la superficie que sirviera de ayuda para poder realizar las mediciones con el microscopio.

Se procede a continuación con el ensayo de microdureza Knoop, según norma UNE – EN 14205 (4). Para ello es necesario establecer primero las condiciones del ensayo, es decir, la carga y tiempo de aplicación sobre la muestra. En un principio se ha tomado 4.906 N (0.5 g), pero la huella obtenida era de difícil lectura. Por tanto, se ha reducido la carga hasta 1.961 N (0.2 g) manteniendo sobre la muestra durante 20 segundos.

- **Resultados**

Los valores de dureza obtenidos se colocan en orden creciente y no en el orden en que se han tomado las medidas. A continuación, se muestran dichos valores en HK, junto a la media del conjunto y los cuartiles (HK25, HK50 y HK75). Los cuartiles tienen la propiedad de dividir la serie en cuatro grupos de número iguales de términos. La proporción entre el HK75 y el HK25 facilita una indicación sobre la uniformidad de la piedra desde el punto de vista de la dureza: cuanto más próxima a la unidad dicha proporción, más uniforme es la piedra.

Serie A

Medida	Dureza (HK)
1	186
2	189
3	200
4	202
5	209
6	233
7	256
8	261
9	292
10	307
11	325
12	339
13	345
14	381
15	381
16	418
17	425
18	458
19	504
20	571
<b>Media</b>	324
<b>HK25</b>	227
<b>KH50</b>	316
<b>HK75</b>	390

Tabla 7.19. Valores de dureza, A

Serie B

Medida	Dureza (HK)
1	358
2	428
3	434
4	436
5	445
6	451
7	454
8	460
9	471
10	473
11	477
12	480
13	481
14	485
15	498
16	507
17	511
18	550
19	563
20	647
<b>Media</b>	480
<b>HK25</b>	450
<b>KH50</b>	475
<b>HK75</b>	500

Tabla 7.20. Valores de dureza, B



Serie C

Medida	Dureza (HK)
1	223
2	224
3	233
4	234
5	235
6	252
7	264
8	335
9	340
10	381
11	398
12	403
13	405
14	424
15	444
16	456
17	463
18	492
19	499
20	531
<b>Media</b>	<b>362</b>
<b>HK25</b>	<b>248</b>
<b>KH50</b>	<b>390</b>
<b>HK75</b>	<b>447</b>

Tabla 7.21. Valores de dureza, C

Serie D

Medida	Dureza (HK)
1	363
2	411
3	423
4	428
5	456
6	462
7	474
8	482
9	503
10	505
11	521
12	528
13	530
14	545
15	547
16	574
17	581
18	622
19	648
20	760
<b>Media</b>	<b>518</b>
<b>HK25</b>	<b>446</b>
<b>KH50</b>	<b>513</b>
<b>HK75</b>	<b>554</b>

Tabla 7.22. Valores de dureza, D

Al comparar las tablas entre sí, se observa que la dureza de las muestras elaboradas a partir de arena de vidrio plano (B y D) es superior a las de árido natural. Además, se aprecia como la dureza de las piedras que presentan fibra de vidrio entre sus componentes (C y D) es ligeramente superior a sus análogas sin fibra (A y B, respectivamente). La dureza de las series B y D se corresponde aproximadamente a 6 en la escala de Mohs.

A continuación, se muestran los diagramas de distribución de dureza de las distintas series.

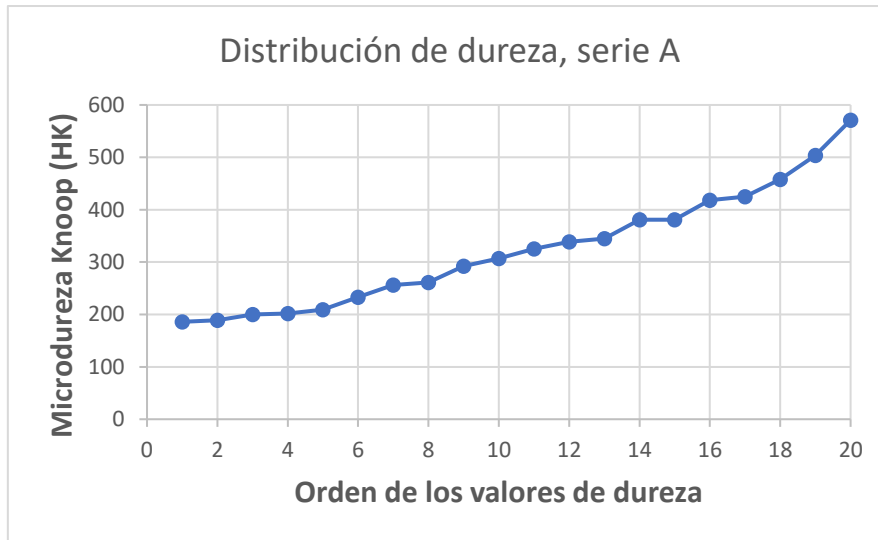


Figura 7.35. Diagrama de distribución de dureza, serie A [Fuente propia].

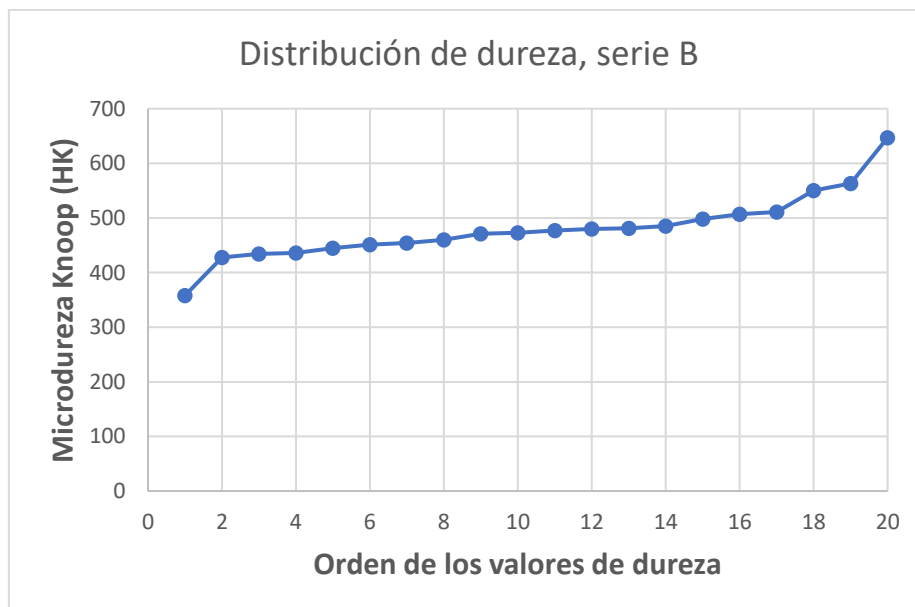


Figura 7.36. Diagrama de distribución de dureza, serie B [Fuente propia].

A la vista de estos gráficos, la serie B aparece con mayor uniformidad que la serie A, la cual parece ser más heterogénea.

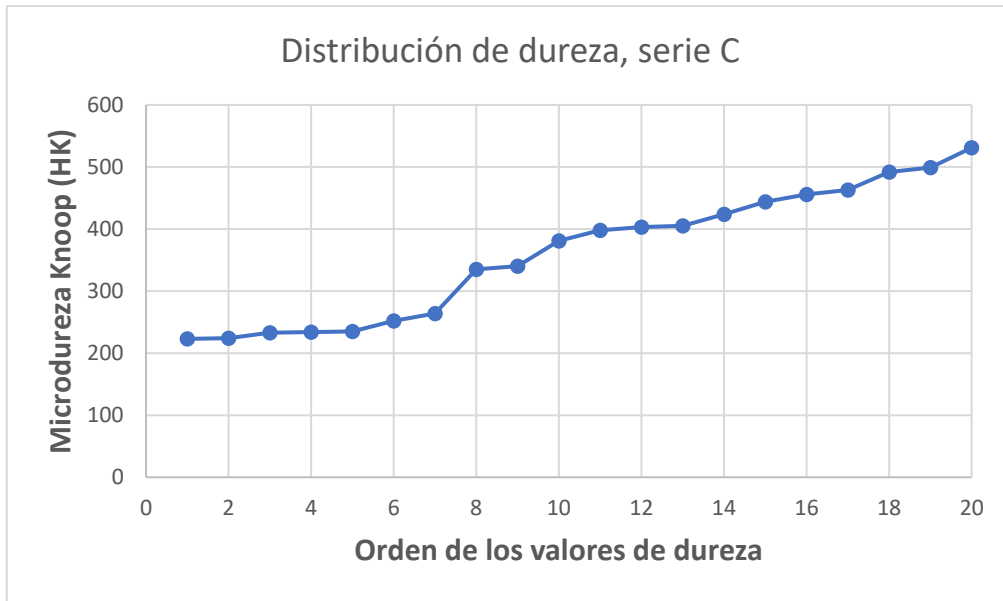


Figura 7.37. Diagrama de distribución de dureza, serie C [Fuente propia].

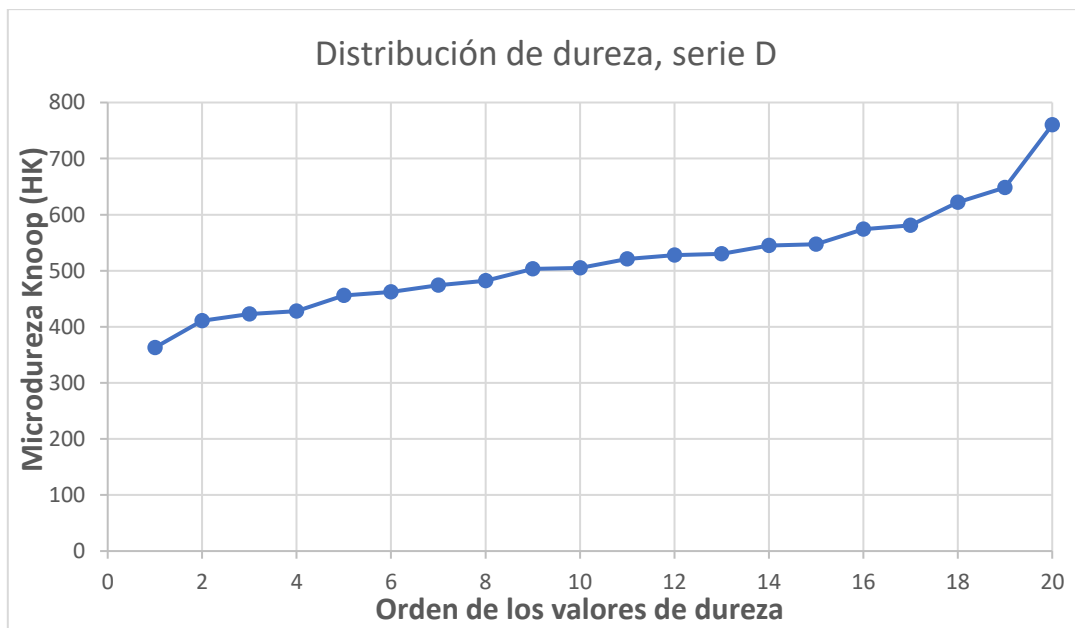


Figura 7.38. Diagrama de distribución de dureza, serie D [Fuente propia].

Lo mismo ocurre en este caso, donde la piedra elaborada con arena de vidrio plano resulta ser más homogénea y uniforme que el árido natural.

#### 7.4. Porosimetría por inyección de Mercurio

La porosimetría por inyección de Hg [18] es una técnica indirecta para la caracterización del sistema poroso de los materiales, obteniéndose fundamentalmente a partir de ella la distribución de la porosidad en función del tamaño aparente de acceso a los poros.

Se basa en los fenómenos de capilaridad generados por los líquidos que no mojan los sólidos con los que están en contacto. Así, un líquido como el mercurio que no penetra espontáneamente en los conductos capilares, precisa una presión "p" para su introducción que es inversamente proporcional al radio "r" de los mismos:

$$r = 2 \sigma \cos \alpha / p \quad [\text{ec.7}]$$

Donde: "σ" es la tensión superficial del Hg y "α" el ángulo de contacto sólido – líquido.

El ensayo porosimétrico consiste en inyectar mercurio a presión y registrar el volumen de mercurio absorbido. Para cada intervalo de presión considerado, el volumen de mercurio absorbido nos indica el volumen de poros de la muestra que tienen un determinado intervalo de tamaño de acceso.

Este ensayo, además de la curva de distribución del volumen de poros que presenta la muestra en función del tamaño de acceso a los mismos, también permite obtener otros parámetros del sistema poroso: porosidad accesible al Hg, porosidad atrapada, eficacia del drenaje, superficie específica, etc.

En la figura 7.39 se muestran diferentes ángulos de contacto para líquidos que mojan y que no mojan la superficie de contacto.

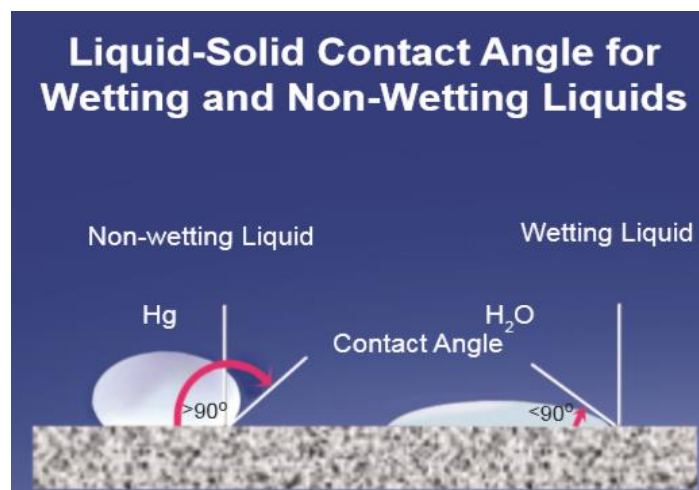


Figura 7.39. Líquidos sobre una superficie sólida [19].

En el caso del mercurio, se trata de un líquido que no moja la superficie de contacto, tal y como se observa en la siguiente figura.

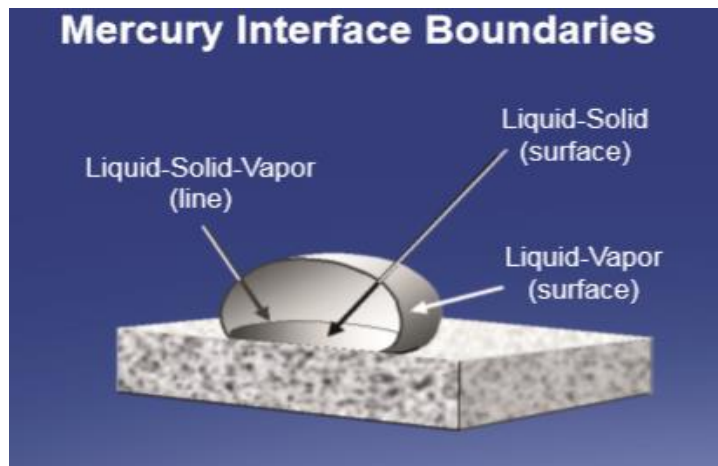


Figura 7.40. Líquidos que no mojan la superficie [19].

Ya que el mercurio no moja la mayoría de las sustancias y no penetra espontáneamente en los poros por acción capilar, debe ser forzado a entrar en los mismos por aplicación de una presión externa (figura 7.41).

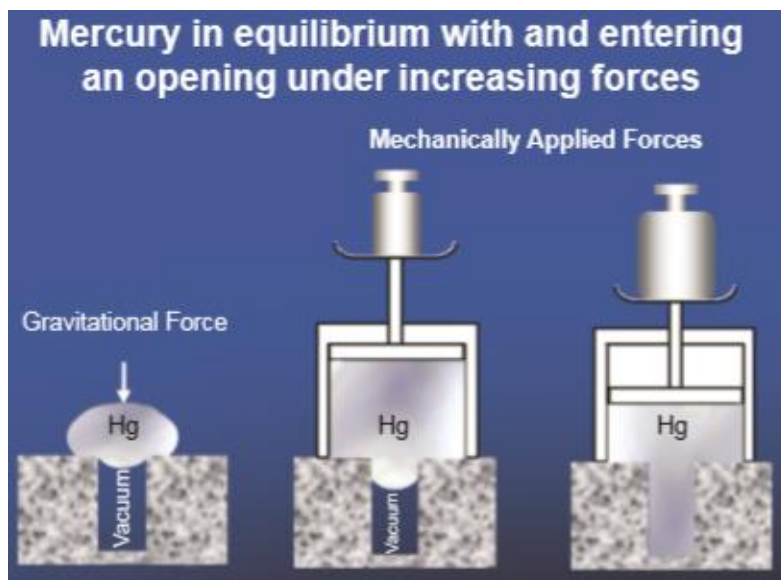


Figura 7.41. Fuerzas aplicadas mecánicamente [19].

A la hora de realizar el ensayo deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Sólo se consideran poros abiertos, accesibles al mercurio.
2. Se determina el tamaño de los conductos por los que tienen acceso los poros a partir de la superficie del material, y no el tamaño de los poros situados en su interior.
3. Se trabaja con presiones elevadas, lo cual puede alterar la geometría del medio poroso.

4. El ensayo precisa usar mercurio –material peligroso–, por lo que deben extremarse las normas de seguridad.
5. Se trata de un ensayo irreversible, ya que una fracción del mercurio queda atrapada en el sistema poroso.

#### ❖ **Resultados del ensayo por muestras.**

Se han sometido a este ensayo dos muestras de cada serie de piedras. Ha sido necesario obtener un tamaño de muestra de 1 cm de lado aproximadamente. Para ello, se ha utilizado la misma máquina de corte que la descrita en el apartado 7.3.1. Tras esto, es el laboratorio de Caracterización de Partículas y Microsuperficies, del Servicio General de Apoyo a la Investigación (SEGAI) [20], el encargado de llevar a cabo dicho ensayo. El equipo empleado para ello es Micromeritics, AUTOPORE IV 9510, para determinar y caracterizar macroporos, mesoporos, grietas y hendiduras existentes en la muestra. Los resultados completos de este ensayo se muestran en el Anexo III. Datos del laboratorio, ensayo de porosimetría.

Tras el ensayo se obtienen una serie de valores que caracterizan la piedra. Sin embargo, a continuación, se muestran los valores más representativos, es decir, los que mejor reflejan las características físicas de la piedra. Los mismos son:

- **Densidad bruta:** es la densidad del material sin tener en cuenta los huecos o intersticios que hay en su interior.
- **Densidad aparente:** esta densidad se calcula teniendo en cuenta los poros y espacios vacíos que hay dentro de las muestras. Hay que tener en cuenta que el mercurio sólo tiene acceso a aquellos poros abiertos y además con un límite de presión de 60000 psia.
- **Porosidad:** este valor indica, en porcentaje, la cantidad de huecos o poros que tienen las muestras. Es decir, cuanto mayor sea este valor, mayor cantidad de poros y, por tanto, menor compacidad. Por el contrario, si este valor es pequeño, indica que la muestra tiene pocos poros y espacios con aire, lo cual significa que hay una buena compacidad.
- **Tamaño medio de poros:** este valor indica el tamaño medio de los poros, en micrómetros ( $\mu\text{m}$ ).

▪ **Serie A.**

	<b>Densidad Bruta (g/ml)</b>	<b>Densidad ap. (g/ml)</b>	<b>Porosidad (%)</b>	<b>Tam. Medio de poros (µm)</b>
<b>A1</b>	1.6341	1.7616	7.2374	0.0197
<b>A2</b>	1.6545	1.7686	6.4533	0.0203

Tabla 7.23. Valores ensayo porosimetría, serie A.

Para cada una de las muestras se obtuvieron una serie de gráficas características del ensayo. En este apartado sólo se mostrarán las dos más importantes de la muestra A2. El resto se puede encontrar adjunto en el Anexo III. Datos del laboratorio, ensayo de porosimetría.

- **Curva de intrusión acumulativa vs presión.** Esta curva indica la cantidad de mercurio introducida en los poros a medida que la presión va aumentando. Primero se hace un vacío, que no aparece reflejado en el gráfico y posteriormente, comienza a aumentar la presión hasta alcanzar la presión máxima, estando todos los poros en ese momento llenos de mercurio. Se trata de una curva acumulativa, por lo que siempre va sumando la cantidad, hasta llegar a la máxima presión que el equipo permite (60000 psia). Se observa como a bajas presiones no se introduce mercurio en los poros, sino más bien cuando la presión ha aumentado considerablemente, debido básicamente a que los poros de la piedra son de tamaño muy reducido. Finalmente cuando la presión disminuye, el mercurio comienza a salir de los poros, pero siempre queda algo atrapado, como puede apreciarse en el gráfico. En este caso, unos 0.027 mL/g de mercurio.

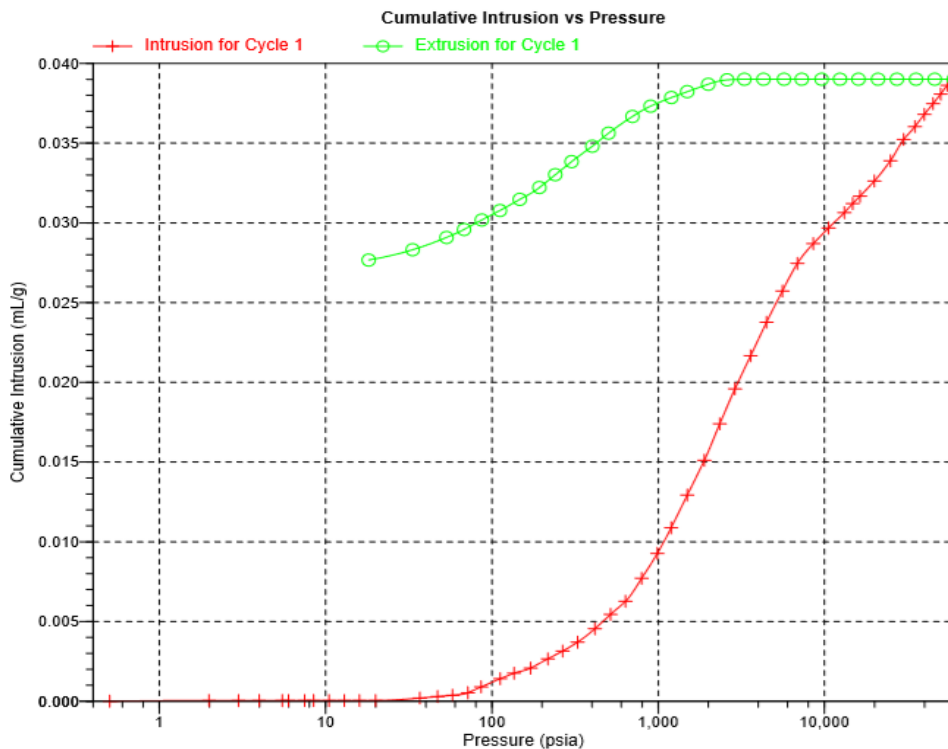


Figura 7.42. Curva de intrusión acumulativa VS presión [Fuente propia].

- **Curva de intrusión diferencial vs tamaño de los poros.** Esta curva lo que indica es la cantidad de mercurio introducida en la muestra, para un tamaño de poros determinado. Así, se puede observar que al principio la gráfica sólo presenta una línea recta, lo cual quiere decir que para esos tamaños de diámetro de poros no se introduce nada de mercurio. Eso significa que no hay poros de esos tamaños en la muestra. Es más bien a partir de unos  $4.9 \mu\text{m}$  cuando el mercurio comienza a penetrar en los poros. Pero como se observa en el gráfico, la mayoría de los poros se encuentran en un rango de tamaño entre  $0.01$  y  $0.003 \mu\text{m}$ . Estando el pico de máxima intrusión para un tamaño de  $0.0033 \mu\text{m}$  con una intrusión de  $1.661 \text{ mL/g}/\mu\text{m}$ , lo que indica que la mayoría de los poros tienen aproximadamente ese tamaño. La máxima presión que el equipo admite es  $60000 \text{ psia}$ , correspondiéndose con tamaños de poros de  $0.003 \mu\text{m}$ . Por tanto, el hecho de que en este gráfico no aparezcan tamaños inferiores, no significa que no existan, sino que debido a la resolución del equipo, no es posible detectarlos. Cabe destacar, por tanto, que los tamaños de poros de la piedra son demasiado pequeños y que este equipo ha sido diseñado para medir la porosidad de materiales más porosos.

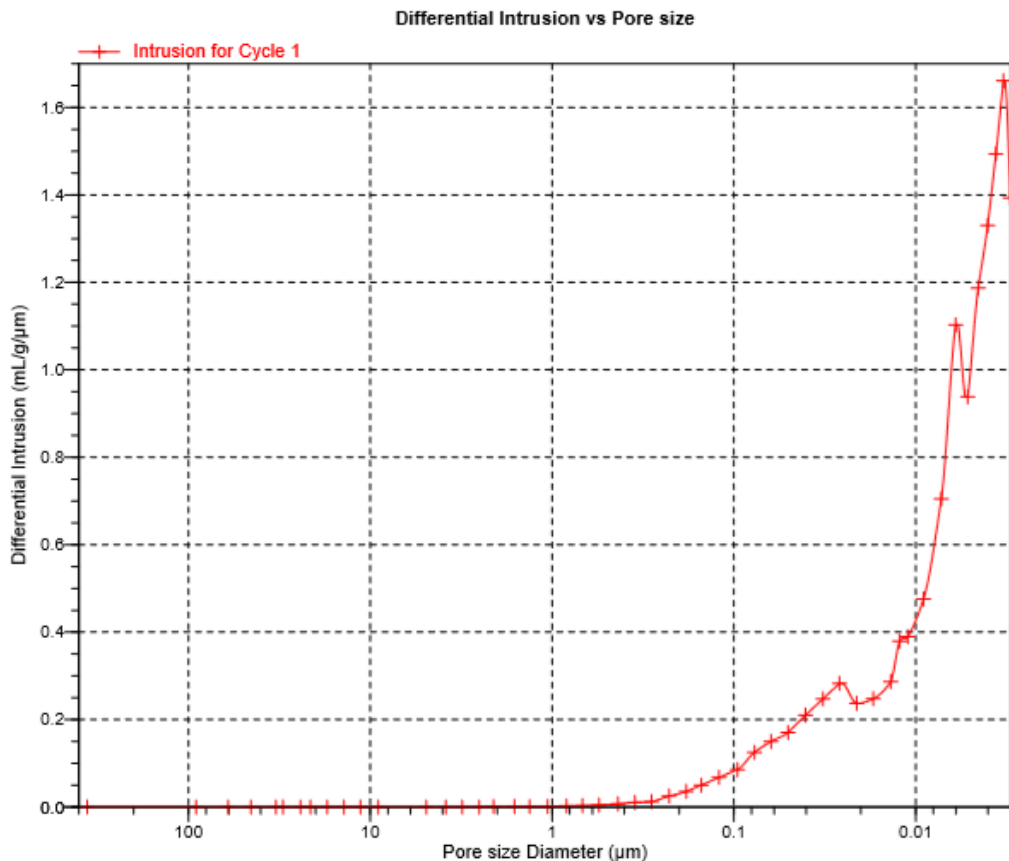


Figura 7.43. Curva de intrusión diferencial VS tamaño de los poros [Fuente propia].



- **Serie B.**

	<b>Densidad Bruta (g/ml)</b>	<b>Densidad ap. (g/ml)</b>	<b>Porosidad (%)</b>	<b>Tam. Medio de poros (µm)</b>
<b>B1</b>	1.5156	1.7131	11.5282	0.020
<b>B2</b>	1.5268	1.7139	10.9123	0.0228

Tabla 7.24. Valores ensayo porosimetría, serie B.

- **Serie C**

	<b>Densidad Bruta (g/ml)</b>	<b>Densidad ap. (g/ml)</b>	<b>Porosidad (%)</b>	<b>Tam. Medio de poros (µm)</b>
<b>C1</b>	1.6223	1.7699	8.3403	0.0196
<b>C2</b>	1.5736	1.7423	9.6861	0.0199

Tabla 7.25. Valores ensayo porosimetría, serie C.

- **Serie D**

	<b>Densidad Bruta (g/ml)</b>	<b>Densidad ap.(g/ml)</b>	<b>Porosidad (%)</b>	<b>Tam. Medio de poros (µm)</b>
<b>D1</b>	1.4594	1.6717	12.6999	0.0197
<b>D2</b>	1.4828	1.6939	12.4582	0.0269

Tabla 7.26. Valores ensayo porosimetría, serie D.

Como se observa en las tablas, los valores de porosidad de las series B y D (arena de vidrio plano como árido) son ligeramente superiores a los de las series A y C (arena africana). Los tamaños medios de poros son muy similares, siendo los de las series B y D también algo superiores, valor lógico pues a mayor porosidad mayor tamaño de los poros. También se puede observar, al comparar los datos de las tablas A con la C y la B con la D, como la porosidad de las dos últimas es algo mayor, debido al hecho de añadir fibra de vidrio a las mismas.

Destacar, que si bien las diferencias de porosidad no son muy acusadas, aquellas muestras fabricadas con árido natural (A y C) se presentan más favorables en cuanto a compacidad que las de arena de vidrio (B y D).

## 7.5 Densidad absoluta en picnómetro de helio.

La densidad es una de las propiedades más características de los materiales. Se obtiene dividiendo su masa entre el volumen que ocupa.

La determinación del peso específico relativo o densidad relativa de las partículas sólidas en un picnómetro [21], se basa en el desplazamiento de volúmenes, es decir, lo que realmente realizan estos aparatos es una medición muy precisa del volumen real de un sólido, basada en el principio de Arquímedes. El picnómetro es un recipiente de volumen estable que se llena con un fluido de densidad conocida. Cuando posteriormente se introduce la muestra cuya densidad o peso específico se quiere conocer, ésta desplaza un cierto volumen de fluido. El volumen de fluido desplazado, generalmente determinado por la diferencia de peso del conjunto, equivale al volumen de la muestra objeto de estudio. Conocida la masa o el peso de la muestra con gran exactitud, es posible calcular su densidad o su peso específico respectivamente, independientemente de que la morfología de la muestra sea más o menos regular o irregular o se encuentre en bloque o en polvo.

Las propiedades de los materiales geológicos que determinan su comportamiento en el picnómetro, tanto de agua como de gas, son su red porosa, superficie específica y tamaño de partícula, así como los fenómenos de interacción que se producen entre la superficie de las mismas y el fluido del picnómetro.

Por ello, la diferencia fundamental entre el picnómetro de agua y el picnómetro de gas radica en las propiedades físico-químicas de los dos fluidos utilizados: tamaño molecular, energía de hidratación y capacidad de adsorción, fundamentalmente debidas a fuerzas de tipo dipolo o van der Waals. De entre todas estas propiedades, la característica específica del picnómetro de gases que funciona con gases ideales potencialmente no reactivos con la superficie de las partículas sólidas.

Para este ensayo se ha empleado un Picnómetro de helio (Micromeritics, ACCUPYC 1330, figura 7.44) que permite la medida de la densidad absoluta de sólidos, disponible en el Laboratorio de Caracterización de Partículas y Microsuperficies, del Servicio General de Apoyo a la Investigación (SEGAI). El picnómetro de helio permite la medida de densidades absolutas mediante la técnica de desplazamiento de gas helio. Es un sistema automático, no destructivo de la muestra que permite analizar muestras sólidas de cualquier tipo (polvo, pastillas, fibras, etc.) así como muestras semisólidas, siempre que su presión de vapor sea inferior a 25 micras de Hg.

Las muestras que se han sometido a este ensayo son las mismas que posteriormente son sometidas al ensayo de porosimetría.



Figura 7.44. Picnómetro de helio [Fuente propia].

#### ▪ Resultados del ensayo

Los resultados del ensayo para cada muestra aparecen reflejados en la siguiente tabla. El informe del ensayo se encuentra adjunto en el Anexo IV. Datos de laboratorio, densidad absoluta mediante picnómetro de helio.

Serie	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Volumen (cm <sup>3</sup> )
A1	2.4471	0.9811
A2	2.4375	1.0331
B1	2.2928	1.0890
B2	2.2907	1.0979
C1	2.4533	0.9924
C2	2.4368	0.9571
D1	2.3102	0.9523
D2	2.3606	0.9773

Tabla 7.27. Resultados de densidad y volumen.

A la vista de estos resultados, se puede decir que los valores de densidad son homogéneos, pues apenas hay variación dentro de cada serie de muestras. Se observa como las series fabricadas a partir de arena africana (A y C) presentan una densidad superior que las fabricadas con arena de vidrio plano, coincidiendo esta tendencia con la de los anteriores ensayos.

## 7.6 Microscopía digital.

Se realiza microscopía digital para poder observar la estructura microscópica de las probetas y observar las posibles reacciones del cemento con el vidrio. Para ello se utilizó un microscopio óptico digital Dino-Lite modelo AM -211 (Figura 7.45).

Primero se han escogido cuatro probetas, una de cada lote de muestras, y se han observado directamente sin haberlas pulido. Posteriormente, se les realiza la microscopía digital a las probetas que han sido seleccionadas para la prueba de dureza, tras haber sido preparadas según el procedimiento descrito en el apartado 7.3, es decir, tras haberlas embutido en poliéster, desbastado y pulido.



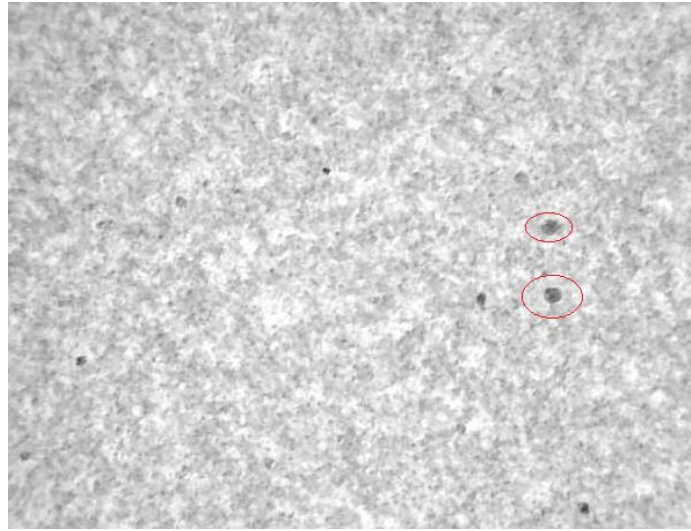
Figura 7.45. Microscopio óptico digital Dino-Lite [4].

### 7.6.1 Procedimiento y resultados.

Este ensayo es bastante sencillo de realizar. Tan sólo se trata de conectar el microscopio Dino – Lite a un ordenador mediante conexión USB, teniendo previamente instalado el software del equipo, y ya es posible observar las muestras. Se han tomado imágenes de cada muestra antes de pulir y después de haberlas pulido. En el primer caso, se obtienen imágenes de muy baja calidad, pues apenas permiten observar la estructura y componentes de cada piedra. Sin embargo, en las mismas se pueden observar algunas zonas con puntos negros. Estos no son más que pequeños agujeros, propios de la piedra y que se forman durante el curado del cemento. El microscopio, por la diferencia de profundidad, los detecta de esta manera.

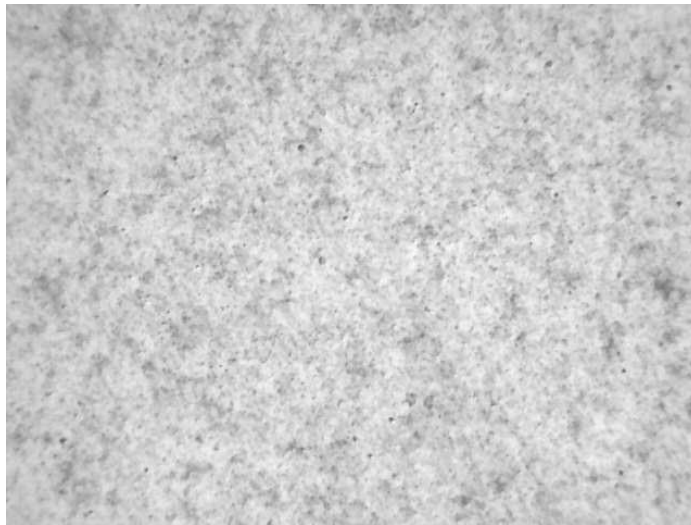
Muestras sin pulir:

- Serie A



*Figura 7.46. Serie A, sin pulir [Fuente propia].*

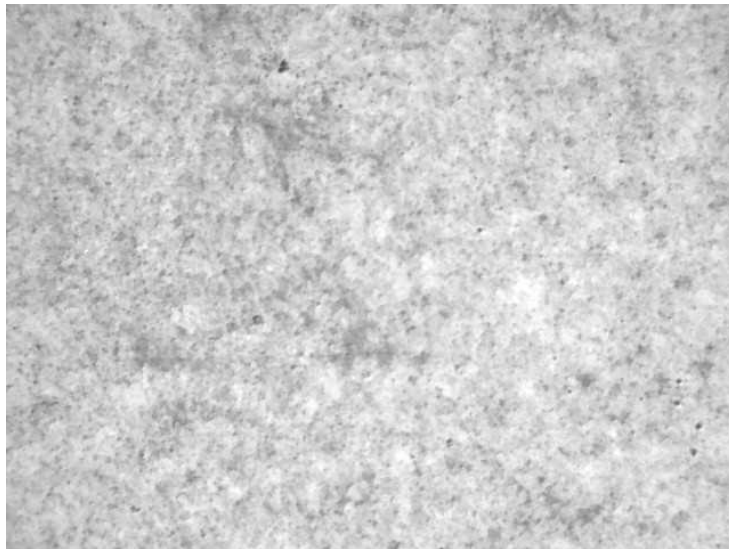
- Serie B



*Figura 7.47. Serie B, sin pulir [Fuente propia].*

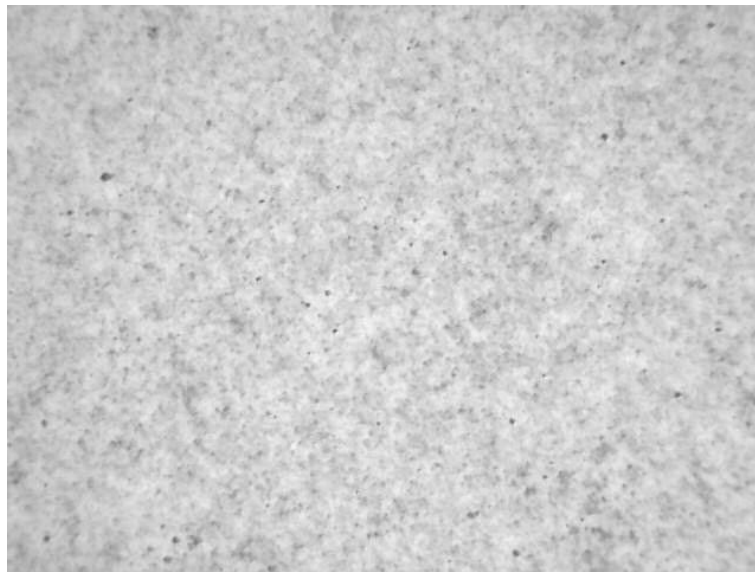
A las dos siguientes series se les había añadido además fibra de vidrio. Por la calidad de la superficie al momento de capturar las imágenes, no se obtiene una buena calidad que permita la distinción de sus componentes.

- Serie C



*Figura 7.48. Serie C, sin pulir [Fuente propia].*

- Serie D

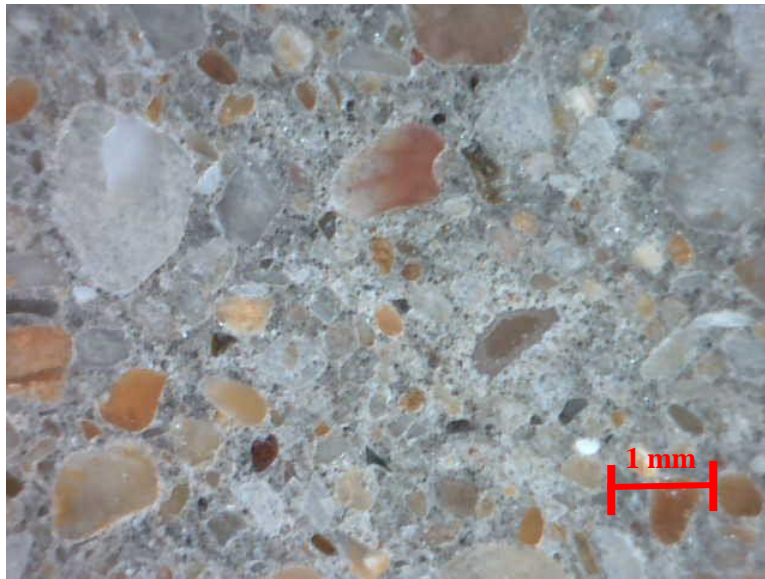


*Figura 7.49. Serie D, sin pulir [Fuente propia].*

Tras el proceso de desbaste y pulido descrito en el apartado 7.3, se obtienen unas imágenes más claras y definidas, que permiten distinguir de mejor manera los diferentes componentes de la piedra. En las mismas se ha incorporado una escala, en color rojo, equivalente a 1 mm en la realidad, lo cual permite una mejor estimación de la distribución de los tamaños de grano de árido en las imágenes.

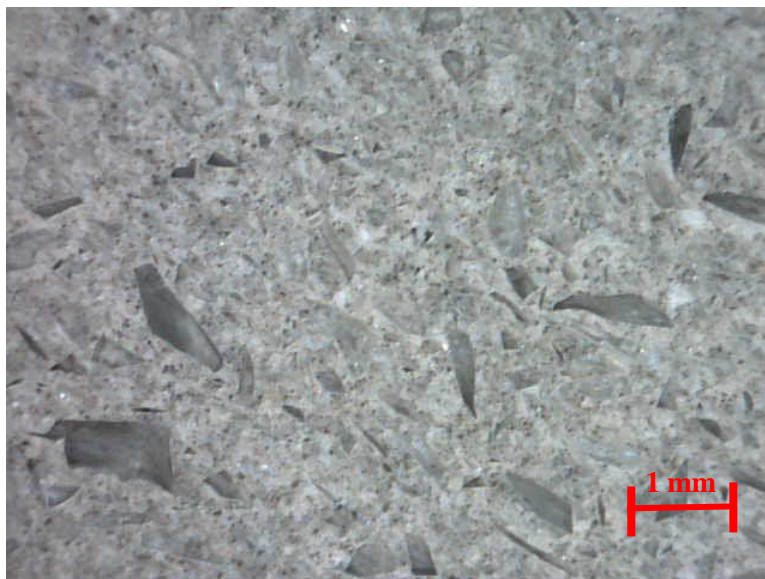


- Serie A



*Figura 7.50. Serie A, pulida [Fuente propia].*

- Serie B



*Figura 7.51. Serie B, pulida [Fuente propia].*

Al comparar ambas imágenes, se observa como la serie A (arena africana) está compuesto por un árido más heterogéneo que el de la serie B, donde se ha empleado arena de vidrio plano. También se aprecia como el árido natural tiende a una geometría más redondeada, debido a que se ha formado por la erosión a lo largo de millones de años. Por el contrario, la arena de vidrio plano presenta formas más angulosas y alargadas debido a la fracturación mecánica necesaria para su obtención. Se distinguen, además, distintos tamaños de áridos, tal y como era de esperarse. Los tamaños de los áridos se presentan de acuerdo a la distribución granulométrica dada en la tabla 4.2, encontrando tamaños desde los 2 mm hasta inferior a 0.063 mm, habiendo un mayor porcentaje (38 %) para partículas de tamaño 0.5 mm.



- Serie C

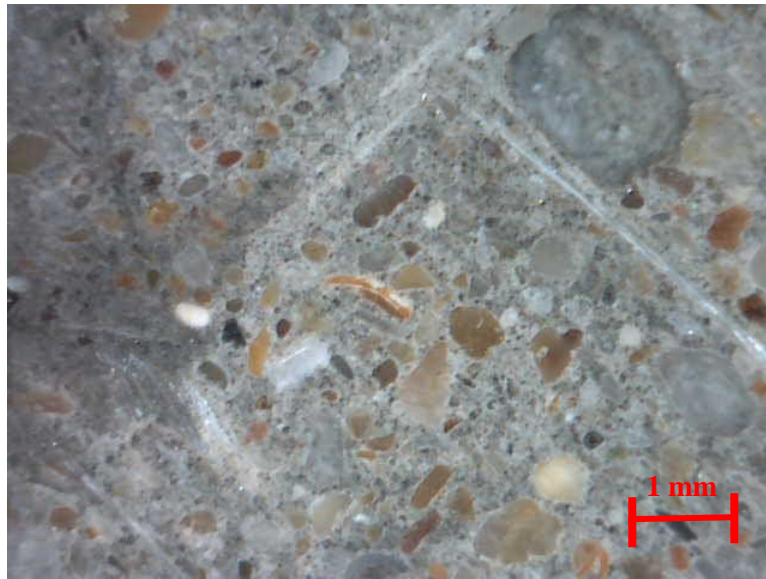


Figura 7.52. Serie C, pulida [Fuente propia].

- Serie D

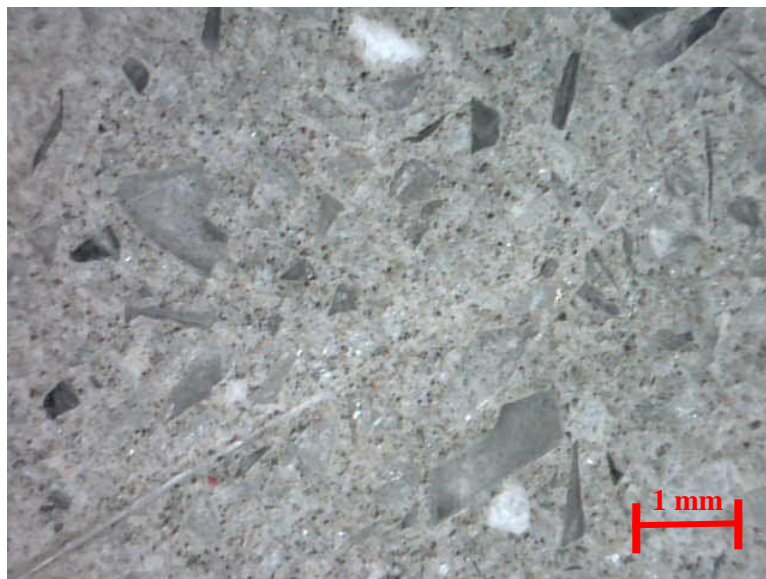


Figura 7.53. Serie D, pulida [Fuente propia].

Estas series contienen además fibra de vidrio, tal y como se observa en forma de líneas blancas. En ninguno de los casos se aprecian reacciones indeseadas del cemento con la arena de vidrio, por lo que su función es de aglomerante entre las distintas partículas de los áridos. Sin embargo, mediante un ensayo álcali – sílice se podría corroborar esta afirmación.

## 8. Análisis de resultados.

Con los datos obtenidos tras los diferentes ensayos, se puede caracterizar de forma general la piedra aglomerada preparada. A continuación, se muestra un resumen de dichos resultados para cada una de las series.

- Serie A (arena natural + cemento):

<b>Resistencia a flexión (MPa)</b>	8.3 ± 0.7
<b>Módulo a flexión (MPa)</b>	16178.8
<b>Densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1929.85
<b>Absorción de agua (%)</b>	15.54
<b>Dureza (HK)</b>	324
<b>Porosidad (%)</b>	6.85
<b>Diam. Medio Poros (µm)</b>	0.02
<b>Densidad aparente Hg (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1765.1
<b>Densidad absoluta He (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2442.3

*Tabla 8.1. Resumen resultados, serie A.*

- Serie B (arena de vidrio plano + cemento):

<b>Resistencia a flexión (MPa)</b>	9.5 ± 1.7
<b>Módulo a flexión (MPa)</b>	13450.7
<b>Densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1813.75
<b>Absorción de agua (%)</b>	17.54
<b>Dureza (HK)</b>	480
<b>Porosidad (%)</b>	11.22
<b>Diam. Medio Poros (µm)</b>	0.0214
<b>Densidad aparente Hg (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1713.5
<b>Densidad absoluta He (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2291.75

*Tabla 8.2. Resumen resultados, serie B.*

- Serie C (arena natural + cemento + fibra de vidrio):

<b>Resistencia a flexión (MPa)</b>	20.0 ± 2.5
<b>Módulo a flexión (MPa)</b>	14841.6
<b>Densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1941.67
<b>Absorción de agua (%)</b>	15.46
<b>Dureza (HK)</b>	362
<b>Porosidad (%)</b>	9.01
<b>Diam. Medio Poros (µm)</b>	0.0197
<b>Densidad aparente Hg (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1756.1
<b>Densidad absoluta He (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2445.05

*Tabla 8.3. Resumen resultados, serie C.*

- Serie D (arena de vidrio plano + cemento + fibra de vidrio):

<b>Resistencia a flexión (MPa)</b>	16.9 ± 3.3
<b>Módulo a flexión (MPa)</b>	11452.5
<b>Densidad aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1777.43
<b>Absorción de agua (%)</b>	16.97
<b>Dureza (HK)</b>	518
<b>Porosidad (%)</b>	12.58
<b>Diam. Medio Poros (µm)</b>	0.0233
<b>Densidad aparente Hg (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1682.8
<b>Densidad absoluta He (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2335.4

Tabla 8.4. Resumen resultados, serie D.

Se pueden agrupar todos estos resultados en una tabla de modo que puedan ser comparados de forma más sencilla y visual.

	<b>Serie A</b>	<b>Serie B</b>	<b>Serie C</b>	<b>Serie D</b>
<b>MOR (MPa)</b>	8.3 ± 0.7	9.5 ± 1.7	20.0 ± 2.5	16.9 ± 3.3
<b>Mod. a flexión (MPa)</b>	16178.8	13450.7	14841.6	11452.5
<b>Dens. aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1929.85	1813.75	1941.67	1777.43
<b>Abs. Agua (%)</b>	15.54	17.54	15.46	16.97
<b>Dureza (HK)</b>	324	480	362	518
<b>Porosidad (%)</b>	6.85	11.22	9.01	12.58
<b>Diam. Medio Poros (µm)</b>	0.020	0.0214	0.0197	0.0233
<b>Dens. Aparente Hg (kg/m<sup>3</sup>).</b>	1765.1	1713.5	1756.1	1682.8
<b>Dens. absoluta He (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2442.3	2291.75	2445.05	2335.4

Tabla 8.5. Resumen de resultados.

A partir de los valores mostrados en la tabla 8.5, se puede comparar los resultados de las distintas series entre sí con objeto de ver las diferencias existentes y obtener unas conclusiones al respecto.

En primer lugar, hay que analizar las series A y B correspondientes a las muestras elaboradas a partir de arena natural y arena de vidrio plano, respectivamente. Al comparar los valores de resistencia a flexión (MOR), se comprueba cómo sus valores están próximos. Sin embargo, la serie A presenta unos resultados mucho más homogéneos pues su desviación típica es sólo ± 0.7 a diferencia de la serie B cuya desviación típica es de ± 1.7, lo cual indica que la resistencia a flexión de cada una de las probetas se aleja más de la media, dando unos resultados menos fiables. Además, en la serie B sólo se han

podido analizar tres muestras resultando en una estadística corta, siendo esto insuficiente para poder extraer unas conclusiones con veracidad.

En cuanto a los valores de densidad aparente, se observa como la serie A es superior a la serie B. Esta tendencia se repite en las densidades obtenidas mediante los diferentes ensayos. Por lo tanto, se puede garantizar que emplear arena de vidrio plano como árido supondrá una reducción en el peso de las piedras que a partir de ella se produzcan. Los valores de densidad obtenidos mediante picnómetro de helio son considerablemente mayores al resto. Esto es debido, básicamente, a que mediante esta técnica se puede acceder a poros de tamaño muy reducido y a zonas inaccesibles por el agua o el mercurio, así se obtienen unos resultados más precisos y reales.

Se observa una mayor dureza en las series elaboradas a partir de arena de vidrio plano. También las series con fibra de vidrio (C y D) presentan una dureza ligeramente superior a su respectivo sin fibra. Al comparar estos valores con los de resistencia a flexión y módulo a flexión, se obtiene una relación inversamente proporcional, donde a mayor resistencia a flexión menor dureza, y viceversa.

La absorción de agua de la serie B (arena de vidrio plano) es ligeramente superior a la de la serie A. Esto resultaría desfavorable, pues una mayor absorción de agua, combinada con las sustancias que disuelve a su paso (sales, ácidos y bases) juntos a los cambios de temperatura, podría ver comprometida la durabilidad de la piedra. Además, en su recorrido por el interior del material, el agua arrastra y disuelve las sales solubles, aumentando la porosidad original y creando depósitos de sales en lugares no deseados.

En cuanto a la porosidad, se observa como la piedra elaborada a partir de arena de vidrio plano (B) es mayor que la de árido natural, lo cual indica un mayor número de huecos en la misma. Esto significa que la serie B es menos compacta y más permeable que la A. En el estudio de la durabilidad es importante conocer la posibilidad de penetración de los agentes agresivos a través de la red de poros y capilares. En este aspecto, la serie B se presenta con mayor desventaja. No obstante, las diferencias no son muy significativas y ambas series se encuentran dentro del rango de tamaños que La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) considera mesoporos ( $2 \text{ nm} < \phi < 50 \text{ nm}$ ), siendo este rango de tamaños los que determinan en mayor medida el comportamiento frente a durabilidad por su mayor conexión.

Es necesario también analizar los efectos de añadir fibra de vidrio a la piedra. Para ello se han elaborado las series C (árido natural) y D (arena de vidrio plano) incluyendo fibra de vidrio en su composición. Al comparar los resultados del ensayo a flexión de las series A con C y B con D, se observan sus beneficios, obteniéndose unos valores de resistencia mucho más elevados en los últimos casos.

La serie C presenta un mayor esfuerzo de rotura (MOR) con un valor de 20.0 MPa frente al de la serie D con un valor de 16.9 MPa. Lo cual significa que la piedra fabricada a partir de arena de vidrio plano es menos resistente a la flexión. Sin embargo, la desviación típica de la serie D ( $\pm 3.3$ ) refleja que hay valores que se alejan considerablemente de la

media, en este caso se trata de la muestra D.5. Si se descuenta la misma de la serie, la media aumentaría hasta 18.2 MPa y los resultados estarían más próximos, con una desviación típica de  $\pm 1.6$  MPa.

Las densidades de las series C y D siguen la misma tendencia que en el caso anterior, apuntando a favor de la arena de vidrio plano en cuanto a peso se refiere. El coeficiente de absorción de agua, también sigue la misma orientación, con una mayor capacidad de absorción de agua para la piedra que presenta la arena de vidrio plano, siendo esto una desventaja.

En el caso de la porosidad, también sigue la misma línea que anteriormente, con valores ligeramente superiores para aquellas muestras fabricadas a partir de arena de vidrio. En este caso, la serie D presenta una porosidad del 12.58% algo mayor que la serie B con un 11.22% debido a que la fibra de vidrio puede crear más espacios vacíos o huecos (poros) entre los diferentes constituyentes de la piedra.

Tras comparar los resultados de la piedra fabricada entre sí, resultaría interesante realizar una comparativa con otras piedras comerciales de las mismas características. En este caso, se trata del producto de la compañía (Glassydur), cuya composición es la misma a la serie C (cemento + árido natural + fibra de vidrio) de nuestro lote de piedras. Si bien, la información que disponemos es de un ensayo a flexión de 4 puntos, en lugar de 3 puntos como es el caso en este trabajo, los valores pueden ser orientativos. Información adicional puede encontrarse en el Anexo II.

	<b>Glassydur</b>	<b>Serie C</b>	<b>Serie D</b>
<b>MOR (MPa)</b>	17.5	20.0	16.9
<b>Densidad (T/m<sup>3</sup>)</b>	1.7 – 2.3	1.9	1.8

Tabla 8.6. Comparativa con el Glassydur.

Los valores de densidad de nuestra piedra (series C y D), se encuentran dentro del rango de valores del Glassydur, siendo estos los valores entre los cuales la densidad de cualquier GRC suele estar comprendida. Se observa como la serie D (arena de vidrio plano) es la que menor resistencia a flexión presenta. Sin embargo, las diferencias no son considerables, lo que lleva a pensar que con una mayor investigación en el uso de la arena de vidrio plano como árido, se podrá mejorar estos resultados.

Se ha comparado los valores de porosidad de nuestra piedra con los de un estudio realizado por el departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Madrid sobre la permeabilidad y porosidad de hormigones autocompactantes [22]. Esta clase de hormigones se diferencian principalmente de los convencionales por su comportamiento en estado fresco. Su composición es diferente, tienen un alto contenido de finos, incluyen aditivos en dosis mayores y reducen el contenido de árido grueso. Sus ventajas más destacables son:

- Hormigonado fácil y rápido.
- No es necesario el vibrado del hormigón en la puesta en obra.
- Mayor resistencia a la compresión con igual contenido de cemento.

- Excelente acabado superficial por su capacidad de adaptación y perfecto llenado del encofrado. Además, puede aplicarse en formas complejas.
- Compatible con armado de fibras, adición de colorantes, etc.
- Mayor durabilidad e impermeabilidad, pues el hormigón convenientemente compactado retrasa el deterioro y carbonatación.

En ese estudio se ha utilizado ocho tipos de cementos y arena silícea de río, además de aditivos y adiciones reactivas (cenizas volantes y filler calizo) en los diferentes hormigones que se elaboraron. Los valores de porosidad de los mismos se encuentran entre un 8.45% y un 13.3% dependiendo del tipo de cemento y de las adiciones añadidas. En nuestro caso la porosidad se encuentra entre 11.22% y 12.58% para las series B y D (arena de vidrio plano). De este modo se corrobora que nuestra piedra se encuentra dentro del rango de porosidad de los hormigones autocompactantes, pudiendo llegar a competir con las ventajas que ello ofrece.

A pesar de que en la mayoría de los casos los resultados de los ensayos apuntan de manera desfavorable a la arena de vidrio plano, todavía es muy pronto para descartarla como futuro candidato y sustituto a los áridos naturales. En este caso, la falta de experiencia y conocimiento en este campo han provocado que la investigación se quede un poco corta en cuanto a resultados, lo cual no ha permitido concluir con claridad la posible viabilidad de la arena de vidrio plano. No obstante, estos resultados se podrían mejorar continuando con una investigación donde se elaboren más muestras, variando la granulometría de la arena de vidrio hasta conseguir una serie que supere en resistencia a flexión a las piedras fabricadas con árido natural.



## 9. Conclusiones

### 9.1. Español

El objetivo inicial de este trabajo era la fabricación de diferentes muestras de piedra artificial utilizando como áridos arenas de origen natural y residuos de vidrio plano y como aglomerante cemento. Así se pretendía estudiar la posible viabilidad del vidrio plano como árido para la construcción para de esta manera, reducir la explotación de áridos en canteras y además reducir la cantidad de residuos que de esta clase se generan constantemente. También se ha considerado añadir fibra de vidrio a la piedra de modo que se puedan estudiar los efectos y beneficios de la misma.

El estudio se dividió, de modo general, en dos partes. Por un lado, la obtención de la arena de vidrio para la posterior fabricación de la piedra y, por otro lado, la caracterización de dicha piedra por medio de una serie de ensayos. Las conclusiones que se pueden obtener al respecto son las siguientes:

1. En cuanto a la fabricación de las piedras, ha sido necesaria mayor cantidad de agua de amasado (un litro de diferencia) cuando se ha utilizado arena de vidrio plano en lugar del árido natural. Esto es debido básicamente a que, en el momento de realizar la mezcla, el árido natural tenía un mayor porcentaje de humedad que la arena de vidrio plano. También debido a la diferencia de densidades entre ambos, la dosificación ha variado ligeramente.
2. Tras el ensayo de flexión, se obtienen unos resultados que se encuentran próximos entre sí, pero debido a las grietas que aparecieron en tres de las seis muestras de la serie B, no se dispone de datos suficientes que permita una buena estadística. Por tanto, no se puede asegurar que la arena de vidrio plano aporte mejores características mecánicas a la piedra, sin embargo, es posible alcanzar unos mejores resultados tras una investigación más profunda.
3. La fibra de vidrio mejora considerablemente la resistencia a flexión. La serie D, elaborada con arena de vidrio plano, presenta valores ligeramente inferiores. Se observan valores que se encuentran alejados de la media, como es el caso de la probeta D.5 lo cual influye notablemente en su resistencia a flexión promedio. De estos resultados se puede concluir, además, que al elaborar piedra artificial utilizando como aglomerante cemento, independientemente del árido, sería muy conveniente que las mismas incorporen fibra de vidrio si en su uso final van a recibir cargas que las hagan trabajar a flexión. El hormigón sin armar tiene una mala resistencia a la tracción. No se descarta la posibilidad de que con una mayor investigación en el uso de la arena de vidrio plano se consigan resultados que puedan superar en resistencia a flexión a las piedras fabricadas con árido natural.



4. La forma de los granos de la arena de vidrio es un factor que influye en la resistencia a flexión de las piedras. Desde el punto de vista microestructural, el agregado reciclado de vidrio plano presenta formas más alargadas y angulosas, lo cual se traduce en una menor resistencia a la flexión.
5. La mejora de la dureza en las muestras elaboradas con arena de vidrio plano supone que las mismas puedan ser utilizadas en aplicaciones donde la dureza superficial sea más importante que la resistencia a flexión. Por ejemplo, como aplacado o revestimiento de estructuras.
6. Las densidades que se obtuvieron en los diferentes ensayos coinciden en la misma tendencia. La piedra fabricada con árido natural presenta una densidad ligeramente superior que la misma a partir de vidrio plano, resultando esto ventajoso para este último al suponer así un ahorro de peso en la pieza final.
7. La absorción de agua de las muestras elaboradas con arena de vidrio plano (B y D) es ligeramente superior, siendo esto una desventaja ya que el agua combinada con las sustancias que disuelve a su paso y a los cambios de temperatura, podría comprometer la durabilidad de la piedra.
8. Después del ensayo de porosimetría y al comparar los resultados entre sí, se observa que la porosidad de las series elaboradas a partir de arena de vidrio plano es algo superior (12%) a las de árido natural (8%), lo cual supone una mayor permeabilidad a través de la red de poros y capilares, y al igual que en el caso anterior, comprometería aún más la durabilidad de la piedra. Sin embargo, la diferencia no es muy grande y ambas se encuentran dentro del rango de tamaños que la IUPAC considera mesoporos, siendo este el rango de tamaños que mejor determinan su comportamiento frente a la durabilidad por su mayor conexión.
9. Como se ha detallado a lo largo de este proyecto, elaborar piedra artificial con vidrio plano propondría una vía de reciclaje para dicho vidrio, ya que actualmente se acumula en vertederos. Se trata de un proceso relativamente barato y rápido, ya que consiste en la recogida, lavado y triturado del vidrio. Para ello, sería necesario establecer un marco normativo que regulara el uso del vidrio como árido dentro del sector de la construcción y que favoreciera su utilización de forma generalizada.
10. Tanto desde el punto de vista técnico como desde el medioambiental, el vidrio plano aspira a ser un material válido para su utilización en la construcción, dando lugar a piedras artificiales que presentan, en general, buenas condiciones y, a la vez, que intentan solucionar algunos problemas de la sociedad desarrollada, como es el excesivo destino de materiales de desecho a los vertederos y la extracción masiva de los áridos naturales.

## 9.2. English

In the beginning, the target of this research was to produce different artificial stone batches, made with natural sand and gravel and flat glass sand, both stick together using cement. Thus, we tried to study the possible viability of the sand glass waste for construction, so that the exploitation of aggregate quarries can be reduced and also the amount of this kind of wastes that are constantly generated. It has been also taken into account to add fiberglass in order to study the effects and benefits of adding it.

In general, the research is separated in two parts. On the one hand, obtaining the glass sand waste to subsequently produce the artificial stone. In the other hand, the characterization of the stone through the performance of several essays. The conclusions that can be obtained in this respect are the following:

1. Regarding the manufacture of the stones, more mixing water (one litre of difference) has been required when flat glass sand has been used instead of the natural aggregate. This is basically since, at the time of mixing, the natural aggregate had a higher humidity percentage than the flat glass sand. Also, due to the difference in densities between both, the dosage has slightly varied.
2. After the flexural strength test, the results obtained are closed to each other, but there is not sufficient data available to allow good statistics. Therefore, it is not possible to assure that the flat glass sand provides better mechanical characteristics to the stone. However, it is possible to reach better results after a deeper investigation.
3. Fiberglass significantly improves the flexural strength. The D series, made with flat glass sand, has slightly lower values. It can be observed values far from the average, as is the case of the sample D.5, which has a significant influence over the average flexural strength. From these results, it can also be concluded that when making artificial stone using cement as a conglomerate, regardless of the aggregate, it would be very convenient to incorporate fiberglass if in their final use, they will receive loads that make them work in bending. Not reinforced concrete has a lower tensile strength. The possibility of obtaining better results when using flat glass sand instead of natural arid cannot be excluded, after a greater investigation.
4. The shape of the grains of flat glass sand has a big influence over the flexural strength of the stones. From the microstructural point of view, the recycled aggregate of flat glass presents more elongated and angular forms, which translates into a lower flexural resistance.
5. The hardness of the samples made of flat glass sand have been improved, which means that they can be used in applications where the superficial hardness is more important than the flexural strength, such as in cladding structures.

6. The densities that were obtained in the different tests coincide in the same trend. The stone made from natural aggregate has a slightly higher density than that made from flat glass, which is an advantage for it, saving weight in the final piece.
7. The water absorption of samples made with flat glass sand (B and D) is slightly higher, being a disadvantage since water combined with substances that dissolve in its passage and changes in temperature, could compromise the durability of the stone.
8. After the porosimetry test and comparing the results with each other, it can be observed that the porosity of the samples produced from flat glass sand is somewhat upper (12%) than those of natural arid (8%). That means a higher permeability through the pores net and capillaries, and as in the previous case, it would reduce the durability of the stone. However, the differences are not very large and both are within the range of sizes that IUPAC considers mesopors, being this the range of sizes that better determine its behaviour against the durability by its greater connection.
9. As detailed throughout this project, to produce artificial stone with flat glass would propose a recycling route for this glass, as it currently accumulates in landfills. This is a relatively inexpensive and fast process, since it consists of the collection, washing and crushing of the glass. To achieve this, it would be desirable to get a normative framework that would regulate the use of glass as aggregate within the construction sector and help its use in a generalized way.
10. Both from a technical and environmental point of view, flat glass is postulated as a valid material for use in the construction, giving rise to artificial stones which, in general, have good conditions and at the same time try to solve some problems of developed society, such as the excessive destination of waste materials to landfills and the massive extraction of natural aggregates.

## 10. Bibliografía

[1] Cristina León. PFC. Julio 2007. Estudio de la sustitución de los áridos por arenas procedentes del reciclado del vidrio para la formulación de mortero para albañilería.

[2] Hou PC.2004. Reuse of waste glass powder for substitution of fine aggregate in the recycling of asphalt concrete. MD thesis. Department of Construction Engineering, National Yunlin University of Science & Technology.

[3] Sonia Marrero. Diciembre 2008. PFC. Hormigón elaborado con arena de vidrio.

[4] Maria de Leon Gonzalez. Septiembre 2015. TFG. Fabricación de piedra artificial a partir de residuos.

[5] Beatriz Rivero Lopez. Julio 2011. PFC. Fabricación de mortero de albañilería con sustitución de los áridos por arena de vidrio plano reciclado.

[6] Empresa colaboradora Antonio Afonso S.L. Disponible en URL:

<http://www.antonioafonso.com/>

[7] Glassydur. Disponible en URL:

<http://www.glassydur.com/>

[8] Apuntes sobre el vidrio. Disponible en:

<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion2.Vidrio.Definicion.CaracteristicasEstadoVitreo.pdf>

[9] Fabricación del vidrio plano: Disponible en:

<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion14.VIDRIO.Conformado.ProcesoFLOTADO.pdf>

[10] Alejandro Orta Rodríguez, PFC “residuos de construcción y demolición (RCD). Una propuesta de reciclado: obtención de materiales cerámicos a partir de residuos de vidrio plano”, 2010.

[11] Artículo periodístico sobre la arena africana. Disponible en URL:

[http://saharahorta.blogspot.com.es/2008\\_06\\_01\\_archive.html?m=0](http://saharahorta.blogspot.com.es/2008_06_01_archive.html?m=0)

[12] Características GRC.

[http://www.concretonline.com/pdf/06aditivos/art\\_tec/PCominoJCRomero\\_El\\_GRC.pdf](http://www.concretonline.com/pdf/06aditivos/art_tec/PCominoJCRomero_El_GRC.pdf)

[13] GRC. Dispñible en:

<http://www.grc-barcelona.es/grc-tecnologia.html>

[14] Construmática, metaportal de Arquitectura, Ingeniería y construcción:

<http://www.construmatica.com/construpedia/Cemento>

[15] Tipos de cementos. Disponible en URL:

<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion4.TiposCEMENTOS.pdf>

[16] Tecnología de los plásticos. Fibra de vidrio. Disponible en URL:

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2011/12/fibra-de-vidrio.html>

[17] Valores de densidad. Software Vaxa. Disponible en URL:

[http://www.vaxasoftware.com/doc\\_edu/qui/denh2o.pdf](http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/denh2o.pdf)

[18] Fco. Javier Alonso Rodríguez. Departamento de geología (petrología y geoquímica). Universidad de Oviedo. Porosimetría por inyección de mercurio. 2002. Disponible en:

[http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/4888/mod\\_resource/content/1/T3b-PorosimetriaMercurio.pdf](http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/4888/mod_resource/content/1/T3b-PorosimetriaMercurio.pdf)

[19] Porosimetría por intrusión de mercurio (en inglés). Disponible en:

[http://www.micromeritics.com/Repository/Files/Mercury\\_Porosemitry\\_Theory\\_poster\\_.pdf](http://www.micromeritics.com/Repository/Files/Mercury_Porosemitry_Theory_poster_.pdf)

[20] Servicio General de apoyo a la investigación (SEGAI). Disponible en URL:

<http://www.segai.ull.es/services/17-laboratorio-de-caracterizacion-de-particulas-y-microsuperficies?printable=yes>

[21] Picnometría de helio. Disponible en URL:

<https://es.scribd.com/doc/86917576/PICNOMETRO-HELIO>

[22] Porosidad de hormigones. Disponible en URL:

[http://oa.upm.es/3881/1/INVE\\_MEM\\_2008\\_57647.pdf](http://oa.upm.es/3881/1/INVE_MEM_2008_57647.pdf)

## 11. Normativas

(1) EN 14618, Piedra aglomerada. Terminología y clasificación. Aenor Ediciones 2011.

(2) EN 14617-2, Métodos de ensayo para piedra aglomerada. Determinación de la resistencia a flexión. Aenor Ediciones 2008 (Anulada).

(3) EN 14617-1, Métodos de ensayo para piedra aglomerada. Determinación de la densidad aparente y la absorción de agua. Aenor Ediciones 2005.

(4) EN 14205, Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la dureza Knoop. Aenor Ediciones 2004 (Anulada).

(5) Normativa ensayo de porosimetría. ASTM D4404-84 (2004).

### **Normativa existente sobre picnometría.**

A continuación, se recogen algunas de las normas existentes relacionadas con los ensayos de picnometría de gases:

(6) ASTM núm. D 5550-06: Standard test method for specific gravity of soil solids by gaspycnometer (En vigor)

(7) UNE 103-302:1994: Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo.

- (8) ASTM D-854-92: Standard Test Method for Specific Gravity of Soils.
  
- (9) ASTM D-653-90: Standard Terminology Relating to Soil, Rock and Contained Fluids.
  
- (10) ASTM C-604-98: Standard Test Method for True Specific Gravity of Refractory Materials by Gas-Comparison Pycnometer.
  
- (11) ASTM D-5965-96: Standard Test Methods for Specific Gravity of Coating Powders.
  
- (12) ASTM D-5550-94: Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer
  
- (13) ASTM D-2638-91: Standard Test Method for Real Density of Calcined Petroleum Coke by Helium Pycnometer
  
- (14) ASTM D-4892-89: Standard Test Method for Density of Solid Pitch (Helium Pycnometer Method).



## **Anexos**

- Anexo I. Ficha Técnica Glassydur.
- Anexo II. Informe Glassydur, Universidad de Zaragoza.
- Anexo III. Datos de laboratorio, ensayo de porosimetría.
- Anexo IV. Datos de laboratorio, densidad absoluta mediante picnómetro de helio.

➤ **Anexo I. Ficha Técnica Glassydur.**

## PLACAS GLASSYDUR

Revestimiento de microhormigón reforzado para exteriores e interiores

El *GLASSYDUR* es producto de gran atractivo y versatilidad que permite en el campo de la arquitectura moderna ofrecer una amplia gama de diseños, modelos, colores y acabados como consecuencia de su gran flexibilidad y manejabilidad en aquellas aplicaciones de fachadas y elementos decorativos en las que la creatividad y la imaginación no tengan límites.

### MATERIAL

Las placas Glassydur tienen un espesor comprendido entre 10 y 30 mm elaboradas a base microhormigones preparados con cemento portland y con fibra de vidrio alcalino-resistentes (Tipo AR), la cual posee un contenido de zirconio mayor al 16%, contenido mínimo según norma ASTM C1666/M-07 y EN 15422.

A esta base se le añaden una serie de aditivos que mejoran las propiedades del material consiguiendo un producto de alta calidad y resistencia a condiciones climáticas extremas.

### CAMPO APLICACION

Las placas Glassydur están recomendadas para uso tanto en interior como exterior, debido a que forman una capa resistente a los agentes atmosféricos más adversos.

Además es un producto de fácil y rápida instalación, debido al sistema de unión entre piezas.

Son óptimas para el revestimiento de muros, fachadas o cualquier elemento que se precise, tanto en obra nueva como en rehabilitaciones debido a su ligereza y propiedades.

### PROPIEDADES

- Capacidad de imitar multitud de texturas.
- Las placas se fabrican en multitud de colores y tonos. Además existe la posibilidad de aplicar pintura sobre los mismos.
- Resistencia a condiciones extremas.
- Resistente a la humedad y al agua.
- Estable e incombustible.
- Fácil de trabajar e instalar, obteniendo grandes progresos en poco tiempo.
- Placas ligeras que no sobrecargan el soporte.
- Posibilidad de aplicar tratamientos superficiales.

### INSTALACION

Las placas Glassydur se pueden instalar de tres formas diferentes:

- Directamente sobre el soporte:
  - El soporte ha de soportar la carga ejercida por los paneles.
  - La fijación se podrá realizar mediante tornillería o mediante la aplicación de un mortero-cola.

- Sobre perfiles que sirven de soporte:
  - Los perfiles dependerán del tipo de placa utilizado y no deberán de separarse entre ellos una longitud mayor a 60 cm.
  - Se fijarán mediante tornillos autoroscantes resistentes al ambiente donde se realice la instalación. La cantidad de tornillos y las dimensiones por unidad dependerá del tipo de placa.
- Actuando de encofrado:
  - Debido a su alta resistencia podrán ser utilizados como panel de encofrado, obteniendo resultados inmediatos.
  - Las cargas ejercidas sobre el panel no podrán superar las establecidas en la tabla de características técnicas generales que se adjunta a continuación.

## TRANSPORTE Y MANIPULACION

- El transporte debe hacerse con cuidado y con medios adecuados, siempre embalados correctamente.
- El transporte manual de las placas se realizará de canto.
- Las placas se deberán apoyar en el suelo con cuidado de no dañar las esquinas y bordes de la misma.

## EMBALAJE Y ALMACENAMIENTO

- El embalaje de las placas se realizará sobre palés, utilizando cantoneras para evitar la rotura de las mismas.
- Durante su almacenamiento deben de ser protegidas para evitar el deterioro de las mismas.
- Las placas Glassydur no tienen fecha de caducidad.

## CARACTERISTICAS TECNICAS (A 28 DIAS)

<b>DENSIDAD DEL MATERIAL</b>	T/M3	1,7-2,3
Pesos Aproximados		
Lámina simple 8 mm de espesor	Kg/m <sup>2</sup>	16
Lámina simple 12 mm de espesor	Kg/m <sup>2</sup>	24
Retracción irreversible	%	0,05
Retracción final	%	0,2
Coefficiente de Dilatación Térmica	mm °C	10-20 x 10-6/°C
Coeff. De Conductividad Térmica	W/m °C	0,5-1
Resistencia Química		Buena
Resistencia a los sulfatos		Se usan cementos especiales
Ambiente Marino		No afecta propiedad. Mecánicas
Hielo-Deshielo (BS4264 - DIN274)		Ningún Cambio
Permeabilidad de vapor al agua		
Bs 3177 para 10mm de <i>Glassy//Dur</i>	Perms. Métricos	<1,3
Luz Ultravioleta		No la degrada
Acústica-Reducción de dB		
Lamina <i>Glassy//Dur</i> 10 mm espesor	dB	30
Lamina <i>Glassy//Dur</i> 20 mm espesor	dB	35
Aislamiento Térmico		
Lamina simple de 8mm de espesor	W/m °C	5,3
Lamina simple de 12mm de espesor	W/m °C	5,2

Polígono Industrial Las Almenas – C/ El Timple, s/n 38437 – Icod de los Vinos. S/C de Tenerife.

Tfn: 922 812 394 – Fax: 922 121 110 – Movil: 609 058 872

WWW.GLASSYDUR.COM – WWW.ANTONIOAFONSO.COM



Las propiedades y características técnicas de las placas Glassydur solo serán garantizadas si se instalan utilizando productos recomendados por el GRUPO ANTONIO AFONSO.

➤ **Anexo II. Informe Glassydur, Universidad de Zaragoza.**



# UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

## ENSAYOS DE

***Glassy R Dur***<sup>®</sup>

Fuerza de cemento, ligereza de vidrio

**Universidad de Zaragoza**

**Departamento de Ingeniería Mecánica**

**Mayo 2003**

**Proyecto con Antonio Afonso, S.L.**

**Departamento de Ingeniería Mecánica**

**Universidad de Zaragoza**

**C/ María de Luna 3, 50018 Zaragoza. Tel.: (+34) 976 762557/1888 Fax: (+34) 976 761 861.**



***Glassy R Dur***<sup>®</sup>  
Fuerza de cemento, ligereza de vidrio

## **1. INTRODUCCIÓN**

Podríamos definir los Materiales Compuestos como aquellos que se obtienen mediante la unión de diferentes materiales, los cuales de forma individual presentan inferiores características mecánicas, físicas o químicas de las que presenta el conjunto del Material Compuesto que generan. Es pues el Material Compuesto un elemento fabricado expresamente para mejorar los valores de las propiedades que los materiales constituyentes presentan por separado.

Los materiales compuestos generados por las Fibras de Vidrio Alkali-Resistentes AR, son composites ampliamente conocidos en el mercado mundial con el nombre de GLASSYDUR.

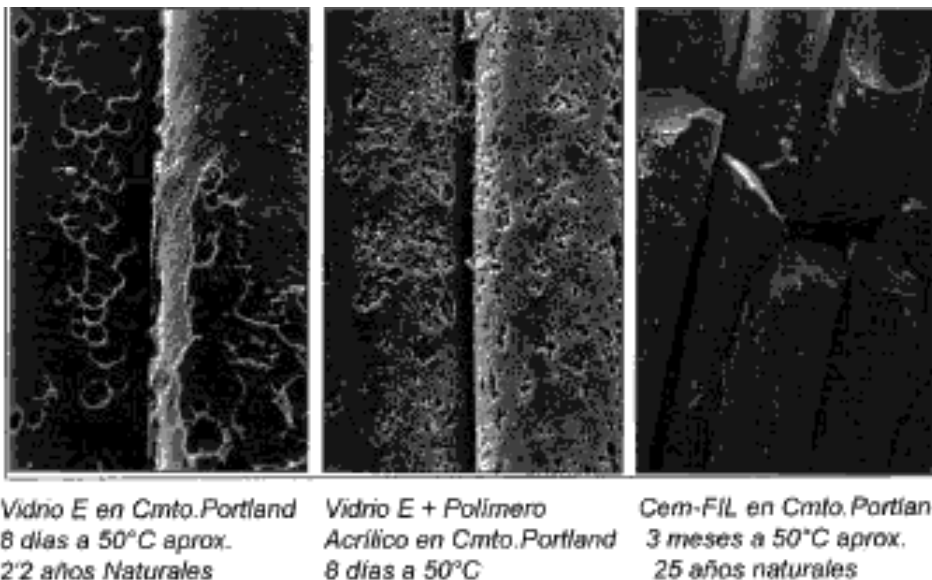
Veremos lo que estas siglas significan y su historia así como propiedades y principales aplicaciones de este tipo de fibras y elementos compuestos que se generan a partir de ellas.

GLASSYDUR (nombre comercial con el que se conocen a los Hormigones compuestos por morteros de cemento reforzados con Fibras de Vidrio Alkali Resistentes), son siglas que identifican el producto por su denominación inglesa "Glass Fibre Reinforced Cement", es el resultado de numerosas investigaciones y aplicaciones de diferentes productos en la historia de los Materiales Compuestos para la construcción.

El GLASSYDUR ( Glass Fibre Reinforced Cement ) es pues un Material Compuesto, siendo su matriz un mortero de cemento Portland armada con Fibras de Vidrio Alkali-Resistentes Cem-FIL. (Las fibras AR Cem-FIL son resistentes a los álcalis liberados con la hidratación del cemento y durante la vida del composite).

## **2. LA FIBRA DE VIDRIO AR**

**Fig. 1 – Aspectos de las diferentes fibras tras ensayo de envejecimiento acelerado.**



Como principal materia prima en la fabricación de un GLASSYDUR, se emplean las Fibras de



**GlassyDur**  
Fuerza de cemento, ligereza de vidrio



Vidrios Alkali-Resistente Cem-FIL, mediante las cuales el GLASSYDUR logra las características que se van a detallar en este estudio.

En el Vidrio Alkali-Resistente el componente “estrella” que otorga a la fibra su poder de Alkali-Resistencia es el Circonio (Zr). Los principales componentes de este vidrio Alkali-Resistente son:

- Oxido de Circonio  $ZrO_2 > 15\%$
- Sílice  $SiO_2$
- Alúmina  $Al_2O_3$
- Oxido de Sodio  $Na_2O$
- Oxido de Titanio  $TiO_2$
- Oxido de Calcio  $CaO$

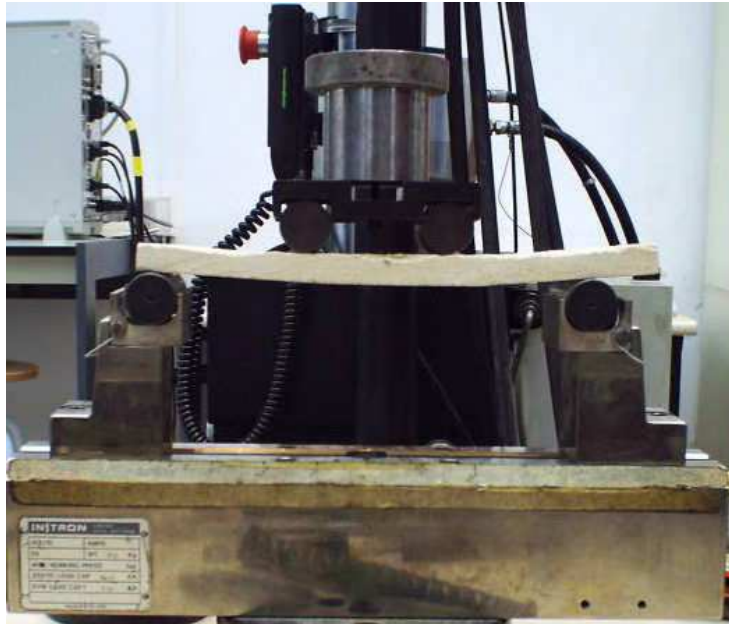
Unidades

<u>Densidad del Material</u>	T/m <sup>3</sup>	l'7 - 2'3
Pesos aproximados		
Lámina simple 8 mm de espesor	kg/m <sup>2</sup>	16
Lámina simple 12 mm de espesor	kg/m <sup>2</sup>	24
Panel Sandwich (*)	kg/m <sup>2</sup>	44
Retracción irreversible	%	0.05
Retracción final	%	0.2
Coefficiente de Dilatación Térmica	mm °C	$10 - 20 \times 10^{-6} / ^\circ C$
Coeffe. de Conductividad Térmica	W/m °C	0.5 - 1
Resistencia química		Buena
Resistencia a los sulfatos		Se usan cementos especiales
Ambiente marino		No afecta propiedad. mecánicas
Hielo-Deshielo (BS4264 - DIN274)		Ningún cambio
Permeabilidad al vapor de agua		
BS 3177 para 10 mm de GRC	Perms. métricos	< 1.3
Luz ultravioleta		No lo degrada
Acústica - Reducción de dB		
Lámina de GRC de 10 mm espesor	dB	30
Lámina de GRC de 20 mm espesor	dB	35
Sandwich de 10 cm (núcleo P.Exp)	dB	47
Aislamiento Térmico		
Lámina simple 8 mm de espesor	W/m °C	5.3
Lámina simple 12 mm de espesor	W/m °C	5.2
Panel Sandwich (*)	W/m °C	0.4

**Tabla 1 - Resistencias mecánicas (a los 28 días).**



**Tabla 3 - Propiedades Físicas y Químicas del GLASSYDUR.**



(1) El panel sandwich en este caso se compone de una lámina de GLASSYDUR de 10 mm de espesor, una capa de poliestireno expandido de 110 mm. y otra capa de GLASSYDUR de 10 mm de espesor.

Tanto la resistencia como la durabilidad del GLASSYDUR pueden verse mejoradas muy notablemente gracias a la adición de un tipo de metacaolín específico. Las propiedades del GLASSYDUR pueden verse mejoradas con la adición de polímeros acrílicos. Los datos expuestos se aplican a formulaciones de GLASSYDUR con una relación arena/cemento entre el 0.5 y 1.

## **7. RESULTADOS DEL ENSAYO A FLEXIÓN 4 PUNTOS EN PROBETAS DE GLASSYDUR**

El ensayo realizado a las probetas de GLASSYDUR es un ensayo de flexión 4 puntos.

Correspondiente a al método de ensayo a flexión completa según la Norma Europea EN1170-5 que indica este método de ensayo para identificar el comportamiento y deformación en el límite de proporcionalidad (LOP) y en rotura a flexión (MOR) de una dosificación de GLASSYDUR sometida a flexión.

Básicamente el LOP indica el punto el cual el material deja de ser elástico y comienza su proceso de rotura y el MOR el punto máximo de carga que el material es capaz de alcanzar. Estos valores son de flexión, con lo cual no tienen una correspondencia clara y definida con sus propiedades tanto o a tracción como a compresión.

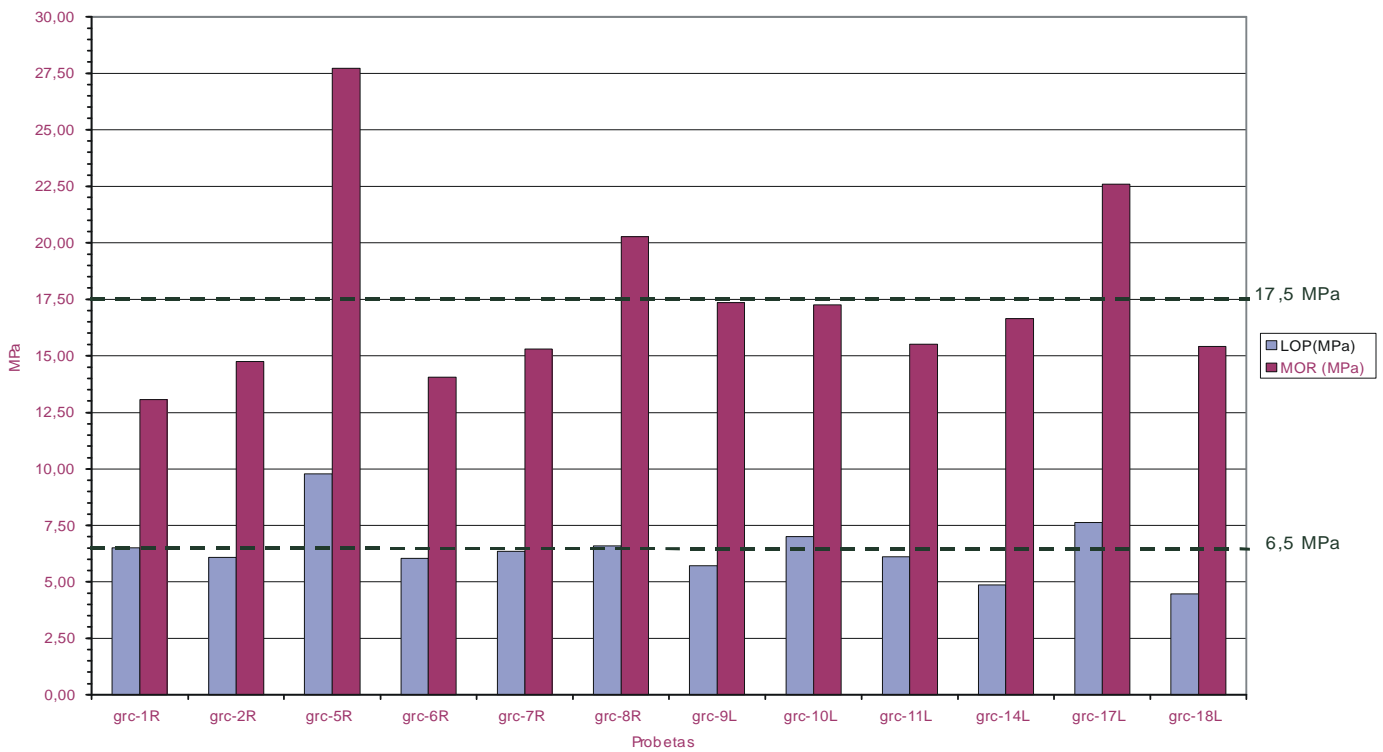
Se han realizado 6 de los ensayos a flexión apoyados por la parte rugosa del material y los otros 6 por la parte lisa, según indica la normativa y según el esquema de carga e lasiguiente imagen.

**Fig. 4 Imagen del ensayo real realizado en máquina de ensayos.**

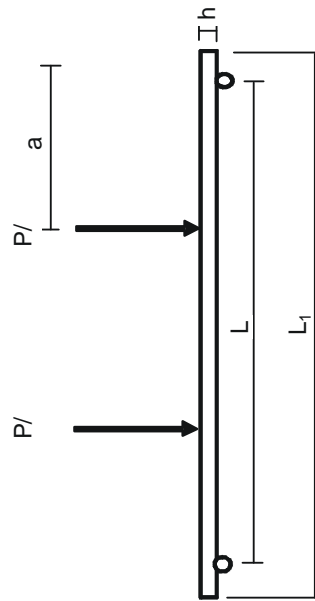


**Fig. 5 Imagen de probeta de GLASSYDUR rota.**

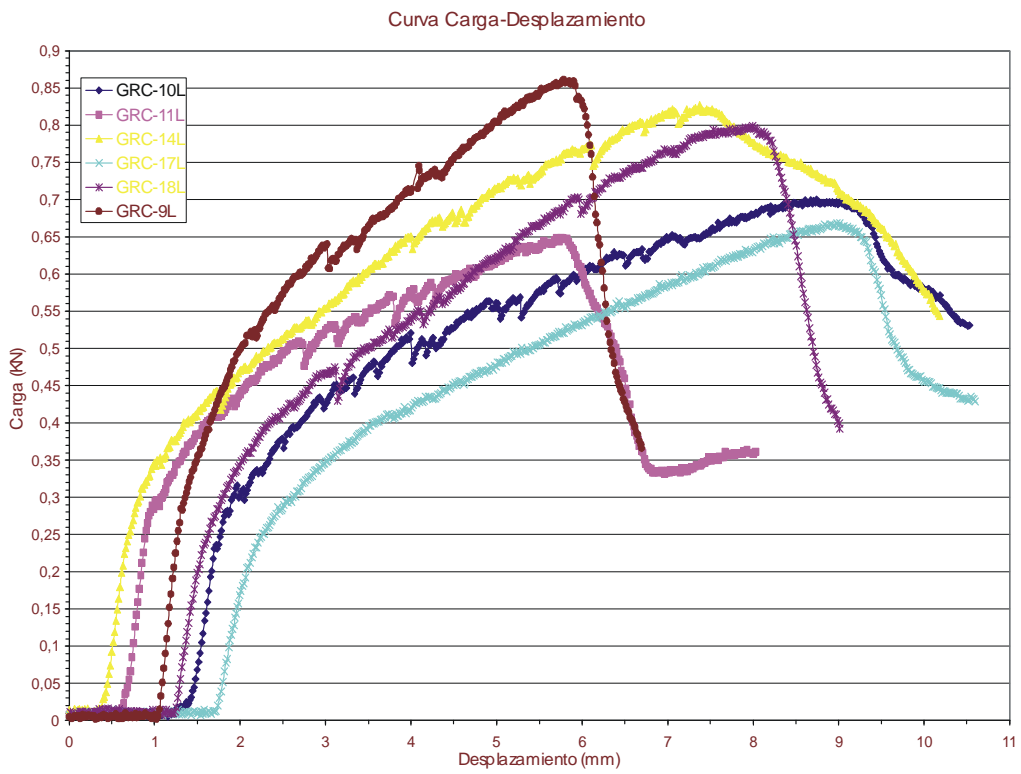
La tabla siguiente indica los valores obtenidos en el ensayo por 12 probetas de GLASSYDUR y los cálculos de LOP y MOR de estas.

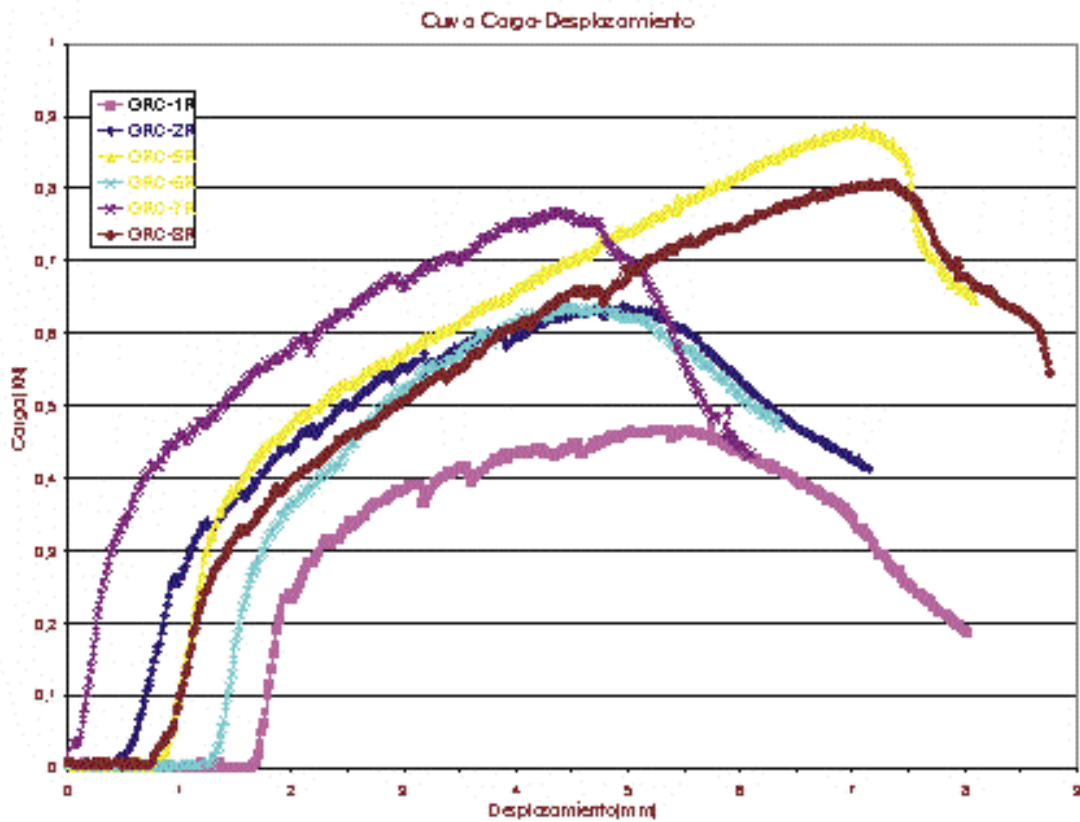


Probeta	b (mm)		h (mm)		media	L1 (mm)	L (mm)	a (mm)	F <sub>top</sub> (N)	F <sub>mor</sub> (N)	I <sub>11</sub> (mm <sup>4</sup> )	LOP(MPa)	MOR(MPa)
	49,9	50	12,4	12,2									
grc-1R	49,9	50	12,4	12,2	12,30	250	210	70	233	468	7707,09	6,51	13,07
grc-2R	49,3	50	13	14	13,50	250	210	70	262	635	10179,80	6,08	14,74
grc-5R	47	48	12,2	11,4	11,80	250	210	70	308	874	6510,51	9,77	27,72
grc-6R	50,5	49	13,7	13,8	13,75	250	210	70	271	631	10799,21	6,04	14,06
grc-7R	49,3	49	14,8	14,4	14,60	250	210	70	318	765	12785,69	6,35	15,29
grc-8R	47,1	47	13,2	13,4	13,30	250	210	70	261	803	9224,30	6,59	20,26
grc-9L	50,3	50	13,9	14,9	14,40	250	210	70	283	858	12466,48	5,72	17,34
grc-10L	47,9	48	13,6	13	13,30	250	210	70	282	695	9371,34	7,00	17,26
grc-11L	47,3	48	14	13,1	13,55	250	210	70	255	647	9889,06	6,11	15,51
grc-14L	49,7	50	13,9	14,9	14,40	250	210	70	241	821	12441,60	4,88	16,63
grc-17L	48	48	11,5	11,2	11,35	250	210	70	224	664	5836,36	7,62	22,60
grc-18L	49,8	50	15	14,4	14,70	250	210	70	230	793	13235,51	4,47	15,41
											media	6,4291	17,4914
											desviacion	21,00%	23,84%

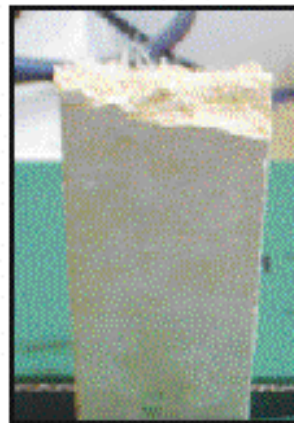


En las siguientes figuras se muestran las gráficas tensión desplazamiento del ensayo a flexión.





Se detecta un color más oscuro en algunas de las probetas debido probablemente a un cambio en la proporción o en la arena utilizada. Además coincide que estas probetas GRC-1R, GRC -14L y GRC -18L presentan unas propiedades mecánicas un poco menores que las del resto.



## **7. CONCLUSIONES**

El GLASSYDUR de Antonio Afonso, S.L. es un prefabricado de fibra de vidrio, que tiene las propiedades típicas del material, ateniéndonos a los ensayos de flexión 4 puntos según EN 1170-5 de flexión completa.

Sus valores son totalmente standard a los indicados o recomendados por los fabricantes de fibra en cuanto al MOR, y en la línea de lo recomendado en cuanto al LOP.

Como conclusión se puede decir que Antonio Afonso, S.L. fabrica un prefabricado de características totalmente standard, y en la línea de las recomendaciones de fabricantes de fibra.



➤ **Anexo III. Datos de laboratorio, ensayo de porosimetría.**

Sample ID: A1  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-319.SMP

LP Analysis Time: 27/01/2017 10:58:15      Sample Weight: 2.4008 g  
 HP Analysis Time: 27/01/2017 13:49:47      Correction Type: Blank  
 Report Time: 27/01/2017 13:49:47          Show Neg. Int: No

**Summary Report**

**Penetrometer parameters**

Penetrometer:	15-0627 -(15) 3 Bulb, 1.190 Stem, Solid		
Pen. Constant:	22.065 $\mu\text{L/pF}$	Pen. Weight:	59.9970 g
Stem Volume:	1.1900 mL	Max. Head Pressure:	4.6800 psia
Pen. Volume:	4.2020 mL	Assembly Weight:	99.3829 g

**Hg Parameters**

Adv. Contact Angle:	130.000 degrees	Rec. Contact Angle:	130.000 degrees
Hg Surface Tension:	485.000 dynes/cm	Hg Density:	13.5335 g/mL

**User Parameters**

Param 1:	N/A	Param 2:	N/A	Param 3:	N/A
----------	-----	----------	-----	----------	-----

**Low Pressure:**

Evacuation Pressure:	50 $\mu\text{mHg}$
Evacuation Time:	5 mins
Mercury Filling Pressure:	0.51 psia
Equilibration Time:	10 secs

**High Pressure:**

Equilibration Time:	10 secs
Maximum Intrusion Volume:	0.050 mL/g

Blank Correction Sample: C:\BLANCO~3\15-0627D.SMP  
 Blank Correction ID: 15-0627\*2

(From Pressure 0.10 to 60000.00 psia)

**Intrusion Data Summary**

Total Intrusion Volume =	0.0443 mL/g
Total Pore Area =	9.015 $\text{m}^2/\text{g}$
Median Pore Diameter (Volume) =	0.1009 $\mu\text{m}$
Median Pore Diameter (Area) =	0.0046 $\mu\text{m}$
Average Pore Diameter (4V/A) =	0.0197 $\mu\text{m}$
Bulk Density at 0.51 psia =	1.6341 g/mL
Apparent (skeletal) Density =	1.7616 g/mL
Porosity =	7.2374 %
Stem Volume Used =	9 % ****

**Pore Structure Summary**

Threshold Pressure:	3.79 psia (Calculated)
Characteristic length =	47.6658 $\mu\text{m}$
Conductivity formation factor =	0.004
Permeability constant =	0.00442
Permeability =	45.0611 mdarcy
BET Surface Area =	200.0000 $\text{m}^2/\text{g}$
Pore shape exponent =	1.00
Tortuosity factor =	2.148
Tortuosity =	4.2827
Percolation Fractal dimension =	2.815
Backbone Fractal dimension =	2.886

**Mayer Stowe Summary**

Interstitial porosity =	25.9500 %
Breakthrough pressure ratio =	8.3200



MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION

AutoPore IV 9500 V1.09

Serial: 426

Port: 1/2

Page 2

Sample ID: A1  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-319.SMP

LP Analysis Time: 27/01/2017 10:58:15  
HP Analysis Time: 27/01/2017 13:49:47  
Report Time: 27/01/2017 13:49:47

Sample Weight: 2.4008 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Material Compressibility**

Linear Coefficient = N/A 1/psia  
Quadratic Coefficient = N/A 1/psia<sup>2</sup>

Sample ID: A1  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-319.SMP

LP Analysis Time: 27/01/2017 10:58:15  
 HP Analysis Time: 27/01/2017 13:49:47  
 Report Time: 27/01/2017 13:49:47

Sample Weight: 2.4008 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
0.51	357.6785	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
1.99	90.6872	$4.432 \times 10^{-3}$	$9.892 \times 10^{-6}$
2.99	60.4796	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
3.99	45.3123	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5.49	32.9378	$1.221 \times 10^{-3}$	$1.367 \times 10^{-5}$
5.99	30.1957	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
7.49	24.1608	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
8.49	21.3152	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
10.47	17.2674	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
12.97	13.9475	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
15.95	11.3376	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
29.95	6.0384	$6.758 \times 10^{-4}$	$3.489 \times 10^{-5}$
37.10	4.8748	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
46.91	3.8559	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
56.32	3.2114	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
71.39	2.5333	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
86.59	2.0887	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
111.07	1.6283	$1.601 \times 10^{-3}$	$3.760 \times 10^{-4}$
137.80	1.3125	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
171.33	1.0556	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
216.96	0.8336	$3.194 \times 10^{-3}$	$1.476 \times 10^{-3}$
267.89	0.6751	$3.621 \times 10^{-3}$	$2.092 \times 10^{-3}$
326.19	0.5545	$3.566 \times 10^{-3}$	$2.527 \times 10^{-3}$
417.00	0.4337	$4.290 \times 10^{-3}$	$3.790 \times 10^{-3}$
517.20	0.3497	$8.874 \times 10^{-3}$	$9.877 \times 10^{-3}$
638.33	0.2833	$9.653 \times 10^{-3}$	$1.329 \times 10^{-2}$
797.78	0.2267	$1.754 \times 10^{-2}$	$2.999 \times 10^{-2}$
987.58	0.1831	$3.057 \times 10^{-2}$	$6.503 \times 10^{-2}$
1197.20	0.1511	$4.009 \times 10^{-2}$	$1.045 \times 10^{-1}$
1497.07	0.1208	$4.607 \times 10^{-2}$	$1.478 \times 10^{-1}$
1896.70	0.0954	$3.327 \times 10^{-2}$	$1.343 \times 10^{-1}$
2346.36	0.0771	$2.584 \times 10^{-2}$	$1.306 \times 10^{-1}$

Sample ID: A1  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-319.SMP

LP Analysis Time: 27/01/2017 10:58:15  
 HP Analysis Time: 27/01/2017 13:49:47  
 Report Time: 27/01/2017 13:49:47

Sample Weight: 2.4008 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
2894.89	0.0625	$1.978 \times 10^{-2}$	$1.235 \times 10^{-1}$
3593.15	0.0503	$1.639 \times 10^{-2}$	$1.267 \times 10^{-1}$
4487.33	0.0403	$1.675 \times 10^{-2}$	$1.611 \times 10^{-1}$
5583.50	0.0324	$1.138 \times 10^{-2}$	$1.366 \times 10^{-1}$
6884.72	0.0263	$1.097 \times 10^{-2}$	$1.630 \times 10^{-1}$
8583.89	0.0211	$8.210 \times 10^{-3}$	$1.512 \times 10^{-1}$
10580.37	0.0171	$8.587 \times 10^{-3}$	$1.961 \times 10^{-1}$
13183.77	0.0137	$7.583 \times 10^{-3}$	$2.146 \times 10^{-1}$
14779.29	0.0122	$1.253 \times 10^{-2}$	$4.197 \times 10^{-1}$
16384.46	0.0110	$8.562 \times 10^{-3}$	$3.198 \times 10^{-1}$
20014.22	0.0090	$9.067 \times 10^{-3}$	$3.936 \times 10^{-1}$
24966.78	0.0072	$8.404 \times 10^{-3}$	$4.502 \times 10^{-1}$
29949.61	0.0060	$9.249 \times 10^{-3}$	$6.064 \times 10^{-1}$
34921.85	0.0052	$7.226 \times 10^{-3}$	$5.606 \times 10^{-1}$
39946.00	0.0045	$5.931 \times 10^{-2}$	$5.315 \times 10^0$
44951.14	0.0040	$1.441 \times 10^{-2}$	$1.466 \times 10^0$
49949.23	0.0036	$1.698 \times 10^{-2}$	$1.931 \times 10^0$
54951.24	0.0033	$1.233 \times 10^{-2}$	$1.551 \times 10^0$
59946.45	0.0030	$1.235 \times 10^{-2}$	$1.701 \times 10^0$
46100.01	0.0039	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
35499.95	0.0051	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
27301.54	0.0066	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
21007.06	0.0086	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
16009.25	0.0113	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
12420.54	0.0146	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
9612.07	0.0188	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
7314.18	0.0247	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5715.81	0.0316	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
4307.04	0.0420	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
3303.62	0.0547	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
2602.77	0.0695	$1.027 \times 10^{-2}$	$7.212 \times 10^{-2}$
2001.81	0.0904	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$

Sample ID: A1  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-319.SMP

LP Analysis Time: 27/01/2017 10:58:15  
 HP Analysis Time: 27/01/2017 13:49:47  
 Report Time: 27/01/2017 13:49:47

Sample Weight: 2.4008 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

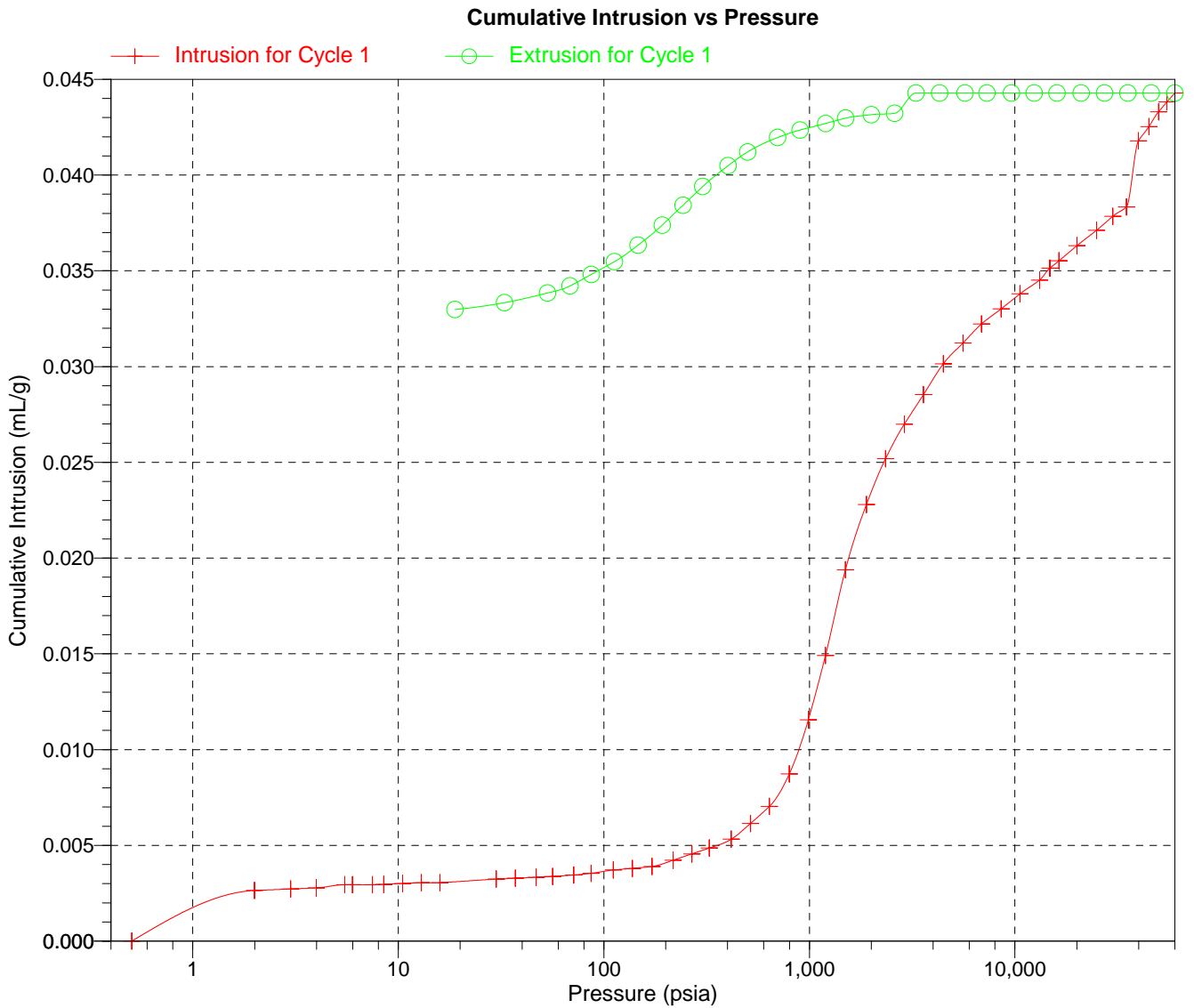
**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
1501.45	0.1205	$1.452 \times 10^{-3}$	$6.022 \times 10^{-3}$
1201.13	0.1506	$2.838 \times 10^{-3}$	$9.134 \times 10^{-3}$
900.96	0.2007	$2.749 \times 10^{-3}$	$6.844 \times 10^{-3}$
701.45	0.2578	$3.641 \times 10^{-3}$	$6.933 \times 10^{-3}$
501.76	0.3605	$5.129 \times 10^{-3}$	$7.272 \times 10^{-3}$
402.21	0.4497	$7.561 \times 10^{-3}$	$8.140 \times 10^{-3}$
302.39	0.5981	$8.764 \times 10^{-3}$	$7.314 \times 10^{-3}$
243.01	0.7443	$1.024 \times 10^{-2}$	$6.652 \times 10^{-3}$
192.48	0.9396	$1.024 \times 10^{-2}$	$5.308 \times 10^{-3}$
146.69	1.2330	$8.894 \times 10^{-3}$	$3.578 \times 10^{-3}$
112.58	1.6066	$7.521 \times 10^{-3}$	$2.314 \times 10^{-3}$
87.06	2.0774	$5.945 \times 10^{-3}$	$1.409 \times 10^{-3}$
68.54	2.6387	$5.813 \times 10^{-3}$	$1.076 \times 10^{-3}$
53.29	3.3941	$3.370 \times 10^{-3}$	$4.877 \times 10^{-4}$
32.84	5.5074	$2.406 \times 10^{-3}$	$2.394 \times 10^{-4}$
18.89	9.5721	$1.487 \times 10^{-3}$	$8.782 \times 10^{-5}$

Sample ID: A1  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-319.SMP

LP Analysis Time: 27/01/2017 10:58:15  
HP Analysis Time: 27/01/2017 13:49:47  
Report Time: 27/01/2017 13:49:47

Sample Weight: 2.4008 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No



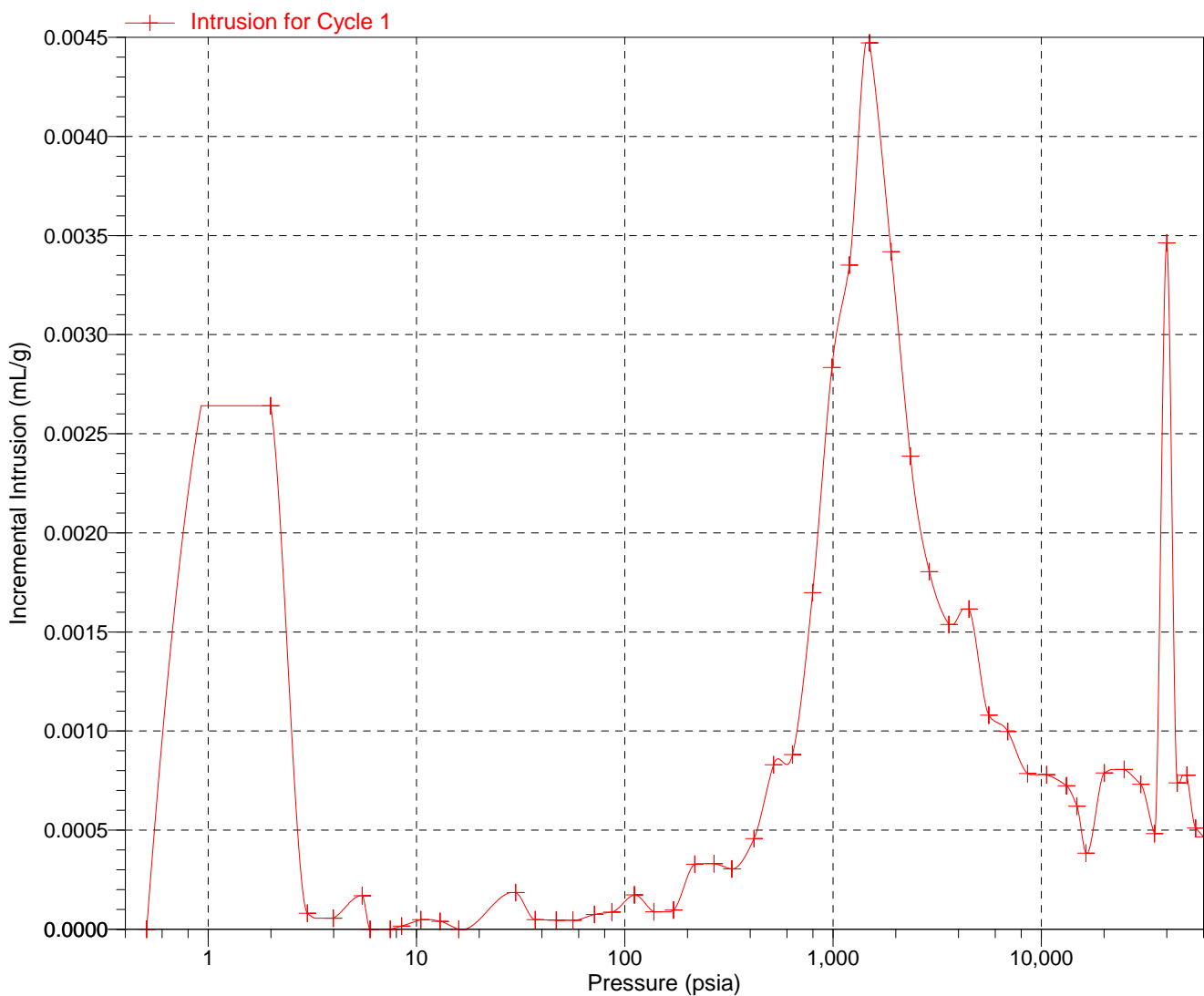


Sample ID: A1  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-319.SMP

LP Analysis Time: 27/01/2017 10:58:15  
HP Analysis Time: 27/01/2017 13:49:47  
Report Time: 27/01/2017 13:49:47

Sample Weight: 2.4008 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Incremental Intrusion vs Pressure**

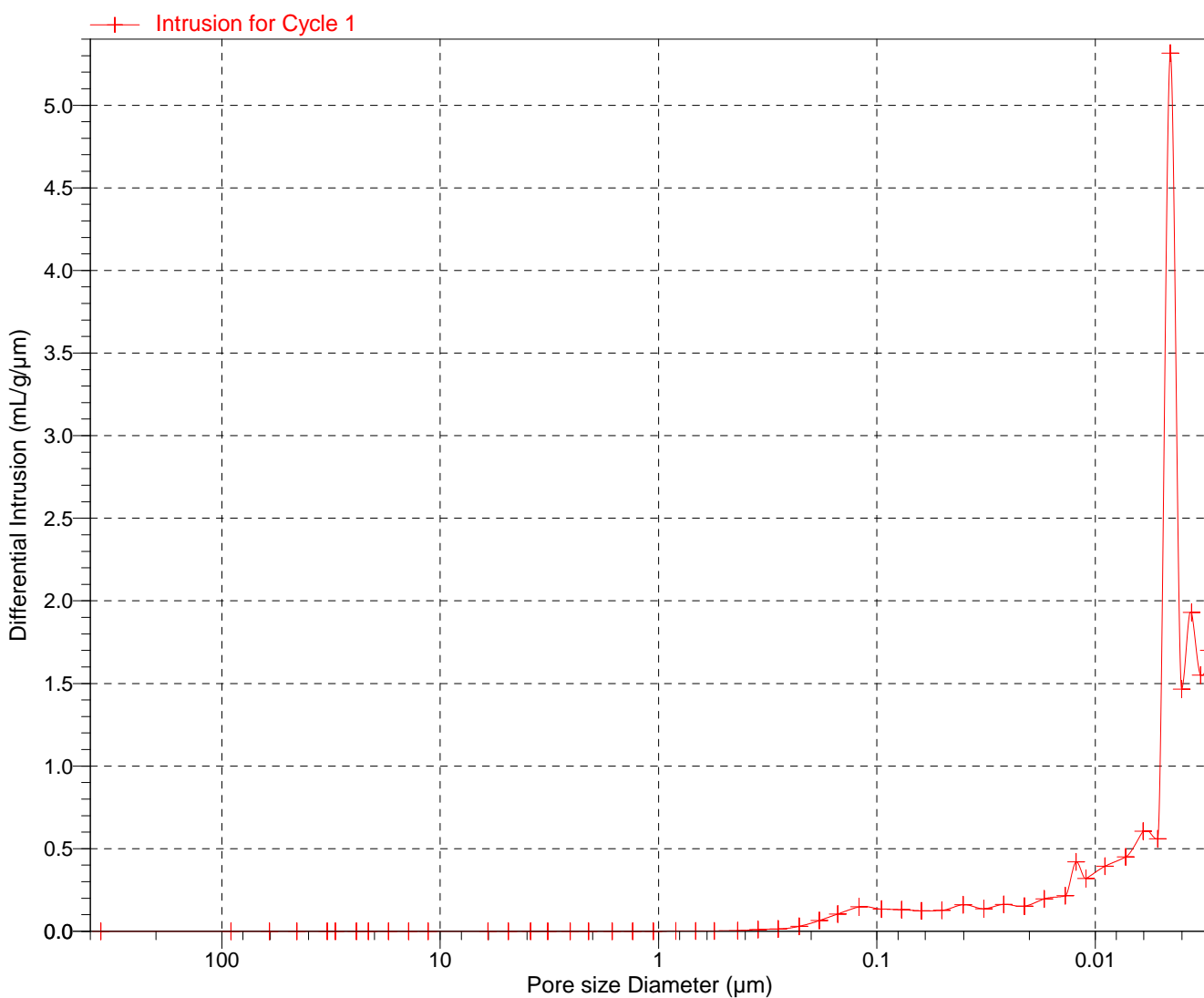


Sample ID: A1  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-319.SMP

LP Analysis Time: 27/01/2017 10:58:15  
HP Analysis Time: 27/01/2017 13:49:47  
Report Time: 27/01/2017 13:49:47

Sample Weight: 2.4008 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

Differential Intrusion vs Pore size

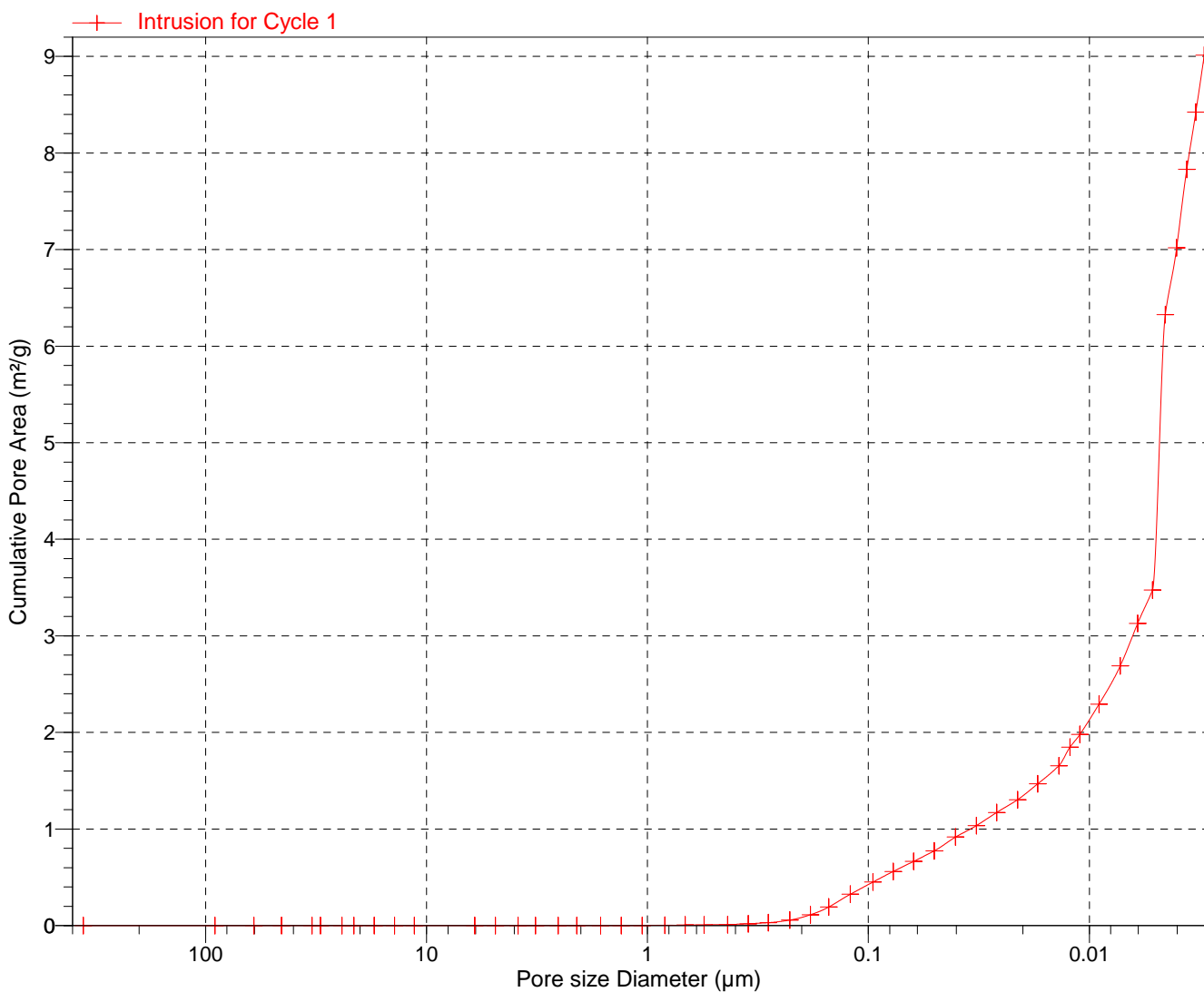


Sample ID: A1  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-319.SMP

LP Analysis Time: 27/01/2017 10:58:15  
HP Analysis Time: 27/01/2017 13:49:47  
Report Time: 27/01/2017 13:49:47

Sample Weight: 2.4008 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

Cumulative Pore Area vs Pore size



Sample ID: A2\_2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-331.SMP

LP Analysis Time: 06/02/2017 13:06:49      Sample Weight: 2.5552 g  
 HP Analysis Time: 06/02/2017 15:47:59      Correction Type: Blank  
 Report Time: 06/02/2017 15:48:00          Show Neg. Int: No

**Summary Report**

**Penetrometer parameters**

Penetrometer:	15-0627 -(15) 3 Bulb, 1.190 Stem, Solid		
Pen. Constant:	22.065 $\mu\text{L/pF}$	Pen. Weight:	59.9970 g
Stem Volume:	1.1900 mL	Max. Head Pressure:	4.6800 psia
Pen. Volume:	4.2020 mL	Assembly Weight:	98.5187 g

**Hg Parameters**

Adv. Contact Angle:	130.000 degrees	Rec. Contact Angle:	130.000 degrees
Hg Surface Tension:	485.000 dynes/cm	Hg Density:	13.5335 g/mL

**User Parameters**

Param 1:	N/A	Param 2:	N/A	Param 3:	N/A
----------	-----	----------	-----	----------	-----

**Low Pressure:**

Evacuation Pressure:	50 $\mu\text{mHg}$
Evacuation Time:	5 mins
Mercury Filling Pressure:	0.50 psia
Equilibration Time:	10 secs

**High Pressure:**

Equilibration Time:	10 secs
Maximum Intrusion Volume:	0.050 mL/g

Blank Correction Sample: C:\BLANCO~3\15-0627D.SMP  
 Blank Correction ID: 15-0627\*2

(From Pressure 0.10 to 60000.00 psia)

**Intrusion Data Summary**

Total Intrusion Volume =	0.0390 mL/g
Total Pore Area =	7.678 $\text{m}^2/\text{g}$
Median Pore Diameter (Volume) =	0.0630 $\mu\text{m}$
Median Pore Diameter (Area) =	0.0064 $\mu\text{m}$
Average Pore Diameter (4V/A) =	0.0203 $\mu\text{m}$
Bulk Density at 0.50 psia =	1.6545 g/mL
Apparent (skeletal) Density =	1.7686 g/mL
Porosity =	6.4533 %
Stem Volume Used =	9 % ****

**Pore Structure Summary**

Threshold Pressure:	85.23 psia (Calculated)
Characteristic length =	2.1221 $\mu\text{m}$
Conductivity formation factor =	0.002
Permeability constant =	0.00442
Permeability =	0.0473 mdarcy
BET Surface Area =	200.0000 $\text{m}^2/\text{g}$
Pore shape exponent =	1.00
Tortuosity factor =	2.157
Tortuosity =	17.3995
Percolation Fractal dimension =	2.645
Backbone Fractal dimension =	1.930

**Mayer Stowe Summary**

Interstitial porosity =	25.9500 %
Breakthrough pressure ratio =	8.3200



MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION

AutoPore IV 9500 V1.09

Serial: 426

Port: 1/2

Page 2

Sample ID: A2\_2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-331.SMP

LP Analysis Time: 06/02/2017 13:06:49  
HP Analysis Time: 06/02/2017 15:47:59  
Report Time: 06/02/2017 15:48:00

Sample Weight: 2.5552 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Material Compressibility**

Linear Coefficient = N/A 1/psia  
Quadratic Coefficient = N/A 1/psia<sup>2</sup>

Sample ID: A2\_2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-331.SMP

LP Analysis Time: 06/02/2017 13:06:49  
 HP Analysis Time: 06/02/2017 15:47:59  
 Report Time: 06/02/2017 15:48:00

Sample Weight: 2.5552 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
0.50	359.9363	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
1.99	90.9098	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
2.99	60.4090	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
3.99	45.3106	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5.49	32.9576	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5.99	30.1850	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
7.48	24.1666	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
8.48	21.3223	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
10.47	17.2690	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
12.96	13.9535	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
15.99	11.3089	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
19.98	9.0510	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
36.85	4.9088	$5.585 \times 10^{-4}$	$3.583 \times 10^{-5}$
47.09	3.8409	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
58.07	3.1148	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
71.84	2.5175	$1.724 \times 10^{-3}$	$2.669 \times 10^{-4}$
86.16	2.0992	$4.591 \times 10^{-3}$	$8.661 \times 10^{-4}$
112.41	1.6089	$4.475 \times 10^{-3}$	$1.054 \times 10^{-3}$
135.91	1.3308	$4.168 \times 10^{-3}$	$1.235 \times 10^{-3}$
170.79	1.0590	$3.273 \times 10^{-3}$	$1.195 \times 10^{-3}$
217.30	0.8323	$5.560 \times 10^{-3}$	$2.566 \times 10^{-3}$
266.21	0.6794	$5.490 \times 10^{-3}$	$3.165 \times 10^{-3}$
327.37	0.5525	$6.253 \times 10^{-3}$	$4.425 \times 10^{-3}$
416.75	0.4340	$8.038 \times 10^{-3}$	$7.112 \times 10^{-3}$
517.41	0.3496	$9.592 \times 10^{-3}$	$1.067 \times 10^{-2}$
636.57	0.2841	$9.060 \times 10^{-3}$	$1.246 \times 10^{-2}$
797.00	0.2269	$1.477 \times 10^{-2}$	$2.522 \times 10^{-2}$
988.26	0.1830	$1.675 \times 10^{-2}$	$3.564 \times 10^{-2}$
1197.28	0.1511	$1.927 \times 10^{-2}$	$5.025 \times 10^{-2}$
1497.12	0.1208	$2.108 \times 10^{-2}$	$6.762 \times 10^{-2}$
1896.04	0.0954	$2.126 \times 10^{-2}$	$8.582 \times 10^{-2}$
2345.89	0.0771	$2.476 \times 10^{-2}$	$1.252 \times 10^{-1}$

Sample ID: A2\_2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-331.SMP

LP Analysis Time: 06/02/2017 13:06:49  
 HP Analysis Time: 06/02/2017 15:47:59  
 Report Time: 06/02/2017 15:48:00

Sample Weight: 2.5552 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
2895.01	0.0625	$2.403 \times 10^{-2}$	$1.501 \times 10^{-1}$
3594.01	0.0503	$2.209 \times 10^{-2}$	$1.707 \times 10^{-1}$
4486.30	0.0403	$2.184 \times 10^{-2}$	$2.101 \times 10^{-1}$
5585.66	0.0324	$2.061 \times 10^{-2}$	$2.473 \times 10^{-1}$
6885.53	0.0263	$1.903 \times 10^{-2}$	$2.829 \times 10^{-1}$
8583.71	0.0211	$1.289 \times 10^{-2}$	$2.374 \times 10^{-1}$
10581.26	0.0171	$1.085 \times 10^{-2}$	$2.478 \times 10^{-1}$
13180.28	0.0137	$1.014 \times 10^{-2}$	$2.870 \times 10^{-1}$
14778.28	0.0122	$1.132 \times 10^{-2}$	$3.793 \times 10^{-1}$
16377.47	0.0110	$1.044 \times 10^{-2}$	$3.898 \times 10^{-1}$
19989.50	0.0090	$1.097 \times 10^{-2}$	$4.760 \times 10^{-1}$
24979.18	0.0072	$1.316 \times 10^{-2}$	$7.049 \times 10^{-1}$
29958.32	0.0060	$1.681 \times 10^{-2}$	$1.103 \times 10^0$
34944.85	0.0052	$1.209 \times 10^{-2}$	$9.384 \times 10^{-1}$
39947.59	0.0045	$1.324 \times 10^{-2}$	$1.187 \times 10^0$
44954.16	0.0040	$1.308 \times 10^{-2}$	$1.331 \times 10^0$
49952.19	0.0036	$1.313 \times 10^{-2}$	$1.494 \times 10^0$
54953.75	0.0033	$1.321 \times 10^{-2}$	$1.661 \times 10^0$
59946.24	0.0030	$1.011 \times 10^{-2}$	$1.393 \times 10^0$
46098.27	0.0039	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
35503.67	0.0051	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
27304.72	0.0066	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
21006.58	0.0086	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
16006.51	0.0113	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
12410.51	0.0146	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
9615.48	0.0188	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
7313.25	0.0247	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5713.95	0.0317	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
4303.36	0.0420	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
3304.63	0.0547	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
2602.90	0.0695	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
1999.63	0.0904	$2.358 \times 10^{-3}$	$1.288 \times 10^{-2}$



Sample ID: A2\_2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-331.SMP

LP Analysis Time: 06/02/2017 13:06:49  
 HP Analysis Time: 06/02/2017 15:47:59  
 Report Time: 06/02/2017 15:48:00

Sample Weight: 2.5552 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

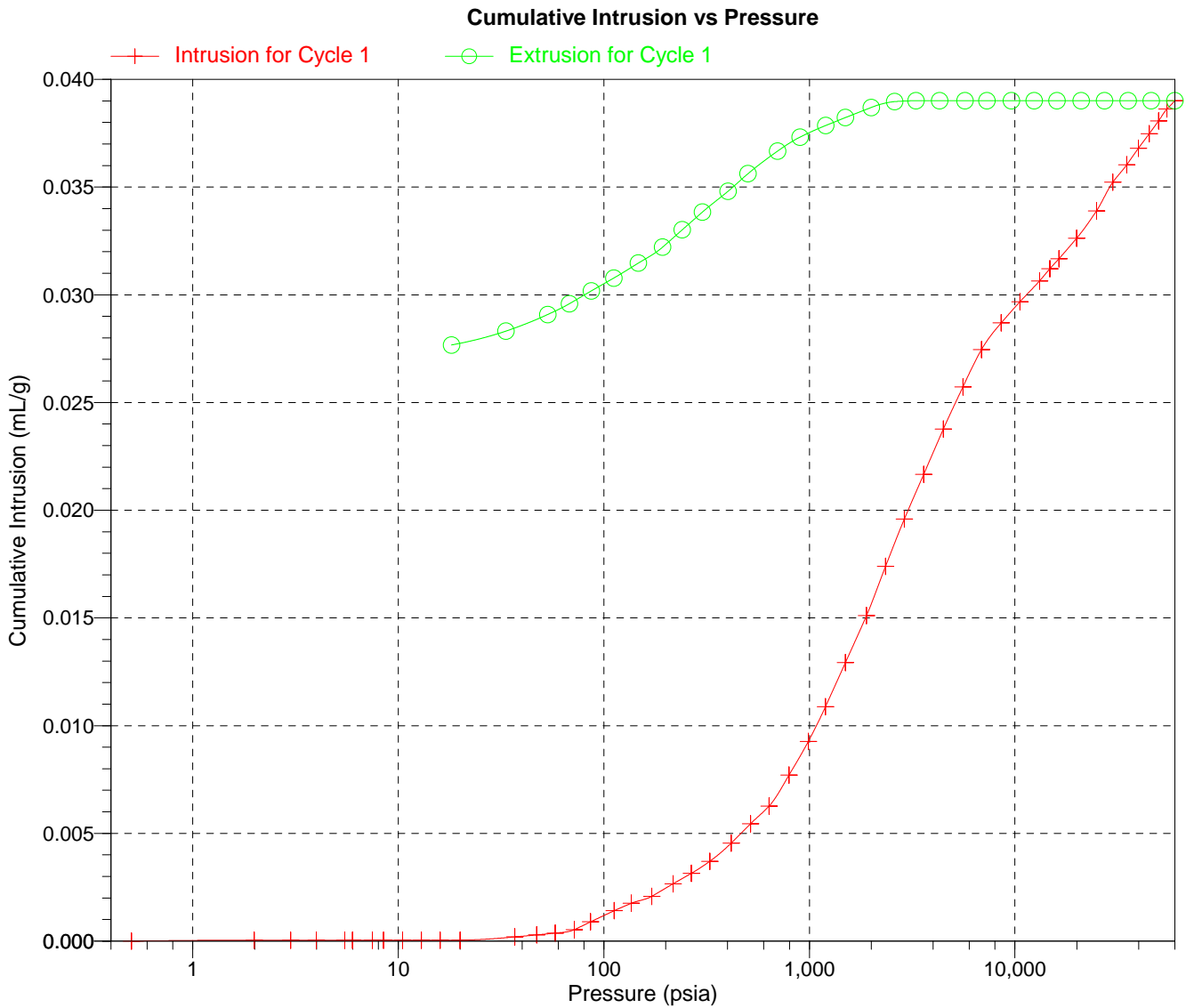
**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
1498.43	0.1207	$3.759 \times 10^{-3}$	$1.557 \times 10^{-2}$
1201.25	0.1506	$3.818 \times 10^{-3}$	$1.228 \times 10^{-2}$
900.69	0.2008	$4.298 \times 10^{-3}$	$1.070 \times 10^{-2}$
700.40	0.2582	$5.957 \times 10^{-3}$	$1.133 \times 10^{-2}$
502.07	0.3602	$7.264 \times 10^{-3}$	$1.030 \times 10^{-2}$
402.19	0.4497	$8.450 \times 10^{-3}$	$9.099 \times 10^{-3}$
301.69	0.5995	$7.730 \times 10^{-3}$	$6.444 \times 10^{-3}$
240.45	0.7522	$8.382 \times 10^{-3}$	$5.409 \times 10^{-3}$
192.94	0.9374	$8.418 \times 10^{-3}$	$4.345 \times 10^{-3}$
147.29	1.2280	$6.294 \times 10^{-3}$	$2.540 \times 10^{-3}$
111.76	1.6184	$5.784 \times 10^{-3}$	$1.776 \times 10^{-3}$
86.94	2.0804	$5.469 \times 10^{-3}$	$1.291 \times 10^{-3}$
67.95	2.6618	$5.565 \times 10^{-3}$	$1.024 \times 10^{-3}$
53.35	3.3904	$4.749 \times 10^{-3}$	$6.848 \times 10^{-4}$
33.35	5.4228	$3.787 \times 10^{-3}$	$3.801 \times 10^{-4}$
18.17	9.9513	$2.442 \times 10^{-3}$	$1.422 \times 10^{-4}$

Sample ID: A2\_2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-331.SMP

LP Analysis Time: 06/02/2017 13:06:49  
HP Analysis Time: 06/02/2017 15:47:59  
Report Time: 06/02/2017 15:48:00

Sample Weight: 2.5552 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

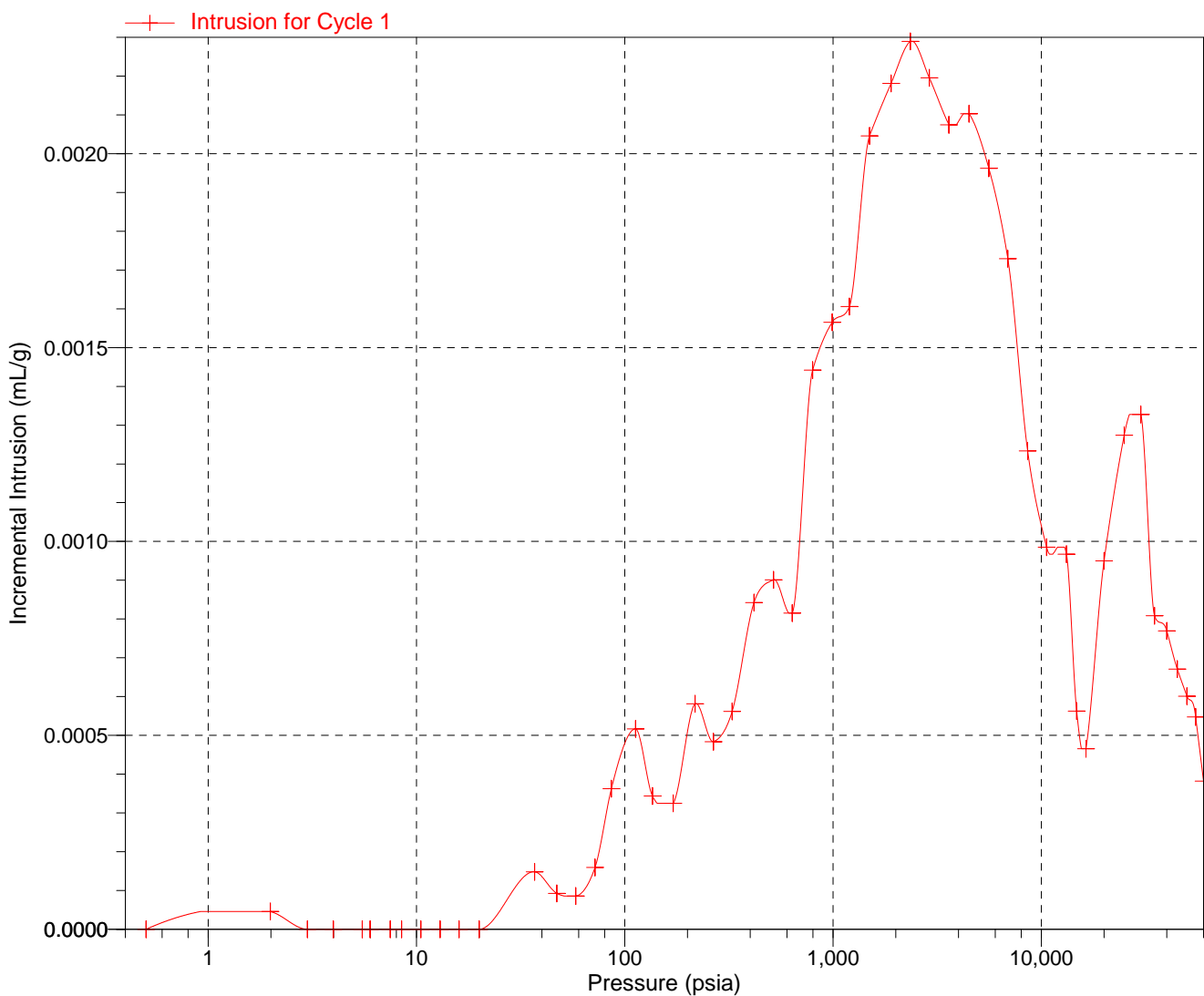


Sample ID: A2\_2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-331.SMP

LP Analysis Time: 06/02/2017 13:06:49  
HP Analysis Time: 06/02/2017 15:47:59  
Report Time: 06/02/2017 15:48:00

Sample Weight: 2.5552 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Incremental Intrusion vs Pressure**

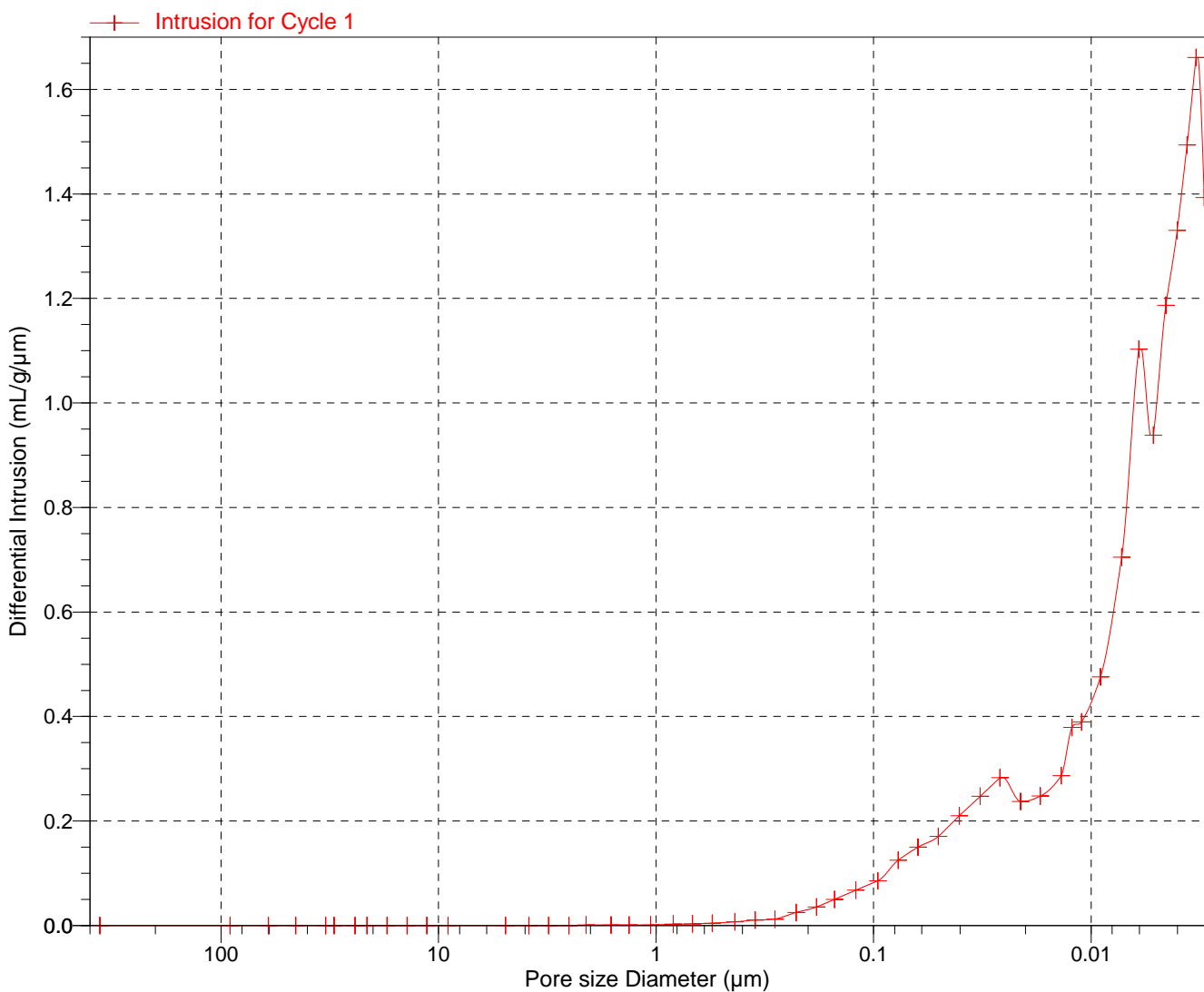


Sample ID: A2\_2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-331.SMP

LP Analysis Time: 06/02/2017 13:06:49  
HP Analysis Time: 06/02/2017 15:47:59  
Report Time: 06/02/2017 15:48:00

Sample Weight: 2.5552 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

Differential Intrusion vs Pore size

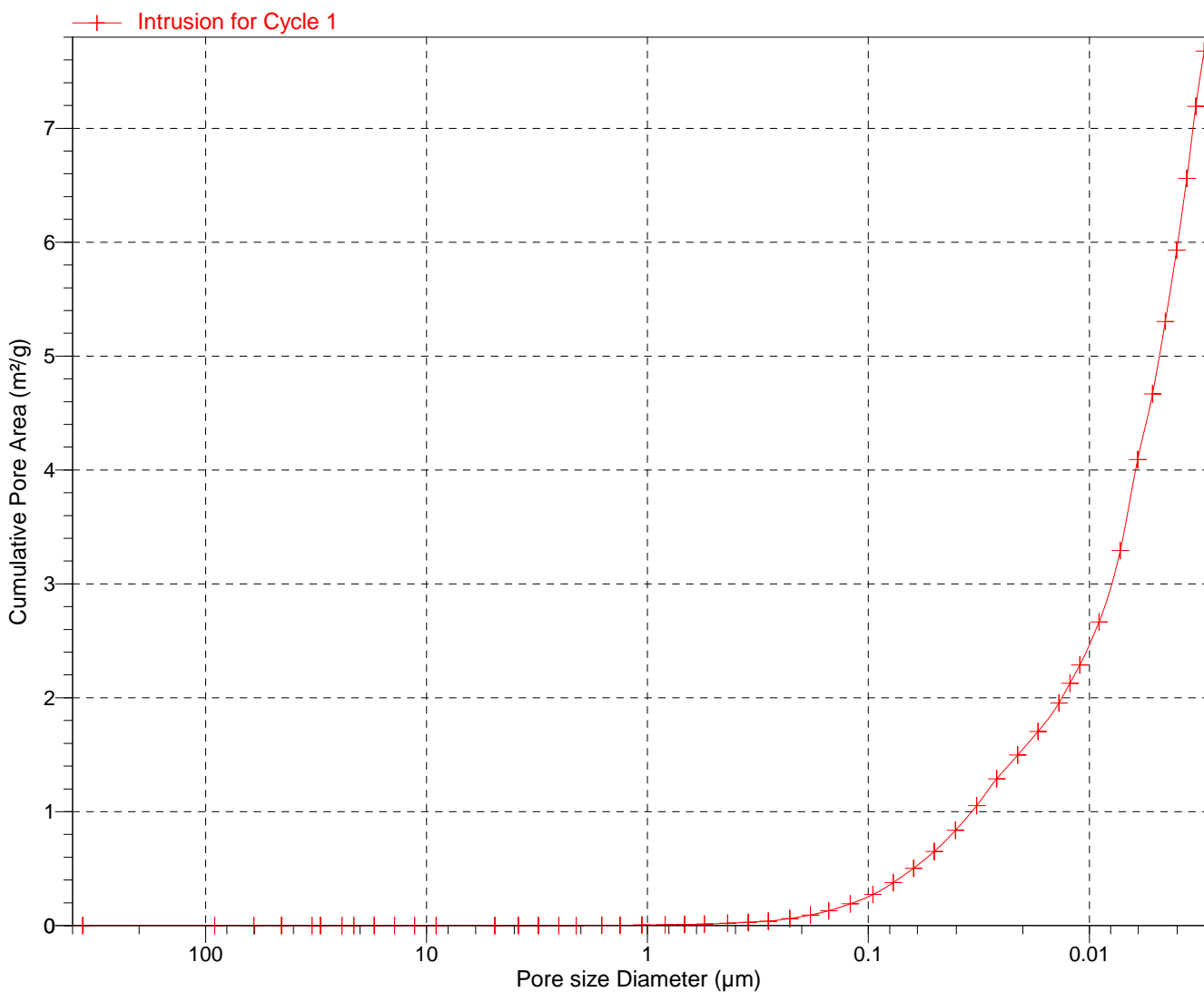


Sample ID: A2\_2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-331.SMP

LP Analysis Time: 06/02/2017 13:06:49  
HP Analysis Time: 06/02/2017 15:47:59  
Report Time: 06/02/2017 15:48:00

Sample Weight: 2.5552 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

Cumulative Pore Area vs Pore size



Sample ID: B1  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-321.SMP

LP Analysis Time: 30/01/2017 15:28:01      Sample Weight: 2.4967 g  
 HP Analysis Time: 31/01/2017 10:38:32      Correction Type: Blank  
 Report Time: 31/01/2017 10:38:32        Show Neg. Int: No

**Summary Report**

**Penetrometer parameters**

Penetrometer:	15-0627 -(15) 3 Bulb, 1.190 Stem, Solid		
Pen. Constant:	22.065 $\mu\text{L/pF}$	Pen. Weight:	59.9970 g
Stem Volume:	1.1900 mL	Max. Head Pressure:	4.6800 psia
Pen. Volume:	4.2020 mL	Assembly Weight:	97.0679 g

**Hg Parameters**

Adv. Contact Angle:	130.000 degrees	Rec. Contact Angle:	130.000 degrees
Hg Surface Tension:	485.000 dynes/cm	Hg Density:	13.5335 g/mL

**User Parameters**

Param 1:	N/A	Param 2:	N/A	Param 3:	N/A
----------	-----	----------	-----	----------	-----

**Low Pressure:**

Evacuation Pressure:	50 $\mu\text{mHg}$
Evacuation Time:	5 mins
Mercury Filling Pressure:	0.51 psia
Equilibration Time:	10 secs

**High Pressure:**

Equilibration Time:	10 secs
Maximum Intrusion Volume:	0.050 mL/g

Blank Correction Sample: C:\BLANCO~3\15-0627D.SMP  
 Blank Correction ID: 15-0627\*2

(From Pressure 0.10 to 60000.00 psia)

**Intrusion Data Summary**

Total Intrusion Volume =	0.0761 mL/g
Total Pore Area =	11.688 $\text{m}^2/\text{g}$
Median Pore Diameter (Volume) =	0.1722 $\mu\text{m}$
Median Pore Diameter (Area) =	0.0071 $\mu\text{m}$
Average Pore Diameter (4V/A) =	0.0260 $\mu\text{m}$
Bulk Density at 0.51 psia =	1.5156 g/mL
Apparent (skeletal) Density =	1.7131 g/mL
Porosity =	11.5282 %
Stem Volume Used =	16 % ****

**Pore Structure Summary**

Threshold Pressure:	569.38 psia (Calculated)
Characteristic length =	0.3176 $\mu\text{m}$
Conductivity formation factor =	0.051
Permeability constant =	0.00442
Permeability =	0.0227 mdarcy
BET Surface Area =	200.0000 $\text{m}^2/\text{g}$
Pore shape exponent =	1.00
Tortuosity factor =	2.100
Tortuosity =	53.5255
Percolation Fractal dimension =	2.877
Backbone Fractal dimension =	N/A

**Mayer Stowe Summary**

Interstitial porosity =	25.9500 %
Breakthrough pressure ratio =	8.3200

Sample ID: B1  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-321.SMP

LP Analysis Time: 30/01/2017 15:28:01  
HP Analysis Time: 31/01/2017 10:38:32  
Report Time: 31/01/2017 10:38:32

Sample Weight: 2.4967 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Material Compressibility**

Linear Coefficient = N/A 1/psia  
Quadratic Coefficient = N/A 1/psia<sup>2</sup>

Sample ID: B1  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-321.SMP

LP Analysis Time: 30/01/2017 15:28:01  
 HP Analysis Time: 31/01/2017 10:38:32  
 Report Time: 31/01/2017 10:38:32

Sample Weight: 2.4967 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
0.51	357.8074	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
1.99	90.6587	$3.898 \times 10^{-4}$	$8.699 \times 10^{-7}$
3.00	60.3867	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
3.99	45.2811	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5.49	32.9339	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
6.00	30.1668	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
7.49	24.1592	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
8.48	21.3185	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
10.47	17.2681	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
12.97	13.9472	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
15.99	11.3115	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
29.97	6.0345	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
37.53	4.8196	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
47.22	3.8299	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
56.57	3.1973	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
72.59	2.4915	$1.927 \times 10^{-3}$	$2.957 \times 10^{-4}$
88.51	2.0435	$3.734 \times 10^{-3}$	$7.176 \times 10^{-4}$
112.88	1.6022	$3.928 \times 10^{-3}$	$9.405 \times 10^{-4}$
137.52	1.3151	$3.285 \times 10^{-3}$	$9.811 \times 10^{-4}$
172.29	1.0498	$4.489 \times 10^{-3}$	$1.656 \times 10^{-3}$
217.24	0.8325	$6.236 \times 10^{-3}$	$2.890 \times 10^{-3}$
268.24	0.6743	$8.390 \times 10^{-3}$	$4.854 \times 10^{-3}$
327.25	0.5527	$1.545 \times 10^{-2}$	$1.098 \times 10^{-2}$
416.72	0.4340	$3.082 \times 10^{-2}$	$2.726 \times 10^{-2}$
516.20	0.3504	$6.442 \times 10^{-2}$	$7.161 \times 10^{-2}$
638.02	0.2835	$1.051 \times 10^{-1}$	$1.445 \times 10^{-1}$
796.91	0.2270	$8.885 \times 10^{-2}$	$1.518 \times 10^{-1}$
988.22	0.1830	$5.121 \times 10^{-2}$	$1.089 \times 10^{-1}$
1196.95	0.1511	$4.087 \times 10^{-2}$	$1.066 \times 10^{-1}$
1497.51	0.1208	$3.639 \times 10^{-2}$	$1.167 \times 10^{-1}$
1896.38	0.0954	$2.758 \times 10^{-2}$	$1.113 \times 10^{-1}$
2345.42	0.0771	$2.360 \times 10^{-2}$	$1.193 \times 10^{-1}$



Sample ID: B1  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-321.SMP

LP Analysis Time: 30/01/2017 15:28:01  
 HP Analysis Time: 31/01/2017 10:38:32  
 Report Time: 31/01/2017 10:38:32

Sample Weight: 2.4967 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
2895.17	0.0625	$2.006 \times 10^{-2}$	$1.253 \times 10^{-1}$
3594.13	0.0503	$1.793 \times 10^{-2}$	$1.386 \times 10^{-1}$
4484.82	0.0403	$1.454 \times 10^{-2}$	$1.399 \times 10^{-1}$
5586.95	0.0324	$1.558 \times 10^{-2}$	$1.869 \times 10^{-1}$
6883.79	0.0263	$1.481 \times 10^{-2}$	$2.201 \times 10^{-1}$
8582.96	0.0211	$1.449 \times 10^{-2}$	$2.669 \times 10^{-1}$
10580.49	0.0171	$1.370 \times 10^{-2}$	$3.130 \times 10^{-1}$
13184.39	0.0137	$1.699 \times 10^{-2}$	$4.807 \times 10^{-1}$
14782.21	0.0122	$2.143 \times 10^{-2}$	$7.180 \times 10^{-1}$
16379.76	0.0110	$3.341 \times 10^{-2}$	$1.248 \times 10^0$
19978.79	0.0091	$2.662 \times 10^{-2}$	$1.154 \times 10^0$
24959.16	0.0072	$3.136 \times 10^{-2}$	$1.678 \times 10^0$
29943.60	0.0060	$2.292 \times 10^{-2}$	$1.502 \times 10^0$
34937.47	0.0052	$2.321 \times 10^{-2}$	$1.801 \times 10^0$
39947.11	0.0045	$1.971 \times 10^{-2}$	$1.767 \times 10^0$
44950.56	0.0040	$2.367 \times 10^{-2}$	$2.407 \times 10^0$
49951.75	0.0036	$1.836 \times 10^{-2}$	$2.089 \times 10^0$
54949.07	0.0033	$1.715 \times 10^{-2}$	$2.156 \times 10^0$
59944.32	0.0030	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
46100.00	0.0039	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
35499.49	0.0051	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
27302.30	0.0066	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
21008.73	0.0086	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
16009.93	0.0113	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
12412.66	0.0146	$1.615 \times 10^{-3}$	$5.452 \times 10^{-2}$
9615.44	0.0188	$1.651 \times 10^{-3}$	$4.319 \times 10^{-2}$
7314.75	0.0247	$3.445 \times 10^{-3}$	$6.916 \times 10^{-2}$
5713.91	0.0317	$1.010 \times 10^{-3}$	$1.564 \times 10^{-2}$
4310.22	0.0420	$5.597 \times 10^{-3}$	$6.648 \times 10^{-2}$
3304.24	0.0547	$3.612 \times 10^{-3}$	$3.263 \times 10^{-2}$
2603.44	0.0695	$6.865 \times 10^{-3}$	$4.824 \times 10^{-2}$
2002.47	0.0903	$7.189 \times 10^{-3}$	$3.930 \times 10^{-2}$

Sample ID: B1  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-321.SMP

LP Analysis Time: 30/01/2017 15:28:01  
 HP Analysis Time: 31/01/2017 10:38:32  
 Report Time: 31/01/2017 10:38:32

Sample Weight: 2.4967 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

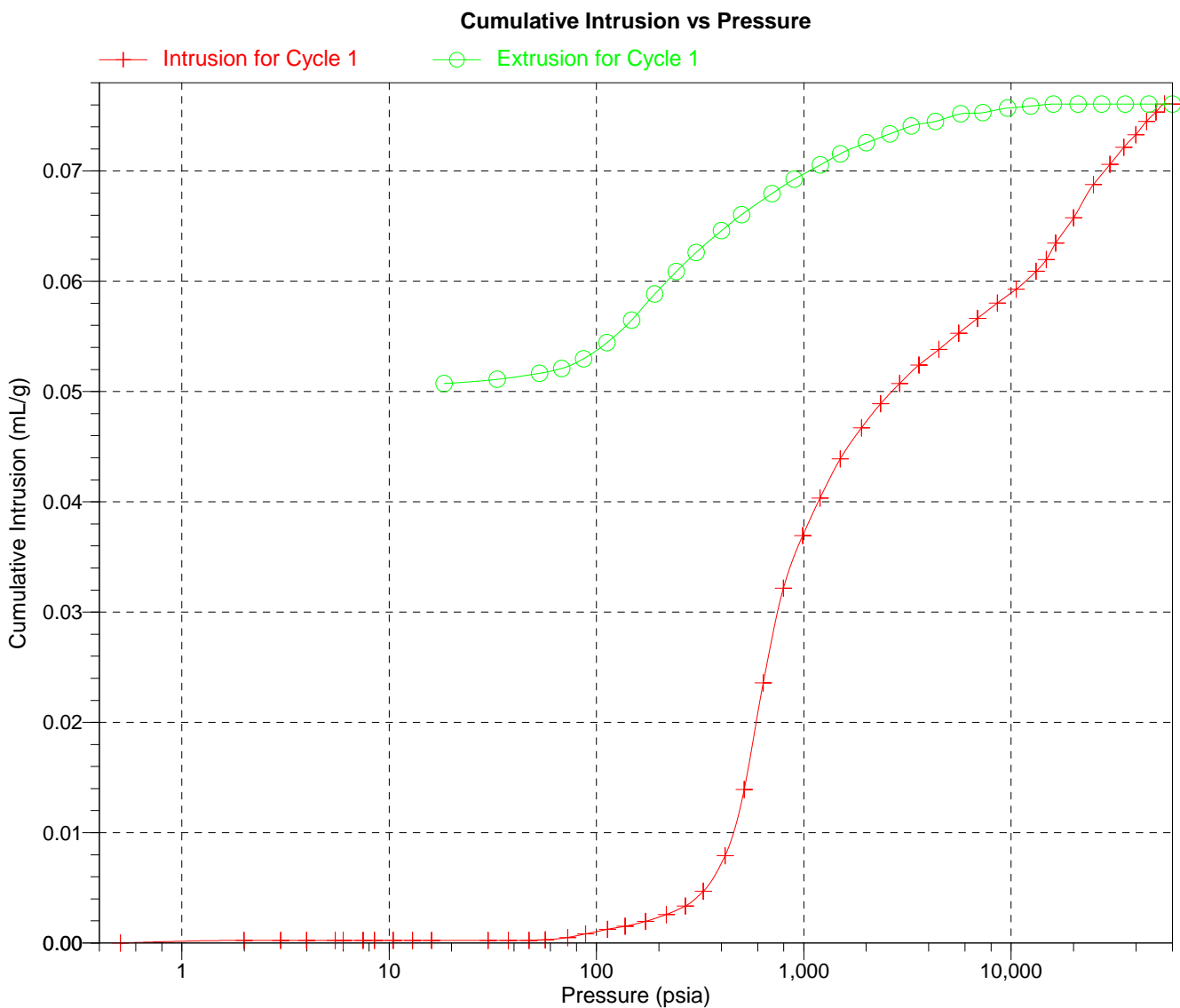
**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
1501.76	0.1204	$7.857 \times 10^{-3}$	$3.261 \times 10^{-2}$
1200.91	0.1506	$1.045 \times 10^{-2}$	$3.363 \times 10^{-2}$
899.78	0.2010	$1.036 \times 10^{-2}$	$2.577 \times 10^{-2}$
701.97	0.2577	$1.206 \times 10^{-2}$	$2.296 \times 10^{-2}$
501.78	0.3604	$1.313 \times 10^{-2}$	$1.862 \times 10^{-2}$
400.90	0.4511	$1.494 \times 10^{-2}$	$1.605 \times 10^{-2}$
302.40	0.5981	$1.607 \times 10^{-2}$	$1.339 \times 10^{-2}$
242.89	0.7446	$1.830 \times 10^{-2}$	$1.189 \times 10^{-2}$
190.68	0.9485	$1.939 \times 10^{-2}$	$9.996 \times 10^{-3}$
147.52	1.2260	$2.121 \times 10^{-2}$	$8.517 \times 10^{-3}$
112.20	1.6120	$1.716 \times 10^{-2}$	$5.283 \times 10^{-3}$
86.71	2.0859	$1.298 \times 10^{-2}$	$3.065 \times 10^{-3}$
67.91	2.6635	$8.333 \times 10^{-3}$	$1.532 \times 10^{-3}$
53.09	3.4067	$4.129 \times 10^{-3}$	$5.938 \times 10^{-4}$
33.16	5.4539	$2.666 \times 10^{-3}$	$2.661 \times 10^{-4}$
18.40	9.8317	$1.464 \times 10^{-3}$	$8.555 \times 10^{-5}$

Sample ID: B1  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-321.SMP

LP Analysis Time: 30/01/2017 15:28:01  
HP Analysis Time: 31/01/2017 10:38:32  
Report Time: 31/01/2017 10:38:32

Sample Weight: 2.4967 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

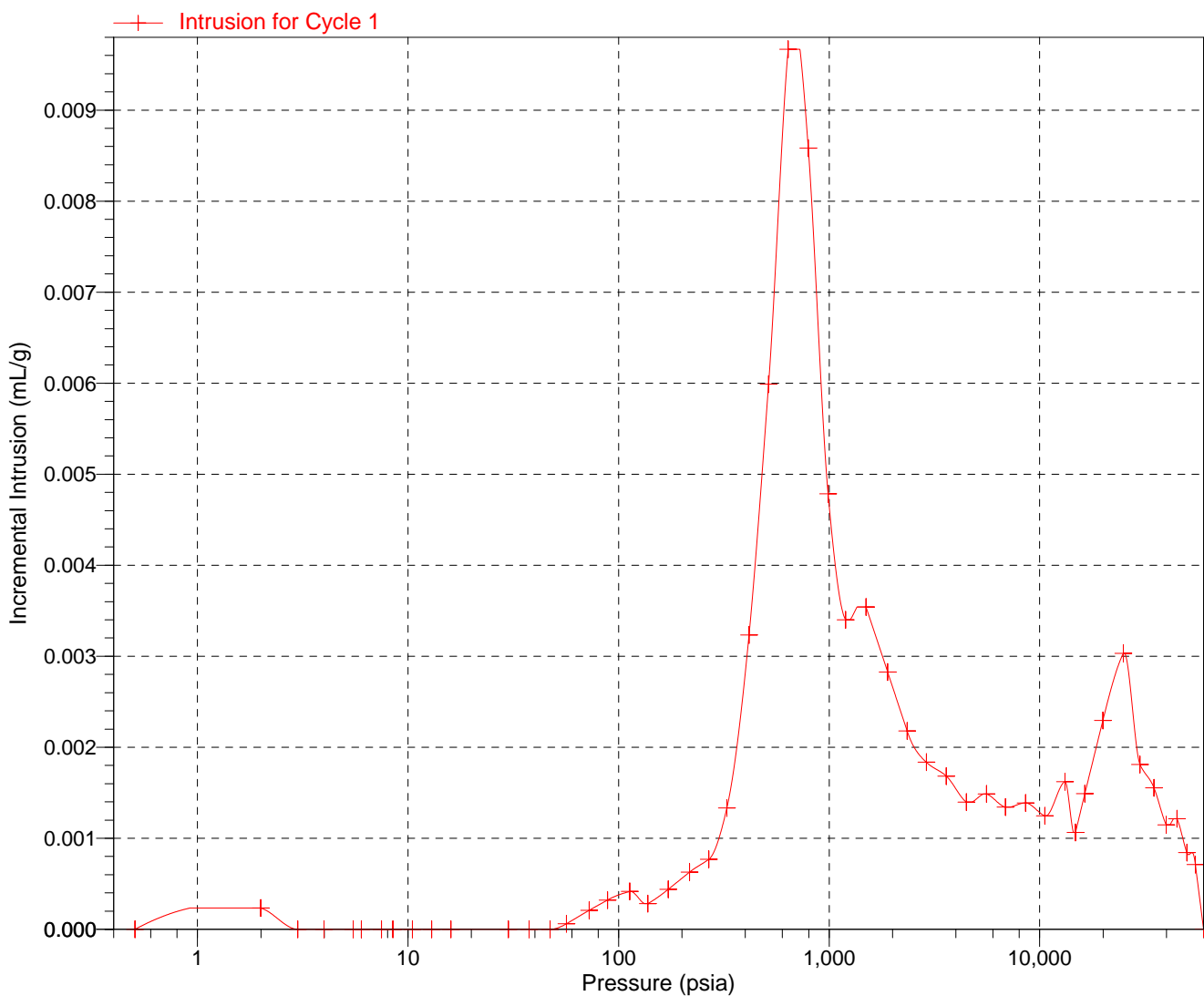


Sample ID: B1  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-321.SMP

LP Analysis Time: 30/01/2017 15:28:01  
HP Analysis Time: 31/01/2017 10:38:32  
Report Time: 31/01/2017 10:38:32

Sample Weight: 2.4967 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Incremental Intrusion vs Pressure**

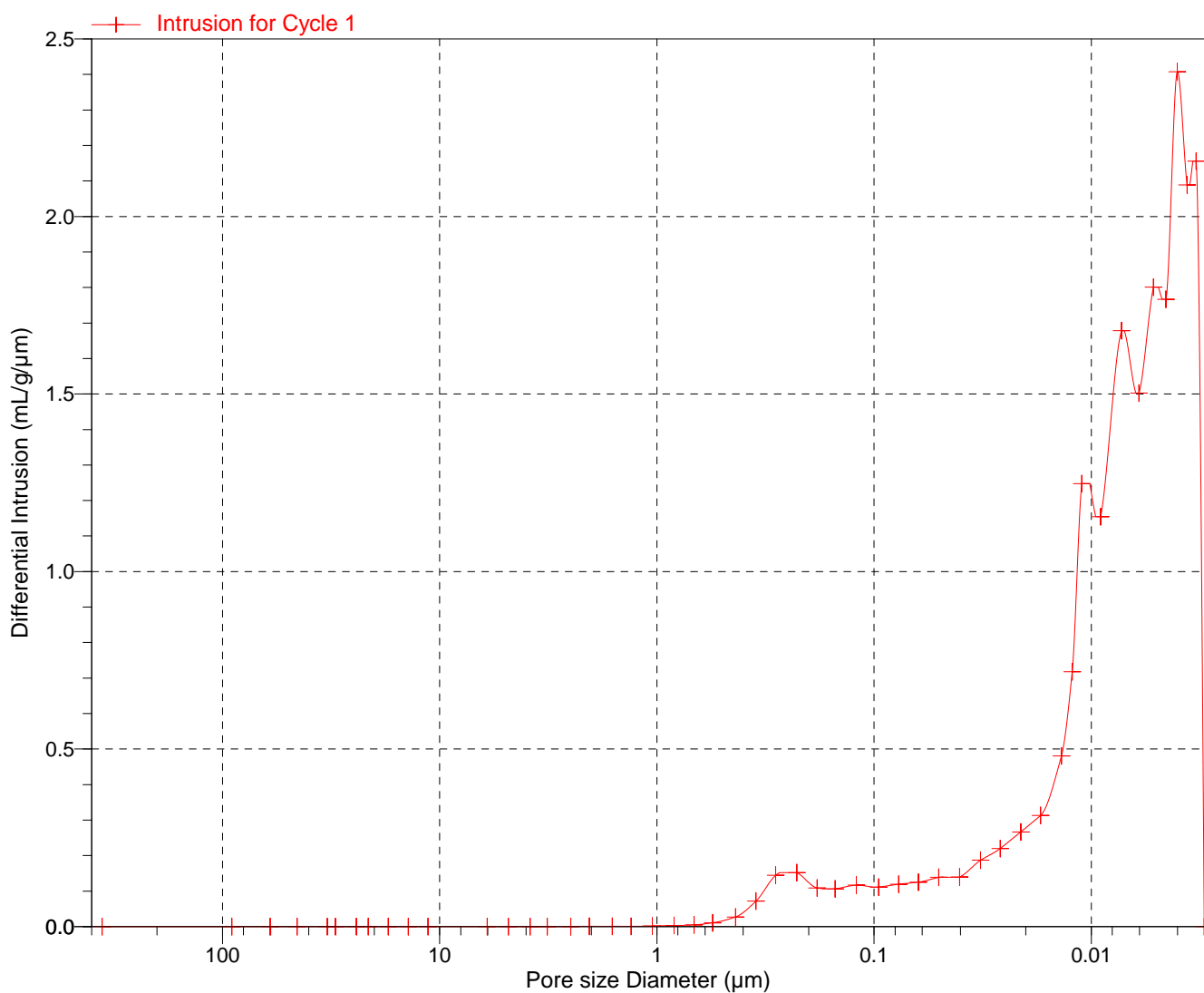


Sample ID: B1  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-321.SMP

LP Analysis Time: 30/01/2017 15:28:01  
HP Analysis Time: 31/01/2017 10:38:32  
Report Time: 31/01/2017 10:38:32

Sample Weight: 2.4967 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

Differential Intrusion vs Pore size

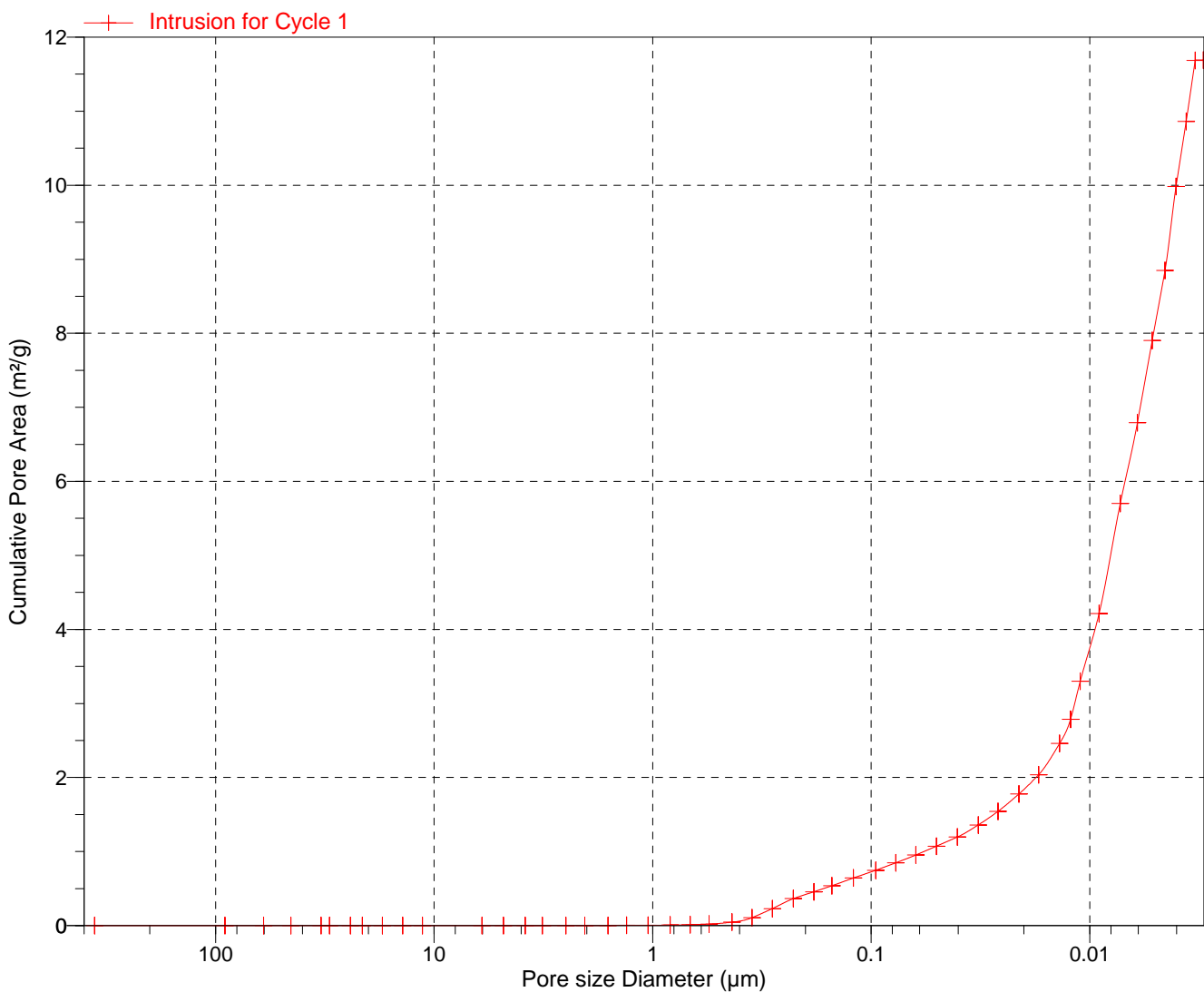


Sample ID: B1  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-321.SMP

LP Analysis Time: 30/01/2017 15:28:01  
HP Analysis Time: 31/01/2017 10:38:32  
Report Time: 31/01/2017 10:38:32

Sample Weight: 2.4967 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Cumulative Pore Area vs Pore size**



Sample ID: B2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-323.SMP

LP Analysis Time: 31/01/2017 14:29:18      Sample Weight: 2.5151 g  
 HP Analysis Time: 31/01/2017 15:48:54      Correction Type: Blank  
 Report Time: 31/01/2017 15:48:54          Show Neg. Int: No

**Summary Report**

**Penetrometer parameters**

Penetrometer:	15-0627 -(15) 3 Bulb, 1.190 Stem, Solid		
Pen. Constant:	22.065 $\mu\text{L/pF}$	Pen. Weight:	59.9970 g
Stem Volume:	1.1900 mL	Max. Head Pressure:	4.6800 psia
Pen. Volume:	4.2020 mL	Assembly Weight:	97.0868 g

**Hg Parameters**

Adv. Contact Angle:	130.000 degrees	Rec. Contact Angle:	130.000 degrees
Hg Surface Tension:	485.000 dynes/cm	Hg Density:	13.5335 g/mL

**User Parameters**

Param 1:	N/A	Param 2:	N/A	Param 3:	N/A
----------	-----	----------	-----	----------	-----

**Low Pressure:**

Evacuation Pressure:	50 $\mu\text{mHg}$
Evacuation Time:	5 mins
Mercury Filling Pressure:	0.50 psia
Equilibration Time:	10 secs

**High Pressure:**

Equilibration Time:	10 secs
Maximum Intrusion Volume:	0.050 mL/g

Blank Correction Sample: C:\BLANCO~3\15-0627D.SMP  
 Blank Correction ID: 15-0627\*2

(From Pressure 0.10 to 60000.00 psia)

**Intrusion Data Summary**

Total Intrusion Volume =	0.0715 mL/g
Total Pore Area =	12.565 $\text{m}^2/\text{g}$
Median Pore Diameter (Volume) =	0.1568 $\mu\text{m}$
Median Pore Diameter (Area) =	0.0061 $\mu\text{m}$
Average Pore Diameter (4V/A) =	0.0228 $\mu\text{m}$
Bulk Density at 0.50 psia =	1.5268 g/mL
Apparent (skeletal) Density =	1.7139 g/mL
Porosity =	10.9123 %
Stem Volume Used =	15 % ****

**Pore Structure Summary**

Threshold Pressure:	559.40 psia (Calculated)
Characteristic length =	0.3233 $\mu\text{m}$
Conductivity formation factor =	0.045
Permeability constant =	0.00442
Permeability =	0.0209 mdarcy
BET Surface Area =	200.0000 $\text{m}^2/\text{g}$
Pore shape exponent =	1.00
Tortuosity factor =	2.107
Tortuosity =	53.9005
Percolation Fractal dimension =	2.868
Backbone Fractal dimension =	N/A

**Mayer Stowe Summary**

Interstitial porosity =	25.9500 %
Breakthrough pressure ratio =	8.3200

Sample ID: B2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-323.SMP

LP Analysis Time: 31/01/2017 14:29:18  
HP Analysis Time: 31/01/2017 15:48:54  
Report Time: 31/01/2017 15:48:54

Sample Weight: 2.5151 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Material Compressibility**

Linear Coefficient = N/A 1/psia  
Quadratic Coefficient = N/A 1/psia<sup>2</sup>



Sample ID: B2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-323.SMP

LP Analysis Time: 31/01/2017 14:29:18  
 HP Analysis Time: 31/01/2017 15:48:54  
 Report Time: 31/01/2017 15:48:54

Sample Weight: 2.5151 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
0.50	358.6096	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
1.99	90.8115	$3.610 \times 10^{-4}$	$8.041 \times 10^{-7}$
2.99	60.4605	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
4.00	45.2546	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5.49	32.9403	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5.99	30.1858	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
7.49	24.1631	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
8.48	21.3280	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
10.48	17.2620	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
12.96	13.9551	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
15.99	11.3111	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
29.97	6.0348	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
37.48	4.8250	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
47.18	3.8337	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
56.85	3.1812	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
72.32	2.5009	$2.126 \times 10^{-3}$	$3.266 \times 10^{-4}$
85.89	2.1057	$4.545 \times 10^{-3}$	$8.590 \times 10^{-4}$
111.06	1.6286	$3.452 \times 10^{-3}$	$8.074 \times 10^{-4}$
135.55	1.3343	$3.205 \times 10^{-3}$	$9.426 \times 10^{-4}$
171.26	1.0560	$2.876 \times 10^{-3}$	$1.050 \times 10^{-3}$
217.68	0.8309	$4.945 \times 10^{-3}$	$2.287 \times 10^{-3}$
267.44	0.6763	$7.524 \times 10^{-3}$	$4.352 \times 10^{-3}$
326.61	0.5538	$1.479 \times 10^{-2}$	$1.048 \times 10^{-2}$
417.35	0.4334	$3.201 \times 10^{-2}$	$2.830 \times 10^{-2}$
516.86	0.3499	$6.589 \times 10^{-2}$	$7.335 \times 10^{-2}$
637.87	0.2835	$9.306 \times 10^{-2}$	$1.281 \times 10^{-1}$
798.45	0.2265	$7.041 \times 10^{-2}$	$1.204 \times 10^{-1}$
987.44	0.1832	$4.454 \times 10^{-2}$	$9.479 \times 10^{-2}$
1197.14	0.1511	$3.685 \times 10^{-2}$	$9.606 \times 10^{-2}$
1497.40	0.1208	$3.274 \times 10^{-2}$	$1.050 \times 10^{-1}$
1896.69	0.0954	$2.723 \times 10^{-2}$	$1.099 \times 10^{-1}$
2345.85	0.0771	$2.296 \times 10^{-2}$	$1.161 \times 10^{-1}$

Sample ID: B2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-323.SMP

LP Analysis Time: 31/01/2017 14:29:18  
 HP Analysis Time: 31/01/2017 15:48:54  
 Report Time: 31/01/2017 15:48:54

Sample Weight: 2.5151 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
2895.47	0.0625	$2.001 \times 10^{-2}$	$1.250 \times 10^{-1}$
3593.59	0.0503	$1.873 \times 10^{-2}$	$1.448 \times 10^{-1}$
4486.29	0.0403	$1.596 \times 10^{-2}$	$1.536 \times 10^{-1}$
5585.78	0.0324	$1.457 \times 10^{-2}$	$1.748 \times 10^{-1}$
6883.92	0.0263	$1.577 \times 10^{-2}$	$2.344 \times 10^{-1}$
8582.88	0.0211	$1.018 \times 10^{-2}$	$1.876 \times 10^{-1}$
10585.74	0.0171	$1.531 \times 10^{-2}$	$3.498 \times 10^{-1}$
13179.44	0.0137	$1.694 \times 10^{-2}$	$4.796 \times 10^{-1}$
14782.60	0.0122	$2.240 \times 10^{-2}$	$7.503 \times 10^{-1}$
16381.43	0.0110	$1.972 \times 10^{-2}$	$7.364 \times 10^{-1}$
19990.82	0.0090	$2.595 \times 10^{-2}$	$1.126 \times 10^0$
24959.76	0.0072	$2.053 \times 10^{-2}$	$1.099 \times 10^0$
29941.56	0.0060	$3.092 \times 10^{-2}$	$2.027 \times 10^0$
34935.75	0.0052	$2.117 \times 10^{-2}$	$1.642 \times 10^0$
39947.19	0.0045	$2.037 \times 10^{-2}$	$1.826 \times 10^0$
44951.42	0.0040	$1.987 \times 10^{-2}$	$2.020 \times 10^0$
49951.67	0.0036	$2.554 \times 10^{-2}$	$2.905 \times 10^0$
54952.52	0.0033	$2.247 \times 10^{-2}$	$2.826 \times 10^0$
59946.19	0.0030	$2.038 \times 10^{-2}$	$2.808 \times 10^0$
46100.20	0.0039	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
35501.35	0.0051	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
27301.29	0.0066	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
21011.42	0.0086	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
16013.09	0.0113	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
12410.50	0.0146	$3.307 \times 10^{-3}$	$1.116 \times 10^{-1}$
9614.72	0.0188	$4.751 \times 10^{-3}$	$1.243 \times 10^{-1}$
7308.45	0.0247	$6.130 \times 10^{-3}$	$1.230 \times 10^{-1}$
5712.06	0.0317	$3.584 \times 10^{-3}$	$5.546 \times 10^{-2}$
4311.75	0.0419	$3.392 \times 10^{-3}$	$4.029 \times 10^{-2}$
3302.89	0.0548	$9.341 \times 10^{-3}$	$8.439 \times 10^{-2}$
2603.02	0.0695	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
2001.93	0.0903	$6.546 \times 10^{-3}$	$3.578 \times 10^{-2}$

Sample ID: B2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-323.SMP

LP Analysis Time: 31/01/2017 14:29:18  
 HP Analysis Time: 31/01/2017 15:48:54  
 Report Time: 31/01/2017 15:48:54

Sample Weight: 2.5151 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

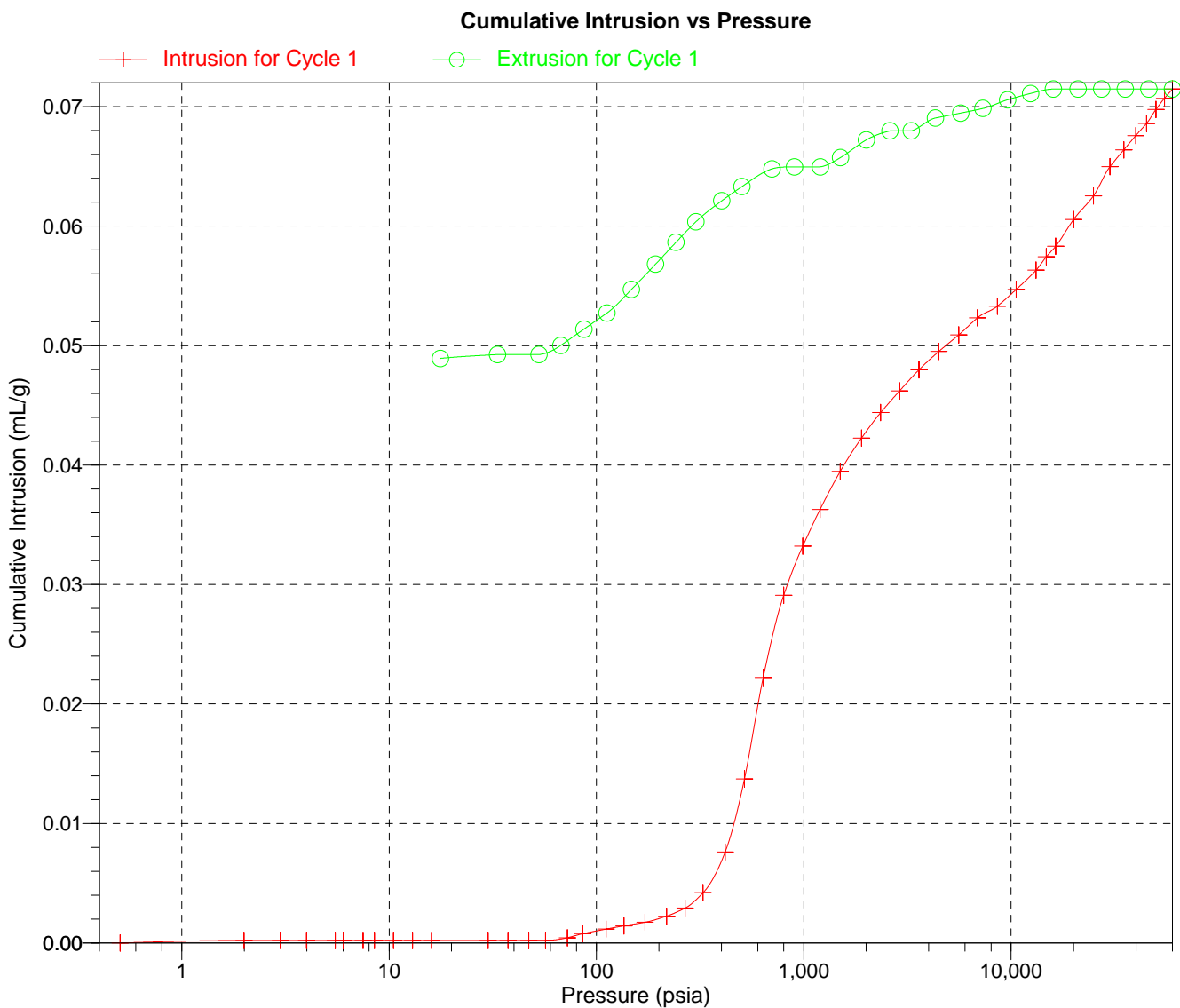
**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
1502.61	0.1204	$1.187 \times 10^{-2}$	$4.926 \times 10^{-2}$
1201.51	0.1505	$7.992 \times 10^{-3}$	$2.573 \times 10^{-2}$
901.62	0.2006	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
702.13	0.2576	$1.579 \times 10^{-3}$	$3.010 \times 10^{-3}$
502.70	0.3598	$1.025 \times 10^{-2}$	$1.456 \times 10^{-2}$
401.86	0.4501	$1.225 \times 10^{-2}$	$1.319 \times 10^{-2}$
301.72	0.5994	$1.414 \times 10^{-2}$	$1.178 \times 10^{-2}$
242.11	0.7470	$1.788 \times 10^{-2}$	$1.158 \times 10^{-2}$
192.85	0.9378	$1.858 \times 10^{-2}$	$9.619 \times 10^{-3}$
147.09	1.2296	$1.796 \times 10^{-2}$	$7.242 \times 10^{-3}$
112.30	1.6106	$1.681 \times 10^{-2}$	$5.172 \times 10^{-3}$
87.01	2.0786	$1.221 \times 10^{-2}$	$2.890 \times 10^{-3}$
67.38	2.6844	$1.217 \times 10^{-2}$	$2.232 \times 10^{-3}$
52.82	3.4239	$7.293 \times 10^{-3}$	$1.042 \times 10^{-3}$
33.35	5.4232	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
17.64	10.2502	$1.174 \times 10^{-3}$	$6.724 \times 10^{-5}$

Sample ID: B2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-323.SMP

LP Analysis Time: 31/01/2017 14:29:18  
HP Analysis Time: 31/01/2017 15:48:54  
Report Time: 31/01/2017 15:48:54

Sample Weight: 2.5151 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

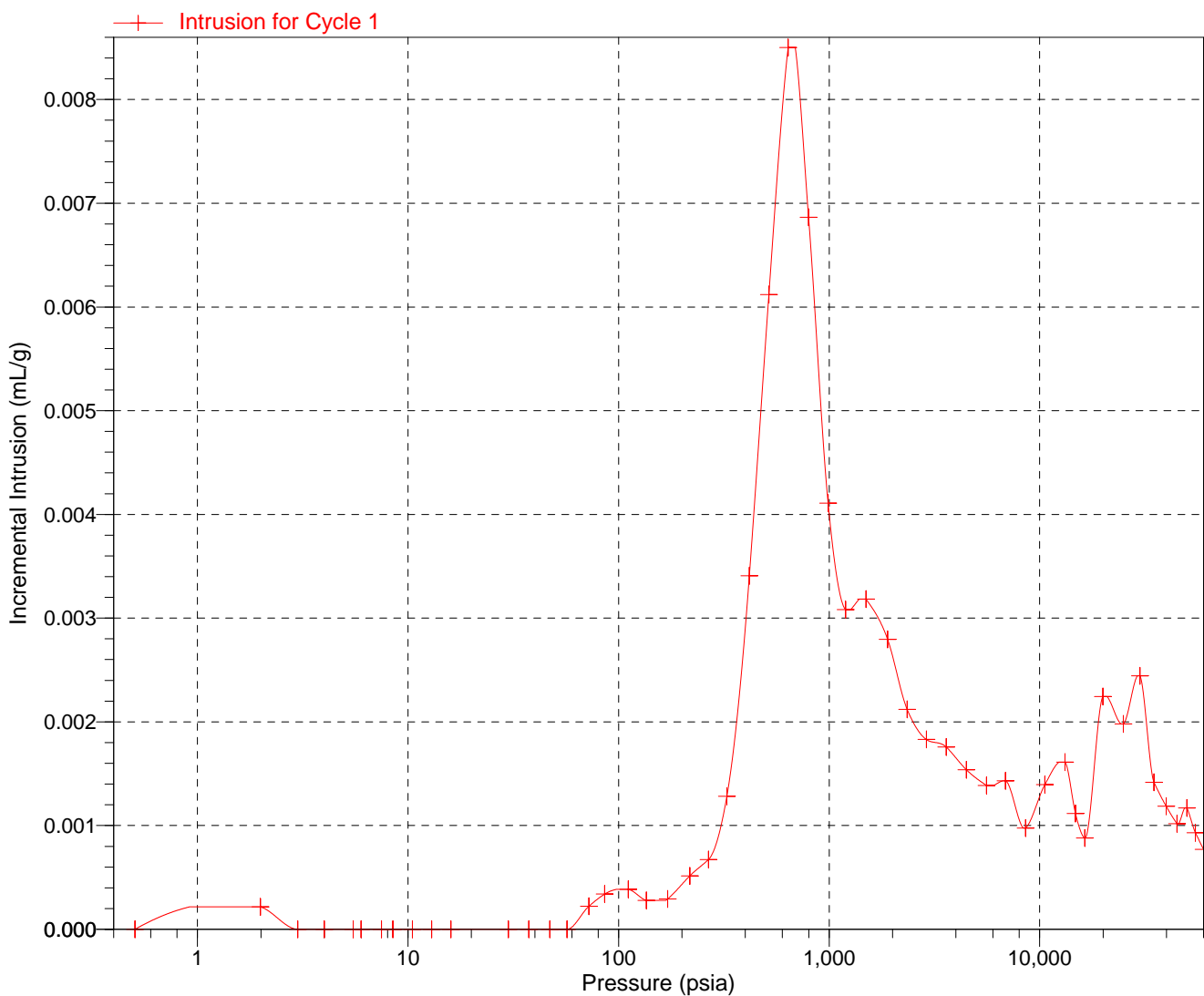


Sample ID: B2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-323.SMP

LP Analysis Time: 31/01/2017 14:29:18  
HP Analysis Time: 31/01/2017 15:48:54  
Report Time: 31/01/2017 15:48:54

Sample Weight: 2.5151 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Incremental Intrusion vs Pressure**

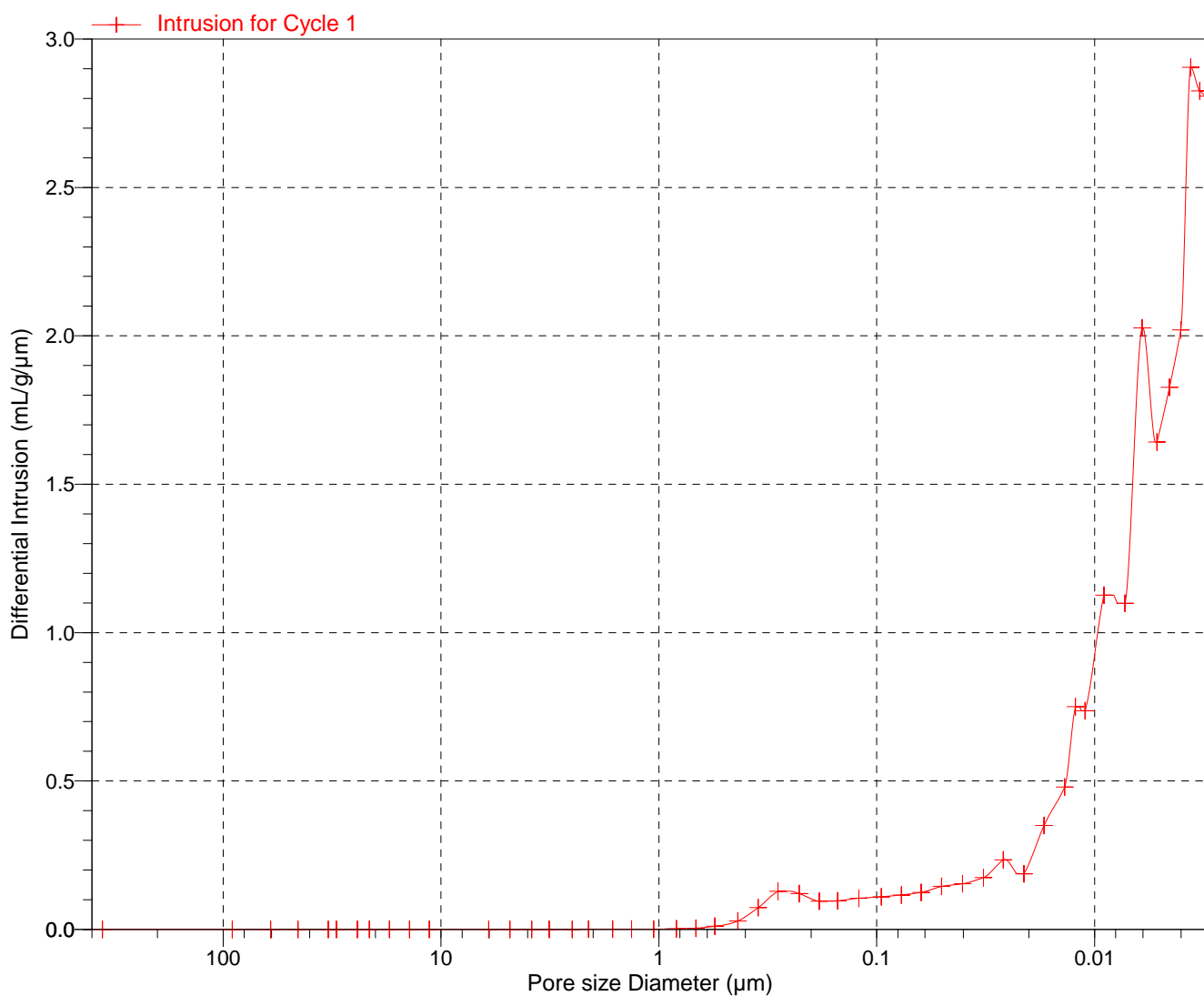


Sample ID: B2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-323.SMP

LP Analysis Time: 31/01/2017 14:29:18  
HP Analysis Time: 31/01/2017 15:48:54  
Report Time: 31/01/2017 15:48:54

Sample Weight: 2.5151 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

Differential Intrusion vs Pore size

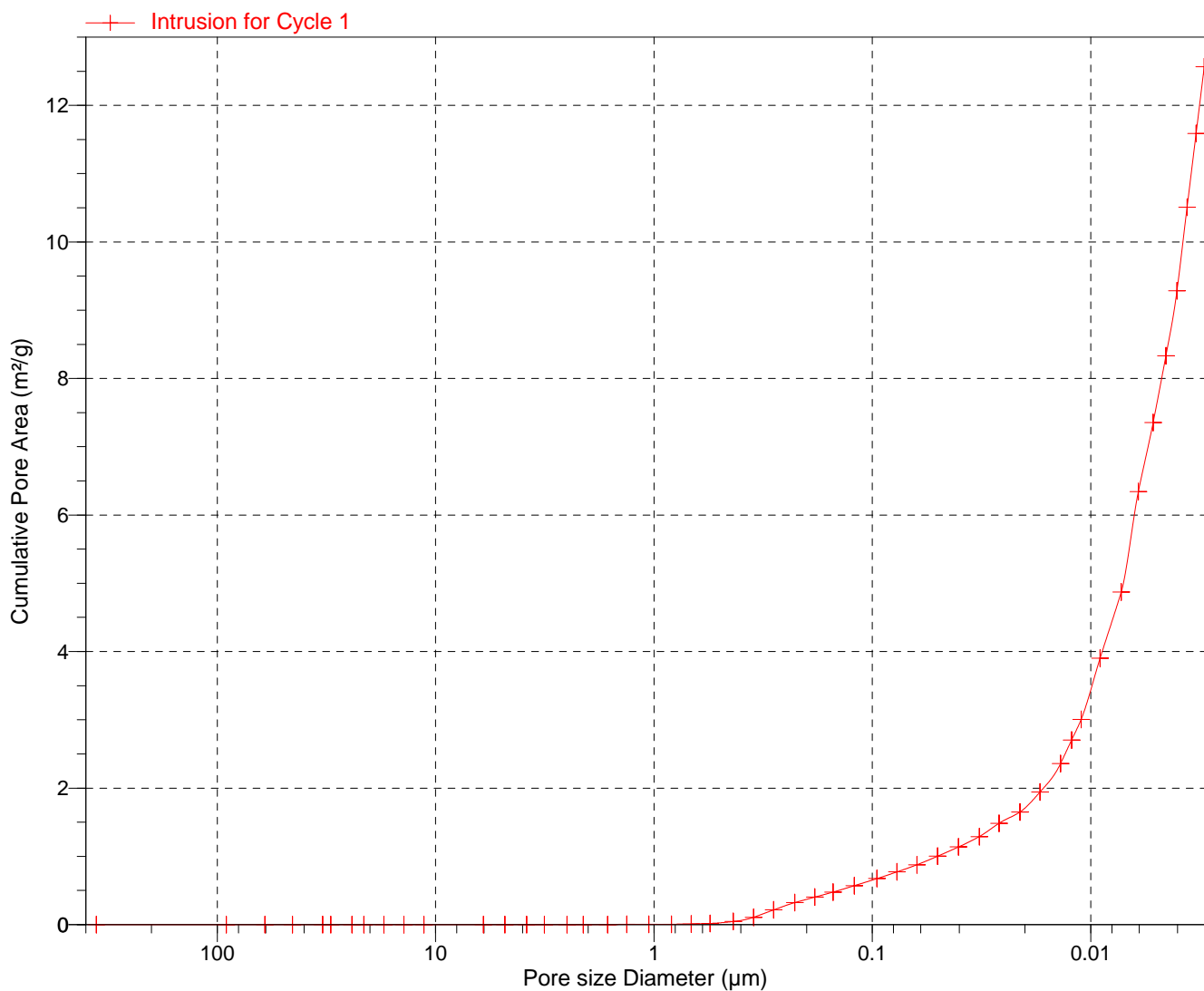


Sample ID: B2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-323.SMP

LP Analysis Time: 31/01/2017 14:29:18  
HP Analysis Time: 31/01/2017 15:48:54  
Report Time: 31/01/2017 15:48:54

Sample Weight: 2.5151 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Cumulative Pore Area vs Pore size**



Sample ID: C1\_2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-326.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 9:32:37      Sample Weight: 2.4346 g  
 HP Analysis Time: 01/02/2017 10:48:07      Correction Type: Blank  
 Report Time: 01/02/2017 10:48:08      Show Neg. Int: No

**Summary Report**

**Penetrometer parameters**

Penetrometer:	15-0627 -(15) 3 Bulb, 1.190 Stem, Solid		
Pen. Constant:	22.065 $\mu\text{L/pF}$	Pen. Weight:	59.9970 g
Stem Volume:	1.1900 mL	Max. Head Pressure:	4.6800 psia
Pen. Volume:	4.2020 mL	Assembly Weight:	98.9891 g

**Hg Parameters**

Adv. Contact Angle:	130.000 degrees	Rec. Contact Angle:	130.000 degrees
Hg Surface Tension:	485.000 dynes/cm	Hg Density:	13.5335 g/mL

**User Parameters**

Param 1:	N/A	Param 2:	N/A	Param 3:	N/A
----------	-----	----------	-----	----------	-----

**Low Pressure:**

Evacuation Pressure:	50 $\mu\text{mHg}$
Evacuation Time:	5 mins
Mercury Filling Pressure:	0.51 psia
Equilibration Time:	10 secs

**High Pressure:**

Equilibration Time:	10 secs
Maximum Intrusion Volume:	0.050 mL/g

Blank Correction Sample: C:\BLANCO~3\15-0627D.SMP  
 Blank Correction ID: 15-0627\*2

(From Pressure 0.10 to 60000.00 psia)

**Intrusion Data Summary**

Total Intrusion Volume =	0.0514 mL/g
Total Pore Area =	10.468 $\text{m}^2/\text{g}$
Median Pore Diameter (Volume) =	0.1099 $\mu\text{m}$
Median Pore Diameter (Area) =	0.0051 $\mu\text{m}$
Average Pore Diameter (4V/A) =	0.0196 $\mu\text{m}$
Bulk Density at 0.51 psia =	1.6223 g/mL
Apparent (skeletal) Density =	1.7699 g/mL
Porosity =	8.3403 %
Stem Volume Used =	11 % ****

**Pore Structure Summary**

Threshold Pressure:	111.48 psia (Calculated)
Characteristic length =	1.6223 $\mu\text{m}$
Conductivity formation factor =	0.007
Permeability constant =	0.00442
Permeability =	0.0807 mdarcy
BET Surface Area =	200.0000 $\text{m}^2/\text{g}$
Pore shape exponent =	1.00
Tortuosity factor =	2.136
Tortuosity =	31.7281
Percolation Fractal dimension =	2.798
Backbone Fractal dimension =	1.402

**Mayer Stowe Summary**

Interstitial porosity =	25.9500 %
Breakthrough pressure ratio =	8.3200





MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION

AutoPore IV 9500 V1.09

Serial: 426

Port: 1/2

Page 2

Sample ID: C1\_2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-326.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 9:32:37  
HP Analysis Time: 01/02/2017 10:48:07  
Report Time: 01/02/2017 10:48:08

Sample Weight: 2.4346 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Material Compressibility**

Linear Coefficient = N/A 1/psia  
Quadratic Coefficient = N/A 1/psia<sup>2</sup>

Sample ID: C1\_2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-326.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 9:32:37  
 HP Analysis Time: 01/02/2017 10:48:07  
 Report Time: 01/02/2017 10:48:08

Sample Weight: 2.4346 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
0.51	356.9596	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
2.00	90.5487	$4.534 \times 10^{-4}$	$1.014 \times 10^{-6}$
3.00	60.3626	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
4.00	45.2547	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5.49	32.9254	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5.99	30.1722	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
7.49	24.1529	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
8.49	21.3127	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
10.48	17.2598	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
12.97	13.9461	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
16.00	11.3072	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
19.99	9.0498	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
37.05	4.8822	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
47.31	3.8233	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
55.92	3.2345	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
71.03	2.5461	$2.867 \times 10^{-3}$	$4.329 \times 10^{-4}$
87.09	2.0767	$3.375 \times 10^{-3}$	$6.363 \times 10^{-4}$
111.64	1.6200	$1.063 \times 10^{-2}$	$2.510 \times 10^{-3}$
136.30	1.3270	$1.693 \times 10^{-2}$	$5.007 \times 10^{-3}$
171.95	1.0518	$1.473 \times 10^{-2}$	$5.402 \times 10^{-3}$
216.85	0.8341	$2.143 \times 10^{-2}$	$9.915 \times 10^{-3}$
268.05	0.6747	$1.754 \times 10^{-2}$	$1.014 \times 10^{-2}$
326.70	0.5536	$1.689 \times 10^{-2}$	$1.198 \times 10^{-2}$
416.94	0.4338	$1.468 \times 10^{-2}$	$1.298 \times 10^{-2}$
518.17	0.3490	$1.806 \times 10^{-2}$	$2.011 \times 10^{-2}$
638.04	0.2835	$2.021 \times 10^{-2}$	$2.785 \times 10^{-2}$
796.36	0.2271	$2.569 \times 10^{-2}$	$4.388 \times 10^{-2}$
987.65	0.1831	$2.563 \times 10^{-2}$	$5.448 \times 10^{-2}$
1198.01	0.1510	$2.603 \times 10^{-2}$	$6.789 \times 10^{-2}$
1496.42	0.1209	$2.440 \times 10^{-2}$	$7.829 \times 10^{-2}$
1896.32	0.0954	$2.110 \times 10^{-2}$	$8.517 \times 10^{-2}$
2347.28	0.0771	$1.975 \times 10^{-2}$	$9.986 \times 10^{-2}$

Sample ID: C1\_2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-326.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 9:32:37  
 HP Analysis Time: 01/02/2017 10:48:07  
 Report Time: 01/02/2017 10:48:08

Sample Weight: 2.4346 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
2895.35	0.0625	$1.932 \times 10^{-2}$	$1.207 \times 10^{-1}$
3593.77	0.0503	$1.938 \times 10^{-2}$	$1.498 \times 10^{-1}$
4484.73	0.0403	$1.911 \times 10^{-2}$	$1.838 \times 10^{-1}$
5584.86	0.0324	$1.629 \times 10^{-2}$	$1.954 \times 10^{-1}$
6884.56	0.0263	$1.369 \times 10^{-2}$	$2.035 \times 10^{-1}$
8585.74	0.0211	$1.051 \times 10^{-2}$	$1.936 \times 10^{-1}$
10581.76	0.0171	$9.022 \times 10^{-3}$	$2.061 \times 10^{-1}$
13184.62	0.0137	$8.809 \times 10^{-3}$	$2.493 \times 10^{-1}$
14777.28	0.0122	$1.007 \times 10^{-2}$	$3.372 \times 10^{-1}$
16383.85	0.0110	$5.995 \times 10^{-3}$	$2.239 \times 10^{-1}$
20022.71	0.0090	$9.856 \times 10^{-3}$	$4.279 \times 10^{-1}$
24952.23	0.0072	$2.361 \times 10^{-2}$	$1.264 \times 10^0$
29934.68	0.0060	$1.808 \times 10^{-2}$	$1.185 \times 10^0$
34936.35	0.0052	$1.701 \times 10^{-2}$	$1.320 \times 10^0$
39945.97	0.0045	$2.241 \times 10^{-2}$	$2.009 \times 10^0$
44952.97	0.0040	$2.457 \times 10^{-2}$	$2.499 \times 10^0$
49949.79	0.0036	$2.423 \times 10^{-2}$	$2.755 \times 10^0$
54949.27	0.0033	$2.166 \times 10^{-2}$	$2.724 \times 10^0$
59943.13	0.0030	$1.847 \times 10^{-2}$	$2.544 \times 10^0$
46099.28	0.0039	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
35500.34	0.0051	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
27306.52	0.0066	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
21005.64	0.0086	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
16009.42	0.0113	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
12414.28	0.0146	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
9612.33	0.0188	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
7315.35	0.0247	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5713.43	0.0317	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
4308.18	0.0420	$1.430 \times 10^{-3}$	$1.698 \times 10^{-2}$
3302.07	0.0548	$3.344 \times 10^{-3}$	$3.020 \times 10^{-2}$
2603.13	0.0695	$3.108 \times 10^{-3}$	$2.183 \times 10^{-2}$
2002.15	0.0903	$3.871 \times 10^{-3}$	$2.116 \times 10^{-2}$

Sample ID: C1\_2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-326.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 9:32:37  
 HP Analysis Time: 01/02/2017 10:48:07  
 Report Time: 01/02/2017 10:48:08

Sample Weight: 2.4346 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

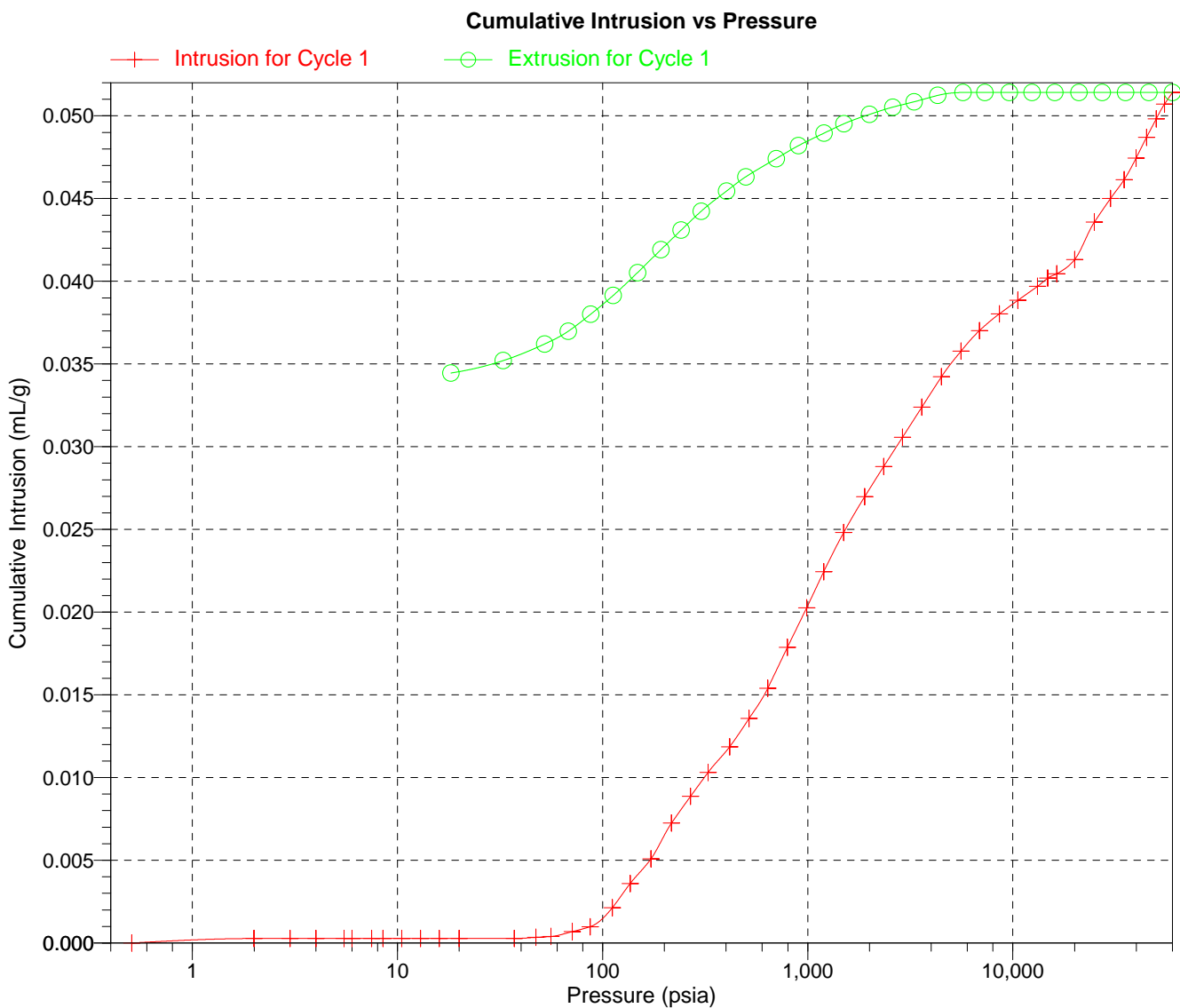
**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
1501.93	0.1204	$4.543 \times 10^{-3}$	$1.885 \times 10^{-2}$
1201.15	0.1506	$5.827 \times 10^{-3}$	$1.876 \times 10^{-2}$
902.04	0.2005	$6.079 \times 10^{-3}$	$1.514 \times 10^{-2}$
702.02	0.2576	$7.150 \times 10^{-3}$	$1.363 \times 10^{-2}$
499.33	0.3622	$7.433 \times 10^{-3}$	$1.052 \times 10^{-2}$
401.78	0.4502	$9.177 \times 10^{-3}$	$9.851 \times 10^{-3}$
302.65	0.5976	$9.873 \times 10^{-3}$	$8.239 \times 10^{-3}$
241.53	0.7488	$1.173 \times 10^{-2}$	$7.596 \times 10^{-3}$
192.59	0.9391	$1.199 \times 10^{-2}$	$6.195 \times 10^{-3}$
148.34	1.2192	$1.220 \times 10^{-2}$	$4.936 \times 10^{-3}$
112.60	1.6062	$1.159 \times 10^{-2}$	$3.587 \times 10^{-3}$
87.50	2.0670	$1.032 \times 10^{-2}$	$2.453 \times 10^{-3}$
68.09	2.6561	$9.466 \times 10^{-3}$	$1.750 \times 10^{-3}$
52.28	3.4598	$6.693 \times 10^{-3}$	$9.560 \times 10^{-4}$
32.80	5.5148	$4.981 \times 10^{-3}$	$4.908 \times 10^{-4}$
18.23	9.9220	$2.938 \times 10^{-3}$	$1.700 \times 10^{-4}$

Sample ID: C1\_2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-326.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 9:32:37  
HP Analysis Time: 01/02/2017 10:48:07  
Report Time: 01/02/2017 10:48:08

Sample Weight: 2.4346 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

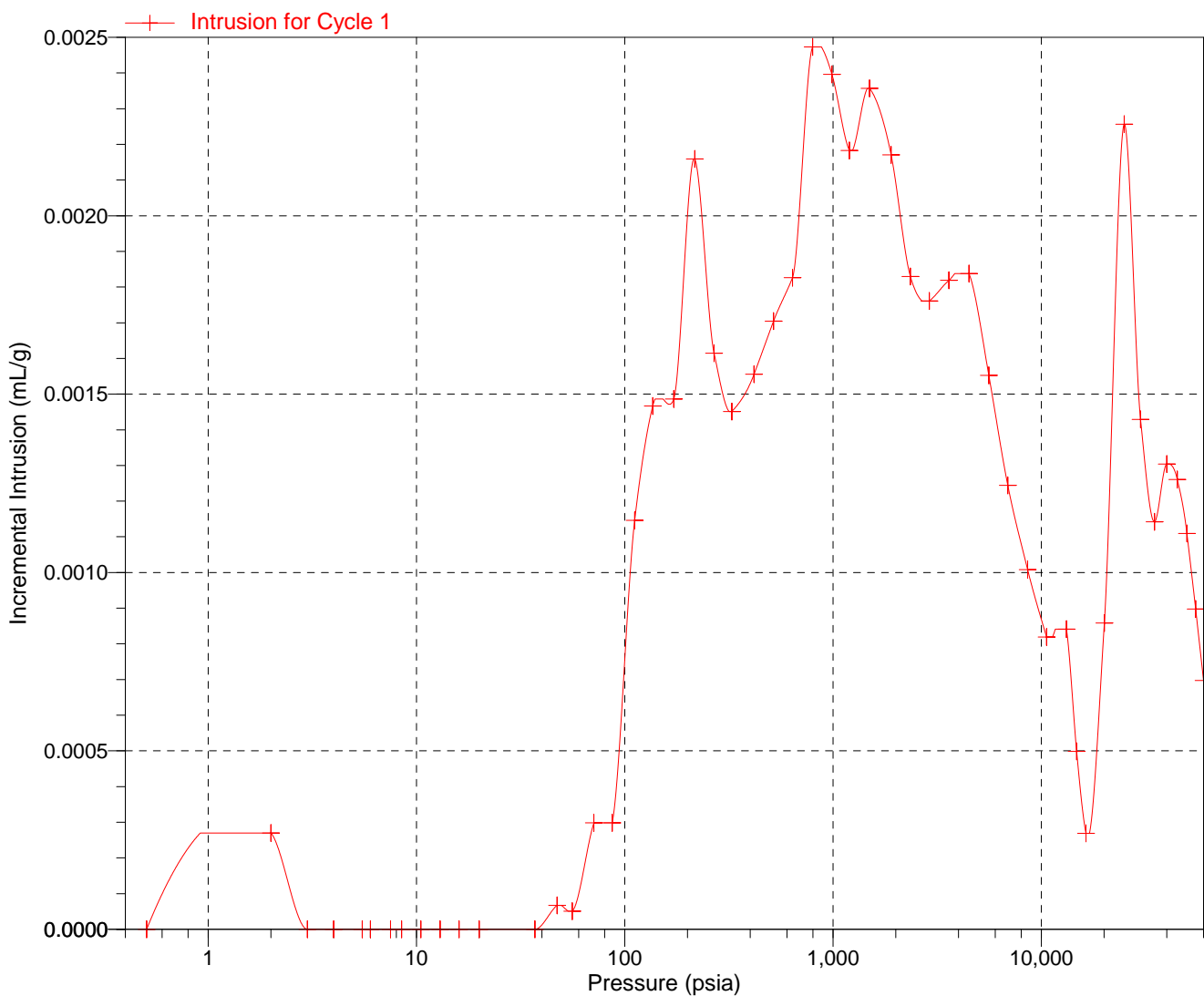


Sample ID: C1\_2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-326.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 9:32:37  
HP Analysis Time: 01/02/2017 10:48:07  
Report Time: 01/02/2017 10:48:08

Sample Weight: 2.4346 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Incremental Intrusion vs Pressure**

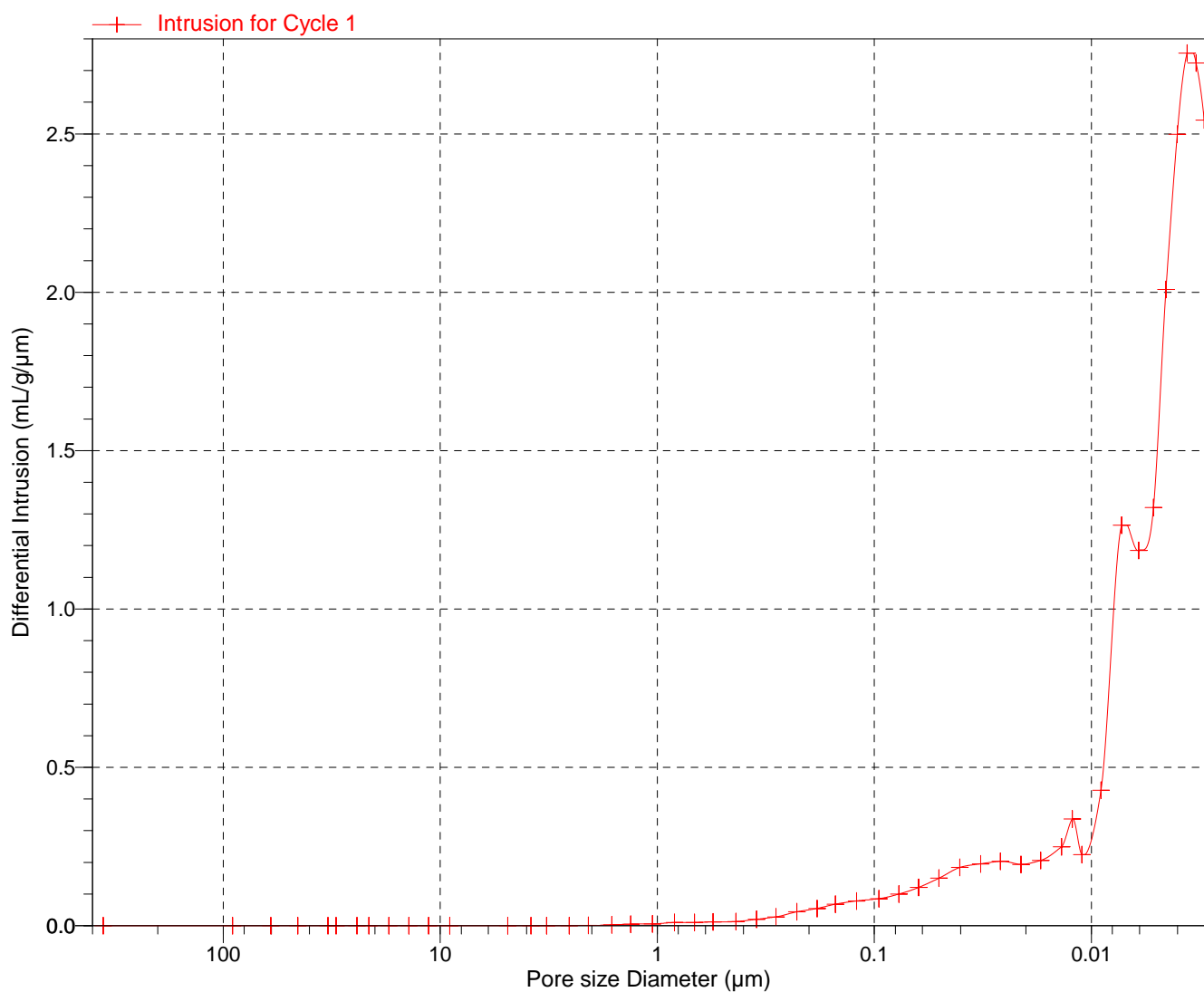


Sample ID: C1\_2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-326.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 9:32:37  
HP Analysis Time: 01/02/2017 10:48:07  
Report Time: 01/02/2017 10:48:08

Sample Weight: 2.4346 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

Differential Intrusion vs Pore size

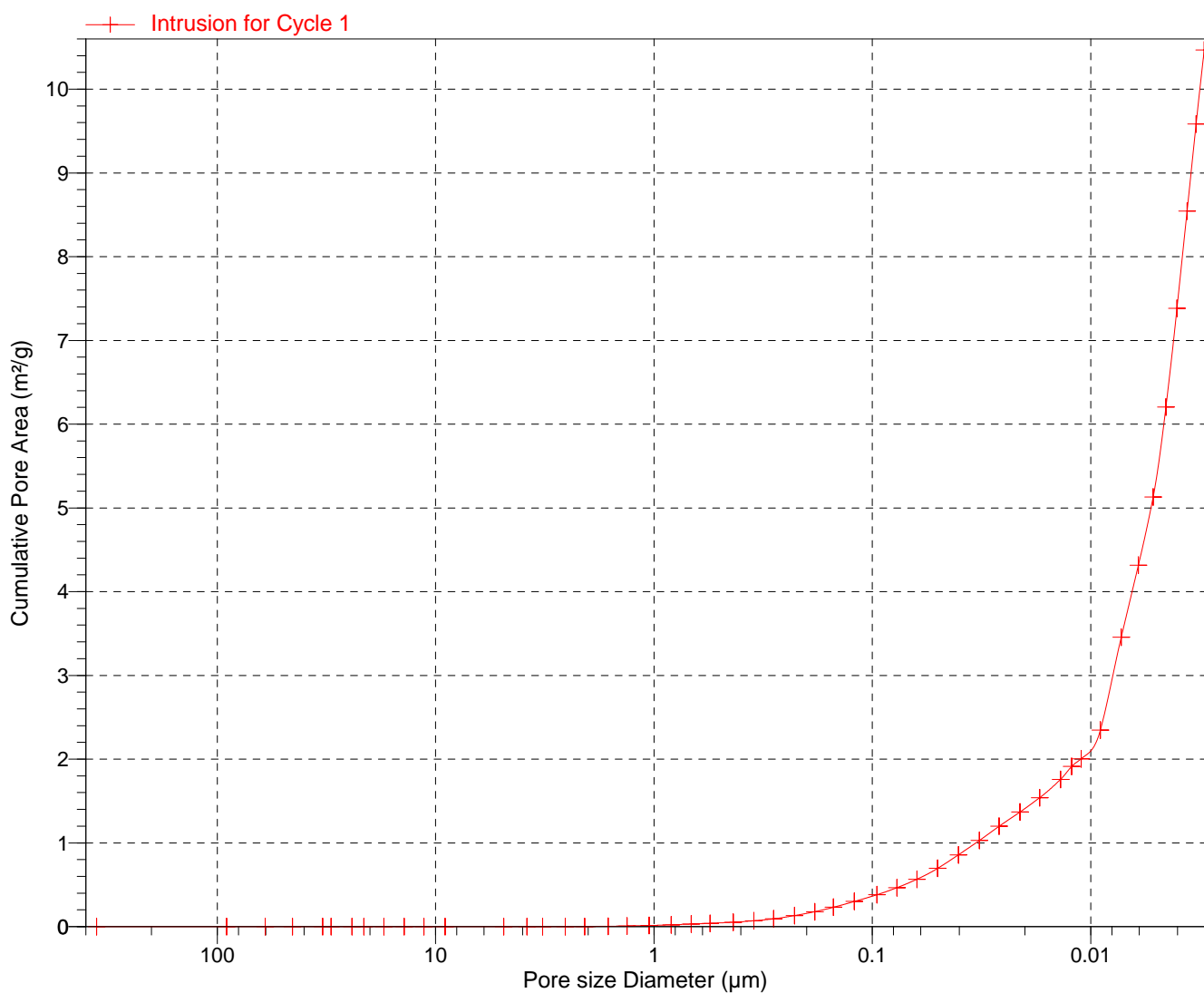


Sample ID: C1\_2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-326.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 9:32:37  
HP Analysis Time: 01/02/2017 10:48:07  
Report Time: 01/02/2017 10:48:08

Sample Weight: 2.4346 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Cumulative Pore Area vs Pore size**





Sample ID: C2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-327.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 14:11:43      Sample Weight: 2.3324 g  
 HP Analysis Time: 01/02/2017 15:38:31      Correction Type: Blank  
 Report Time: 01/02/2017 15:38:31          Show Neg. Int: No

**Summary Report**

**Penetrometer parameters**

Penetrometer:	15-0627 -(15) 3 Bulb, 1.190 Stem, Solid		
Pen. Constant:	22.065 $\mu\text{L/pF}$	Pen. Weight:	59.9970 g
Stem Volume:	1.1900 mL	Max. Head Pressure:	4.6800 psia
Pen. Volume:	4.2020 mL	Assembly Weight:	99.1371 g

**Hg Parameters**

Adv. Contact Angle:	130.000 degrees	Rec. Contact Angle:	130.000 degrees
Hg Surface Tension:	485.000 dynes/cm	Hg Density:	13.5335 g/mL

**User Parameters**

Param 1:	N/A	Param 2:	N/A	Param 3:	N/A
----------	-----	----------	-----	----------	-----

**Low Pressure:**

Evacuation Pressure:	50 $\mu\text{mHg}$
Evacuation Time:	5 mins
Mercury Filling Pressure:	0.51 psia
Equilibration Time:	10 secs

**High Pressure:**

Equilibration Time:	10 secs
Maximum Intrusion Volume:	0.050 mL/g

Blank Correction Sample: C:\BLANCO~3\15-0627D.SMP  
 Blank Correction ID: 15-0627\*2

(From Pressure 0.10 to 60000.00 psia)

**Intrusion Data Summary**

Total Intrusion Volume =	0.0616 mL/g
Total Pore Area =	12.345 $\text{m}^2/\text{g}$
Median Pore Diameter (Volume) =	0.1242 $\mu\text{m}$
Median Pore Diameter (Area) =	0.0050 $\mu\text{m}$
Average Pore Diameter (4V/A) =	0.0199 $\mu\text{m}$
Bulk Density at 0.51 psia =	1.5736 g/mL
Apparent (skeletal) Density =	1.7423 g/mL
Porosity =	9.6861 %
Stem Volume Used =	12 % ****

**Pore Structure Summary**

Threshold Pressure:	184.06 psia (Calculated)
Characteristic length =	0.9826 $\mu\text{m}$
Conductivity formation factor =	0.010
Permeability constant =	0.00442
Permeability =	0.0432 mdarcy
BET Surface Area =	200.0000 $\text{m}^2/\text{g}$
Pore shape exponent =	1.00
Tortuosity factor =	2.121
Tortuosity =	41.2713
Percolation Fractal dimension =	2.827
Backbone Fractal dimension =	1.723

**Mayer Stowe Summary**

Interstitial porosity =	25.9500 %
Breakthrough pressure ratio =	8.3200

Sample ID: C2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-327.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 14:11:43  
HP Analysis Time: 01/02/2017 15:38:31  
Report Time: 01/02/2017 15:38:31

Sample Weight: 2.3324 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Material Compressibility**

Linear Coefficient = N/A 1/psia  
Quadratic Coefficient = N/A 1/psia<sup>2</sup>

Sample ID: C2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-327.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 14:11:43  
 HP Analysis Time: 01/02/2017 15:38:31  
 Report Time: 01/02/2017 15:38:31

Sample Weight: 2.3324 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
0.51	357.0915	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
2.00	90.5998	$4.177 \times 10^{-4}$	$9.335 \times 10^{-7}$
3.00	60.3626	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
3.99	45.2785	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5.49	32.9196	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5.99	30.1698	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
7.49	24.1549	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
8.49	21.3104	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
10.48	17.2588	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
12.97	13.9458	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
15.95	11.3362	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
19.98	9.0521	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
36.60	4.9413	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
47.35	3.8199	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
57.64	3.1379	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
71.67	2.5236	$1.505 \times 10^{-3}$	$2.318 \times 10^{-4}$
85.91	2.1052	$2.117 \times 10^{-3}$	$3.983 \times 10^{-4}$
111.68	1.6195	$3.744 \times 10^{-3}$	$8.781 \times 10^{-4}$
136.05	1.3294	$6.892 \times 10^{-3}$	$2.037 \times 10^{-3}$
172.66	1.0475	$1.215 \times 10^{-2}$	$4.462 \times 10^{-3}$
216.31	0.8361	$2.130 \times 10^{-2}$	$9.863 \times 10^{-3}$
267.40	0.6764	$1.727 \times 10^{-2}$	$9.955 \times 10^{-3}$
326.60	0.5538	$1.717 \times 10^{-2}$	$1.217 \times 10^{-2}$
417.04	0.4337	$1.954 \times 10^{-2}$	$1.728 \times 10^{-2}$
518.14	0.3491	$2.964 \times 10^{-2}$	$3.302 \times 10^{-2}$
636.02	0.2844	$4.054 \times 10^{-2}$	$5.579 \times 10^{-2}$
797.19	0.2269	$4.778 \times 10^{-2}$	$8.153 \times 10^{-2}$
988.15	0.1830	$4.284 \times 10^{-2}$	$9.113 \times 10^{-2}$
1197.37	0.1511	$3.425 \times 10^{-2}$	$8.931 \times 10^{-2}$
1497.54	0.1208	$2.965 \times 10^{-2}$	$9.514 \times 10^{-2}$
1896.45	0.0954	$2.459 \times 10^{-2}$	$9.929 \times 10^{-2}$
2345.62	0.0771	$2.232 \times 10^{-2}$	$1.128 \times 10^{-1}$

Sample ID: C2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-327.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 14:11:43  
 HP Analysis Time: 01/02/2017 15:38:31  
 Report Time: 01/02/2017 15:38:31

Sample Weight: 2.3324 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
2895.47	0.0625	$2.136 \times 10^{-2}$	$1.334 \times 10^{-1}$
3593.79	0.0503	$2.107 \times 10^{-2}$	$1.629 \times 10^{-1}$
4488.22	0.0403	$1.975 \times 10^{-2}$	$1.901 \times 10^{-1}$
5586.19	0.0324	$1.642 \times 10^{-2}$	$1.970 \times 10^{-1}$
6882.36	0.0263	$1.441 \times 10^{-2}$	$2.142 \times 10^{-1}$
8585.91	0.0211	$1.071 \times 10^{-2}$	$1.972 \times 10^{-1}$
10583.46	0.0171	$1.167 \times 10^{-2}$	$2.667 \times 10^{-1}$
13181.45	0.0137	$1.164 \times 10^{-2}$	$3.296 \times 10^{-1}$
14783.90	0.0122	$1.423 \times 10^{-2}$	$4.767 \times 10^{-1}$
16387.18	0.0110	$1.577 \times 10^{-2}$	$5.892 \times 10^{-1}$
20000.21	0.0090	$1.826 \times 10^{-2}$	$7.923 \times 10^{-1}$
24959.89	0.0072	$1.980 \times 10^{-2}$	$1.060 \times 10^0$
29938.59	0.0060	$2.138 \times 10^{-2}$	$1.402 \times 10^0$
34940.61	0.0052	$1.833 \times 10^{-2}$	$1.423 \times 10^0$
39945.65	0.0045	$2.077 \times 10^{-2}$	$1.862 \times 10^0$
44950.55	0.0040	$3.198 \times 10^{-2}$	$3.252 \times 10^0$
49952.26	0.0036	$2.404 \times 10^{-2}$	$2.734 \times 10^0$
54951.79	0.0033	$2.870 \times 10^{-2}$	$3.609 \times 10^0$
59944.61	0.0030	$2.699 \times 10^{-2}$	$3.718 \times 10^0$
46099.66	0.0039	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
35502.43	0.0051	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
27303.24	0.0066	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
21009.77	0.0086	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
16010.20	0.0113	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
12413.52	0.0146	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
9614.45	0.0188	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
7313.77	0.0247	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5711.70	0.0317	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
4308.87	0.0420	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
3302.82	0.0548	$3.086 \times 10^{-3}$	$2.787 \times 10^{-2}$
2602.01	0.0695	$4.759 \times 10^{-3}$	$3.342 \times 10^{-2}$
2001.22	0.0904	$4.460 \times 10^{-3}$	$2.437 \times 10^{-2}$

Sample ID: C2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-327.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 14:11:43  
 HP Analysis Time: 01/02/2017 15:38:31  
 Report Time: 01/02/2017 15:38:31

Sample Weight: 2.3324 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

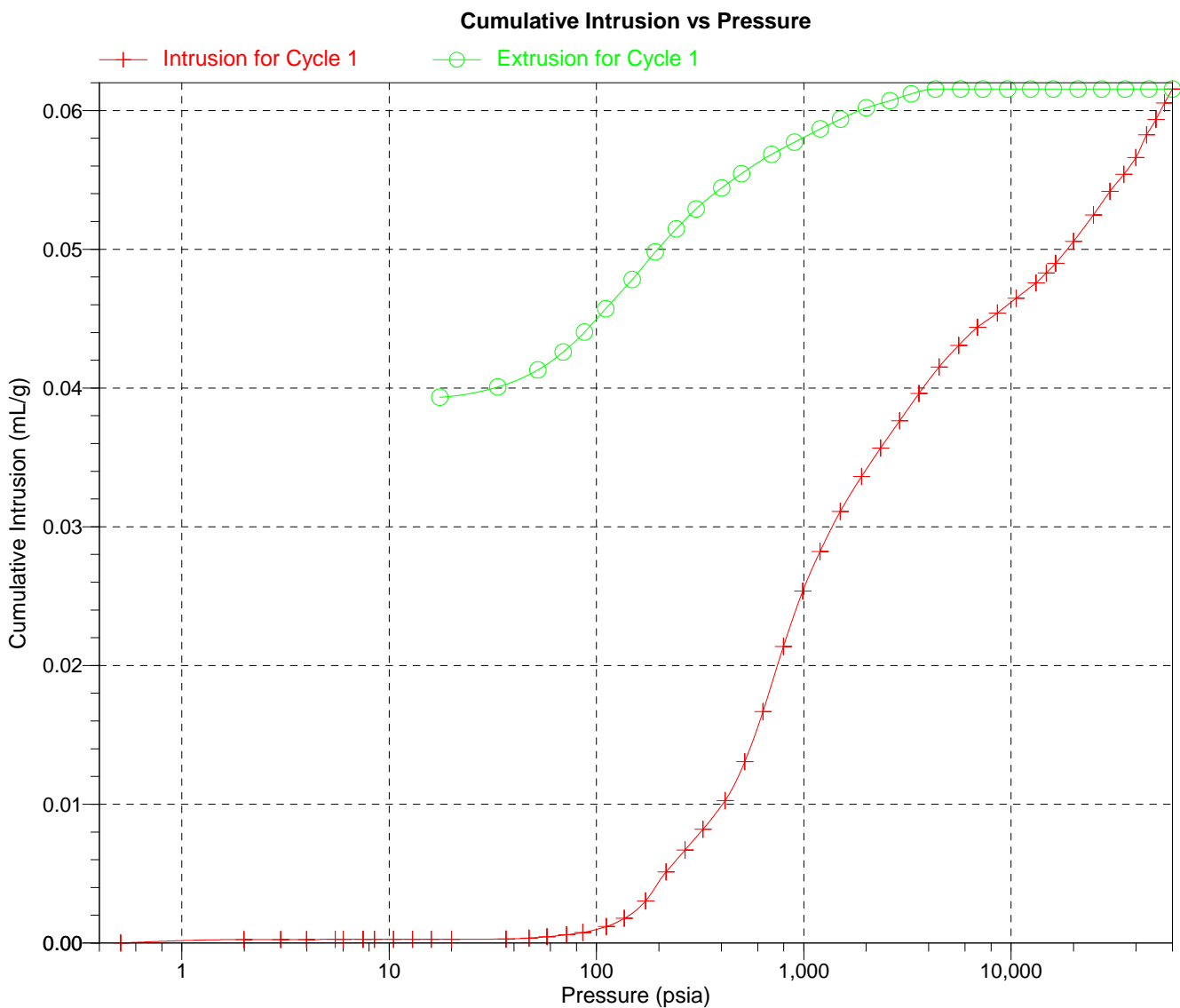
**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
1501.49	0.1205	$6.583 \times 10^{-3}$	$2.731 \times 10^{-2}$
1199.77	0.1507	$7.208 \times 10^{-3}$	$2.318 \times 10^{-2}$
901.56	0.2006	$7.726 \times 10^{-3}$	$1.923 \times 10^{-2}$
701.29	0.2579	$7.968 \times 10^{-3}$	$1.517 \times 10^{-2}$
501.53	0.3606	$9.565 \times 10^{-3}$	$1.356 \times 10^{-2}$
402.24	0.4496	$1.077 \times 10^{-2}$	$1.160 \times 10^{-2}$
302.20	0.5985	$1.217 \times 10^{-2}$	$1.015 \times 10^{-2}$
242.81	0.7449	$1.516 \times 10^{-2}$	$9.838 \times 10^{-3}$
192.08	0.9416	$1.636 \times 10^{-2}$	$8.465 \times 10^{-3}$
148.48	1.2181	$1.778 \times 10^{-2}$	$7.189 \times 10^{-3}$
110.84	1.6318	$1.653 \times 10^{-2}$	$5.073 \times 10^{-3}$
87.40	2.0694	$1.644 \times 10^{-2}$	$3.876 \times 10^{-3}$
69.10	2.6174	$1.394 \times 10^{-2}$	$2.596 \times 10^{-3}$
52.11	3.4709	$1.061 \times 10^{-2}$	$1.524 \times 10^{-3}$
33.41	5.4140	$6.349 \times 10^{-3}$	$6.309 \times 10^{-4}$
17.53	10.3192	$2.628 \times 10^{-3}$	$1.501 \times 10^{-4}$

Sample ID: C2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-327.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 14:11:43  
HP Analysis Time: 01/02/2017 15:38:31  
Report Time: 01/02/2017 15:38:31

Sample Weight: 2.3324 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

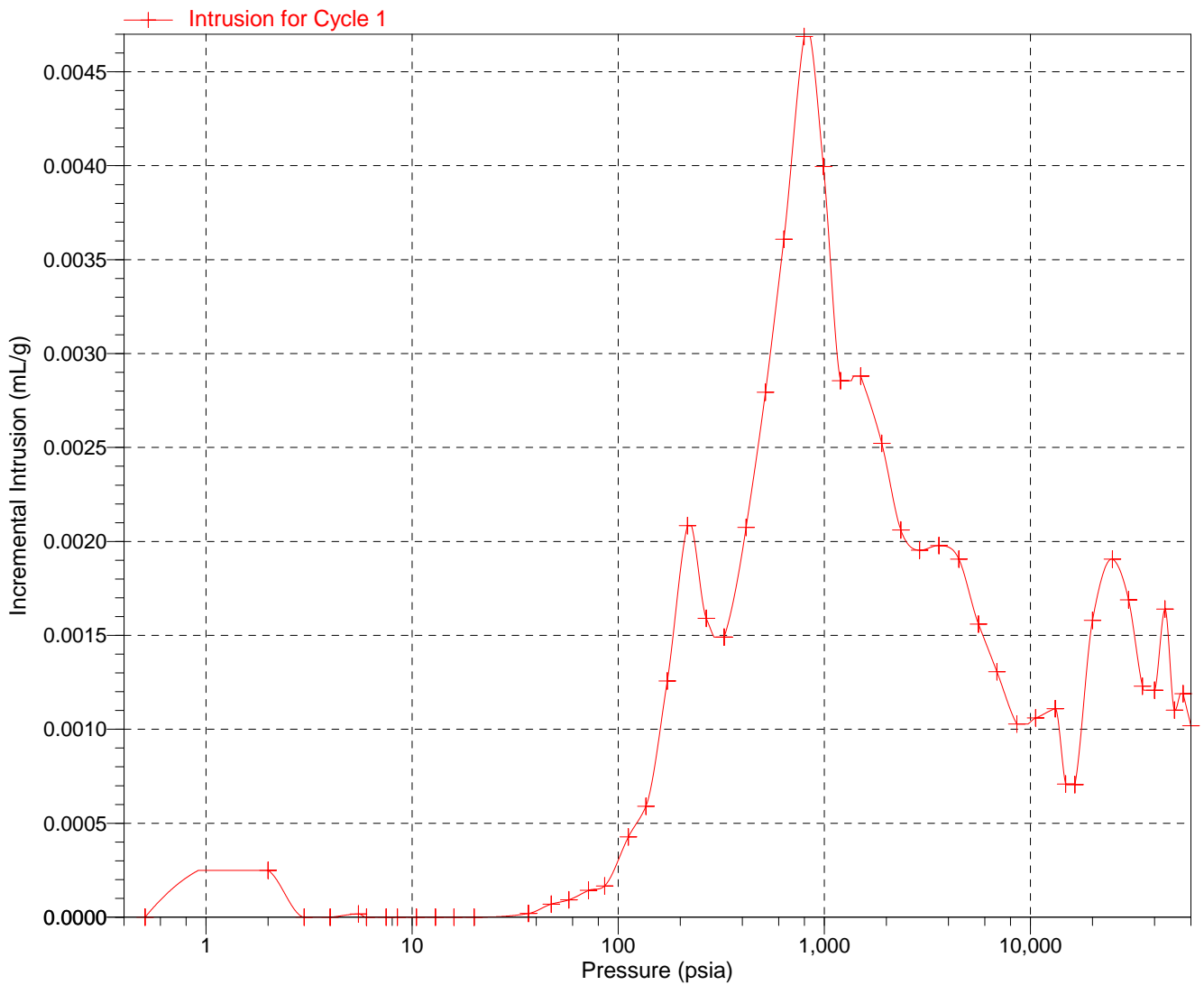


Sample ID: C2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-327.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 14:11:43  
HP Analysis Time: 01/02/2017 15:38:31  
Report Time: 01/02/2017 15:38:31

Sample Weight: 2.3324 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Incremental Intrusion vs Pressure**

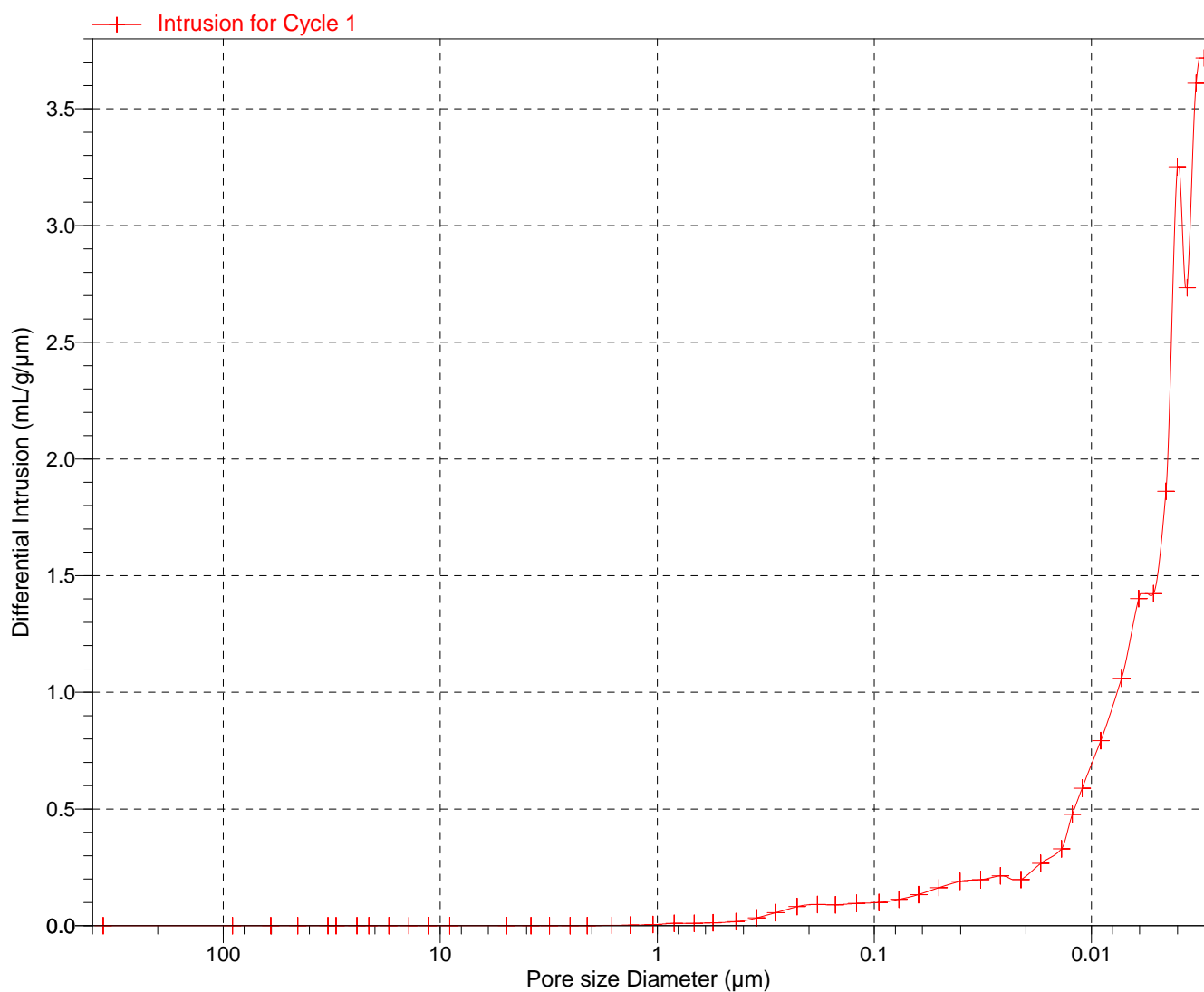


Sample ID: C2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-327.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 14:11:43  
HP Analysis Time: 01/02/2017 15:38:31  
Report Time: 01/02/2017 15:38:31

Sample Weight: 2.3324 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

Differential Intrusion vs Pore size



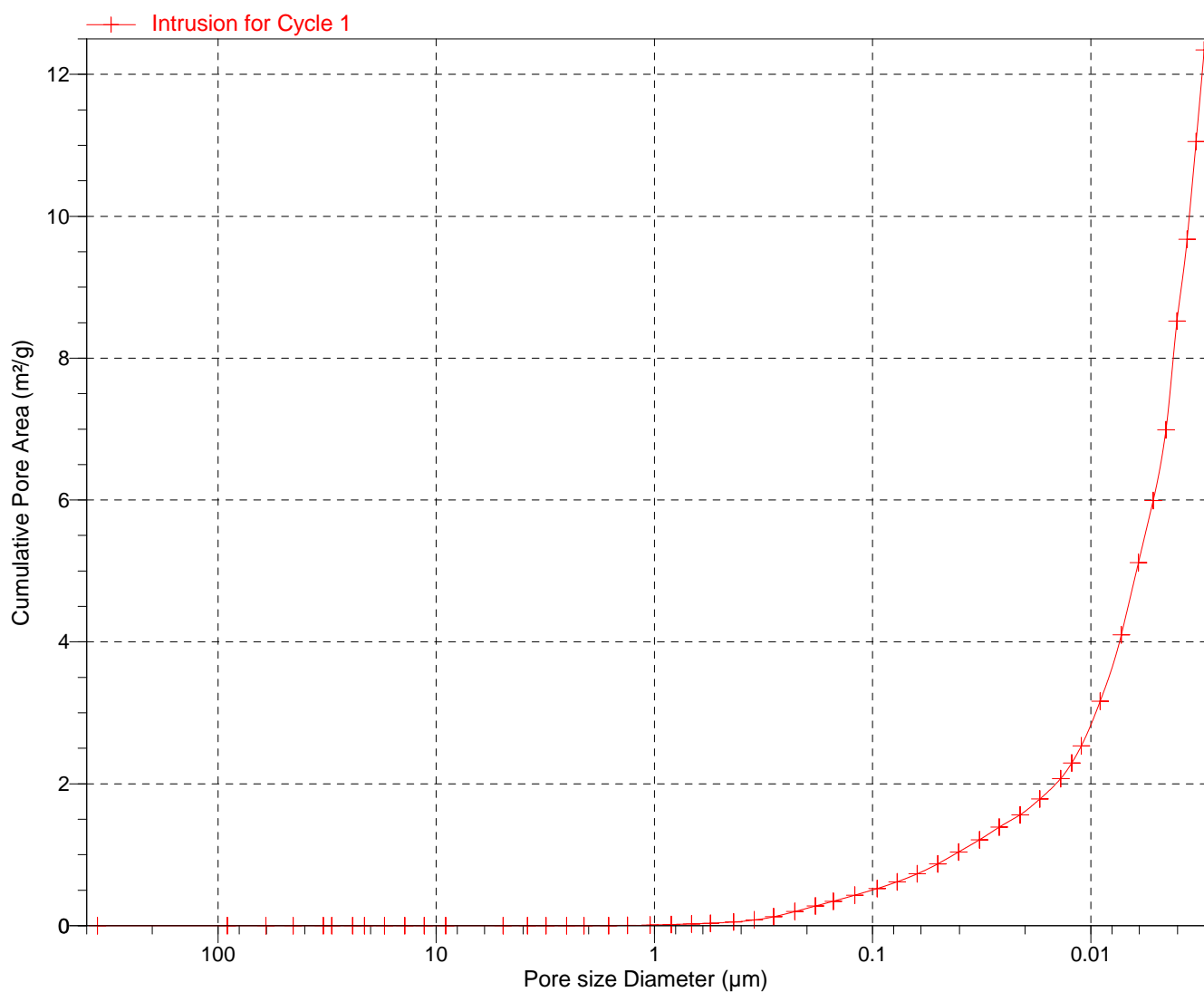


Sample ID: C2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-327.SMP

LP Analysis Time: 01/02/2017 14:11:43  
HP Analysis Time: 01/02/2017 15:38:31  
Report Time: 01/02/2017 15:38:31

Sample Weight: 2.3324 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Cumulative Pore Area vs Pore size**



Sample ID: D1  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-329.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 12:52:17      Sample Weight: 2.1999 g  
 HP Analysis Time: 03/02/2017 13:50:49      Correction Type: Blank  
 Report Time: 03/02/2017 13:50:50      Show Neg. Int: No

**Summary Report**

**Penetrometer parameters**

Penetrometer:	15-0627 -(15) 3 Bulb, 1.190 Stem, Solid		
Pen. Constant:	22.065 $\mu\text{L/pF}$	Pen. Weight:	59.9970 g
Stem Volume:	1.1900 mL	Max. Head Pressure:	4.6800 psia
Pen. Volume:	4.2020 mL	Assembly Weight:	98.6645 g

**Hg Parameters**

Adv. Contact Angle:	130.000 degrees	Rec. Contact Angle:	130.000 degrees
Hg Surface Tension:	485.000 dynes/cm	Hg Density:	13.5335 g/mL

**User Parameters**

Param 1:	N/A	Param 2:	N/A	Param 3:	N/A
----------	-----	----------	-----	----------	-----

**Low Pressure:**

Evacuation Pressure:	50 $\mu\text{mHg}$
Evacuation Time:	5 mins
Mercury Filling Pressure:	0.50 psia
Equilibration Time:	10 secs

**High Pressure:**

Equilibration Time:	10 secs
Maximum Intrusion Volume:	0.050 mL/g

Blank Correction Sample: C:\BLANCO~3\15-0627D.SMP  
 Blank Correction ID: 15-0627\*2

(From Pressure 0.10 to 60000.00 psia)

**Intrusion Data Summary**

Total Intrusion Volume =	0.0870 mL/g
Total Pore Area =	17.690 $\text{m}^2/\text{g}$
Median Pore Diameter (Volume) =	0.1832 $\mu\text{m}$
Median Pore Diameter (Area) =	0.0051 $\mu\text{m}$
Average Pore Diameter (4V/A) =	0.0197 $\mu\text{m}$
Bulk Density at 0.50 psia =	1.4594 g/mL
Apparent (skeletal) Density =	1.6717 g/mL
Porosity =	12.6999 %
Stem Volume Used =	16 % ****

**Pore Structure Summary**

Threshold Pressure:	474.32 psia (Calculated)
Characteristic length =	0.3813 $\mu\text{m}$
Conductivity formation factor =	0.057
Permeability constant =	0.00442
Permeability =	0.0365 mdarcy
BET Surface Area =	200.0000 $\text{m}^2/\text{g}$
Pore shape exponent =	1.00
Tortuosity factor =	2.086
Tortuosity =	40.1317
Percolation Fractal dimension =	2.882
Backbone Fractal dimension =	N/A

**Mayer Stowe Summary**

Interstitial porosity =	25.9500 %
Breakthrough pressure ratio =	8.3200



MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION

AutoPore IV 9500 V1.09

Serial: 426

Port: 1/2

Page 2

Sample ID: D1  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-329.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 12:52:17  
HP Analysis Time: 03/02/2017 13:50:49  
Report Time: 03/02/2017 13:50:50

Sample Weight: 2.1999 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Material Compressibility**

Linear Coefficient = N/A 1/psia  
Quadratic Coefficient = N/A 1/psia<sup>2</sup>

Sample ID: D1  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-329.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 12:52:17  
 HP Analysis Time: 03/02/2017 13:50:49  
 Report Time: 03/02/2017 13:50:50

Sample Weight: 2.1999 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
0.50	358.1634	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
1.99	90.7719	$3.540 \times 10^{-4}$	$7.892 \times 10^{-7}$
2.99	60.4875	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
3.99	45.2956	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5.49	32.9384	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5.99	30.1857	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
7.49	24.1633	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
8.48	21.3206	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
10.47	17.2675	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
12.96	13.9545	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
15.99	11.3104	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
19.98	9.0517	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
37.43	4.8318	$6.281 \times 10^{-4}$	$4.058 \times 10^{-5}$
47.95	3.7718	$1.125 \times 10^{-3}$	$1.141 \times 10^{-4}$
57.65	3.1373	$1.902 \times 10^{-3}$	$2.398 \times 10^{-4}$
71.19	2.5406	$3.974 \times 10^{-3}$	$6.102 \times 10^{-4}$
87.29	2.0721	$7.830 \times 10^{-3}$	$1.480 \times 10^{-3}$
112.25	1.6112	$5.981 \times 10^{-3}$	$1.418 \times 10^{-3}$
136.72	1.3229	$8.054 \times 10^{-3}$	$2.392 \times 10^{-3}$
172.32	1.0496	$6.801 \times 10^{-3}$	$2.501 \times 10^{-3}$
216.95	0.8336	$1.852 \times 10^{-2}$	$8.580 \times 10^{-3}$
266.57	0.6785	$3.359 \times 10^{-2}$	$1.936 \times 10^{-2}$
330.03	0.5480	$4.772 \times 10^{-2}$	$3.392 \times 10^{-2}$
416.46	0.4343	$6.644 \times 10^{-2}$	$5.901 \times 10^{-2}$
517.49	0.3495	$8.500 \times 10^{-2}$	$9.456 \times 10^{-2}$
636.79	0.2840	$7.692 \times 10^{-2}$	$1.058 \times 10^{-1}$
798.12	0.2266	$5.040 \times 10^{-2}$	$8.610 \times 10^{-2}$
987.37	0.1832	$4.185 \times 10^{-2}$	$8.905 \times 10^{-2}$
1197.00	0.1511	$3.482 \times 10^{-2}$	$9.077 \times 10^{-2}$
1496.61	0.1208	$3.174 \times 10^{-2}$	$1.018 \times 10^{-1}$
1897.60	0.0953	$2.462 \times 10^{-2}$	$9.941 \times 10^{-2}$
2346.63	0.0771	$2.215 \times 10^{-2}$	$1.120 \times 10^{-1}$

Sample ID: D1  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-329.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 12:52:17  
 HP Analysis Time: 03/02/2017 13:50:49  
 Report Time: 03/02/2017 13:50:50

Sample Weight: 2.1999 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
2894.99	0.0625	$1.879 \times 10^{-2}$	$1.174 \times 10^{-1}$
3593.21	0.0503	$1.866 \times 10^{-2}$	$1.442 \times 10^{-1}$
4488.02	0.0403	$1.789 \times 10^{-2}$	$1.722 \times 10^{-1}$
5585.81	0.0324	$1.588 \times 10^{-2}$	$1.905 \times 10^{-1}$
6885.27	0.0263	$1.627 \times 10^{-2}$	$2.418 \times 10^{-1}$
8580.88	0.0211	$1.130 \times 10^{-2}$	$2.081 \times 10^{-1}$
10582.75	0.0171	$1.331 \times 10^{-2}$	$3.039 \times 10^{-1}$
13181.51	0.0137	$1.580 \times 10^{-2}$	$4.472 \times 10^{-1}$
14778.82	0.0122	$2.011 \times 10^{-2}$	$6.736 \times 10^{-1}$
16382.41	0.0110	$2.311 \times 10^{-2}$	$8.632 \times 10^{-1}$
20007.04	0.0090	$2.138 \times 10^{-2}$	$9.279 \times 10^{-1}$
24960.09	0.0072	$3.503 \times 10^{-2}$	$1.876 \times 10^0$
29932.73	0.0060	$2.551 \times 10^{-2}$	$1.672 \times 10^0$
34937.90	0.0052	$4.438 \times 10^{-2}$	$3.442 \times 10^0$
39947.23	0.0045	$3.282 \times 10^{-2}$	$2.942 \times 10^0$
44953.42	0.0040	$3.933 \times 10^{-2}$	$3.999 \times 10^0$
49952.88	0.0036	$3.944 \times 10^{-2}$	$4.485 \times 10^0$
54950.55	0.0033	$4.159 \times 10^{-2}$	$5.231 \times 10^0$
59942.88	0.0030	$3.333 \times 10^{-2}$	$4.592 \times 10^0$
46099.61	0.0039	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
35499.97	0.0051	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
27304.67	0.0066	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
21007.94	0.0086	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
16009.75	0.0113	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
12410.30	0.0146	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
9613.26	0.0188	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
7308.75	0.0247	$1.002 \times 10^{-3}$	$2.010 \times 10^{-2}$
5709.71	0.0317	$6.598 \times 10^{-3}$	$1.021 \times 10^{-1}$
4306.16	0.0420	$6.154 \times 10^{-3}$	$7.303 \times 10^{-2}$
3303.44	0.0548	$5.985 \times 10^{-3}$	$5.404 \times 10^{-2}$
2603.34	0.0695	$7.086 \times 10^{-3}$	$4.978 \times 10^{-2}$
2001.85	0.0903	$8.160 \times 10^{-3}$	$4.460 \times 10^{-2}$

Sample ID: D1  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-329.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 12:52:17  
 HP Analysis Time: 03/02/2017 13:50:49  
 Report Time: 03/02/2017 13:50:50

Sample Weight: 2.1999 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

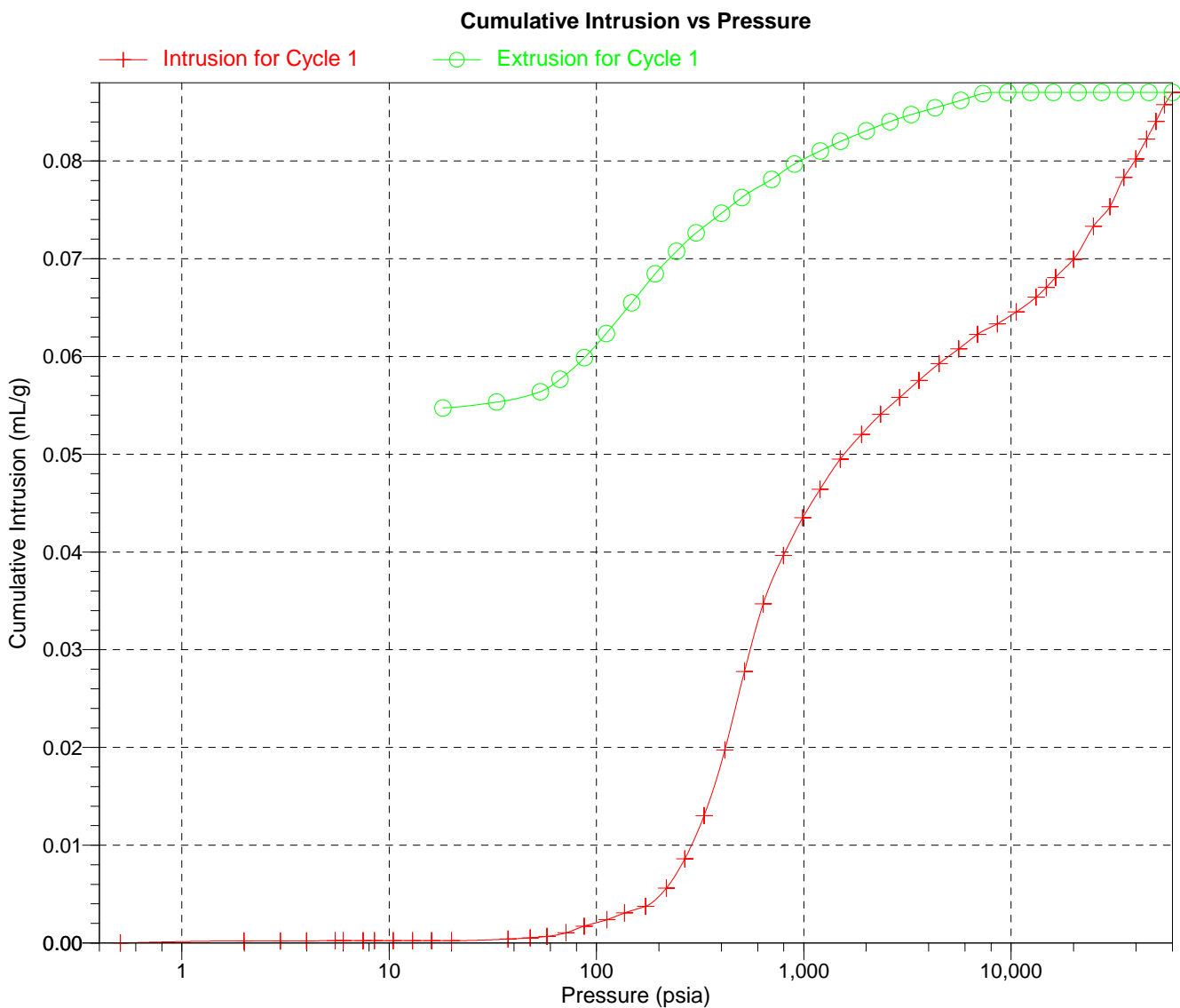
**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
1503.62	0.1203	$8.757 \times 10^{-3}$	$3.636 \times 10^{-2}$
1202.25	0.1504	$9.924 \times 10^{-3}$	$3.197 \times 10^{-2}$
901.60	0.2006	$1.075 \times 10^{-2}$	$2.677 \times 10^{-2}$
701.37	0.2579	$1.434 \times 10^{-2}$	$2.731 \times 10^{-2}$
502.33	0.3600	$1.288 \times 10^{-2}$	$1.828 \times 10^{-2}$
401.04	0.4510	$1.638 \times 10^{-2}$	$1.762 \times 10^{-2}$
302.27	0.5984	$1.641 \times 10^{-2}$	$1.368 \times 10^{-2}$
243.03	0.7442	$2.000 \times 10^{-2}$	$1.299 \times 10^{-2}$
192.15	0.9413	$2.233 \times 10^{-2}$	$1.156 \times 10^{-2}$
147.55	1.2257	$2.598 \times 10^{-2}$	$1.047 \times 10^{-2}$
111.52	1.6218	$2.575 \times 10^{-2}$	$7.907 \times 10^{-3}$
87.39	2.0697	$2.344 \times 10^{-2}$	$5.542 \times 10^{-3}$
66.78	2.7084	$1.893 \times 10^{-2}$	$3.462 \times 10^{-3}$
53.61	3.3738	$1.324 \times 10^{-2}$	$1.898 \times 10^{-3}$
32.96	5.4870	$5.086 \times 10^{-3}$	$5.083 \times 10^{-4}$
18.15	9.9657	$2.267 \times 10^{-3}$	$1.312 \times 10^{-4}$

Sample ID: D1  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-329.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 12:52:17  
HP Analysis Time: 03/02/2017 13:50:49  
Report Time: 03/02/2017 13:50:50

Sample Weight: 2.1999 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

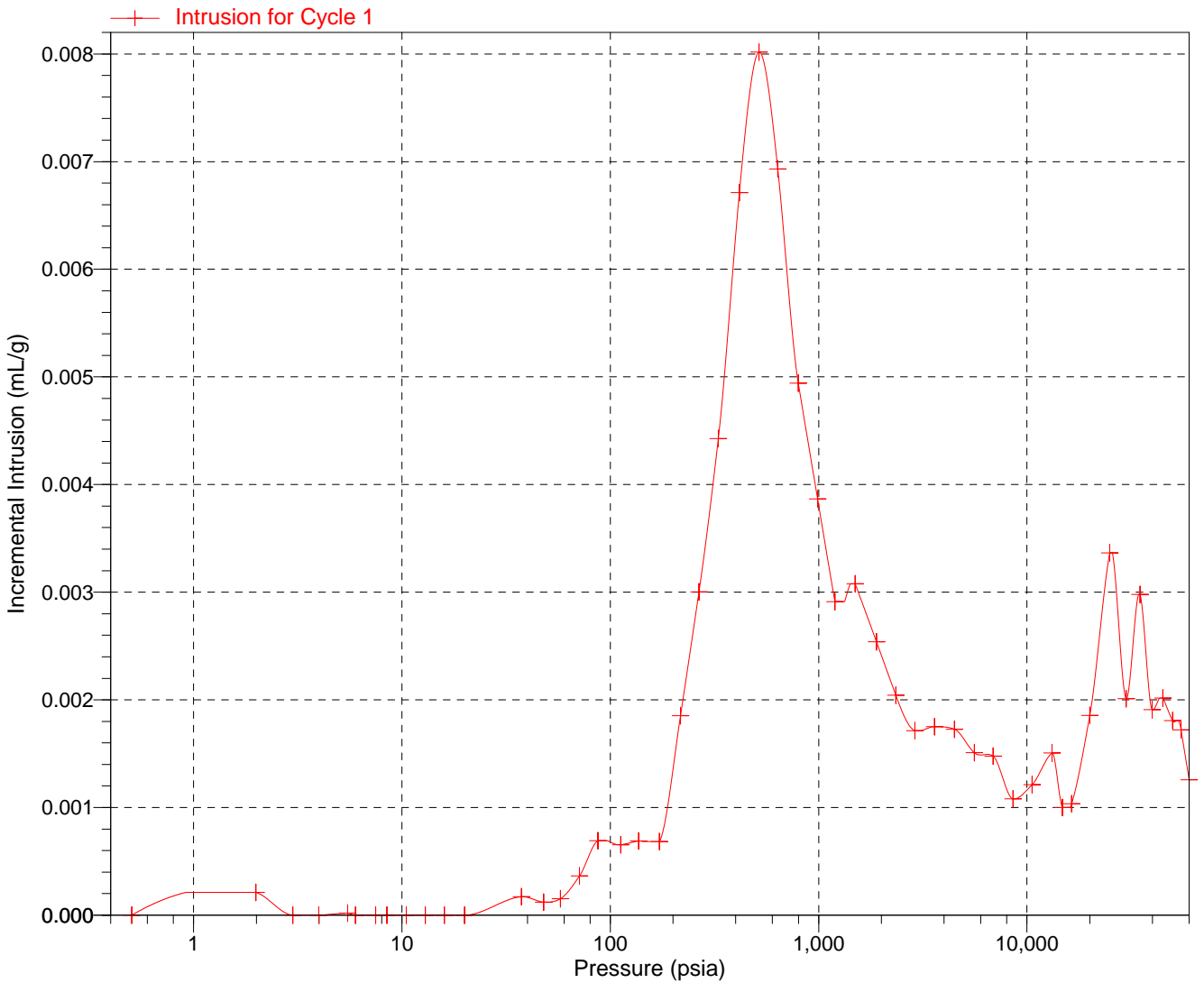


Sample ID: D1  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-329.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 12:52:17  
HP Analysis Time: 03/02/2017 13:50:49  
Report Time: 03/02/2017 13:50:50

Sample Weight: 2.1999 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Incremental Intrusion vs Pressure**



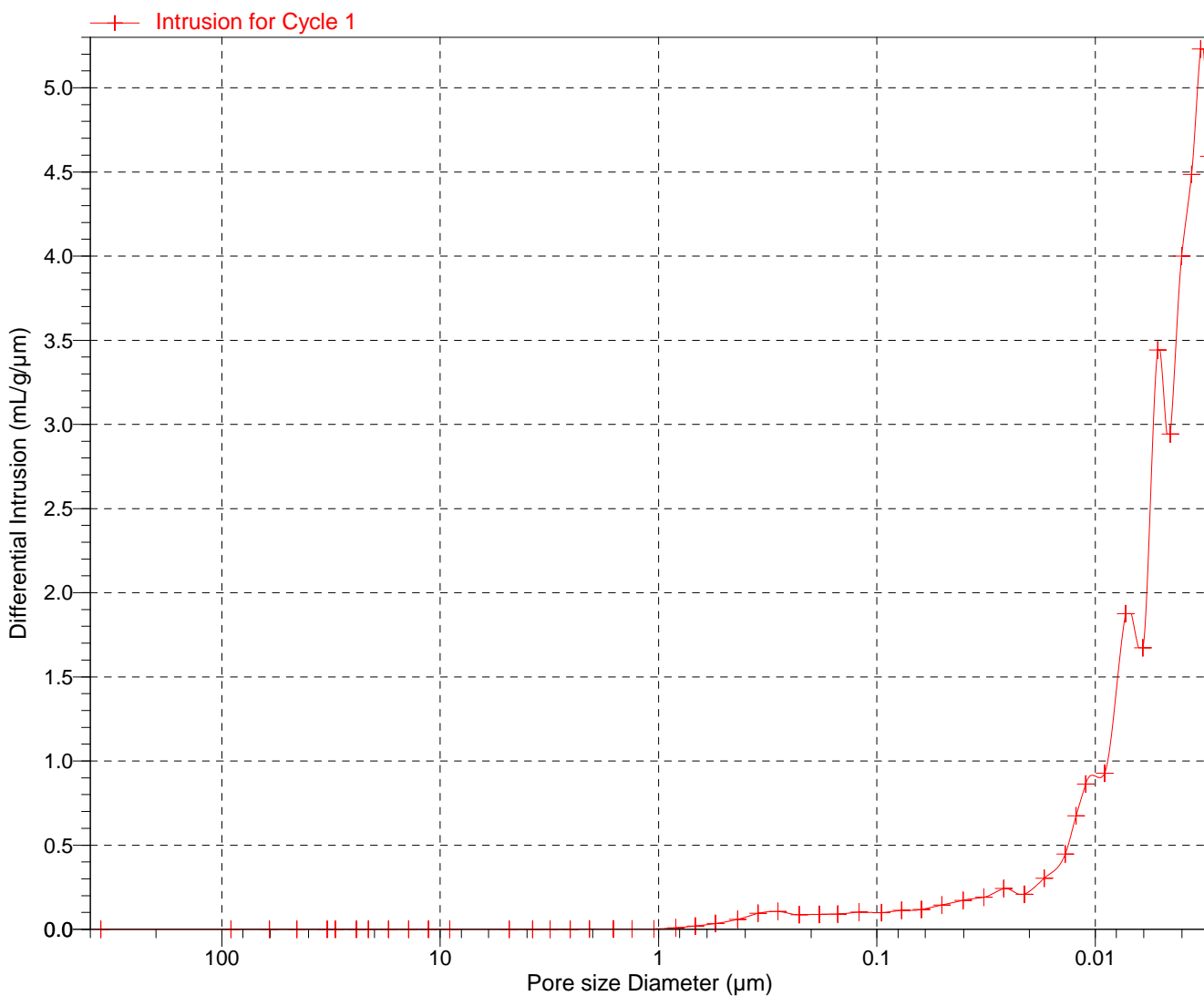


Sample ID: D1  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-329.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 12:52:17  
HP Analysis Time: 03/02/2017 13:50:49  
Report Time: 03/02/2017 13:50:50

Sample Weight: 2.1999 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

Differential Intrusion vs Pore size

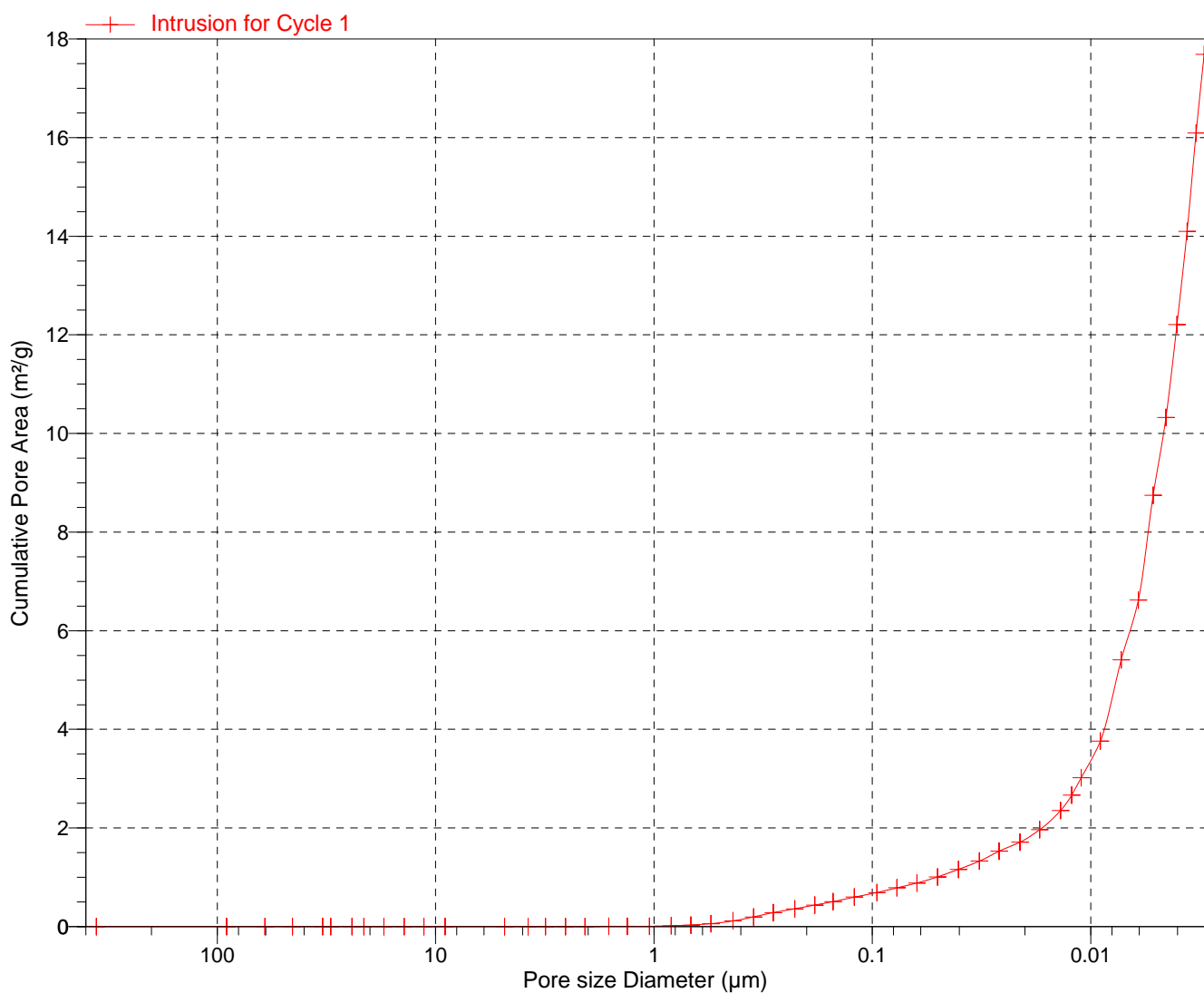


Sample ID: D1  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-329.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 12:52:17  
HP Analysis Time: 03/02/2017 13:50:49  
Report Time: 03/02/2017 13:50:50

Sample Weight: 2.1999 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Cumulative Pore Area vs Pore size**



Sample ID: D2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-330.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 18:58:23      Sample Weight: 2.3071 g  
 HP Analysis Time: 06/02/2017 9:17:58      Correction Type: Blank  
 Report Time: 06/02/2017 9:17:57      Show Neg. Int: No

**Summary Report**

**Penetrometer parameters**

Penetrometer:	15-0627 -(15) 3 Bulb, 1.190 Stem, Solid		
Pen. Constant:	22.065 $\mu\text{L/pF}$	Pen. Weight:	59.9970 g
Stem Volume:	1.1900 mL	Max. Head Pressure:	4.6800 psia
Pen. Volume:	4.2020 mL	Assembly Weight:	98.1157 g

**Hg Parameters**

Adv. Contact Angle:	130.000 degrees	Rec. Contact Angle:	130.000 degrees
Hg Surface Tension:	485.000 dynes/cm	Hg Density:	13.5335 g/mL

**User Parameters**

Param 1:	N/A	Param 2:	N/A	Param 3:	N/A
----------	-----	----------	-----	----------	-----

**Low Pressure:**

Evacuation Pressure:	50 $\mu\text{mHg}$
Evacuation Time:	5 mins
Mercury Filling Pressure:	0.50 psia
Equilibration Time:	10 secs

**High Pressure:**

Equilibration Time:	10 secs
Maximum Intrusion Volume:	0.050 mL/g

Blank Correction Sample: C:\BLANCO~3\15-0627D.SMP  
 Blank Correction ID: 15-0627\*2

(From Pressure 0.10 to 60000.00 psia)

**Intrusion Data Summary**

Total Intrusion Volume =	0.0840 mL/g
Total Pore Area =	12.481 $\text{m}^2/\text{g}$
Median Pore Diameter (Volume) =	0.1928 $\mu\text{m}$
Median Pore Diameter (Area) =	0.0059 $\mu\text{m}$
Average Pore Diameter (4V/A) =	0.0269 $\mu\text{m}$
Bulk Density at 0.50 psia =	1.4828 g/mL
Apparent (skeletal) Density =	1.6939 g/mL
Porosity =	12.4582 %
Stem Volume Used =	17 % ****

**Pore Structure Summary**

Threshold Pressure:	476.10 psia (Calculated)
Characteristic length =	0.3799 $\mu\text{m}$
Conductivity formation factor =	0.057
Permeability constant =	0.00442
Permeability =	0.0366 mdarcy
BET Surface Area =	200.0000 $\text{m}^2/\text{g}$
Pore shape exponent =	1.00
Tortuosity factor =	2.089
Tortuosity =	45.1759
Percolation Fractal dimension =	2.867
Backbone Fractal dimension =	N/A

**Mayer Stowe Summary**

Interstitial porosity =	25.9500 %
Breakthrough pressure ratio =	8.3200



MICROMERITICS INSTRUMENT CORPORATION

AutoPore IV 9500 V1.09

Serial: 426

Port: 1/2

Page 2

Sample ID: D2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-330.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 18:58:23  
HP Analysis Time: 06/02/2017 9:17:58  
Report Time: 06/02/2017 9:17:57

Sample Weight: 2.3071 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Material Compressibility**

Linear Coefficient = N/A 1/psia  
Quadratic Coefficient = N/A 1/psia<sup>2</sup>

Sample ID: D2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-330.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 18:58:23  
 HP Analysis Time: 06/02/2017 9:17:58  
 Report Time: 06/02/2017 9:17:57

Sample Weight: 2.3071 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
0.50	359.7861	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
1.99	90.7674	$4.485 \times 10^{-4}$	$9.972 \times 10^{-7}$
2.99	60.4487	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
3.99	45.2764	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5.49	32.9418	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
5.99	30.1938	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
7.49	24.1598	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
8.48	21.3277	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
10.48	17.2626	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
12.96	13.9539	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
15.99	11.3122	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
19.98	9.0523	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
36.93	4.8969	$9.738 \times 10^{-4}$	$6.253 \times 10^{-5}$
47.58	3.8016	$4.285 \times 10^{-3}$	$4.301 \times 10^{-4}$
56.74	3.1875	$4.770 \times 10^{-3}$	$5.943 \times 10^{-4}$
70.80	2.5547	$3.950 \times 10^{-3}$	$5.999 \times 10^{-4}$
87.47	2.0678	$3.911 \times 10^{-3}$	$7.376 \times 10^{-4}$
111.06	1.6285	$3.662 \times 10^{-3}$	$8.645 \times 10^{-4}$
135.84	1.3314	$5.703 \times 10^{-3}$	$1.679 \times 10^{-3}$
172.08	1.0510	$6.070 \times 10^{-3}$	$2.223 \times 10^{-3}$
217.72	0.8307	$8.837 \times 10^{-3}$	$4.098 \times 10^{-3}$
267.17	0.6770	$2.129 \times 10^{-2}$	$1.231 \times 10^{-2}$
326.59	0.5538	$4.089 \times 10^{-2}$	$2.895 \times 10^{-2}$
418.11	0.4326	$6.695 \times 10^{-2}$	$5.926 \times 10^{-2}$
517.70	0.3494	$9.777 \times 10^{-2}$	$1.090 \times 10^{-1}$
638.70	0.2832	$8.683 \times 10^{-2}$	$1.197 \times 10^{-1}$
798.09	0.2266	$5.141 \times 10^{-2}$	$8.795 \times 10^{-2}$
988.02	0.1831	$4.078 \times 10^{-2}$	$8.679 \times 10^{-2}$
1197.54	0.1510	$3.919 \times 10^{-2}$	$1.022 \times 10^{-1}$
1497.10	0.1208	$3.843 \times 10^{-2}$	$1.233 \times 10^{-1}$
1896.21	0.0954	$3.203 \times 10^{-2}$	$1.293 \times 10^{-1}$
2346.37	0.0771	$2.680 \times 10^{-2}$	$1.355 \times 10^{-1}$

Sample ID: D2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-330.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 18:58:23  
 HP Analysis Time: 06/02/2017 9:17:58  
 Report Time: 06/02/2017 9:17:57

Sample Weight: 2.3071 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
2895.06	0.0625	$2.378 \times 10^{-2}$	$1.485 \times 10^{-1}$
3594.32	0.0503	$2.244 \times 10^{-2}$	$1.735 \times 10^{-1}$
4486.28	0.0403	$2.207 \times 10^{-2}$	$2.123 \times 10^{-1}$
5587.83	0.0324	$1.710 \times 10^{-2}$	$2.052 \times 10^{-1}$
6884.93	0.0263	$1.825 \times 10^{-2}$	$2.714 \times 10^{-1}$
8582.39	0.0211	$1.554 \times 10^{-2}$	$2.862 \times 10^{-1}$
10583.74	0.0171	$1.689 \times 10^{-2}$	$3.858 \times 10^{-1}$
13182.60	0.0137	$1.466 \times 10^{-2}$	$4.150 \times 10^{-1}$
14779.49	0.0122	$1.664 \times 10^{-2}$	$5.574 \times 10^{-1}$
16379.39	0.0110	$1.818 \times 10^{-2}$	$6.788 \times 10^{-1}$
20006.62	0.0090	$1.941 \times 10^{-2}$	$8.425 \times 10^{-1}$
24963.70	0.0072	$2.143 \times 10^{-2}$	$1.148 \times 10^0$
29938.29	0.0060	$2.493 \times 10^{-2}$	$1.634 \times 10^0$
34939.32	0.0052	$2.727 \times 10^{-2}$	$2.116 \times 10^0$
39944.79	0.0045	$2.326 \times 10^{-2}$	$2.085 \times 10^0$
44950.32	0.0040	$2.414 \times 10^{-2}$	$2.455 \times 10^0$
49954.92	0.0036	$2.144 \times 10^{-2}$	$2.438 \times 10^0$
54950.38	0.0033	$1.907 \times 10^{-2}$	$2.398 \times 10^0$
59946.25	0.0030	$1.846 \times 10^{-2}$	$2.543 \times 10^0$
46100.68	0.0039	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
35502.63	0.0051	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
27304.91	0.0066	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
21008.20	0.0086	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
16009.87	0.0113	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
12413.74	0.0146	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
9608.81	0.0188	$0.000 \times 10^0$	$0.000 \times 10^0$
7315.58	0.0247	$1.575 \times 10^{-3}$	$3.161 \times 10^{-2}$
5713.22	0.0317	$5.883 \times 10^{-3}$	$9.110 \times 10^{-2}$
4308.22	0.0420	$6.306 \times 10^{-3}$	$7.488 \times 10^{-2}$
3303.86	0.0547	$8.002 \times 10^{-3}$	$7.228 \times 10^{-2}$
2602.38	0.0695	$8.262 \times 10^{-3}$	$5.803 \times 10^{-2}$
2001.81	0.0904	$9.384 \times 10^{-3}$	$5.128 \times 10^{-2}$

Sample ID: D2  
 Operator: Enrique Glez  
 Submitter: Jorge Pasan  
 File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-330.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 18:58:23  
 HP Analysis Time: 06/02/2017 9:17:58  
 Report Time: 06/02/2017 9:17:57

Sample Weight: 2.3071 g  
 Correction Type: Blank  
 Show Neg. Int: No

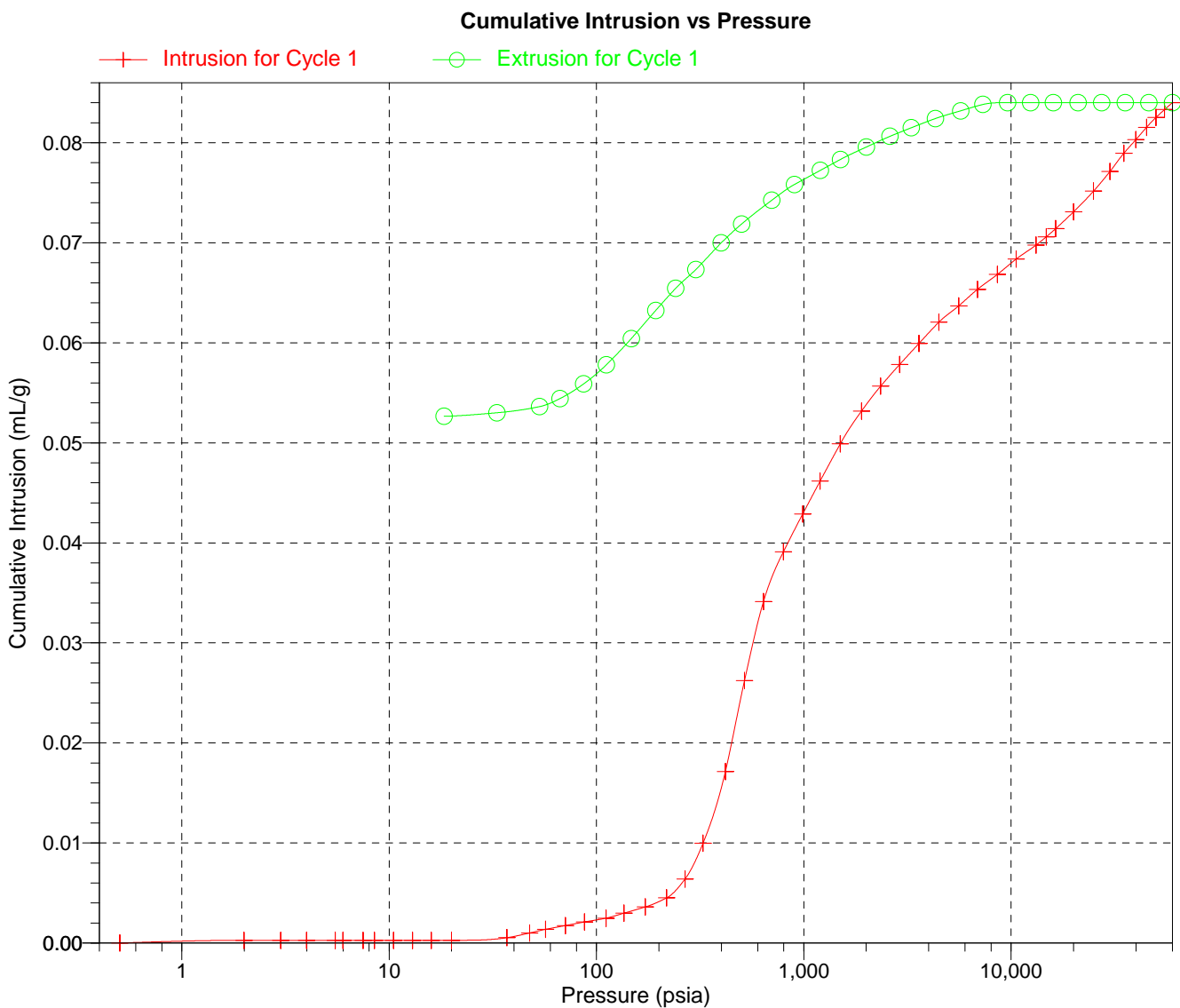
**Tabular Report**

Pressure (psia)	Pore Diameter ( $\mu\text{m}$ )	dV/dlogD Pore Volume (mL/g)	dV/dD Pore Volume (mL/g/ $\mu\text{m}$ )
1502.74	0.1204	$9.943 \times 10^{-3}$	$4.127 \times 10^{-2}$
1200.74	0.1506	$1.125 \times 10^{-2}$	$3.622 \times 10^{-2}$
901.26	0.2007	$1.129 \times 10^{-2}$	$2.812 \times 10^{-2}$
700.94	0.2580	$1.449 \times 10^{-2}$	$2.759 \times 10^{-2}$
501.22	0.3608	$1.627 \times 10^{-2}$	$2.305 \times 10^{-2}$
399.80	0.4524	$1.928 \times 10^{-2}$	$2.068 \times 10^{-2}$
301.57	0.5997	$2.168 \times 10^{-2}$	$1.802 \times 10^{-2}$
241.07	0.7503	$1.935 \times 10^{-2}$	$1.250 \times 10^{-2}$
193.21	0.9361	$2.292 \times 10^{-2}$	$1.186 \times 10^{-2}$
147.24	1.2284	$2.386 \times 10^{-2}$	$9.633 \times 10^{-3}$
111.64	1.6201	$2.183 \times 10^{-2}$	$6.700 \times 10^{-3}$
86.71	2.0859	$1.743 \times 10^{-2}$	$4.107 \times 10^{-3}$
66.60	2.7158	$1.280 \times 10^{-2}$	$2.329 \times 10^{-3}$
53.12	3.4047	$8.213 \times 10^{-3}$	$1.171 \times 10^{-3}$
33.14	5.4576	$2.991 \times 10^{-3}$	$2.986 \times 10^{-4}$
18.38	9.8426	$1.398 \times 10^{-3}$	$8.163 \times 10^{-5}$

Sample ID: D2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-330.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 18:58:23  
HP Analysis Time: 06/02/2017 9:17:58  
Report Time: 06/02/2017 9:17:57

Sample Weight: 2.3071 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No



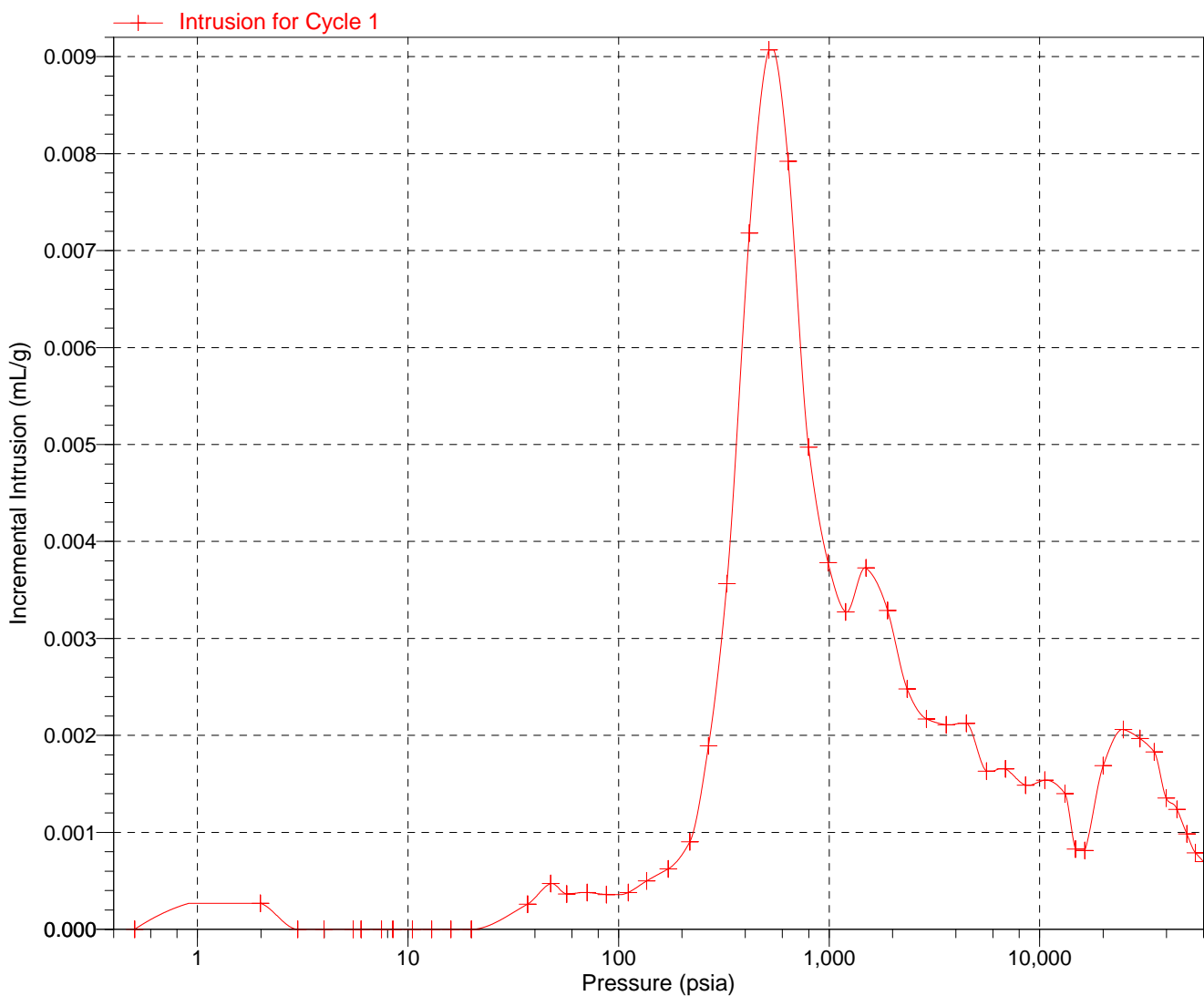


Sample ID: D2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-330.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 18:58:23  
HP Analysis Time: 06/02/2017 9:17:58  
Report Time: 06/02/2017 9:17:57

Sample Weight: 2.3071 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Incremental Intrusion vs Pressure**

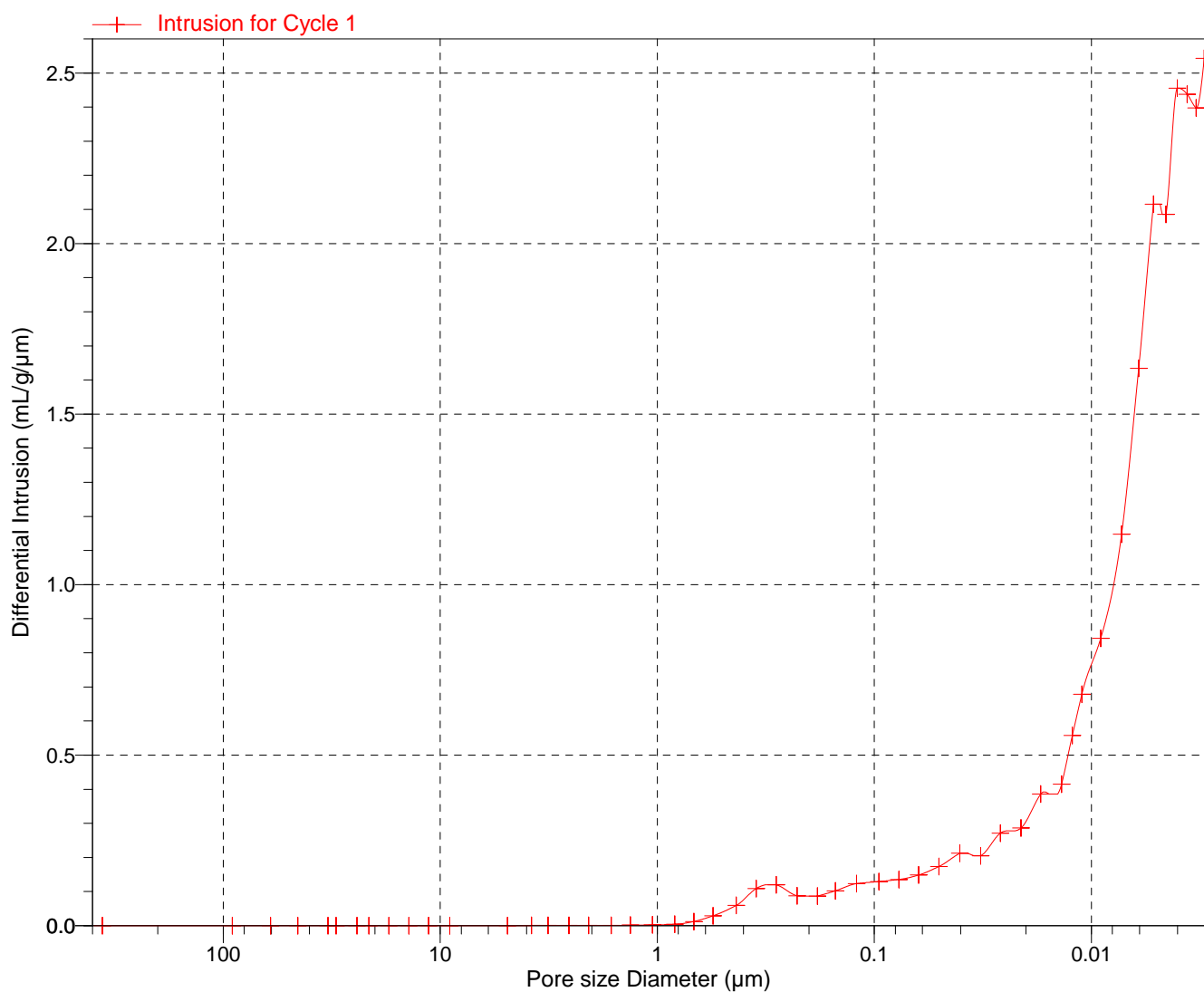


Sample ID: D2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-330.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 18:58:23  
HP Analysis Time: 06/02/2017 9:17:58  
Report Time: 06/02/2017 9:17:57

Sample Weight: 2.3071 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

Differential Intrusion vs Pore size

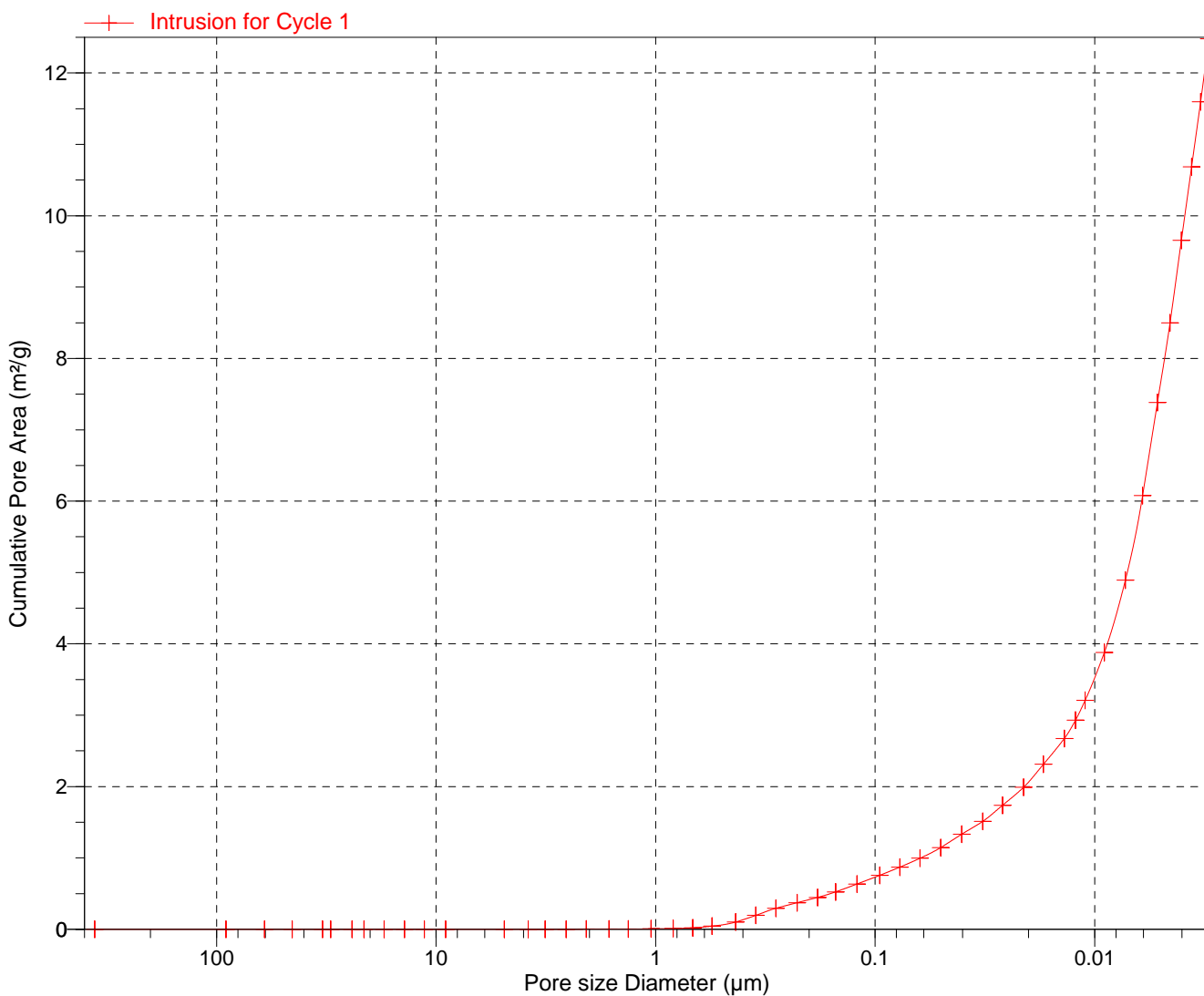


Sample ID: D2  
Operator: Enrique Glez  
Submitter: Jorge Pasan  
File: C:\9500\DATA\BONSAI\000-330.SMP

LP Analysis Time: 03/02/2017 18:58:23  
HP Analysis Time: 06/02/2017 9:17:58  
Report Time: 06/02/2017 9:17:57

Sample Weight: 2.3071 g  
Correction Type: Blank  
Show Neg. Int: No

**Cumulative Pore Area vs Pore size**



➤ **Anexo IV. Datos de laboratorio, densidad absoluta mediante picnómetro de helio.**

AccuPyc 1330 V2.04N  
 Numero de Serie: 0  
 Reporte de Densidad y Volumen

ID Muestra: 1 AA  
 Peso Muestra: 2.4008 g  
 Temperatura: 22.0 C  
 Numero de Purgas: 5  
 Volumen Celda: 5.9027 cm3  
 Chamber Insert: 3.5 cm3

Comenzado: 26/01/17 16:54:29  
 Completado: 26/01/17 17:10:34

Velocidad de Equil: 0.0050 psig/min  
 Volumen Expansion: 9.2882 cm3  
 Calibration Factor: 0.999713

Proc#	Volumen cm3	Desviacion cm3	Densidad g/cm3	Desviacion g/cm3	Duracion (h:m:s)
1	0.9795	-0.0015	2.4510	0.0038	0:06:20
2	0.9804	-0.0007	2.4488	0.0016	0:08:54
3	0.9805	-0.0006	2.4485	0.0014	0:11:24
4	0.9822	0.0012	2.4442	-0.0030	0:13:40
5	0.9826	0.0016	2.4432	-0.0039	0:15:57

Volumen Promedio: 0.9811 cm3  
 Densidad Promedio: 2.4471 g/cm3

Desviacion Standard: 0.0013 cm3  
 Desviacion Standard: 0.0033 g/cm3

AccuPyc 1330 V2.04N  
 Numero de Serie: 0  
 Reporte de Densidad y Volumen

ID Muestra: 2 A2  
 Peso Muestra: 2.5181 g  
 Temperatura: 22.5 C  
 Numero de Purgas: 5  
 Volumen Celda: 5.9027 cm3  
 Chamber Insert: 3.5 cm3

Comenzado: 26/01/17 17:19:42  
 Completado: 26/01/17 17:35:13

Velocidad de Equil: 0.0050 psig/min  
 Volumen Expansion: 9.2882 cm3  
 Calibration Factor: 0.999713

Proc#	Volumen cm3	Desviacion cm3	Densidad g/cm3	Desviacion g/cm3	Duracion (h:m:s)
1	1.0324	-0.0007	2.4390	0.0016	0:06:34
2	1.0335	0.0004	2.4365	-0.0009	0:08:40
3	1.0332	0.0001	2.4371	-0.0003	0:10:52
4	1.0333	0.0002	2.4369	-0.0006	0:13:05
5	1.0330	-0.0001	2.4377	0.0002	0:15:22

Volumen Promedio: 1.0331 cm3  
 Densidad Promedio: 2.4375 g/cm3

Desviacion Standard: 0.0004 cm3  
 Desviacion Standard: 0.0010 g/cm3

AccuPyc 1330 V2.04N  
 Numero de Serie: 0  
 Reporte de Densidad y Volumen

ID Muestra: 3 BA  
 Peso Muestra: 2.4967 g  
 Temperatura: 22.9 C  
 Numero de Purgas: 5  
 Volumen Celda: 5.9027 cm3  
 Chamber Insert: 3.5 cm3

Comenzado: 26/01/17 17:40:49  
 Completado: 26/01/17 17:56:36  
 Velocidad de Equil: 0.0050 psig/min  
 Volumen Expansion: 9.2882 cm3  
 Calibration Factor: 0.999713

Proc#	Volumen cm3	Desviacion cm3	Densidad g/cm3	Desviacion g/cm3	Duracion (h:m:s)
1	1.0889	-0.0000	2.2928	0.0000	0:06:17
2	1.0889	-0.0001	2.2929	0.0002	0:08:40
3	1.0894	0.0004	2.2919	-0.0009	0:10:50
4	1.0885	-0.0005	2.2937	0.0010	0:13:13
5	1.0891	0.0001	2.2925	-0.0003	0:15:39

Volumen Promedio: 1.0890 cm3  
 Densidad Promedio: 2.2928 g/cm3

Desviacion Standard: 0.0003 cm3  
 Desviacion Standard: 0.0007 g/cm3

AccuPyc 1330 V2.04N  
 Numero de Serie: 0  
 Reporte de Densidad y Volumen

ID Muestra: 4 32  
 Peso Muestra: 2.5151 g  
 Temperatura: 23.6 C  
 Numero de Purgas: 5  
 Volumen Celda: 5.9027 cm3  
 Chamber Insert: 3.5 cm3

Comenzado: 26/01/17 18:17:07  
 Completado: 26/01/17 18:33:29  
 Velocidad de Equil: 0.0050 psig/min  
 Volumen Expansion: 9.2882 cm3  
 Calibration Factor: 0.999713

Proc#	Volumen cm3	Desviacion cm3	Densidad g/cm3	Desviacion g/cm3	Duracion (h:m:s)
1	1.0975	-0.0004	2.2916	0.0008	0:06:11
2	1.0977	-0.0003	2.2913	0.0005	0:08:50
3	1.0981	0.0001	2.2905	-0.0002	0:11:18
4	1.0982	0.0002	2.2903	-0.0005	0:13:46
5	1.0982	0.0003	2.2901	-0.0006	0:16:14

Volumen Promedio: 1.0979 cm3  
 Densidad Promedio: 2.2907 g/cm3

Desviacion Standard: 0.0003 cm3  
 Desviacion Standard: 0.0006 g/cm3



AccuPyc 1330 V2.04N  
 Numero de Serie: 0  
 Reporte de Densidad y Volumen

ID Muestra: 5 CA  
 Peso Muestra: 2.4346 g  
 Temperatura: 20.6 C  
 Numero de Purgas: 5  
 Volumen Celda: 5.9027 cm3  
 Chamber Insert: 3.5 cm3

Comenzado: 27/01/17 10:43:10  
 Completado: 27/01/17 10:58:48

Velocidad de Equil: 0.0050 psig/min  
 Volumen Expansion: 9.2882 cm3  
 Calibration Factor: 0.999713

Proc#	Volumen cm3	Desviacion cm3	Densidad g/cm3	Desviacion g/cm3	Duracion (h:m:s)
1	0.9913	-0.0011	2.4559	0.0026	0:06:23
2	0.9922	-0.0002	2.4537	0.0005	0:08:44
3	0.9927	0.0003	2.4525	-0.0008	0:11:00
4	0.9928	0.0004	2.4523	-0.0010	0:13:16
5	0.9929	0.0005	2.4519	-0.0014	0:15:30

Volumen Promedio: 0.9924 cm3  
 Densidad Promedio: 2.4533 g/cm3

Desviacion Standard: 0.0007 cm3  
 Desviacion Standard: 0.0016 g/cm3

AccuPyc 1330 V2.04N  
 Numero de Serie: 0  
 Reporte de Densidad y Volumen

ID Muestra: 6 C<sub>2</sub>  
 Peso Muestra: 2.3324 g  
 Temperatura: 21.0 C  
 Numero de Purgas: 5  
 Volumen Celda: 5.9027 cm<sup>3</sup>  
 Chamber Insert: 3.5 cm<sup>3</sup>

Comenzado: 27/01/17 11:09:32  
 Completado: 27/01/17 11:25:01  
 Velocidad de Equil: 0.0050 psig/min  
 Volumen Expansion: 9.2882 cm<sup>3</sup>  
 Calibration Factor: 0.999713

Proc#	Volumen cm <sup>3</sup>	Desviacion cm <sup>3</sup>	Densidad g/cm <sup>3</sup>	Desviacion g/cm <sup>3</sup>	Duracion (h:m:s)
1	0.9565	-0.0006	2.4385	0.0016	0:06:18
2	0.9571	-0.0000	2.4369	0.0001	0:08:34
3	0.9570	-0.0001	2.4371	0.0003	0:10:56
4	0.9575	0.0003	2.4360	-0.0009	0:13:07
5	0.9576	0.0004	2.4357	-0.0011	0:15:21

Volumen Promedio: 0.9571 cm<sup>3</sup>  
 Densidad Promedio: 2.4368 g/cm<sup>3</sup>

Desviacion Standard: 0.0004 cm<sup>3</sup>  
 Desviacion Standard: 0.0011 g/cm<sup>3</sup>

AccuPyc 1330 V2.04N  
 Numero de Serie: 0  
 Reporte de Densidad y Volumen

ID Muestra: 7  
 Peso Muestra: 2.1999 g  
 Temperatura: 21.4 C  
 Numero de Purgas: 5  
 Volumen Celda: 5.9027 cm3  
 Chamber Insert: 3.5 cm3

Comenzado: 27/01/17 11:27:23  
 Completado: 27/01/17 11:42:55  
 Velocidad de Equil: 0.0050 psig/min  
 Volumen Expansion: 9.2882 cm3  
 Calibration Factor: 0.999713

Proc#	Volumen cm3	Desviacion cm3	Densidad g/cm3	Desviacion g/cm3	Duracion (h:m:s)
1	0.9523	0.0001	2.3100	-0.0002	0:06:07
2	0.9517	-0.0005	2.3115	0.0013	0:08:36
3	0.9521	-0.0002	2.3107	0.0005	0:10:54
4	0.9525	0.0002	2.3097	-0.0005	0:13:07
5	0.9527	0.0005	2.3091	-0.0011	0:15:23

Volumen Promedio: 0.9523 cm3  
 Densidad Promedio: 2.3102 g/cm3

Desviacion Standard: 0.0004 cm3  
 Desviacion Standard: 0.0009 g/cm3

AccuPyc 1330 V2.04N  
 Numero de Serie: 0  
 Reporte de Densidad y Volumen

ID Muestra: 8 <sup>02</sup>  
 Peso Muestra: 2.3071 g  
 Temperatura: 23.6 C  
 Numero de Purgas: 5  
 Volumen Celda: 5.9027 cm3  
 Chamber Insert: 3.5 cm3

Comenzado: 27/01/17 13:44:37  
 Completado: 27/01/17 14:01:08

Velocidad de Equil: 0.0050 psig/min  
 Volumen Expansion: 9.2882 cm3  
 Calibration Factor: 0.999713

Proc#	Volumen cm3	Desviacion cm3	Densidad g/cm3	Desviacion g/cm3	Duracion (h:m:s)
1	0.9766	-0.0007	2.3623	0.0017	0:06:46
2	0.9774	0.0001	2.3604	-0.0003	0:09:09
3	0.9777	0.0004	2.3598	-0.0009	0:11:23
4	0.9777	0.0003	2.3598	-0.0008	0:13:40
5	0.9772	-0.0001	2.3610	0.0003	0:16:23

Volumen Promedio: 0.9773 cm3  
 Densidad Promedio: 2.3606 g/cm3

Desviacion Standard: 0.0004 cm3  
 Desviacion Standard: 0.0011 g/cm3