

Caracterización del EPS Geofom mediante
ensayos de compresión simple y edométrico para
su empleo en terraplenes sobre suelos blandos.

Alumno: SERGIO ELPIDIO SANTOS MARTÍNEZ

Director: GONZALO GARCÍA ROS



Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos a mi director principal, profesor Gonzalo García, por la confianza, dedicación y paciencia brindada durante el desarrollo del presente trabajo. También, al profesor Iván Alhama y a María E. Martínez por las atenciones ofrecidas.

Gracias a todo el personal de la universidad. Iniciando con los de seguridad, por abrirme las puertas del laboratorio los días no lectivos, y terminando con el excelente profesorado, quienes han ayudado durante mi formación.

A mis familiares, en especial a mi abuela, a mi madre y mi tía, por confiar y contar con su ayuda a pesar de la distancia. Muchísimas gracias.

También quiero agradecerle a mi novia y compañera, Doris A. Jiménez P., por su comprensión y por regalarme lo más valioso que tiene una persona: su tiempo.

Por último, a mis compañeros y a aquellas personas que se han sentido parte de este proyecto.

Gracias de corazón.



Índice

1	Introducción	9
1.1.	Resumen	9
1.2.	Objetivos y alcance	10
2	Fundamentos teóricos	11
2.1.	Material EPS	11
2.1.1.	Historia	11
2.1.2.	Procesos de fabricación	12
2.1.3.	Características del material	15
2.1.3.1.	Densidad	15
2.1.3.2.	Resistencia mecánica	15
2.1.3.3.	Esfuerzo de compresión y curva esfuerzo-deformación	16
2.1.3.4.	Resistencia a compresión – A corto plazo	17
2.1.3.5.	Resistencia a la compresión – Resistencia permanente	17
2.1.3.6.	Resistencia a la compresión – Bajo carga cíclica	18
2.1.3.7.	Módulo de elasticidad	18
2.1.3.8.	Comportamiento a fluencia	19
2.1.3.9.	Contracción transversal	20
2.1.3.10.	Flexión	21
2.1.3.11.	Aislamiento térmico	21
2.1.3.12.	Estabilidad dimensional	21
2.1.3.13.	Estabilidad frente a la temperatura	22
2.1.3.14.	Comportamiento frente al agua y vapor de agua	22
2.1.3.15.	Comportamiento frente a factores atmosféricos	22
2.1.4.	Ámbito de aplicación	24
2.1.4.1.	Aplicaciones en geotecnia	24
2.1.4.2.	Construcción en carreteras	25
2.1.4.3.	Construcción de puentes	28
2.1.4.4.	Construcción de estructuras de ferrocarril	32
2.1.4.5.	Estabilización de pendientes o taludes	33
2.1.4.6.	Alcantarillas y tuberías	35
2.2.	Fundamentos teóricos	36

2.3.	Normativa	39
3	Ensayos de laboratorio	40
3.1.	Equipos utilizados	40
3.1.1.	Edómetro.....	40
3.1.2.	Transductor potenciométrico	41
3.1.3.	Cyber-Plus Evolution	42
3.1.4.	Máquina multiensayo (para compresión simple)	43
3.2.	Ensayos en edómetros.....	44
3.2.1.	Realización de muestras.....	44
3.2.2.	Metodología	45
3.3.	Ensayos a compresión simple	50
3.3.1.	Realización de muestras.....	50
3.3.2.	Metodología	51
4	Pruebas de laboratorio	58
4.1.	Resultado de los ensayos en edómetros	58
4.1.1.	Pruebas de corta duración	58
4.1.1.1.	Ensayos EPS de 20 kg/m ³ a 12.5 kPa (12 hr)	58
4.1.1.2.	Ensayo EPS de 20 kg/m ³ a 25 kPa (24 hr)	61
4.1.1.3.	Ensayo EPS de 20 kg/m ³ a 50 kPa (24 hr)	63
4.1.1.4.	Ensayo EPS de 20 kg/m ³ a 100 kPa (12 hr)	65
4.1.1.5.	Resumen	67
4.1.2.	Pruebas de larga duración y con ciclos de carga	68
4.1.2.1.	Ensayo EPS de 20 kg/m ³ a 50 kPa: carga, descarga y recarga.....	68
4.1.2.2.	EPS de 20 kg/m ³ y 40 kg/m ³ a 25 kPa cíclica	70
4.1.2.3.	EPS de 20 kg/m ³ a carga y descarga de: 25 kPa, 50 kPa y 100 kPa	72
4.1.2.4.	EPS de 20 kg/m ³ a 25 kPa: muestra de referencia vs muestra nueva.....	74
4.1.2.5.	EPS de 20 kg/m ³ a 50 kPa: muestra de referencia vs muestra nueva.....	75
4.1.2.6.	EPS de 20 kg/m ³ a 100 kPa: muestra de referencia vs muestra nueva....	77
4.1.2.7.	Resumen	78
4.2.	Resultados de ensayos a compresión simple	79
4.2.1.	Coeficiente de Poisson en EPS de 20 kg/m ³	79
4.2.2.	Coeficiente de Poisson en EPS de 40 kg/m ³	86

4.2.3.	Módulo de Young en EPS de 20 kg/m ³	94
4.2.4.	Módulo de Young en EPS de 40 kg/m ³	99
4.2.5.	Resumen.....	104
5	Aplicaciones	108
5.1.	Caso 1: arcilla blanda	111
5.2.	Caso 2: EPS de 20 kg/m ³	115
5.3.	Caso 3: EPS de 40 kg/m ³	119
5.4.	Resumen	121
6	Conclusiones	124
7	Referencias	126



1 Introducción

1.1. Resumen

El poliestireno expandido o EPS, del inglés Expandable Polystyrene, es un material plástico que se deriva del estireno. En España se le conoce coloquialmente como poliespán o corcho blanco, mientras que, en República Dominicana, como foam o hielo seco. A lo largo de este trabajo se utilizará indistintamente geofom o EPS para hacer alusión a este material.

Este es un material sumamente ligero que, por sus propiedades, se ha utilizado en diversas aplicaciones. Ha sido empleado como material de envase en el campo de la alimentación y de embalaje para la industria de consumo general; también, en el campo deportivo, utilizándose como material de protección en cascos, en tablas de surf y en salvavidas; y, por último, en el sector de la construcción, principalmente como aislante térmico o acústico, como material de aligeramiento, y como una opción a tener en cuenta en terrenos donde se produzcan asentamientos.

La primera aplicación de EPS para controlar asentamientos se llevó a cabo en Oslo, Noruega, en 1972, para la construcción del Puente Flom (Alfheim et al., 2011). A partir de aquí, se empezó a utilizar en el mismo ámbito en distintas partes del mundo, mayormente en Japón, Estados Unidos y en varios países de la Unión Europea.

En el presente trabajo de investigación se busca analizar el comportamiento del EPS mediante ensayos edométricos y de compresión simple para su empleo en terraplenes sobre suelos blandos.

Las muestras de EPS ensayadas tendrán una densidad de 20 kg/m^3 . En casos puntuales, ciertos ensayos serán comparados con muestras de 40 kg/m^3 . En los ensayos edométricos, las tensiones verticales aplicadas serán de 12.5 kPa, 25 kPa, 50 kPa y 100 kPa. Algunas muestras serán sometidas a un esfuerzo de compresión bajo una única tensión determinada, pudiendo aplicarle un ciclo de carga y descarga. Otras muestras serán sometidas a escalones de cargas y descargas.

Para la realización y medición de estas pruebas se utilizaron varios equipos de medición que serán detallados más adelante. También, se empleó el software Plaxis para la modelización de un problema de construcción de una carretera sobre una arcilla blanda.

1.2. Objetivos y alcance

A partir de la realización de ensayos de laboratorio edométricos y a compresión simple, y tras su análisis, el objetivo fundamental de este trabajo es caracterizar el comportamiento del EPS, en cuanto a:

- Módulo de elasticidad o de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν) de acuerdo con el rango de tensiones al que está sometido.
- Resistencia a la compresión, para unos valores límite de deformación unitaria de acuerdo a normativa existente (europea o americana), en los ensayos de compresión simple.
- Estudio de viabilidad en el empleo en diversos contextos geotécnicos:
 - Modelización con Plaxis de un problema de un terraplén de carretera sobre un suelo blando.
 - Aumento del FS por disminución de la carga en servicio en terrenos blandos.
 - Deformación del terraplén de EPS de acuerdo a datos de laboratorio, deformación por peso propio.

2 Fundamentos teóricos

2.1. Material EPS

2.1.1. Historia

El poliestireno expandido fue fruto del azar y nace de las innovaciones científicas y tecnológicas del siglo XX. Fue descubierto a principios de 1950 por el Dr. Fritz Stastny (Figura 1), en los laboratorios de la Badische Anilin Und Soda Fabrik (BASF) en Ludwigshafen, Alemania, bajo el nombre de Styropor. (ANAPE)



Figura 1. Dr. Fritz Stastny (4 de marzo de 1908 – 25 de mayo de 1985) (Suedmaehren, 2019)

Fue utilizado como aislante en una construcción dentro de la misma fábrica donde fue descubierto. 45 años más tarde, frente a escribanos y técnicos de distintos institutos europeos, se levantó parte de ese material y se lo sometió a todas las pruebas y verificaciones posibles. La conclusión fue que el material después de utilizarse durante 45 años mantenía todas y cada una de sus propiedades intactas. (Textos Científicos, 2005)

La primera patente fue presentada el 28 de febrero de 1950, a nombre de BASF, cuyos inventores son el Dr. Fritz Stastny y el jefe de su departamento, el Dr. Rudolf Gath. A partir de esta patente se empiezan a desarrollar aplicaciones en las que este nuevo material pueda ser útil, aprovechándose en los campos del aislamiento térmico, embalaje, conservación y transporte de alimentos, y aplicaciones diversas en el campo de la construcción en las que puedan producirse asentamientos y pérdida de estabilidad. Por tanto, algunas áreas de aplicación muy adecuadas para el EPS son:

- Construcción y/o reparación de carreteras libres de asentamientos
- Construcción en estribos para puentes y estructuras de ferrocarril
- Estabilización de pendientes o taludes
- Reducción de carga mediante relleno para proteger alcantarillas
- Reducción de cargas laterales

2.1.2. Procesos de fabricación

En la actualidad, existen tres procesos patentados de fabricación. Dos de ellos parten del poliestireno expansible bajo forma de gránulos. Estos son, por orden cronológico, los siguientes:

- **Proceso BASF**

Es el proceso alemán, caracterizado por una doble expansión continua. Los productos se presentan bajo forma de gránulos expandidos soldados entre sí. La fabricación se efectúa en tres etapas: preexpansión, maduración y moldeado. (Rougeron, 1977)

- Preexpansión

En esta fase, la materia prima se calienta en unas instalaciones especiales denominadas preexpansores, con vapor de agua a temperatura situadas entre 80 y 110 °C. Los preexpansores pueden ser continuos o discontinuos. En los continuos, se alimentan de materia prima y vapor de agua de forma ininterrumpida, y los discontinuos, son cerrados y con dosificación definida de materia prima (Consejería de Economía y Hacienda [CEH], 2012). Bajo el efecto del calor, los gránulos se expanden, alcanzando un volumen cuarenta veces superior al volumen inicial (Figura 2). (Rougeron, 2012)

En función de la temperatura y del tiempo de exposición, la densidad aparente del material disminuye de unos 630 kg/m³ a densidades que oscilan entre los 10 - 30 kg/m³. (ANAPE)



Figura 2. Materia prima antes y después de la Etapa de Preexpansión (ANAPE)

- Maduración

También denominado reposo intermedio y estabilización. A la salida del aparato de expansión, los gránulos se deshinchaban como consecuencia del enfriamiento. La estabilización o maduración tiene por finalidad devolver al gránulo expandido el volumen obtenido en el transcurso de la expansión.

Esta fase se desarrolla durante el reposo intermedio del material preexpandido en silos ventilados. Durante el reposo intermedio se desarrollan simultáneamente varios procesos:

- a) Se difunde aire al interior de las celdillas a través de sus membranas consiguiendo la estabilidad mecánica de las partículas.
- b) Se emite humedad a la atmósfera mejorándose el transporte de las perlas y el llenado de moldes complicados.
- c) Se elimina por difusión el exceso de agente de expansión reduciéndolo a las cantidades estrictamente necesarias para la siguiente etapa.

- Moldeado

En esta etapa las perlas preexpandidas y estabilizadas se transportan a unos moldes donde nuevamente se les comunica vapor de agua, y las perlas, a través de una nueva expansión se sueldan entre sí, formándose una estructura poliédrica.

De esta forma se pueden obtener grandes bloques, que no pueden ser desmoldeados hasta que se haya producido un enfriamiento suficiente que no origine deformaciones. (CEH, 2012)

La Figura 3 resume las tres etapas anteriormente citadas.

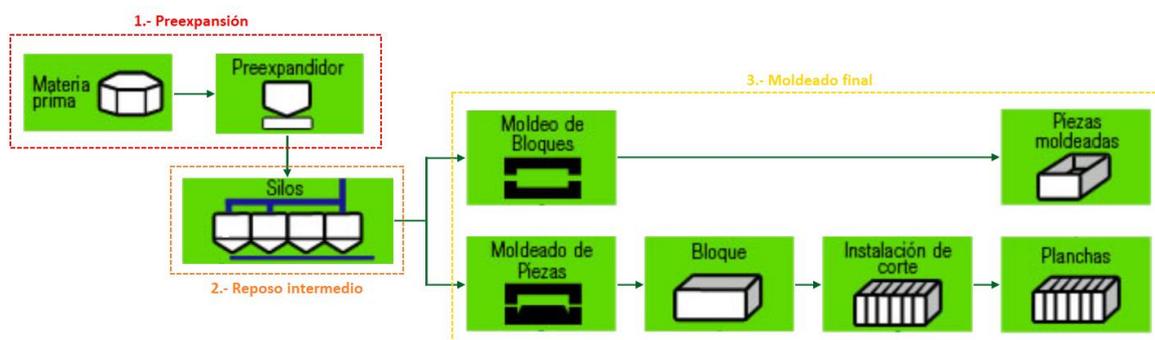


Figura 3. Esquema de transformación del EPS (ANAPE)

- **Proceso de Saint-Gobain**

Es el proceso francés. Caracterizado por la posibilidad de soldadura de los gránulos expandidos en continuo.

Este proceso coincide con las dos primeras etapas del anterior. A continuación, se procede a una superexpansión y a una nueva maduración. La soldadura de las perlas se efectúa en continuo bajo la acción conjugada del aire caliente y de la presión ejercida por dos planchas metálicas que determinan el espesor del producto. De esta forma, se pueden obtener placas de perlas soldadas con un espesor de 20 a 100 mm. El ancho útil depende de la máquina utilizada. La longitud no está limitada y varía con la demanda.

La soldadura por aire caliente tiene la ventaja de dar productos secos que no necesitan estabilización alguna antes de cortarlos.

Las densidades de los productos pueden variar de 8 a 30 kg/m³.

- **Proceso Dow Chemical Company**

Es el proceso americano y es totalmente diferente a los dos anteriores. Los productos son elaborados por extrusión en presencia de un agente porógeno, y la fabricación se efectúa en continuo. La densidad mínima obtenida es de 30 kg/m³. (Rougeron, 2012)

2.1.3. Características del material

2.1.3.1. Densidad

La densidad del geofom puede considerarse el índice principal en la mayoría de sus propiedades. Los productos de EPS se caracterizan por su extrema ligereza. Para aplicaciones de obras civiles, las densidades se sitúan entre los 10 kg/m³ hasta los 40 kg/m³ (0.01 kN/m³ y 0.40 kN/m³). Para otras aplicaciones como el aislamiento, las densidades más altas son más eficientes. (Van Dorp, 1988)

En la antigua norma que regía los productos de EPS, la densidad era el factor clave que definía los diferentes tipos de materiales existentes. O sea, una densidad determinada ya definía el resto de propiedades de ese material de una manera fija. No obstante, los nuevos desarrollos en el campo de las materias primas han permitido obtener diferentes propiedades del producto (absorción de agua, resistencia mecánica, drenaje) con distintas densidades. Este tipo de producto quedaría fuera de la antigua normativa, pero la nueva norma UNE-EN 13163 de 2009 ha resuelto este problema eliminando la densidad como una propiedad que defina a los productos de poliestireno expandido. (Dávila, 2013)

Algunos países tienen una clasificación del tipo de EPS en función de su densidad. La Tabla 1 menciona algunos de estos países:

España		Estados Unidos		Japón		Reino Unido	
Tipo	Densidad (kg/m ³)	Tipo	Densidad (kg/m ³)	Tipo	Densidad (kg/m ³)	Tipo	Densidad (kg/m ³)
I	10	XI	12	D-12	12	SD	12
II	12	I	15	D-16	16	HD	16
III	15	VIII	18	D-20	20	EHD	20
IV	20	II	22	D-25	25	UHD	25
V	25	IX	29	D-30	30		
VI	30						
VII	35						
UNE-EN 1602		ASTM C 578-95		(Miki, G., 1996)		(Sanders, 1996)	

Tabla 1. Clasificación del EPS en algunos países (Elragi, 2006)

2.1.3.2. Resistencia mecánica

El EPS soporta cargas mecánicas gracias a su configuración en forma de celdas, permitiendo la construcción de estructuras que presentan una elevada resistencia vertical y horizontal. Esta se evalúa generalmente a través de las siguientes propiedades (ver Tabla 2):

- Resistencia a la compresión para una deformación del 10 %
- Resistencia a la flexión
- Resistencia a la tracción
- Resistencia a la cizalladura o esfuerzo cortante
- Fluencia a compresión

Densidad (g/cm³)	15	25	40	50
Resistencia a la tracción (kPa)	200	350	600	750
Resistencia a la flexión (kPa)	200	400	700	900
Resistencia a la compresión para una deformación del 10 % (kPa)	90	180	320	400

Tabla 2. Propiedades físicas del EPS en función de la densidad. (Barnetson, 2004)

2.1.3.3. Esfuerzo de compresión y curva esfuerzo-deformación

La Figura 4 muestra la curva tensión-deformación del esfuerzo a compresión uniaxial del EPS para dos densidades diferentes. Las muestras corresponden a cubos de 0.05 m de aristas, analizados a una tasa de desplazamiento de 0.005 m/min. Desde la figura, la curva esfuerzo-deformación puede simplificarse como la división en dos líneas rectas principales conectadas con una parte curva (BASF Corp., 1968, citado por Elragi, 2006). Se dibujó una línea recta intermitente para comprobar la simplificación anterior.

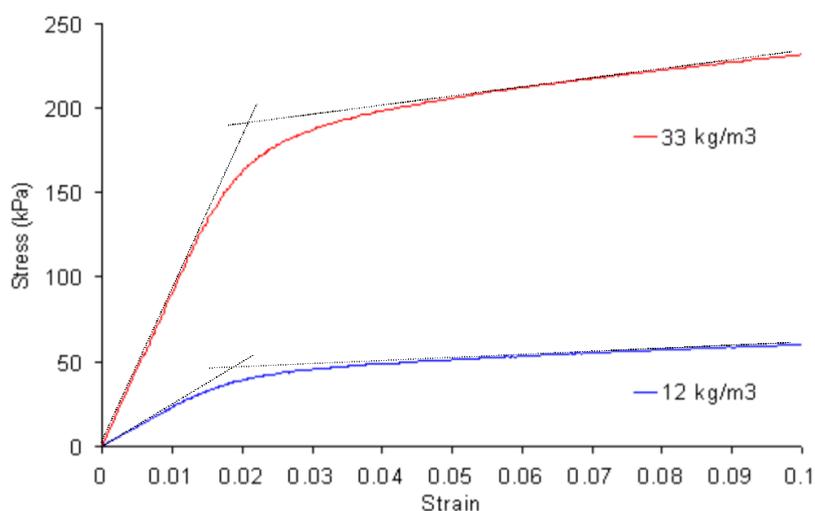


Figura 4. Curva tensión-deformación a compresión uniaxial del EPS (Negussey y Elragi, 2000, citado por Elragi, 2006)

Sun (1997) informó que, el EPS bajo compresión confinada, al aumentar el esfuerzo de confinamiento, la fuerza y el módulo tangencial inicial disminuyen. Concluyó estos resultados basándose en las curvas de tensión-deformación del desviador axial. (Elragi, 2006)

2.1.3.4. Resistencia a compresión – A corto plazo

La curva de tensión-deformación del EPS tiene una forma especial (Figura 5). El límite elástico lineal (o límite de proporcionalidad) se encuentra para un valor de la deformación entre el 1 y el 1.5%, si la prueba para determinar la resistencia a la compresión se realiza de acuerdo con la norma UNE-EN 826. (ANAPE)

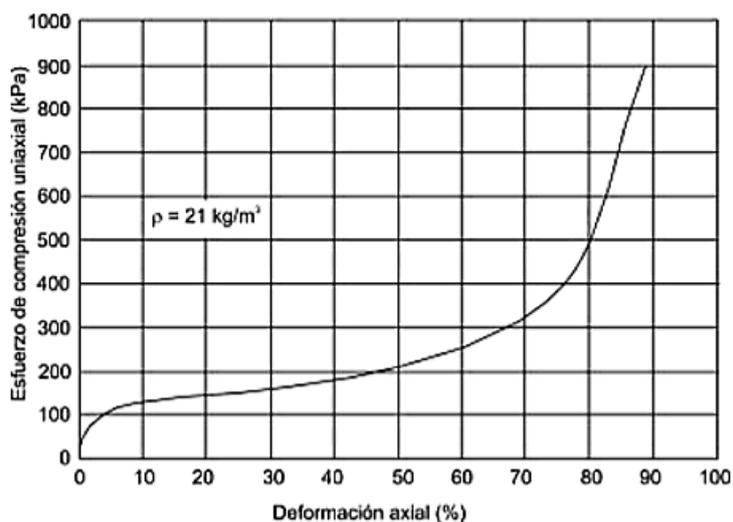


Figura 5. Curva esfuerzo-deformación bajo carga rápida (Horvath, 2010)

Para nombrar los productos de EPS hay que tener en cuenta el valor declarado de resistencia a la compresión, en kPa, a una deformación fijada arbitrariamente en el 10 %. En otras palabras, es el esfuerzo que produce una deformación del 10 % en una muestra ensayada. Por ejemplo, un EPS denominado EPS 100 tiene una resistencia a compresión al 10 % de deformación de 100 kPa. Para calcular la resistencia a la compresión a corto plazo $\sigma_{10;d}$ hay que tener en cuenta un factor del material. Este factor (γ_m) es 1.25. Por lo tanto, para el EPS100, $\sigma_{10;d} = 100/1.25 = 80$ kPa. (Tepper, 2012)

2.1.3.5. Resistencia a la compresión – Resistencia permanente

Se espera que después de 50 años el EPS tenga una deformación por fluencia de compresión del 2 % o menos cuando se somete a un esfuerzo de compresión permanente menor de $0.30 \cdot \sigma_{10}$.

Por lo tanto, el valor declarado de la resistencia a la compresión permanente es $\sigma_{10;perm} = 0.30 \cdot \sigma_{10}$. De nuevo, hay que tener en cuenta un factor del material, $\gamma_m = 1.25$. Por ejemplo, para calcular el valor de diseño de la resistencia a la compresión permanente, $\sigma_{10;perm;d}$, para el EPS100, es: $\sigma_{10;perm;d} = 0.30 \cdot (100/1.25) = 24$ kPa. (Tepper, 2012)

2.1.3.6. Resistencia a la compresión – Bajo carga cíclica

El EPS puede experimentar una carga cíclica en una serie de condiciones, especialmente cuando la estructura involucrada está destinada al tránsito vehicular, que es una carga dinámica.

Existen evidencias de que, si los esfuerzos aplicados al EPS están dentro del rango elástico, el comportamiento en carga cíclica se mantiene también dentro del mismo rango, no evidenciándose deformaciones por fatiga. Esto es cuando la deformación no alcance el 1 % (N. Pérez, Garnica, A. Pérez, Juárez y Castro, 2016). Elragi (2016) citó un reporte de Flate (1987) en el cual informó que las pruebas de carga cíclica indican que el EPS soportará un número ilimitado de ciclos de carga, siempre y cuando el nivel de carga se mantenga por debajo del 80 % de la resistencia a compresión.

Ahora bien, la Asociación Europea de Poliestireno Expandido (EUMEPS) considera que, para estar en el rango elástico, la deformación debe de ser menor al 0.4 %. Según uno de sus consultores, Hans Tepper (2012), con una carga permanente relativamente ligera ($< 15 \text{ kN/m}^2$) y si la deformación bajo una carga cíclica se mantiene por debajo de 0.4 %, la deformación será elástica y no se producirá deformación permanente. Traducido en esfuerzos, el valor máximo de seguridad debido a carga cíclica es $0.35 \cdot \sigma_{10}$. Por tanto, la resistencia a la compresión declarada bajo carga cíclica es $\sigma_{10;\text{cycl};d} = 0.35 \cdot \sigma_{10}$.

Siguiendo con las ejemplificaciones del EPS100, su resistencia a la compresión declarada bajo carga cíclica es: $\sigma_{10;\text{cycl};d} = 0.35 \cdot 100 = 35 \text{ kPa}$. Y si fuera para el cálculo del valor de diseño: $\sigma_{10;\text{cycl};d} = 35/1.25 = 28 \text{ kPa}$.

2.1.3.7. Módulo de elasticidad

La curva tensión-deformación del EPS tiene una porción lineal inicial. El valor de la pendiente de este tramo inicial se define como el módulo tangente inicial. También se conoce como módulo de Young o módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad del EPS es una función de la densidad como se muestra en la Figura 6. Aquí, varios autores proponen un valor específico para una densidad dada. Por ejemplo, para una densidad de 12 kg/m^3 , el módulo tangente inicial está entre 2 MPa y 3.85 MPa, lo cual representa un 92.5 % de diferencia. Algo también a destacar es que, para algunos investigadores, la relación es lineal (Horvath, 1995 y Miki, 1996); para otros, no (Duskov, 1997 y Eriksson & Trank, 1991).

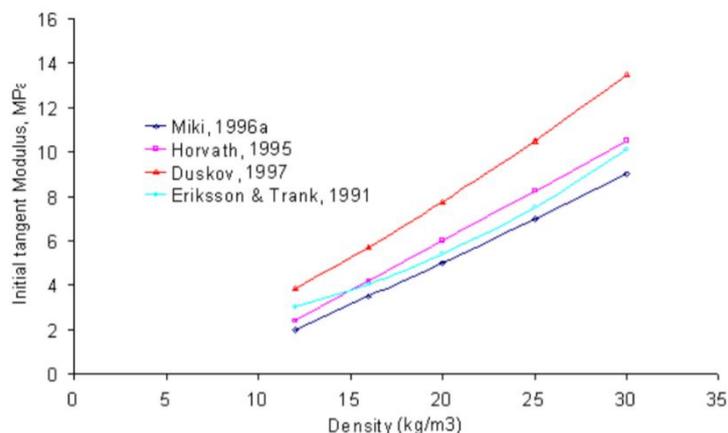


Figura 6. Módulo tangente inicial del geofoam (Elragi, 2006)

Duskov (1997) después de probar muestras de EPS con densidades de 20 kg/m^3 , informó que las bajas temperaturas, el nivel de absorción de agua y la exposición a los ciclos de congelación y descongelación, por separado o combinados, no parecen tener una influencia negativa en el comportamiento mecánico del geofoam que había probado.

2.1.3.8. Comportamiento a fluencia

El comportamiento a fluencia de un material se refiere a un proceso de deformación dependiente del tiempo¹¹. Si el EPS es sometido a una carga constante durante mucho tiempo, acumula una deformación permanente debido a que la estructura celular empieza a deformarse plásticamente. Este mecanismo hace que la resistencia a compresión se reduzca y gradualmente conduce a un rápido incremento en la deformación permanente (Awol, 2012, citado por Pérez et al., 2016). Estas deformaciones de fluencia disminuyen cuando el material presenta mayor densidad. (Sun, 1997)

La Figura 7 refleja el comportamiento de una muestra de EPS cuya densidad es de 23.5 kg/m^3 en el rango de bajas deformaciones.

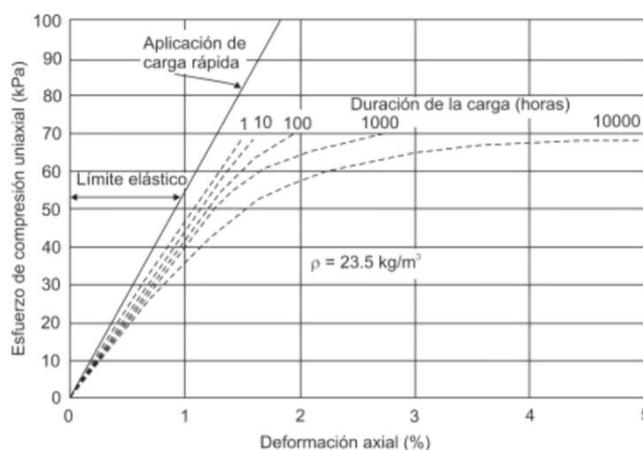


Figura 7. Comportamiento esfuerzo-deformación en pruebas de creep (Pérez et al., 2016)

Krollmann, auxiliándose de la ecuación de Findley, propuso en 1989 una forma para determinar y calcular el efecto a largo plazo de la fluencia de compresión en los materiales de aislamiento térmico, durante un periodo de 667 días. Como era necesario una predicción mayor para aplicaciones de ingeniería civil, el instituto de ensayos sueco SP propuso otra ecuación de extrapolación para la fluencia a largo plazo basada en el método lin-log de Struik.

Al haber dos formas para calcular el efecto de la fluencia a largo plazo, el Comité Europeo de Normalización (CEN, por sus siglas en inglés) concluyó que la ecuación de Struik ofrece buenos resultados para períodos más largos, mientras que en la de Findley, los resultados son conservadores.

Esto se debe a dos efectos. El primero es que, los ensayos se realizan con pequeñas muestras mientras que, en las construcciones se usan grandes bloques o planchas. El segundo se debe a la rigidización a la cual es sometido el EPS durante la exposición prolongada de cargas.

La Norma Europea EN 1606 incorpora estos resultados con el conocimiento de que la conducta de fluencia del EPS corresponde al método de extrapolación de Struik. La norma EN 14933 posee un anexo informativo con una declaración específica que ayuda a ahorrar a los fabricantes una cantidad considerable de costes asociados por ensayos extra.

2.1.3.9. Contracción transversal

El coeficiente de Poisson del EPS es pequeño y en algunos países su valor se desprecia. Sin embargo, Elragi (2006) citó un artículo de Sanders (1996), el cual recoge varios autores estableciendo un único valor o intervalo del coeficiente de Poisson para los tipos de EPS del Reino Unido (Tabla 3). Pudiendo estar dicho rango de valores entre 0.05 a 0.5.

Referencia	Yamanaka, et al. (1991)	Momoi y Kokusyo (1996)	Negussey y Sun (1996)	Ooe, et al. (1996)	Sanders (1996)	Duskov et al. (1998)	GeoTech (1999a)
Coef. de Poisson	0.075	0.5	0.09 – 0.33	0.08	0.05 – 0.2	0.1	0.05

Tabla 3. Coeficiente de Poisson en función del autor (Sanders, 1996, citado por Elragi, 2006)

Ninguno de los autores anteriormente mencionados especifica el coeficiente de Poisson en función con la densidad del EPS. Tampoco, establecen un valor o pequeño intervalo para un rango de deformación.

En todos, el valor o rango es positivo. No se considera la posibilidad de ser un material augético, o sea, con coeficiente de Poisson negativo. No obstante, D. Negusse y M. Jahanandish (1993) explican que, para cargas posteriores a la elasticidad del material, el esfuerzo lateral disminuye, como sucedería en un material con coeficiente de Poisson negativo.

2.1.3.10. Flexión

Las pruebas de resistencia a la flexión son ampliamente utilizadas como pruebas de control de calidad en las fábricas donde se produce el geofom. La tensión máxima se calcula suponiendo que el material es elástico lineal hasta el fallo. Aunque esta suposición no es precisa, los valores calculados son ampliamente utilizados en el control de calidad.

2.1.3.11. Aislamiento térmico

El EPS presenta un gran aislamiento térmico frente a bajas o altas temperaturas (frío o calor). Esta capacidad se debe a la estructura en sí del material, que consta de microscópicas burbujas de aire que cubren el 98 % de todo el volumen, dentro de una estructura celular conformada por el restante 2 % de materia sólida de poliestireno. (Barnetson, 2004)

La conductividad térmica del EPS es mayor a muy bajas densidades (10 – 15 kg/m³) y disminuye con un aumento en ésta, de modo que se produce un rendimiento térmico óptimo en el rango de 30 a 50 kg/m³. Después de eso, la conductividad térmica comienza a aumentar nuevamente, como puede observarse en la Tabla 4.

Densidad (g/cm³)	10	20	40	50	50
Conductividad térmica (W/mK)	0.043	0.035	0.033	0.033	0.034

Tabla 4. Propiedades térmicas del EPS en función de la densidad. (Barnetson, 2004)

2.1.3.12. Estabilidad dimensional

Al igual que otros materiales, los productos de EPS también están influenciados por las acciones térmicas, por lo que, sus dimensiones pueden sufrir leves cambios debido a variaciones en la temperatura. Estas variaciones se evalúan a través del coeficiente de dilatación térmica que, para los productos de EPS, es independiente de la densidad y se sitúa en valores que oscilan en el intervalo $5-7 \cdot 10^{-5} \cdot K^{-1}$, es decir entre 0.05 y 0.07 mm por metro de longitud y Kelvin.

2.1.3.13. Estabilidad frente a la temperatura

La temperatura no solo afecta a este material en cambios dimensionales, sino que puede sufrir variaciones o alteraciones internas por efecto de la misma.

El rango de temperaturas en el que este material puede utilizarse con total seguridad sin que sus propiedades se vean afectadas no tiene limitación alguna por el extremo inferior (excepto las variaciones dimensionales por contracción). Con respecto al extremo superior, el límite de temperaturas de uso se sitúa alrededor de los 100 °C para acciones de corta duración, y alrededor de los 80 °C para acciones continuadas y con el material sometido a una presión de 20 kPa. (ANAPE)

2.1.3.14. Comportamiento frente al agua y vapor de agua

El EPS no absorbe la humedad del medio circundante, por lo tanto, no es un material higroscópico. Incluso sumergiendo el material completamente en agua, los niveles de absorción son mínimos, con valores oscilando entre el 1 % y el 3 % en volumen (ensayo de inmersión después de 28 días) (Tabla 5).

Nivel de acuerdo a EN 13163	Contenido práctico de agua W_p vol %	
	Drenado	No drenado
WL(T)5	≤ 2.5	≤ 5.0
WL(T)3	≤ 1.5	≤ 3.0
WL(T)2	≤ 1.0	≤ 2.0
WL(T)1	≤ 0.5	≤ 1.0

Tabla 5. Absorción de agua. (UMPESP, 2003, citado por Dávila, 2013)

2.1.3.15. Comportamiento frente a factores atmosféricos

El único factor que reviste de importancia al EPS es la radiación ultravioleta. Bajo acción prolongada de luz UV, la superficie se vuelve frágil y se amarillenta, de manera que la lluvia y el viento logran erosionarla. Dichos efectos pueden evitarse con medidas sencillas, por ejemplo, utilizando pinturas o revestimientos; pero en obras de geotecnia este aspecto no presenta inconveniente alguno.

La Asociación Nacional de Poliestireno Expandido ha elaborado la siguiente tabla (6), que resume las principales propiedades en función del EPS y la norma aplicable.

Tabla resumen propiedades físicas			
Propiedades	Valores margen de oscilación (entre tipo I – VII)	Unidad	Norma UNE
Densidad nominal	10 – 35	kg/m ³	EN-1602
Densidad mínima	9 – 31.5	kg/m ³	
Espesor mínimo	50 – 20	mm	
Tensión por compresión con deformación del 10 % (σ_{10})	30 – 250	kPa	EN-826
Resistencia permanente a la compresión con una deformación del 2 %	15 – 70	kPa	EN-826
Resistencia a la flexión (σ_B)	50 – 375	kPa	EN-12089
Resistencia al cizallamiento	25 – 184	kPa	EN-12090
Resistencia a la tracción	< 100 – 580	kPa	EN-1607 EN-1608
Módulo de elasticidad	< 1.5 – 10.8	MPa	
Indeformabilidad al calor instantánea	100	°C	
Indeformabilidad al calor duradera con 20,000 N/m ²	80	°C	
Conductividad térmica λ (10 °C)	46 – 33	mW/(mK)	EN-826
Coefficiente de dilatación térmica lineal	5 – 7	$\cdot 10^{-5} K^{-1}$	
Capacidad térmica específica	1,210	J/(kgK)	
Clase de reacción al fuego	M1 o M4	-	
Absorción de agua en condiciones de inmersión al cabo de 7 días	0.5 – 1.5	% (vol.)	EN-12087
Absorción de agua en condiciones de inmersión al cabo de 28 días	1 – 3	% (vol.)	EN-12087
Índice de resistencia a la difusión de vapor de agua	< 20 – 120	-	92226

Tabla 6. Principales propiedades físicas del EPS (ANAPE)

2.1.4. Ámbito de aplicación

2.1.4.1. Aplicaciones en geotecnia

El uso del geofom en aplicaciones de geotecnia tiene una historia que se remonta a la década de 1960, cuando el Laboratorio Noruego de Investigación de Carreteras (NRRL), y más tarde Japón, comenzaron a incorporar geosintéticos como aislantes de carreteras y material de relleno liviano.

El primer empleo del EPS fue para controlar los asentamientos en el proyecto Flom Brigde en Oslo, Noruega, en 1972. Al mismo tiempo sirvió para evitar que se congele el subsuelo eliminando así los problemas subsiguientes de deshielo.

Según Alfheim et al. (2011) entre 1972 y 1988 se realizaron en Noruega un total de 100 proyectos con bloques de EPS. El mayor número de proyectos se realizó en el 1985 con un total de 16, y el año en que se utilizó el mayor volumen de geofom fue en 1987, con un aproximado de 27,000 m³.

Entre 1985 y 1987, Japón utilizó más de 1,300,000 m³ de geofom en unos 2,000 proyectos. Y según Aabøe et al. (2018) desde 1985 hasta 2015 se utilizó en el país nipón 73,000,000 m³ en bloques de EPS, de los cuales el 80.9 % fue utilizado en carreteras.

En Estados Unidos se empezó a utilizar en el 1989 para un relleno de terraplén para la Carretera 160 entre Durango y Mancos Hills, en Colorado.

Este material puede ser utilizado en una gran variedad de aplicaciones. Ofrece ventajas especiales para la construcción en terrenos blandos, estabilidad de taludes y muros de contención. Éste se ha utilizado en carreteras, sistemas de vías férreas, tanques de almacenamientos y en tuberías para evitar la congelación, entre otras aplicaciones. Entre estas, tenemos:

2.1.4.2. Construcción en carreteras

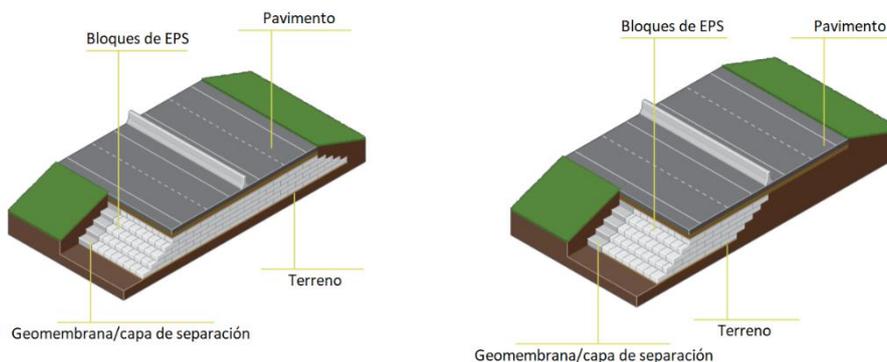


Figura 8. Representación de bloques de EPS en una carretera (EPS Industry Alliance, 2012)

La creciente necesidad de nuevos caminos puede, en muchos casos, requerir de la construcción sobre suelos blandos que son incapaces de soportar cargas adicionales. En estos casos, el EPS se puede usar para reemplazar los materiales de relleno pesados y la necesidad de su compactación.

La construcción con geofom también ahorra tiempo porque es fácil de manejar sin la necesidad de equipos especiales. Debido a que este es un producto regido por normas, ya ha sido sometido a numerosas pruebas y controles de calidad, a diferencia de otros materiales de relleno que requieren de estas pruebas en función del lugar de donde se utilice el préstamo.

A menudo, las carreteras tienen que ser ampliadas para reducir la congestión. Este proceso también requiere de un relleno adicional, puede ser costoso y requerir mucho tiempo si los suelos adyacentes a la calzada existente no son adecuados para soportar las cargas de tráfico porque el asentamiento resultante puede impactar a la carretera en servicio. En estos casos, la utilización del geofom minimiza el impacto sobre la estructura y sus instalaciones (Figura 9).



Figura 9. Ampliación de una carretera con bloques de EPS (Obras Urbanas, 2012)

Al ampliar o construir carreteras en pendientes laterales pronunciadas, los bloques de geofoam con terminación lateral vertical pueden ser una solución favorable. En las laderas, particularmente cuando se trata de rellenos altos, la necesidad de un anclaje adecuado debe analizarse por separado (Figura 10). El anclaje debe proporcionar apoyo para las fuerzas horizontales ocasionadas por la presión del terreno en la estructura y para los vehículos que golpean las barandillas de protección. (Aabøe et al., 2018)

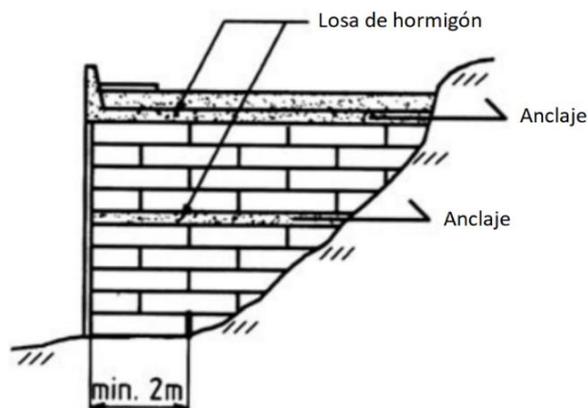


Figura 10. Corte transversal de terraplén en pendiente (Aabøe et al., 2018)

En resumen, el uso de EPS geofoam elimina la necesidad de pruebas de compactación y relleno, reduce el tiempo de construcción y minimiza el impacto en la carretera existente y en las estructuras próximas y/o servicios públicos enterrados. La resistencia a la compresión del EPS lo hace capaz de soportar las cargas de tráfico sin ocasionar sobrecargas sobre el terreno inferior o los rellenos adyacentes.

Ejemplos de aplicación en carreteras:

➤ Estambul, Turquía

La primera vez que se utilizaron bloques de geofoam para aplicaciones viales en Turquía fue en 2017 en Acibadem, Estambul.

El volumen utilizado en comparación con otros países fue mínimo, aproximadamente 720 m³.

Detalles del proyecto:

Se seleccionó el EPS para construir el terraplén de la calzada en un lugar donde se ubican dos tuberías de agua de 2.20 m de diámetro, cuya distancia debajo era de 3.8 a 5.6 m por debajo de la base del terraplén.

Los bloques de geofom no solo evitaron el costo de la reubicación de esta infraestructura en un entorno urbano muy complejo, sino que también evitaron posibles daños estructurales a la red eléctrica. Además, el servicio de agua no se interrumpió durante la construcción.

La construcción con los bloques de geofom se muestra en la Figura 11.



Figura 11. Vista aérea de la construcción en Estambul, Turquía (Tolga y Akinay, 2018)

➤ Interestatal 15

Es la cuarta autopista interestatal transcontinental más larga en los Estados Unidos, cuya longitud es de 2,307 km.

En Ciudad del Lago Salado, Utah, se utilizaron 100,000 m³ de geofom como relleno de terraplén y protección de servicios públicos en la reconstrucción de un tramo de la Carretera I-15.

Detalles del proyecto:

En verano de 1998, el contratista y la firma de ingeniería, Wasatch Constructors, requirieron de un material que minimizara los asentamientos esperados al contemplarse un relleno convencional. A su vez, los servicios públicos debajo de la carretera debían permanecer en servicio durante la construcción.

Según Steve Bartlett, había áreas donde al utilizarse el relleno convencional, el asentamiento esperado estaría entre 50 a 100 cm. Por lo tanto, los servicios públicos externos o soterrados requerirían un reemplazo o reubicación costoso.

Como resultado, se colocó geofom EPS19 como material de relleno (Figura 12), disminuyendo el asentamiento diferencial a unos pocos centímetros, permitiendo así

que las empresas de servicios públicos permanecieran en su lugar, sin interrupción, reemplazo o reubicación. (ACHfoam, 2009)



Figura 12. Utilización de bloques de EPS durante la reconstrucción de la Interestatal 15 (Aabøe, 2011)

2.1.4.3. Construcción de puentes

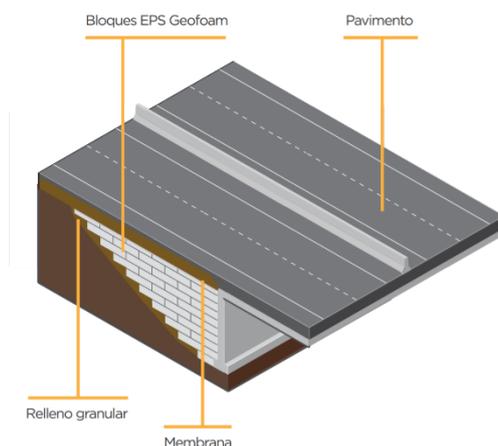


Figura 13. Representación de bloques de EPS en construcción de puentes (EPS Industry Alliance, 2012)

Su utilización como relleno en este tipo de construcciones ayuda a soportar las sobrecargas de tráfico sin afectar al terreno, lo que implica menores movimientos diferenciales entre la losa de aproximación y el tablero del puente, reduciendo así los costes y su mantenimiento a largo plazo.

Además, en comparación con los rellenos de terraplén tradicionales, el geofoam imparte fuerzas laterales significativamente menores en los estribos y muros del puente, cimientos y otras estructuras de retención, debido a que la fuerza lateral transmitida es proporcional al peso del relleno.

Para reducir las cargas laterales en estructuras de retención, los bloques de EPS se instalan de manera que reemplacen la cuña deslizante del suelo por encima del ángulo de reposo (Figura 14).

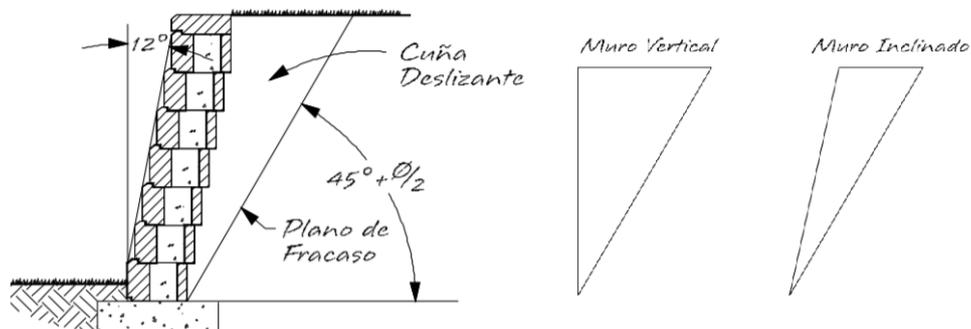


Figura 14. Comparación de la cuna deslizante (Allanblock, 2008)



Figura 15. Terraplén de geofoam en el estribo del puente Almark (Damtew et al., 2011)

Algunos puentes en los cuales se ha utilizado el geofoam:

➤ Puente Hjelmungen

El Puente Hjelmungen es de tres vanos continuos con una longitud de 54 m localizado en Noruega. Fue construido en 1992 y dos años más tarde, se hizo evidente que la capacidad de carga del suelo debajo de los estribos se había excedido, ya que se produjeron asentamientos excesivos y los estribos infligieron daños al tablero del puente. Se inició el monitoreo de la deformación y pronto quedó claro que debían iniciarse medidas de reparación inmediatas. (Aabøe, 2011)

Detalles del proyecto:

La composición del suelo era principalmente de arcilla, con un espesor que varía entre 11 y 14 m. Un alto asentamiento, casi 600 mm, se registró en el terraplén de aproximación que condujo a una reparación inmediata de la base del puente.

La reparación se inició en 1995 y se terminó en 1996. El pilar y el relleno del terraplén de aproximación se excavaron y reemplazaron por bloques de geofoam. El estribo original donde se apoyaba el puente, fue modificado y lo convirtieron en una silla cargadera que se dejó reposar directamente en un terraplén relleno de EPS (Figura 16). (Valestad et al., 2018)

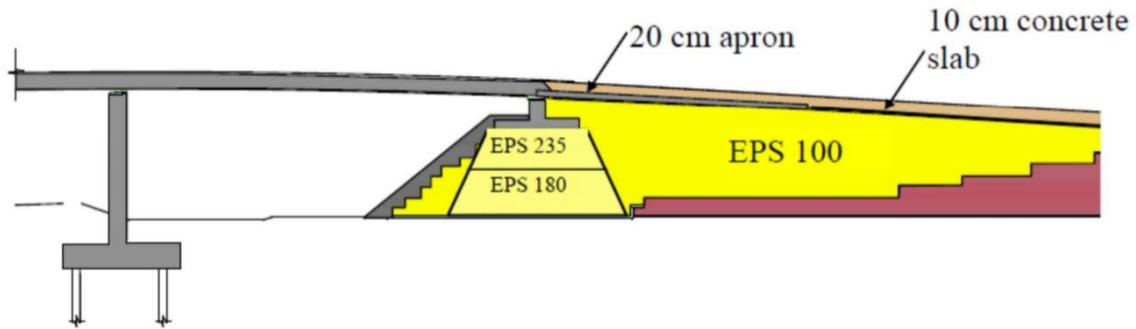


Figura 16. Silla cargadera directamente sobre bloques de EPS (Aabøe, 2011)

Como se observa en la figura anterior, se utilizaron tres tipos diferentes de EPS. La zona superior que donde se apoya la silla cargadera, está compuesta por tres capas con una resistencia de $\sigma = 235$ kPa, para las primeras tres capas de bloques debajo de la losa inferior del pilar; más abajo, EPS180, y EPS100 para el resto del relleno.

Con el fin de monitorear el comportamiento del puente reconstruido, se han instalado medidores de tensión y de asentamiento. Los diferentes tipos de medidores y sus ubicaciones en relación al estribo del puente se indican en la sección transversal en la Figura 17.

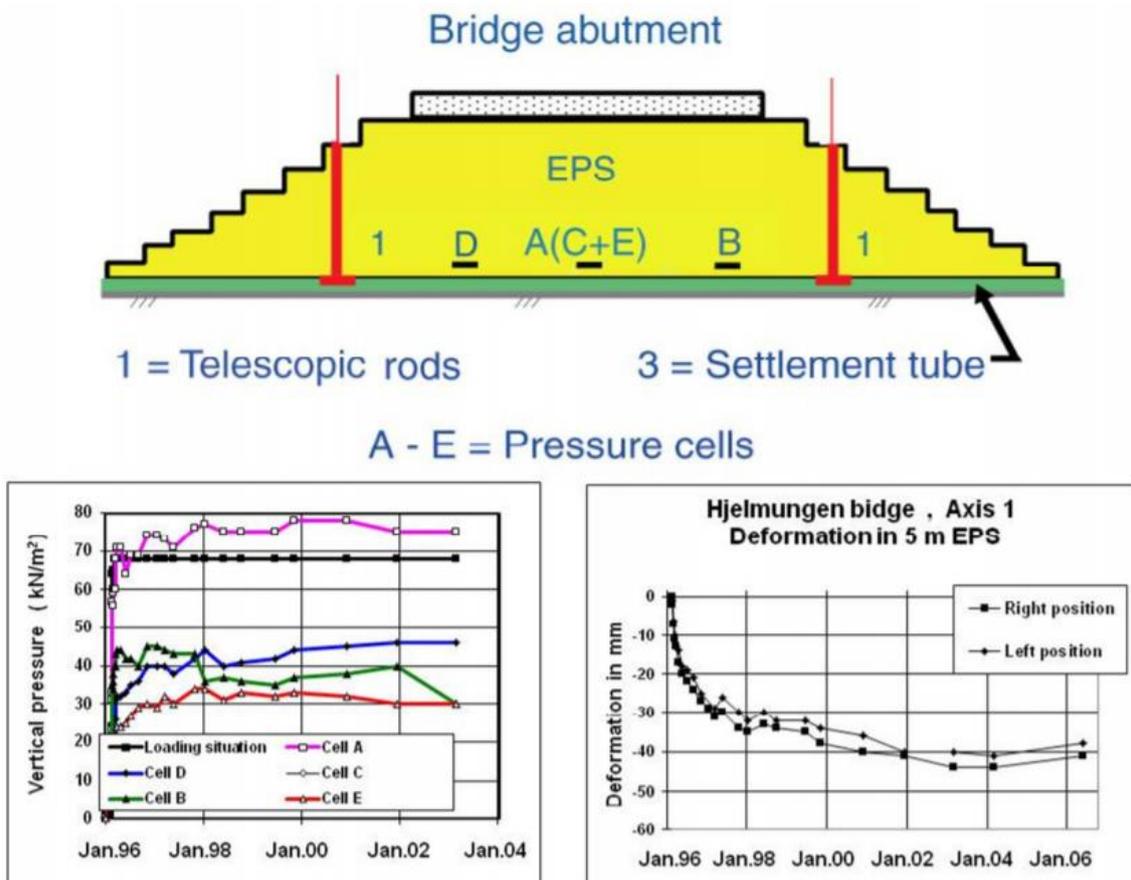


Figura 17. Medida de los esfuerzos y asentamientos en Hjelmungen (Aabøe, 2011)

Las tensiones observadas debajo del terraplén de EPS indican una mayor tensión debajo de la parte central del estribo que debajo de los bordes. Se registró una deformación de 4.5 cm que constituye aproximadamente el 0.9 % de la altura del terraplén.

A consecuencia de una ampliación, en la primavera de 2006, el puente Hjelmungen tuvo que ser nuevamente reconstruido. No hubo necesidad de cambiar los bloques de EPS, estos mostraron tener un buen desempeño y ciertamente fueron aceptables para su reutilización. El puente fue reconstruido con un nuevo estribo en el área de terraplén de EPS y se construyó una nueva base de EPS exactamente con el mismo concepto de diseño que en la reconstrucción de 1996 (Figura 18). (Aabøe, 2011)



Figura 18. Soportes temporales durante la reconstrucción del Hjelmungen (Aabøe, 2011)

➤ Puente York

Este proyecto se ubica cerca de un área recreativa muy transcurrida dentro de un entorno rural en Seattle. La obra inició en junio de 2005 y se completó en septiembre de 2006 a un costo de \$ 9.5 millones.

Detalles del proyecto:

Debido a que el puente sobre el Río Sammamish está rodeado de suelos arcillosos, la División de Servicios Viales del Condado de King necesitaba encontrar un relleno liviano para el camino de acceso en el lado oeste. Los estudios geotécnicos indicaron que el suelo estaba compuesto por arena suelta y grava, arcilla blanda y limo hasta una profundidad de 60 metros.

Los ingenieros en el proyecto recurrieron a los bloques de geofoam. Estos fueron colocados entre paneles de hormigón prefabricado (Figura 19). Sobre los bloques hay una losa de hormigón para distribuir las cargas debidas al tráfico. Encima de esta, una capa de material granular y luego, la carpeta asfáltica. El uso de esta técnica permitió incrementar el gálibo, mejorando la seguridad para quienes peatones y motoristas que transitan bajo el puente.

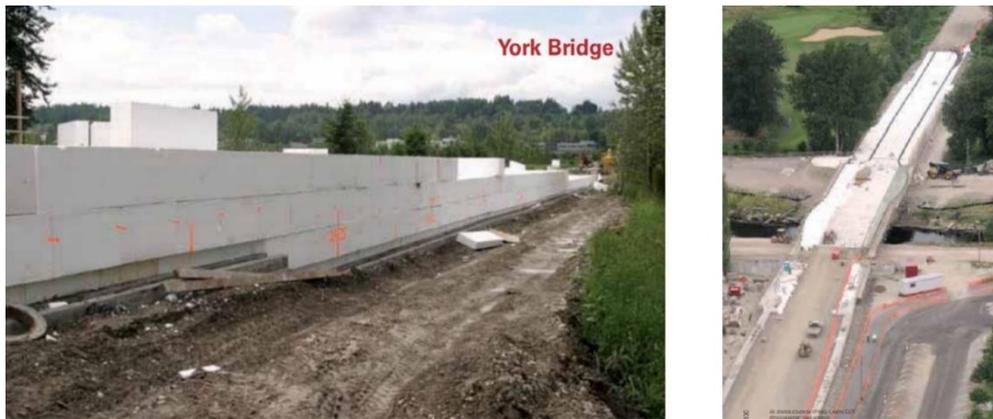


Figura 19. Utilización de bloques de EPS durante la construcción del York Bridge (Dusenberry y Bygness, 2006)

2.1.4.4. Construcción de estructuras de ferrocarril

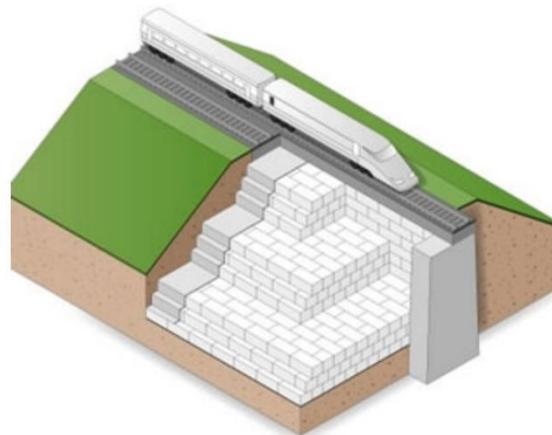


Figura 20. Típica representación de EPS para estructuras de ferrocarril (Tecnopor, 2019)

Como en los casos anteriores, también soporta las cargas ferroviarias sin afectar al terreno existente. Además, de controlar los asentamientos, la aplicación del geofoam en la construcción de ferrocarriles reduce las vibraciones que éstos generan. Esto se debe a que el poliestireno es un material que absorbe ondas; ya sean sonoras, térmicas, o vibratorias, como es en el caso del ferrocarril. (Tecnopor, 2019)

➤ Proyecto TRAX

Volvemos para Ciudad del Lago Salado, Utah, pero esta vez para el uso del geofoam en un terraplén para su implementación en ferrocarriles. La Autoridad de Tránsito de Utah (UTA, por sus siglas en inglés) utilizó geofoam para la expansión del sistema de tren ligero TRAX (Transit Express) de West Valley y el tren de cercanías Frontrunner.

Se utilizaron tres tipos de EPS: EPS 19, EPS 22 y EPS 39; y un volumen total de 53,500 m³ (Figura 21).

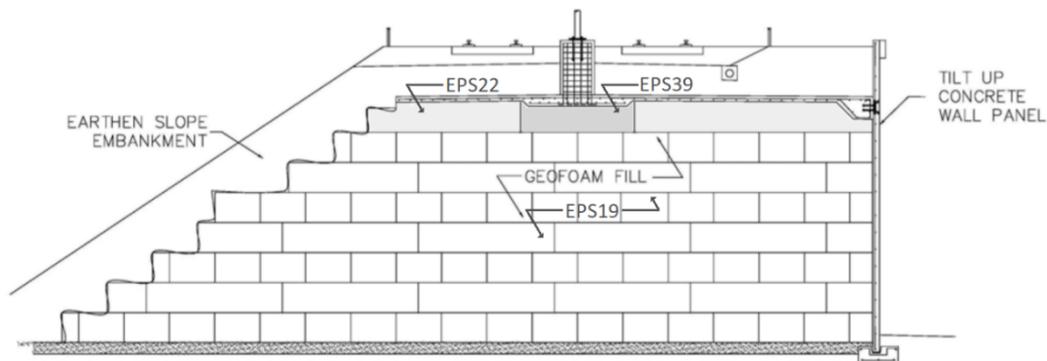


Figura 21. Terraplén de geofóam con densidades variables (Snow et al., 2010)

Detalles del proyecto:

El informe geotécnico estimó que los asentamientos en los suelos existentes podrían ser de hasta 1.50 m durante un periodo de tres años. Este periodo de tiempo no solo presentó un desafío significativo para el cronograma del proyecto, sino que también pudo haber tenido un gran impacto en los costos al extender la duración del contrato.

El terreno existente se excavó a una profundidad de unos 1.50 – 1.75 m, donde los bloques de geofóam se apilaron hasta la altura de diseño, que en algunos casos llegaba a 12 m. Debido a la eliminación de este terreno y al peso insignificante del EPS, este procedimiento produjo una carga neta cero en los suelos existentes debajo de las ubicaciones del terraplén y no indujo a ningún asentamiento significativo.

La configuración final tiene el mismo aspecto que cualquier terraplén típico, ya que el geofóam utilizado en el terraplén no es visible para el público. Este proyecto fue el segundo mayor proyecto de EPS en los Estados Unidos, después del de la Interestatal 15, y es la primera aplicación conocida de geofóam en tren ligero. (Snow, Webb y Sander, 2010)

2.1.4.5. Estabilización de pendientes o taludes

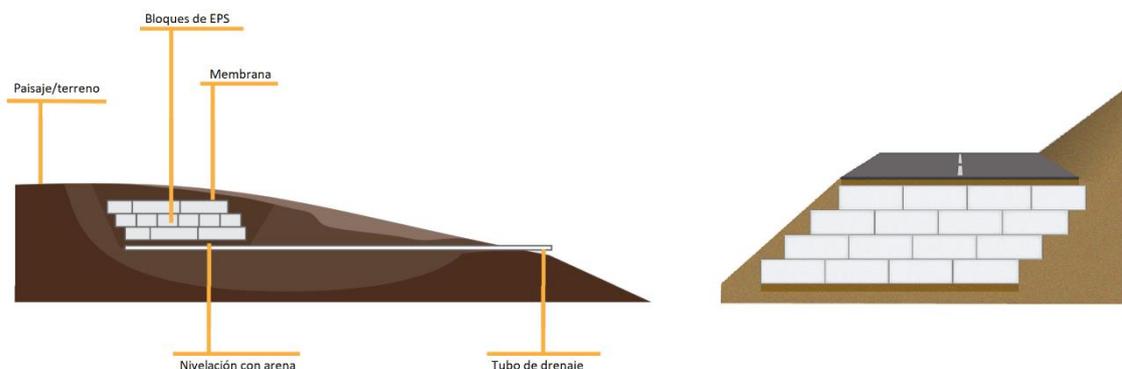


Figura 22. Representación de EPS para la estabilización de taludes (Enpolex, 2019)

La inestabilidad de un talud puede ser corregida removiendo una porción del suelo existente y remplazándolo con bloques de EPS, descargando así la cabeza o parte superior del deslizamiento y mejorando su estabilidad. Esto permite aumentar el factor de seguridad sin la necesidad de cambiar la geometría de la pendiente. Puede ser utilizado en pendientes con áridos o rocas, obteniendo el mismo resultado de estabilización.

➤ **Paso de Cameron**

Cameron Pass es un paso montañoso de 3,132 m de altura en las Montañas Rocosas en el centro norte de Colorado, Estados Unidos.

Para la estabilización de un talud en uno de estos pasos montañosos, se instalaron 6,100 m³ de geofam como relleno ligero para reparar el Paso de Cameron en la Carretera Estatal 14 en Colorado.

Detalles del proyecto:

En otoño de 2011, el Departamento de Transporte de Colorado se enfrentó a reparaciones de emergencia en el Paso de Cameron después de que la capa de una avalancha de nieve en una sección de 180 m de la ladera.

Para estabilizar la pendiente, se retiraron partes de la ladera y se reemplazaron con bloques de geofam, seguidos por una losa de distribución de concreto y la base de la carretera. En diciembre, las cuadrillas completaron el proyecto con la instalación de 40 cm de asfalto en la parte superior de la base de la carretera (Figura 23).



Figura 23. Etapas durante la estabilización del talud en el Paso de Cameron (ACHfoam, 2009)

Uno de los muchos beneficios del geofam es que no se ve afectado por condiciones climáticas adversas. Según Fred Duckels, contratista de Duckels Construction, "pudimos crear una superficie segura para todo clima durante el resto del invierno, mientras manteníamos el tráfico durante la instalación".

2.1.4.6. Alcantarillas y tuberías

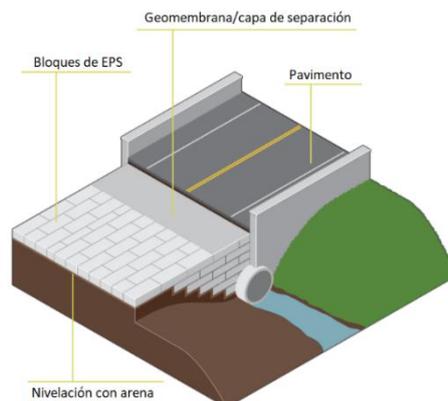


Figura 24. Representación de bloques de EPS en estructuras subterráneas (EPS Industry Alliance, 2012)

Los planes de ingeniería a menudo requieren la colocación de nuevo relleno sobre estructuras subterráneas existentes que no fueron diseñadas para soportar el aumento de cargas. En lugar de eliminar o reforzar las estructuras subterráneas existentes, la nueva carga de relleno se puede reducir a un nivel tolerable utilizando el gefoam.

➤ Proyecto Branson

Este proyecto se encuentra la ciudad del mismo nombre, que es una ciudad en el condado de Taney, Misuri, Estados Unidos.

Para llevarse a cabo se necesitó un total de 5,600 m³ en bloques de gefoam.

Detalles del proyecto:

Una alcantarilla existente estaba adyacente a una carretera de dos carriles que se construyó en la década de 1960. El camino necesitaba ser ampliado a cuatro carriles. Esto requería colocar los nuevos carriles sobre el área de la alcantarilla. Esta no fue diseñada para soportar las cargas asociadas con la nueva carretera.

En la Figura 25 se aprecia parte de la construcción y la finalización de este proyecto.



Figura 25. Etapas durante la construcción del proyecto Branson (ACHfoam, 2009)

2.2. Fundamentos teóricos

Módulo de elasticidad

En la Figura 26, hasta un cierto punto como A, la relación entre esfuerzo y deformación unitaria puede considerarse como lineal para todos los materiales. Esta relación se conoce como ley de Hooke y puede expresarse como:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Dicha relación significa que el esfuerzo (σ) es directamente proporcional a la deformación unitaria (ε), donde la constante de proporcionalidad es E (Popov, 2000). Llamada así en honor del matemático inglés Robert Hooke (1635 – 1703).

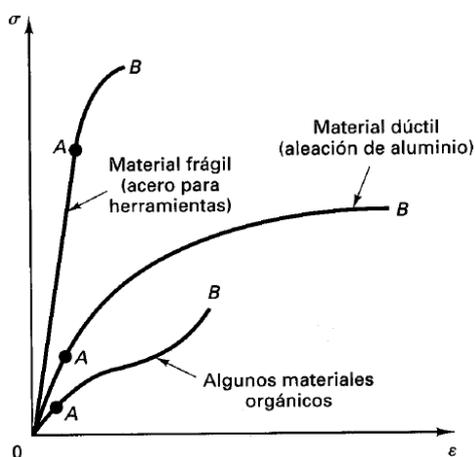


Figura 26. Diagramas esfuerzo-deformación para varios materiales (Popov, 2000)

La constante de proporcionalidad se denomina módulo de elasticidad o módulo de Young, en honor al científico inglés Thomas Young (1773 – 1829) (Beer, Russell y DeWolf, 2004). Gráficamente, es la razón entre el incremento del esfuerzo aplicado a un material y el cambio correspondiente a la deformación unitaria que experimenta, en la dirección de aplicación del esfuerzo.

Los diferentes valores que pueden determinarse a partir de una prueba incluyen el módulo tangente inicial y el módulo secante. Cada uno de estos valores se puede representar por la pendiente de la recta adecuada que se muestra en la Figura 27.

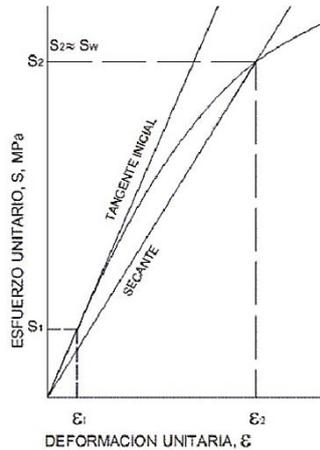


Figura 27. Módulo tangente y secante en la curva esfuerzo-deformación (Ingenierocivilinfo, 2011)

- **Módulo tangente:** su valor es variable en cada punto y viene medido por la inclinación de la tangente a la curva en dicho punto. Cuando se toma en el punto (0, 0) se denomina módulo tangente inicial o módulo inicial.
- **Módulo secante:** su valor es variable en cada punto y es medido por la inclinación de la recta que une el origen con dicho punto. (Ingenierocivilinfo, 2011). Los módulo tangente y secante son iguales hasta el límite de proporcionalidad.

Para poder modelizar el problema de construcción en Plaxis, se requiere del módulo secante correspondiente al 50 % de la tensión desviadora de rotura, denotado como E_{50} .

Coeficiente de Poisson

Cuando un cuerpo deformable está sometido a una fuerza axial de tensión, no solo se alarga, sino que también se contrae lateralmente. Igualmente, una fuerza de compresión que actúa sobre un cuerpo ocasiona que éste se contraiga en la dirección de la fuerza y que se expanda lateralmente. Estos dos casos se ilustran en la Figura 28. (Hibbeler, 1997)

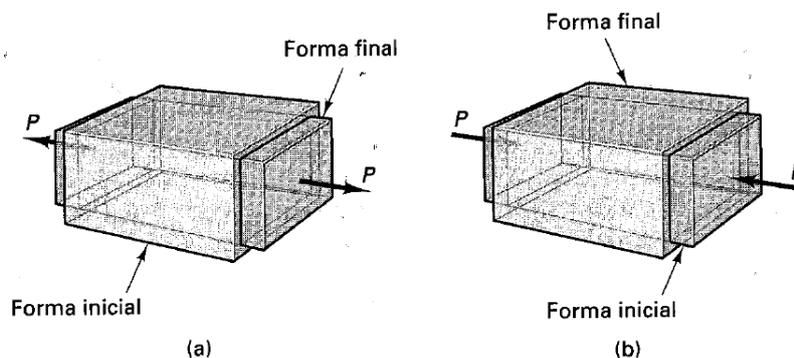


Figura 28. (a) Contracción lateral y (b) expansión lateral de cuerpos sólidos sometidos a fuerzas axiales (Popov, 2000)

Es preferible referirse a esas deformaciones laterales en términos de deformaciones por unidad de longitud de la dimensión transversal. Así entonces, las deformaciones laterales relativas pueden expresarse en m/m o in/in y son conocidas como deformaciones unitarias laterales.

Por experimentos se sabe que las deformaciones unitarias laterales mantienen una relación constante con las deformaciones unitarias axiales o longitudinales causadas por una fuerza axial, siempre que el material permanezca elástico y sea homogéneo e isotrópico (Popov, 2000). Esta relación adimensional se llama razón o coeficiente de Poisson en honor al matemático francés Siméon Denis Poisson (1781 – 1840). Se denota con la griega ν y se define como:

$$\nu = - \frac{\text{deformación unitaria lateral}}{\text{deformación unitaria axial}} = - \frac{\varepsilon'_l}{\varepsilon} = - \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_h}$$

El signo menos se usa para obtener un valor positivo, ya que, las deformaciones unitarias lateral y axial suelen tener signos opuestos (Gere, 2006). Por ejemplo, un alargamiento longitudinal (deformación unitaria positiva) ocasiona una contracción lateral (deformación unitaria negativa), y viceversa. (Hibbeler, 1997)

También existen algunos materiales poco comunes con coeficiente de Poisson negativo, conocidos como materiales auxéticos o auxéticos.

Modelo Hardening Soil

Es un modelo avanzado capaz de simular el comportamiento de varios tipos de suelo tanto cohesivos como granulares. Al igual que en el modelo Mohr-Coulomb, los estados límites de tensiones están en función del ángulo de rozamiento interno, la cohesión y el ángulo de dilatancia. No obstante, se describe la rigidez del suelo con mayor precisión a partir del uso de tres valores diferentes de rigidez, estos son (Tejedor, 2014):

- Rigidez triaxial de carga, E_{50}
- Rigidez triaxial de descarga-recarga, E_{ur}
- Rigidez tangente en cargas edométrica, E_{oed}

Como valores típicos promedios en varios suelos se tienen las siguientes relaciones orientativas entre E_{50} , E_{ur} y E_{oed} :

$$E_{50} \approx E_{oed} \quad E_{ur} \approx 3E_{50} \text{ o } 2E_{50}$$

2.3. Normativa

Hay diversas normativas que hacen referencia a las características del poliestireno expandido en función de su campo de aplicación. Estas normas especifican los rangos o valores a cumplir para los distintos productos e incluyen procedimientos para pruebas, como también de evaluación de conformidad, marcado y etiquetado, entre otros.

En enero de 2009 entró en vigor la norma armonizada europea UNE-EN 14933, titulada “Productos aislantes térmicos y de relleno ligero para aplicaciones en la ingeniería civil. Productos manufacturados de poliestireno expandido (EPS)”, que determinó la elaboración de la declaración de prestaciones del producto y el marcado CE. Esta aún en una única normativa varios parámetros y ensayos para el EPS como material de construcción.

Sin dejar de lado la UNE-EN 14933, los ensayos de compresión simple estarán basados en la norma UNE-EN 826 “Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación del comportamiento a compresión”.

Para los ensayos edométricos relativos al EPS no hay una norma específica, por lo que, dichos ensayos se han basado según la norma de suelos UNE 103-405-94, titulada “Ensayo de consolidación unidimensional de un suelo en edómetro”.

3 Ensayos de laboratorio

3.1. Equipos utilizados

3.1.1. Edómetro

Este es un equipo para ensayos a consolidación que posee un brazo palanca con una relación determinada y, mediante el empleo de placas de peso, induce un esfuerzo vertical sobre una muestra de suelo que se encuentra confinada en una recámara entre dos piedras porosas. La relación del brazo palanca de estos edómetros es de 9:1, 10:1 y 11:1; lo que quiere decir que la carga aplicada es proporcional a uno de estos valores.

El anillo edométrico impide que las muestras se deformen lateralmente e impone condiciones de compresión unidimensional. Las piedras porosas permiten la expulsión de agua de la muestra ensayada.

El Laboratorio de Geotecnia de la UPCT cuenta con dos edómetros (Figura 29). Para la realización de estas pruebas, se utilizaron los dos equipos simultáneamente con la relación de palanca de 10:1.

La lectura de esta deformación se realiza con un transductor potenciométrico y estos datos se registran en una máquina llamada Cyber-Plus Evolution.

Consta de las siguientes partes, que serán numeradas en la misma Figura 29:

- Palanca (1)
- Contrapeso (2)
- Yugo de carga (3)
- Célula edométrica (4)
- Transformador diferencial de variación lineal (5)
- Cargadero (6)
- Bancada (7)
- Pistón de carga (4)
- Anillo edométrico (4)
- Cuerpo lateral de cierre o collarín (4)
- Tornillos de fijación (4)
- Piedra porosa (4)
- Placas de peso (8)



Figura 29. Edómetros del laboratorio de geotecnia de la UPCT

3.1.2. Transductor potenciométrico

Es un dispositivo eléctrico que sirve para medir desplazamientos lineales (Figura 30). Este tiene una altísima precisión, mide hasta la milésima parte de un milímetro, o sea, una micra ($1 \mu\text{m}$). Su rango de desplazamiento es de 10 mm y el error relativo es de $\pm 0.25 \%$ de linealidad.



Figura 30. Transductor potenciométrico de 10 mm

3.1.3. Cyber-Plus Evolution

Es una máquina que se encarga de procesar datos en función del tiempo (Figura 31). Puede registrar desplazamientos, fuerzas y otras magnitudes. Simultáneamente, muestra en su pequeña pantalla táctil una gráfica de los datos que va registrando. Está formada por las siguientes partes:

- Pantalla táctil
- Cuatro teclas de desplazamiento y una de entrada
- Dos puertos USB
- Un puerto para tarjeta SD
- Puerto RJ-45
- Puerto VGA macho de 9 pines
- 8 canales de entrada
- Interruptor de encendido y apagado
- Entrada de corriente

Este aparato permite registrar varias mediciones al mismo, guardando las lecturas en un documento de texto (.txt). También, su software permite programar hasta cuatro ventanas para que cada cierto tiempo tome lecturas en un intervalo específico, y decidir cómo quieren que estos sean, si lineal (LIN), logarítmico (LOG) o radical (SQRROOT). La máxima lectura que puede registrar de forma continua es de 432,000 segundos, equivalentes a 5 días.



Figura 31. De izquierda a derecha: frontal, lateral y trasera del Cyber-Plus Evolution

Hay una versión portátil (Figura 32) de esta misma máquina que fue utilizada en el Laboratorio Experimental de Estructuras para medir la deformación perpendicular a la carga aplicada en la determinación del coeficiente de Poisson.

Esta cuenta con el mismo software, canales de entradas y puertos; por lo que, permite programar y registrar las mismas magnitudes que la anterior. La principal diferencia si se obvia su aspecto es que, al ser una versión móvil, posee una batería interna que puede ser cargada para utilizarse sin estar enchufado.



Figura 32. Cyber-Plus Evolution portátil

3.1.4. Máquina multiensayo (para compresión simple)

Como su nombre lo indica, es una máquina que se utiliza principalmente para ensayos a compresión, tracción y flexión; pudiéndose utilizar cualquier tipo de materiales: metales, plásticos, cauchos, textiles, entre otros.

El Laboratorio Experimental de Estructuras de la UPCT cuenta con una de estas máquinas electromecánica. La marca es Microtest y el modelo pertenece a la serie EM2. Como se aprecia en la Figura 33, la carga es aplicada mediante un sistema de doble husillo que, junto a las columnas de la máquina, proporcionan una alta rigidez al conjunto.



Figura 33. Máquina multiensayo Microtest EM2

La capacidad, tanto a tracción como a compresión, es de 100 kN y el rango de velocidad de desplazamiento varía entre 0.0005 mm/min a 1000 mm/min. El control y medida de los ensayos se efectúa con ordenador, utilizando el software SCM3000 de Microtest.

3.2. Ensayos en edómetros

3.2.1. Realización de muestras

El laboratorio de Geotecnia de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) tiene a su disposición dos grandes bloques de EPS geofam para la realización de cualquier prueba o experimento. La densidad de cada bloque es de 20 kg/m^3 y 40 kg/m^3 , respectivamente.

Los materiales utilizados para preparar las muestras, fueron los siguientes (Figura 34):

- Geofam
- Segueta
- Cúter
- Lija de mano
- Bolígrafo o marcador

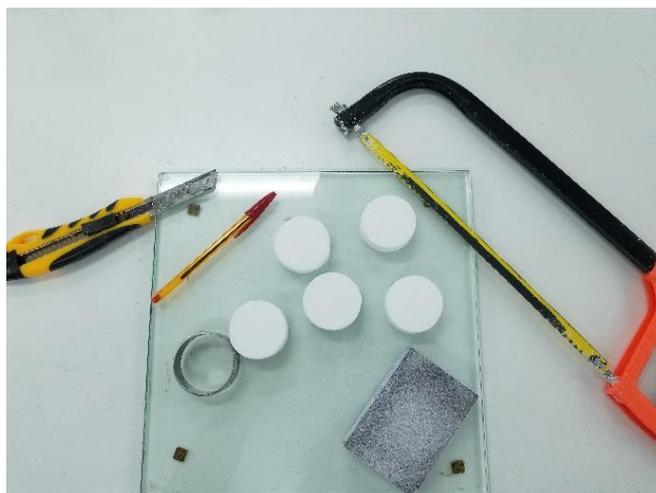


Figura 34. Materiales utilizados para la preparación de muestras

Los pasos llevados a cabo para que las muestras cilíndricas de EPS encajen perfectamente en los anillos edométricos se detallan a continuación:

- Utilizando la segueta, primero se procedió a cortar una pieza del bloque de geofam disponible. Las tres dimensiones del fragmento cortado tenían que ser mayores a las del anillo edométrico.
- Luego, colocando el anillo edométrico encima de la pieza de geofam cortada (preferible sobre una cara plana), procedíamos a marcar con el bolígrafo el perímetro exterior e interior del anillo.
- Teniendo las limitaciones marcadas y utilizando el cúter con suma precaución, cortamos la circunferencia exterior.

- Utilizando la lija de mano, se procede a darle la forma circular ya marcada en la circunferencia interior. Hay que tener en cuenta que a medida que nos acercamos a este límite interior, se debe ir presentando la muestra en el anillo para asegurarnos de que encajará como deseamos.
- Por último, introducimos la muestra en el anillo y cortamos con cierto margen el espesor de la muestra, para luego, lijar ambas caras y que queden a ras del anillo edométrico.

La Figura 35 resume lo dicho anteriormente.

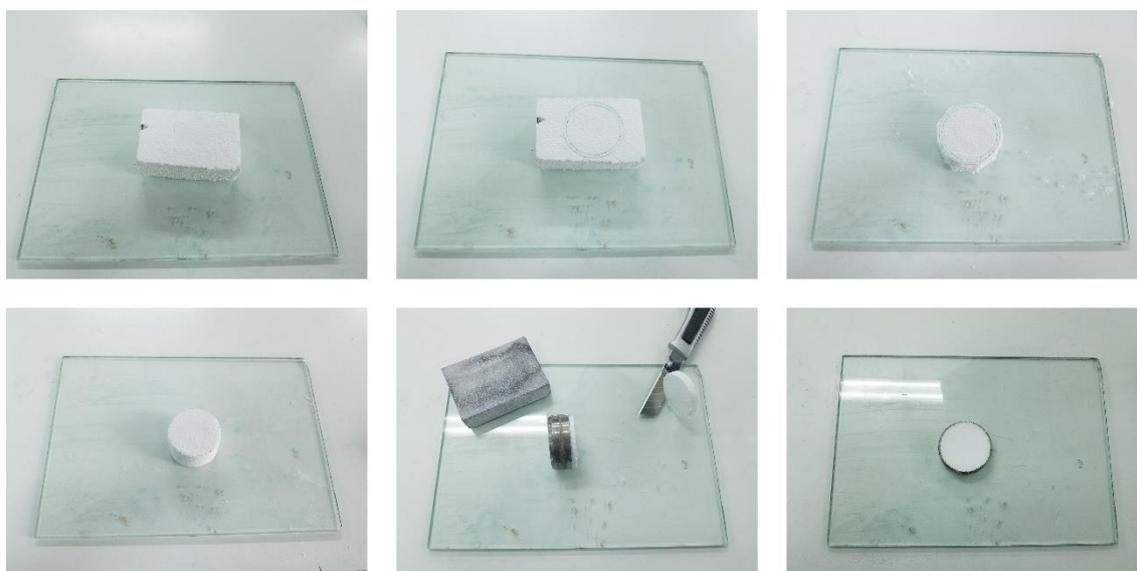


Figura 35. Pasos para la preparación de las muestras usadas en los edómetros

3.2.2. Metodología

Luego de haber preparado las muestras cilíndricas, en total de 25, 22 de 20 kg/m^3 y 3 de 40 kg/m^3 ; se procedió a lo siguiente:

- a) Comprobar la densidad de cada muestra de manera individual

Se consideró que el volumen de cada muestra sería constante porque están sujetas a las dimensiones del anillo edométrico, que consta de 50 mm de diámetro y 20 mm de altura. Por tanto, su volumen es:

$$V = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot H = \pi \cdot \frac{(50 \text{ mm})^2}{4} \cdot (20 \text{ mm}) = 39,269.908 \text{ mm}^3$$

donde:

V es el volumen del interior del anillo, en mm³

d es el diámetro interior, en mm

H es el espesor, en mm

Aunque los grandes bloques tienen su densidad característica, de 20 kg/m³ y 40 kg/m³, la densidad de cada muestra puede ser diferente debido al peso de la misma. Esta diferencia en peso puede deberse al proceso de fabricación de los bloques de EPS o a una carencia o exceso de lijado en el momento en que las muestras se preparaban para acoplarse a los anillos edométricos. Estas mínimas diferencias en el lijado, aunque no eran perceptible a simple vista, sí se reflejaba en la balanza. La Figura 36 muestra el proceso de pesaje de algunas muestras.



Figura 36. Durante el pesaje de las muestras cilíndricas

Ya conocido el volumen y el peso de cada muestra, su densidad se calculará con la siguiente ecuación conocida:

$$\rho = \frac{m}{V} \cdot 10^6$$

donde:

ρ es la densidad de la muestra, en kg/m³

m es la masa, en g

V es el volumen, en mm³

Para saber cuál es la variación porcentual que tiene la densidad de los bloques de EPS con la densidad de las muestras ensayadas, se ha elaborado la Tabla 7. Para calcular el error relativo, se ha tomado como valor real los datos de las muestras.

Referencia	Densidad EPS (kg/m ³)	Masa (g)	Volumen (mm ³)	Densidad muestras (kg/m ³)	Error relativo (%)
M20A	20	0.63	39,269.908	16.04	24.69
M20B		0.72		18.33	9.11
M20C		0.74		18.84	6.16
M20D		0.72		18.33	9.11
M20E		0.70		17.83	12.17
M20F		0.63		16.04	24.69
M20G		0.63		16.04	24.69
M20H		0.69		17.57	13.83
M20I		0.63		16.04	24.69
M20J		0.67		17.06	17.23
M20K		0.63		16.04	24.69
M20L		0.67		17.06	17.23
M20M		0.70		17.83	12.17
M20N		0.63		16.04	24.69
M20Ñ		0.65		16.55	20.85
M20O		0.66		16.81	18.98
M20P		0.69		17.57	13.83
M20Q		0.66		16.81	18.98
M20R		0.66		16.81	18.98
M20S		0.64		16.30	22.70
M20T	0.64	16.30	22.70		
M20U	0.69	17.57	13.83		
M40A	40	1.51		38.45	4.03
M40B		1.53		38.96	2.67
M40C		1.76		44.82	10.75

Tabla 7. Comparación entre la densidad de las muestras y la densidad teórica de los bloques de EPS

b) Programar el Cyber-Plus Evolution

Se programaron las cuatro ventanas con distintos intervalos. El tipo de lectura en todos los casos fue lineal. Para la primera ventana, se tomó lectura cada segundo durante el primer minuto; para la segunda, cada 5 segundos durante los próximos 5 minutos; en la tercera, cada 30 segundos por un periodo de una hora y, en la cuarta, cada 3 minutos durante los próximos cuatro días. La Tabla 8 muestra la programación tal cual fueron introducidas en el aparato Cyber-Plus Evolution:

	Ventana 1	Ventana 2	Ventana 3	Ventana 4
Tipo	LIN	LIN	LIN	LIN
Tiempo base (seg)	1.00	5.00	30.00	180.00
Duración (seg)	60	300	3,600	345,600
Intervalo máximo (seg)	60	300	3,600	345,600

Tabla 8. Tiempo de lectura para las muestras

c) Cálculo de esfuerzos

Para saber el esfuerzo al que estarán sometidas las muestras de EPS en función de las placas de peso, se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{P \cdot g \cdot R}{A} \cdot 10^3$$

donde:

σ , es el esfuerzo aplicado, en KPa

P, es la carga aplicada, en kg

g, es la gravedad, igual a 9.81 m/s²

R, es la relación del brazo palanca, en este caso, 10

A, es el área superficial de la muestra, igual a 1,953.49 mm²

Por lo tanto, en función del peso utilizado, tenemos:

Peso (kg)	Esfuerzo (kPa)
0.25	12.49 ≈ 12.5
0.5	24.98 ≈ 25
1	49.96 ≈ 50
2	99.92 ≈ 100

Tabla 9. Conversión de carga a esfuerzo

d) Ensayos

El objetivo de estos ensayos es determinar el porcentaje de deformación que experimentan varias muestras sometidas a una serie de esfuerzos

Se analizarán las muestras de la Tabla 7 bajo distintas combinaciones o no de cargas, como también, a ciclos de cargas y descargas. Se tomará una muestra de referencia

(M20R) que primero se le aplicará una carga de 25 kPa. Dicha carga no será retirada hasta que la deformación por fluencia se haya estabilizado. La segunda carga, de 50 kPa, no será aplicada hasta que la muestra no haya logrado su recuperación correspondiente. La tercera y última carga será el doble de la anterior, 100 kPa.

Estos datos se compararán con muestras nuevas de la misma densidad y durante el mismo periodo. Es decir, en la primera fase de carga y descarga a 25 kPa, la M20R estará siendo ensayada junto a una nueva muestra (M20B). Cumplida esta fase, se sustituirá únicamente la M20B por otra nueva (M20C) y se cargará a 50 kPa junto con la M20R. En la última fase será la misma temática, reemplazar la M20C por otra (M20K) y aplicar el último ciclo de 100 kPa juntamente con la M20R.

Debido a diferencias observadas en el asentamiento instantáneo de muestras de igual densidad teórica (20 kg/m^3) sometidas al mismo esfuerzo, se decidió hacer unos ensayos de corta duración (12 o 24 horas) a nuevas muestras con el fin de comprobar el asentamiento instantáneo. Con esto se busca minimizar cualquier error al momento de colocar las placas de peso en los edómetros y poder corregir alguna curva desplazamiento-tiempo que haya experimentado estas discrepancias. Bajo este parámetro, se ensayarán:

- 4 muestras de 20 kg/m^3 a 12.5 kPa durante 12 horas
- 4 muestras de 20 kg/m^3 a 25 kPa durante 24 horas
- 4 muestras de 20 kg/m^3 a 50 kPa durante 24 horas
- 4 muestras de 20 kg/m^3 a 100 kPa durante 12 horas

La elección de 12 horas fue porque se consideró que, a bajas y altas cargas, el asentamiento instantáneo ocurre casi al instante y la deformación por fluencia es menor.

3.3. Ensayos a compresión simple

3.3.1. Realización de muestras

Para la preparación de las pequeñas muestras cúbicas de 5 cm de lado, se utilizaron los mismos materiales que en el inciso 3.2.1., más un cartabón y una escuadra (Figura 37).

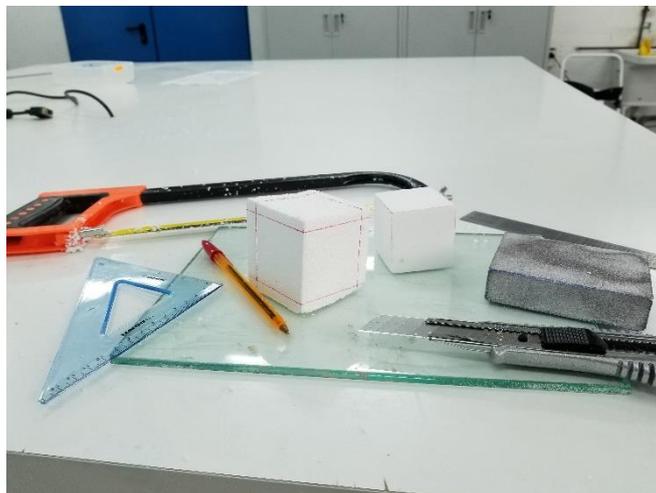


Figura 37. Materiales utilizados para la preparación de las muestras cúbicas

Los pasos requeridos para obtener estas muestras fueron los siguientes:

- Al igual que las muestras anteriores, utilizando la segueta, se corta con cautela un pedazo del bloque de EPS. Para mayor facilidad, aprovechar que las caras del bloque a cortar sean planas y perpendiculares entre sí.
- Utilizando el cartabón, proyectar dos líneas paralelas con una separación de 5 cm y luego, dos líneas más con igual separación que sean perpendiculares a las anteriores, para así formar el cuadrado guía. Antes de proseguir, verificar que los cuatro ángulos sean rectos.
- Proyectar las líneas del cuadrado a las cuatro caras que son perpendiculares al plano donde está referenciado el cuadrado guía. Esto nos permite cortar y/o lijar con seguridad porque las otras caras están definidas (Figura 37).
- Cuando lijamos una cara hasta las líneas que fueron anteriormente proyectadas, borra los límites de referencia a lijar de la otra cara perpendicular, por lo que, hay que volver a trazar estas líneas para que la otra cara del cubo tenga su referencia. En este paso de lijado, siempre hay que verificar la perpendicularidad de las caras con ayuda de la escuadra.

- Por último, cortar y lijar la cara que es paralela adonde dibujamos el primer cuadrado de referencia, sin olvidarnos de verificar la longitud de 5 cm.

La Figura 38 resume estos pasos.

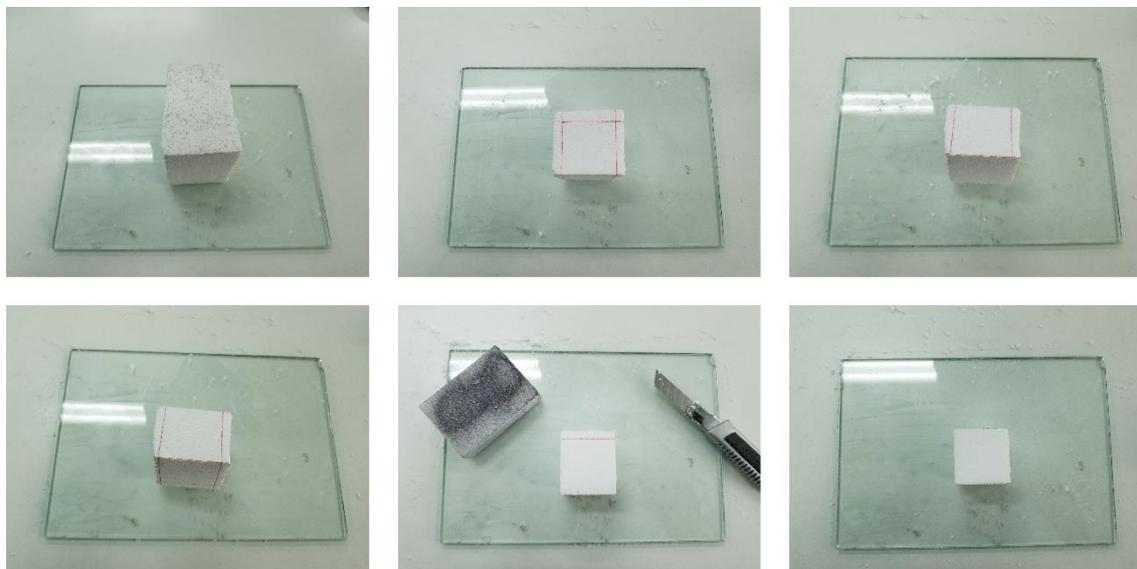


Figura 38. Pasos para la preparación de las muestras cúbicas usadas en ensayos de compresión simple

3.3.2. Metodología

Tras haber preparado ocho muestras, cuatro de cada densidad, se procedió a lo siguiente:

- a) Comprobar la densidad de cada muestra de manera individual

Al igual que en el inciso 3.2.2., se consideró que el volumen de cada muestra sería constante, pese a que puede haber ligeras diferencias entre el volumen de una y otra debido las dimensiones no estuvieron sujetas molde. Por tanto, su volumen es:

$$V = l^3 = 50^3 = 125,000 \text{ mm}^3$$

donde:

V , es el volumen de la muestra, en mm^3

l , es el lado o arista del cubo, en mm

Como se apreció anteriormente, puede haber diferencia en la densidad de cada muestra, aunque hayan sido elaboradas a partir del mismo bloque de EPS. Luego de pesarlas individualmente, se elaboró la siguiente tabla (10):

Referencia	Densidad EPS (kg/m ³)	Masa (g)	Volumen (mm ³)	Densidad muestras (kg/m ³)	Error relativo (%)
M191	20	1.91	125,000	15.28	30.89
M193		1.93		15.44	29.53
M203		2.03		16.24	23.15
M206		2.06		16.48	21.36
M487	40	4.87		38.96	2.67
M456		4.56		36.48	9.65
M501		5.01		40.08	0.20
M539		5.39		43.12	7.24

Tabla 10. Comparación entre la densidad de las muestras cúbicas y la densidad teórica de los bloques de EPS

b) Programar el Cyber-Plus Evolution portátil

Como eran pruebas de corta duración no hubo la necesidad de programar las cuatro ventanas. Solamente se programó la primera ventana con un tipo de lectura lineal (LIN), tomando lectura cada segundo con una duración de 120 segundos.

c) Preparación máquina multiensayo

Para preparar esta máquina a este tipo de ensayo, primero se le cambiaron las mordazas de tracción por unos platos de compresión. Luego, se adaptaron los transductores potenciométricos para medir la deformación transversal con unos pequeños angulares atornillados a la base. Con esta adaptación los transductores quedaron por encima del centroide de las caras de las muestras, por tal razón, se colocó una placa metálica sobre el plato de compresión inferior para darle mayor altura a las muestras de EPS (Figura 39).



Figura 39. Adaptaciones para ensayar las muestras cúbicas de EPS

d) Ensayos

Se aplicará carga a cada muestra de la Tabla 10 a una velocidad de deformación constante igual a 5 mm/min. A medida que la muestra se deforma verticalmente, los datos de estas deformaciones serán recogidos por el software SCM3000 de Microtest. La lectura de la deformación transversal viene dada por los transductores, cuyos datos serán registrados por el Cyber-Plus Evolution portátil.

La sincronización para la lectura de estos datos se hizo manual. Una vez colocada la muestra sobre la placa metálica, se ajustaban los transductores y se descendía el pistón superior de la EM2 hasta asegurarnos que estuviera en contacto con la muestra de EPS. A partir de ahí, se corría el software SCM3000 y cuando se empezaban a registrar datos, en ese mismo instante, se ponía en marcha el Cyber-Plus Evolution.

La duración de cada ensayo fue mínima, un máximo de 90 segundos por cada muestra. Dada la información obtenida con los distintos sensores, se analizará en cada muestra el coeficiente de Poisson y el módulo de Young para una deformación máxima del 10 %.

La Tabla 11 refleja los primeros 4 segundos de lectura de la muestra M456. En ella se aprecia la fuerza aplicada y la posición del pistón a medida que transcurre el tiempo.

Máquina multiensayo (compresión simple)			
Fuerza (kN)	Posición (mm)	Resistencia Compresión (MPa)	Tiempo (s)
-3.9240697E-04	0	-1.5696279E-04	0
-3.2700581E-04	-3.4420642E-03	-1.3080232E-04	0.11
-1.3080232E-04	-1.2497971E-02	-5.2320930E-05	0.219
3.9240697E-04	-2.2332440E-02	1.5696279E-04	0.328
1.0464186E-03	-3.0732716E-02	4.1856744E-04	0.437
1.6350291E-03	-4.3394595E-02	6.5401162E-04	0.546
2.0274360E-03	-5.0975332E-02	8.1097441E-04	0.656
2.5506453E-03	-5.9908308E-02	1.0202581E-03	0.78
3.2700581E-03	-7.2242371E-02	1.3080232E-03	0.89
3.7932674E-03	-8.1052416E-02	1.5173070E-03	0.999
4.4472790E-03	-8.9575623E-02	1.7789116E-03	1.124
5.2974942E-03	-1.0141796E-01	2.1189977E-03	1.233
6.1477093E-03	-1.1047387E-01	2.4590837E-03	1.358
6.9325232E-03	-1.1977564E-01	2.7730093E-03	1.467
7.7173372E-03	-1.2854471E-01	3.0869349E-03	1.576
8.5021511E-03	-1.3665814E-01	3.4008604E-03	1.685
9.5485697E-03	-1.4694336E-01	3.8194279E-03	1.794

1.0464186E-02	-1.5567145E-01	4.1856744E-03	1.919
1.1903012E-02	-1.6739086E-01	4.7612046E-03	2.028
1.2949430E-02	-1.7624188E-01	5.1797721E-03	2.138
1.4126651E-02	-1.8607635E-01	5.6506604E-03	2.247
1.5238471E-02	-1.9414881E-01	6.0953883E-03	2.356
1.6677296E-02	-2.0459793E-01	6.6709186E-03	2.481
1.8116122E-02	-2.1381775E-01	7.2464488E-03	2.59
1.9358744E-02	-2.2193119E-01	7.7434976E-03	2.699
2.0993773E-02	-2.3279008E-01	8.3975092E-03	2.808
2.2498000E-02	-2.4180501E-01	8.9991999E-03	2.918
2.4002227E-02	-2.5057408E-01	9.6008906E-03	3.027
2.5702657E-02	-2.5909728E-01	1.0281063E-02	3.136
2.7599291E-02	-2.6942348E-01	1.1039716E-02	3.261
2.9888331E-02	-2.8163461E-01	1.1955332E-02	3.37
3.1654163E-02	-2.9028075E-01	1.2661665E-02	3.479
3.3289192E-02	-2.9794344E-01	1.3315677E-02	3.604
3.5905238E-02	-3.0974480E-01	1.4362095E-02	3.713
3.7867273E-02	-3.1859582E-01	1.5146909E-02	3.838
4.0025511E-02	-3.2793857E-01	1.6010205E-02	3.947
4.1791343E-02	-3.3642080E-01	1.6716537E-02	4.056

Tabla 11. Datos obtenidos por la máquina multiensayo para la muestra M456

Se observa que, en las primeras 3 filas, el valor de la fuerza es negativa y, a partir de la cuarta, su valor es positivo. Se debe a que el pistón aún no había estado en contacto con la muestra. Estos valores negativos no fueron considerados en los cálculos y hubo que reajustar la fuerza, la posición y el tiempo. Se hizo restándole el valor de la tercera fila a su magnitud correspondiente en cada medida.

La Tabla 12 muestra los dos primeros segundos de los valores reajustados, que son los que fueron considerados para el cálculo.

Máquina multiensayo (compresión simple)			
Fuerza (kN)	Posición (mm)	Resistencia Compresión (MPa)	Tiempo (s)
0	0	0	0
5.2320930E-04	-9.8344691E-03	2.0928372E-04	0.109
1.1772209E-03	-1.8234745E-02	4.7088837E-04	0.218
1.7658314E-03	-3.0896624E-02	7.0633255E-04	0.327
2.1582384E-03	-3.8477360E-02	8.6329534E-04	0.437
2.6814477E-03	-4.7410337E-02	1.0725791E-03	0.561
3.4008604E-03	-5.9744400E-02	1.3603442E-03	0.671

3.9240697E-03	-6.8554445E-02	1.5696279E-03	0.78
4.5780814E-03	-7.7077652E-02	1.8312325E-03	0.905
5.4282965E-03	-8.8919992E-02	2.1713186E-03	1.014
6.2785116E-03	-9.7975899E-02	2.5114046E-03	1.139
7.0633255E-03	-1.0727767E-01	2.8253302E-03	1.248
7.8481395E-03	-1.1604674E-01	3.1392558E-03	1.357
8.6329534E-03	-1.2416017E-01	3.4531814E-03	1.466
9.6793720E-03	-1.3444539E-01	3.8717488E-03	1.575
1.0594988E-02	-1.4317348E-01	4.2379953E-03	1.7
1.2033814E-02	-1.5489289E-01	4.8135256E-03	1.809
1.3080232E-02	-1.6374391E-01	5.2320930E-03	1.919
1.4257453E-02	-1.7357838E-01	5.7029814E-03	2.028

Tabla 12. Datos reajustados para la muestra M456

Parte de la lectura de la deformación transversal para la misma muestra se refleja en la Tabla 13. El signo negativo en los valores de lectura indica que el sensor de desplazamiento del transductor iba hacia afuera de éste, o sea, hacia dentro de la muestra. Significa que la sección se estaba encogiendo.

Cyber-Plus Evolution			Cyber-Plus Evolution		
Tiempo (s)	CH3: Desplaz. (mm)	CH5: Desplaz. (mm)	Tiempo (s)	CH3: Desplaz. (mm)	CH5: Desplaz. (mm)
0	0	0	18	-0.026	-0.0067
1	-0.0002	-0.0051	19	-0.026	-0.0067
2	-0.0024	-0.006	20	-0.026	-0.007
3	-0.007	-0.0065	21	-0.026	-0.0076
4	-0.01	-0.0065	22	-0.026	-0.0085
5	-0.0122	-0.0065	23	-0.0244	-0.0102
6	-0.0201	-0.0067	24	-0.0148	-0.0192
7	-0.0231	-0.0067	25	-0.0077	-0.0283
8	-0.0234	-0.0067	26	-0.0037	-0.0366
9	-0.0238	-0.0067	27	0	-0.0468
10	-0.0239	-0.0067	28	0.0016	-0.0724
11	-0.0244	-0.0067	29	0.0031	-0.0782
12	-0.0246	-0.0067	30	0.0066	-0.0866
13	-0.025	-0.0067	31	0.0094	-0.0926
14	-0.0255	-0.0067	32	0.0114	-0.0995
15	-0.0258	-0.0067	33	0.0124	-0.1044
16	-0.0258	-0.0067	34	0.0129	-0.107
17	-0.026	-0.0067	35	0.0133	-0.1095

Tabla 13. Datos obtenidos por el Cyber-Plus Evolution para la muestra M456

El valor utilizado para determinar la deformación transversal fue la suma de ambos canales. Como el Cyber-Plus se programó para tomar una lectura cada segundo y no varias lecturas entre un segundo y otro como sí hizo la máquina multiensayo, se hizo una interpolación lineal para determinar el valor de la fuerza o posición conforme el tiempo cuando este no era un número entero.

e) Determinación del coeficiente de Poisson y módulo de Young

El coeficiente de Poisson (ν) será determinado en distintos intervalos de la deformación pautada. Habrá dos variantes. Una, que se denominará ν_{origen} , y será calculada como es conocida. O sea, tomando la diferencia entre el agrandamiento o estrechamiento de una sección con relación a su dimensión original.

Como es un cubo de arista de 50 mm, tenemos:

$$\nu_{origen} = -\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_h} = -\frac{\Delta l / l_0}{\Delta h / h_0} = -\frac{\Delta l}{\Delta h} = -\frac{l_2 - l_1}{h_2 - h_1}$$

donde:

ν , es el coeficiente de Poisson

ε_l , es la deformación perpendicular a la fuerza aplicada, en mm

ε_h , es la deformación en la dirección de la fuerza aplicada, en mm

l_x , es la longitud transversal a la fuerza aplicada, final o inicial, en mm

h_x , es la altura o longitud paralela a la fuerza aplicada, final o inicial, en mm

La otra variante se denominará $\nu_{relativo}$. Aquí, la diferencia entre el aumento o disminución de una sección se hará en relación al estado anterior de la muestra y no a la dimensión original. Por tanto:

$$\nu_{relativo} = -\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_h} = -\frac{\Delta l / l_0}{\Delta h / h_0} = -\frac{\frac{l_2 - l_1}{50 + l_1}}{\frac{h_2 - h_1}{50 + h_1}}$$

Para la determinación del módulo de Young (E) se consideraron varios intervalos donde la curva esfuerzo-deformación tuvieran un tramo de la pendiente lo más recto posible.

Para calcular el esfuerzo vertical se consideró el área transversal a la fuerza aplicada como constante. La fuerza es la que varía en función de la lectura anterior.

$$E = \frac{\sigma_v}{\varepsilon_v} = \frac{F/A}{\Delta h/h_0} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{h_2 - h_1}{h_1}}$$

donde:

E , es el módulo de Young, en kN/mm^2

A , es el área de la sección transversal a la fuerza aplicada, igual a $2,500 \text{ mm}^2$

ε_v , es igual a ε_h , es la deformación en la dirección de la fuerza aplicada, en mm

h_x , es la altura o longitud paralela a la fuerza aplicada, final o inicial, en mm

4 Pruebas de laboratorio

4.1. Resultado de los ensayos en edómetros

Los ensayos serán ordenados en dos grupos. El primero corresponderá al inciso 4.1.1. y es donde se mostrarán los ensayos de corta duración, cuyo tiempo de prueba fue de 12 o 24 horas. El segundo grupo que inicia a partir del inciso 4.1.2, estará destinado a los ensayos de larga duración, con escalones o no de cargas cíclicas.

En la Figura 40 se observan dos muestras en la célula edométrica.



Figura 40. Muestras en la célula edométrica antes de ser reemplazadas

4.1.1. Pruebas de corta duración

El objetivo principal era observar que asentamiento y deformación por fluencia experimentaban las muestras en las primeras 24 horas de ensayo. Del mismo modo, ver qué tanto recuperaban al descargase durante un breve periodo.

4.1.1.1. Ensayos EPS de 20 kg/m³ a 12.5 kPa (12 hr)

La finalidad de estos ensayos era comprobar el asentamiento instantáneo y diferido durante las primeras 12 horas. Del mismo modo, ver qué recuperación hay durante la primera hora de descarga. En total se ensayaron cuatro muestras y su comportamiento puede verse en la Figura 41.

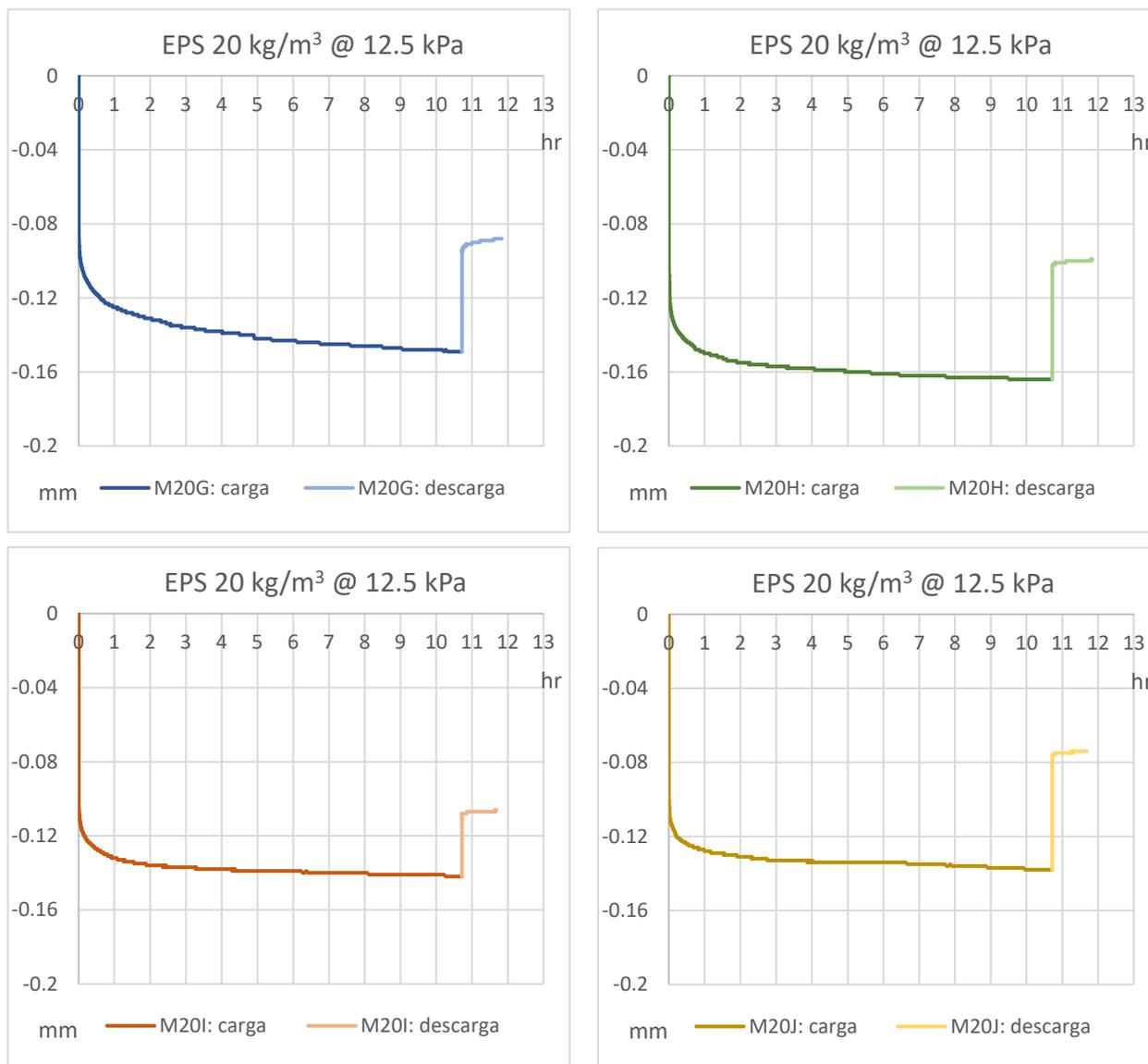


Figura 41. Comportamiento promedio de las muestras de EPS 20 kg/m³ ensayadas a 12.5 kPa

El asentamiento durante las primeras 11 horas estuvo entre 0.138 mm – 0.164 mm. No se pudo relacionar que las muestras con menores densidades tuvieran una mayor deformación, ya que, si se observa la Tabla 7, la muestra M20H es la más densa de todas y es la que más se ha deformado en el tiempo ensayado.

El promedio de las pruebas anteriores se representa en la Figura 42. Esta gráfica servirá como parámetro para calcular los asentamientos en la Tabla 14.

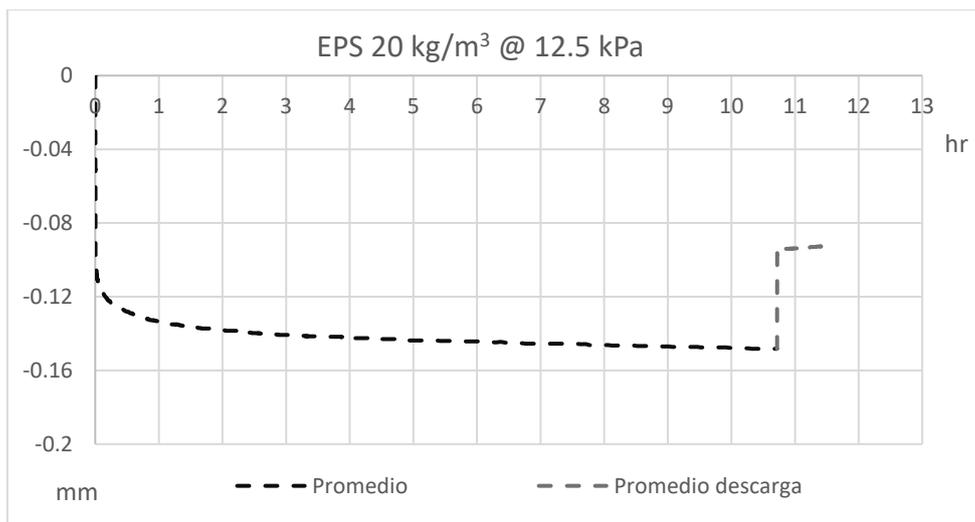


Figura 42. Comportamiento promedio de las muestras de EPS 20 kg/m³ ensayadas a 12.5 kPa

Etapa	Asent. instant. (mm)	Def. por asent. (%)	Asent. diferido (mm)	Def. por asent. (%)	Recup. instant. (mm)	Def. por recup. (%)	Recup. diferida (mm)	Def. por recup. (%)
Carga	-0.107	0.5	-0.148	0.7	-	-	-	-
Descarga	-	-	-0.093	0.5	0.052	35.1	0.055	37.2

Tabla 14. Análisis de resultados para la muestra promedio de EPS 20 kg/m³ a 12.5 kPa

donde:

Asent. instant., es el asentamiento instantáneo. Es un valor de referencia porque puede variar por la dimensión del gráfico o la escala de los ejes utilizada.

Asent. diferido, es el asentamiento diferido. Es el asentamiento total que incluye al instantáneo. Este no varía en función de la escala o dimensión del gráfico.

Recup. instant., es la recuperación instantánea. También es un valor de referencia porque al igual que el asent. instant., puede variar por la dimensión del gráfico o la escala utilizada.

Recup. diferida, es la recuperación diferida. Es todo lo que se ha recuperado al retirar la carga durante el tiempo ensayado incluyendo la instantánea. Esta no varía con la dimensión del gráfico o la escala.

Def. por asent., es la deformación por asentamiento a origen.

Def. por recup., es la deformación por recuperación.

Bajo esta tensión y durante el tiempo ensayado, el asentamiento máximo no alcanzó el 1 % de la deformación de la muestra. Al retirarse la carga hubo una recuperación de un 37 %.

4.1.1.2. Ensayo EPS de 20 kg/m³ a 25 kPa (24 hr)

Al igual que los ensayos anteriores, se busca comprobar el asiento instantáneo y el diferido, pero ahora durante las primeras 24 horas. Asimismo, ver la curva de recuperación durante las primeras seis horas de descarga. El comportamiento de las cuatro muestras puede verse en la Figura 43.

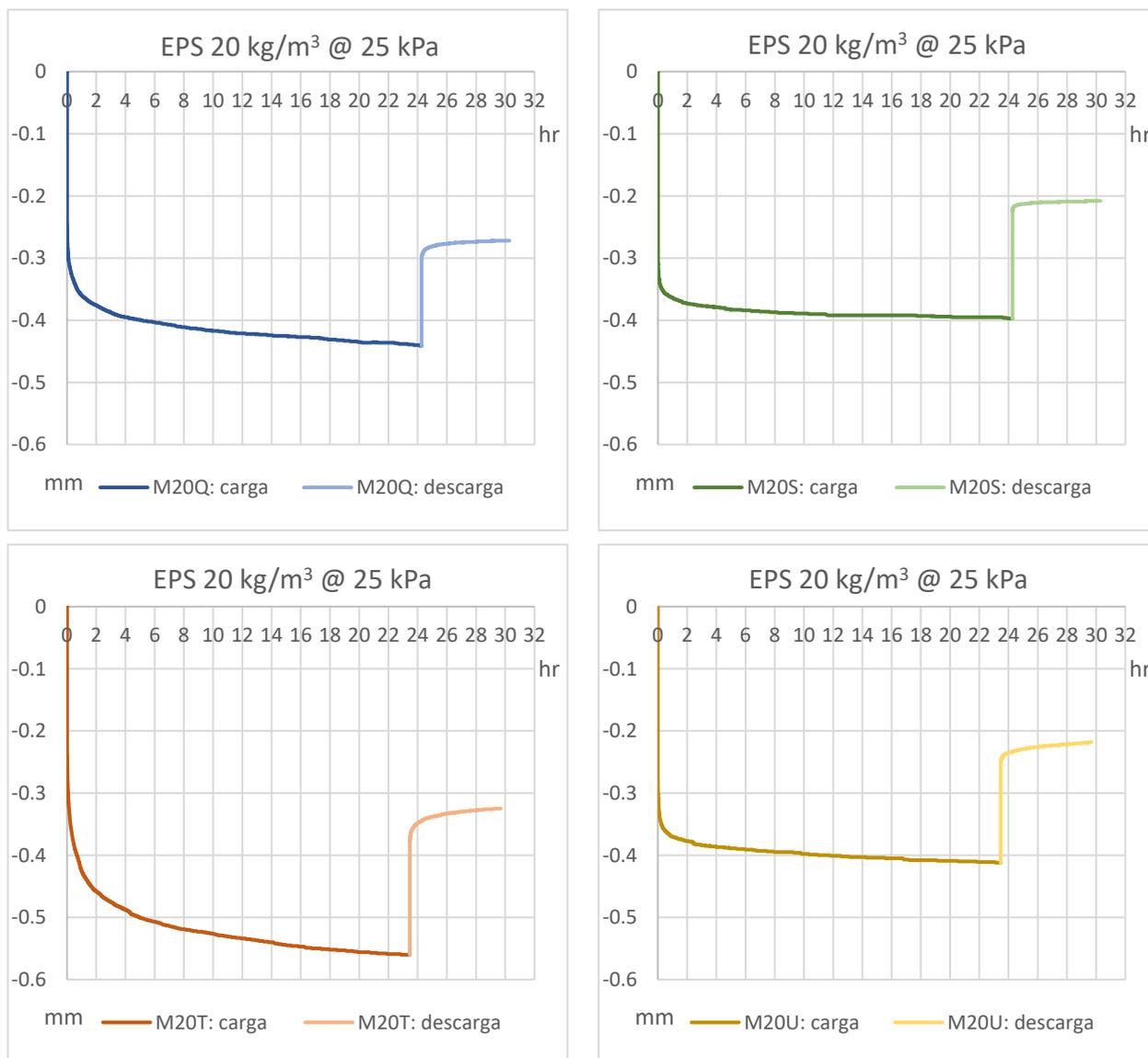


Figura 43. Comportamiento del EPS 20 kg/m³ a 25 kPa (24 horas de carga y 6 de descarga)

Las muestras M20S y M20T tienen la misma y más baja densidad en estas pruebas, de 16.30 kg/m³. Sin embargo, su comportamiento no es idéntico. La M20S fue la que experimentó menor deformación, y la de mayor, fue la M20T entre las cuatro muestras.

La M20U fue la más densa de todas (17.57 kg/m³) y su gráfica es parecida a la de M20S.

El comportamiento promedio de los ensayos anteriores se refleja en la Figura 44. Dicho promedio se tomará como medida de comparación en la Tabla 15.

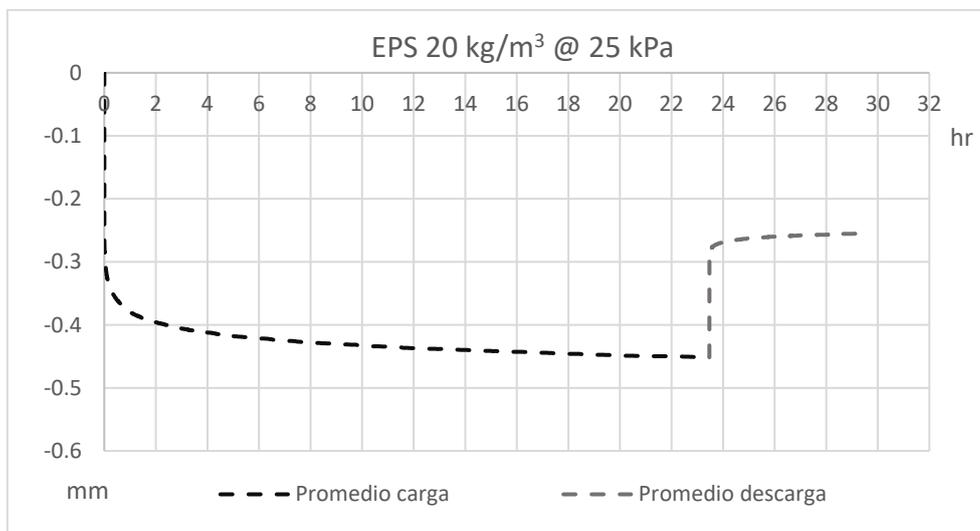


Figura 44. Comportamiento promedio de las muestras de EPS 20 kg/m³ ensayadas a 25 kPa

Etapa	Asent. instant. (mm)	Def. por asent. (%)	Asent. diferido (mm)	Def. por asent. (%)	Recup. instant. (mm)	Def. por recup. (%)	Recup. diferida (mm)	Def. por recup. (%)
Carga	-0.29	1.5	-0.452	2.3	-	-	-	-
Descarga	-	-	-0.255	1.3	0.168	37.2	0.197	43.6

Tabla 15. Análisis de resultados para la muestra promedio de EPS 20 kg/m³ a 25 kPa

Al aplicársele un ciclo de carga y descarga, la muestra quedó con una deformación permanente que ronda el uno por ciento. La recuperación o hinchamiento al final de la descarga fue de 43.6 %. Recalcar que estos datos son en base a casi 30 horas de ensayo. Como se verá más adelante, a esta muestra le queda mucho por asentarse.

4.1.1.3. Ensayo EPS de 20 kg/m³ a 50 kPa (24 hr)

La carga en estas cuatro muestras fue de 50 kPa durante aproximadamente 24 horas y el tiempo de descarga fue de unas tres horas. El comportamiento puede verse en la Figura 45.

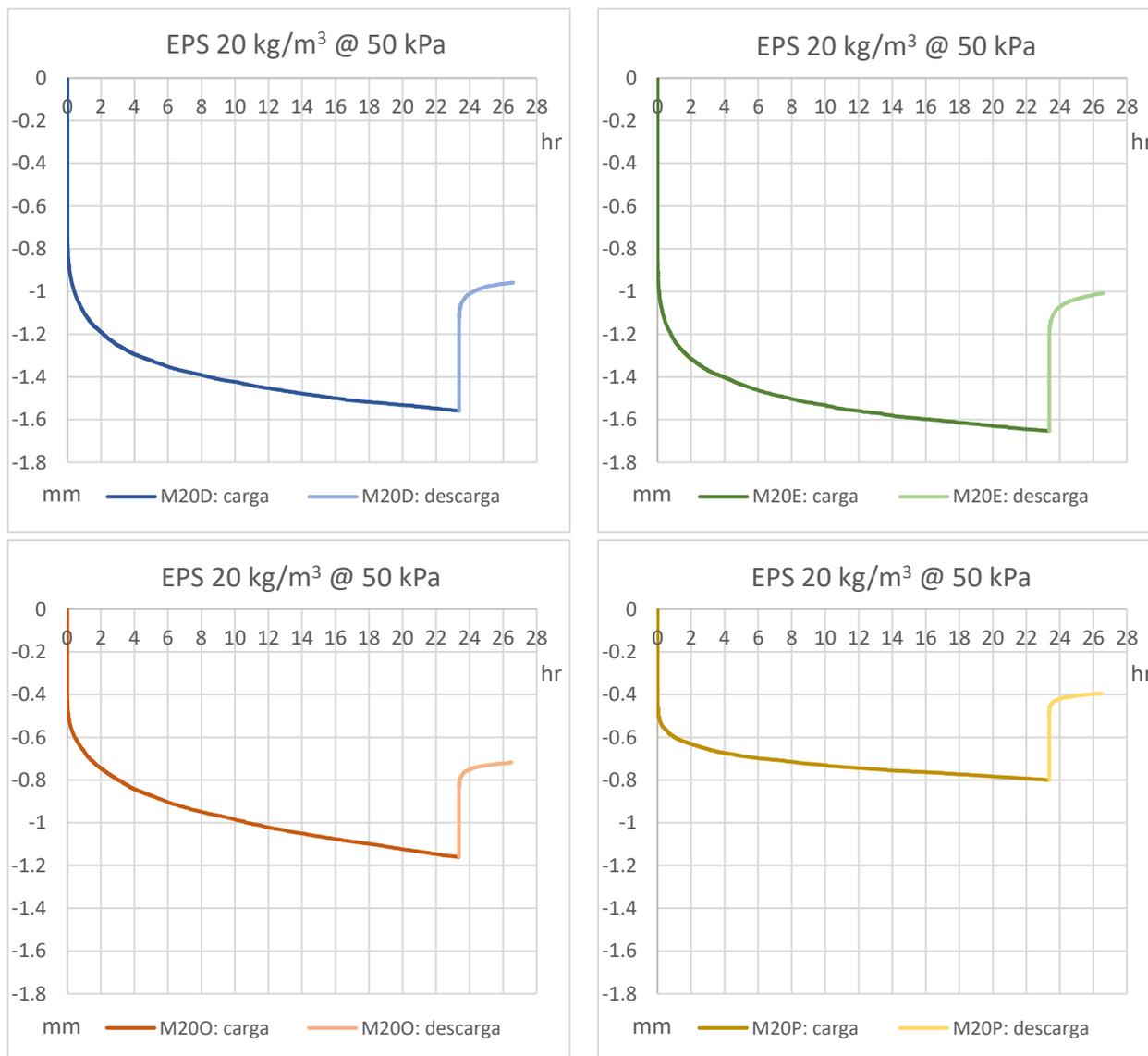


Figura 45. Comportamiento del EPS 20 kg/m³ a 50 kPa (24 horas de carga y 3 de descarga)

Aquí se observa claramente el motivo de porqué se hicieron estos ensayos de corta duración: fueron cuatro muestras de la misma densidad teórica sometidas al mismo esfuerzo, sin embargo, cada una experimentó un asentamiento instantáneo diferente.

Curiosamente, las dos muestras más densas (M20D y M20E) fueron las que más asentaron. Se observa que la pendiente de estas dos muestras junto con la de M200 en la parte del asentamiento diferido, son similares.

El comportamiento promedio de los ensayos anteriores se refleja en la Figura 46. Este se tomará como medida de comparación en la Tabla 16.

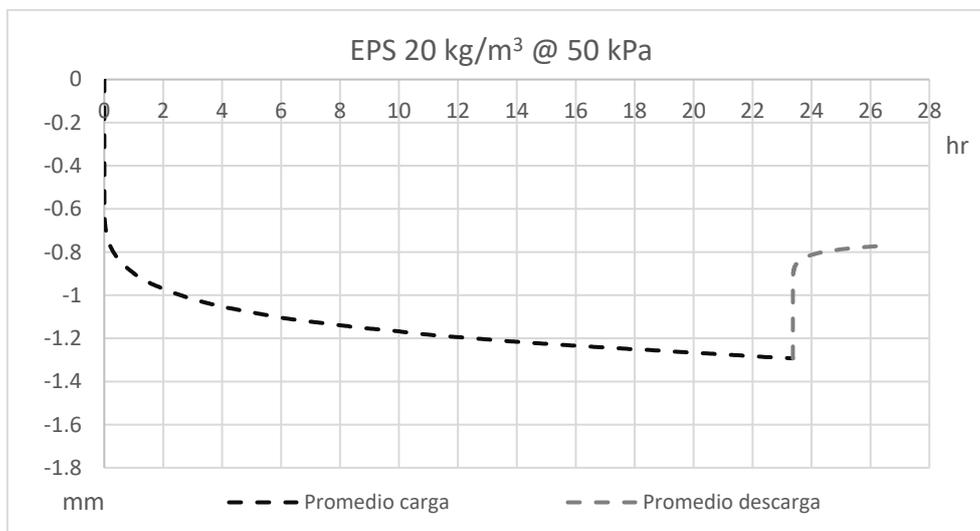


Figura 46. Comportamiento promedio de las muestras ensayadas de EPS 20 kg/m³ a 50 kPa

Etapa	Asent. instant. (mm)	Def. por asent. (%)	Asent. diferido (mm)	Def. por asent. (%)	Recup. instant. (mm)	Def. por recup. (%)	Recup. diferida (mm)	Def. por recup. (%)
Carga	-0.669	3.3	-1.293	6.5	-	-	-	-
Descarga	-	-	-0.77	3.8	0.393	30.39	0.523	40.4

Tabla 16. Análisis de resultados para la muestra promedio de EPS 20 kg/m³ a 50 kPa

Considerando solo las 24 horas (un día) de ensayo, el asentamiento máximo fue de un 6.5 %. La recuperación de la muestra respecto a la deformación máxima supera el 40 %.

4.1.1.4. Ensayo EPS de 20 kg/m³ a 100 kPa (12 hr)

Estas pruebas tienen la misma duración en carga y descarga que las del inciso 4.1.1.1., a diferencia de que el esfuerzo aplicado es de 100 kPa. El comportamiento es mostrado en la Figura 47.

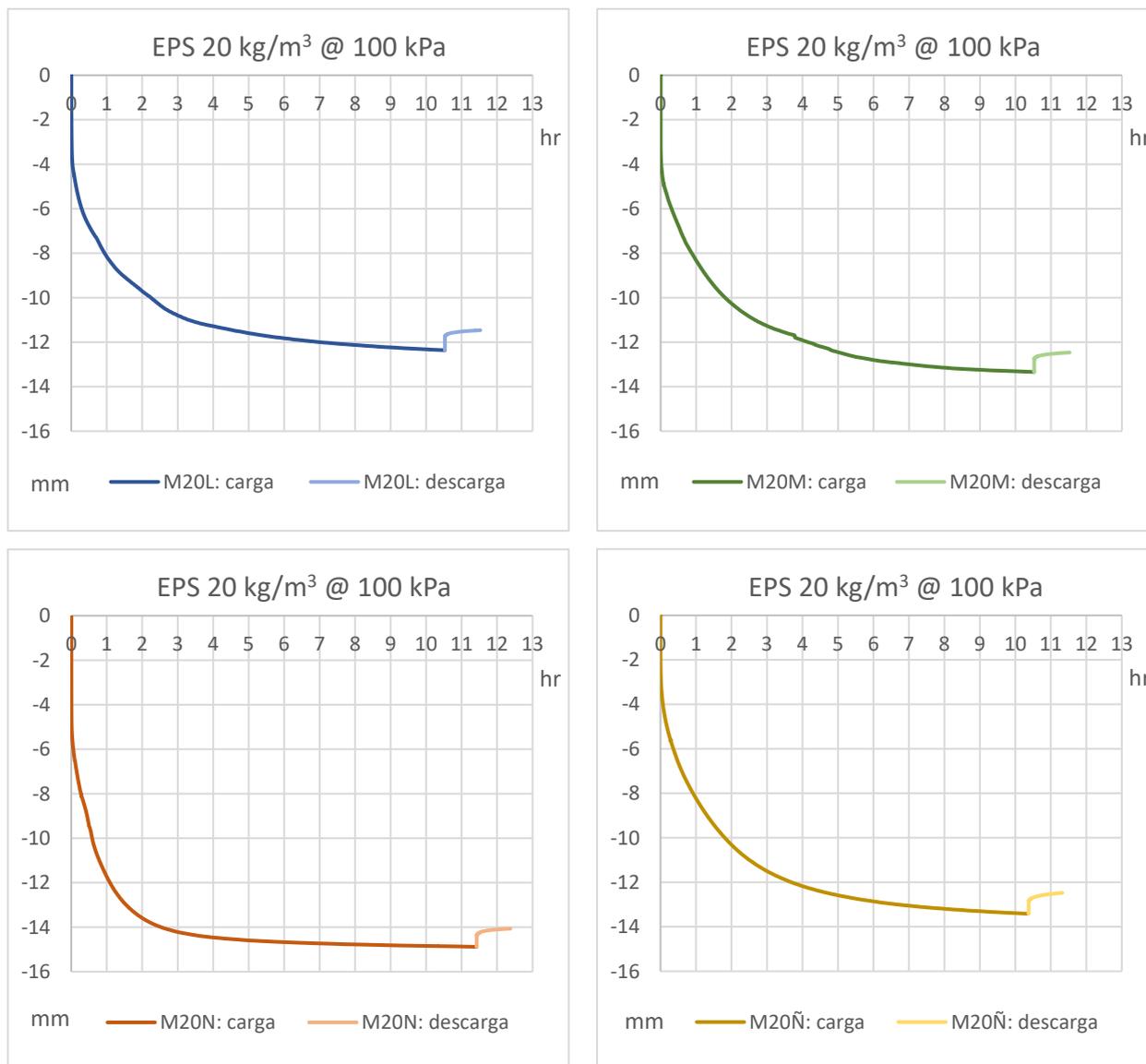


Figura 47. Comportamiento del EPS 20 kg/m³ a 100 kPa (12 horas de carga y una de descarga)

Cada muestra presenta un gran desplazamiento a pesar de la corta duración del ensayo. Durante la descarga, la recuperación de cada una fue mínima. La mayor deformación ocurrió en la muestra menos densa (M20N).

El comportamiento promedio de estas muestras se refleja en la Figura 48.

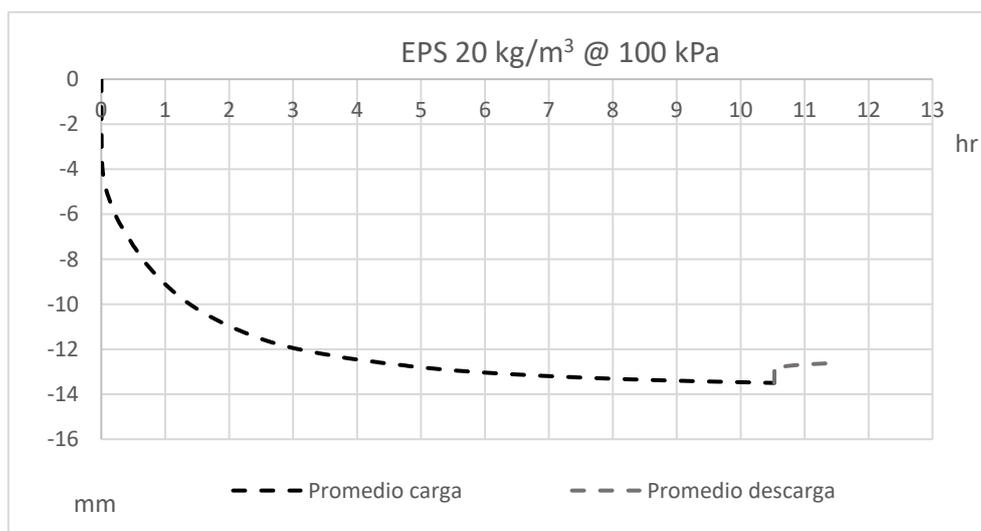


Figura 48. Comportamiento promedio de las muestras de EPS 20 kg/m³ ensayadas a 100 kPa

Los valores y porcentajes de la gran deformación y la poca recuperación se muestran en la Tabla 17.

Etapa	Asent. instant. (mm)	Def. por asent. (%)	Asent. diferido (mm)	Def. por asent. (%)	Recup. instant. (mm)	Def. por recup. (%)	Recup. diferida (mm)	Def. por recup. (%)
Carga	-4.366	21.8	-13.50	67.5	-	-	-	-
Descarga	-	-	-12.62	63.1	0.518	3.8	0.88	6.5

Tabla 17. Análisis de resultados para la muestra promedio de EPS 20 kg/m³ a 100 kPa

Contemplando solamente la deformación por el asentamiento instantáneo, el valor calculado duplica lo concerniente en la Norma UNE-EN 826, la cual limita al 10 % la deformación por esfuerzo a compresión. Si se toma en cuenta el asentamiento diferido, esta deformación aumenta a un 67.5 %.

En comparación con las anteriores pruebas de corta duración, bajo este nivel de carga es cuando las muestras tuvieron una menor recuperación, alcanzando un promedio máximo de un 6.5 %.

En la Figura 49 aparecen cuatro muestras de EPS 20 kg/m³, tres de ellas luego de ser ensayadas. De izquierda a derecha: las dos primeras a 100 kPa, la tercera a 50 kPa y la cuarta está intacta. Claramente se aprecia la deformación que han tenido las ensayadas a 100 kPa, no tanto las que fueron a 50 kPa.



Figura 49. Muestras tras ser ensayadas

4.1.1.5. Resumen

Para tener una mejor visualización de cuánto han asentado las muestras en función a la carga aplicada, se aunarán todos los promedios en una sola gráfica para que así estén representadas en la misma escala (Figura 50).

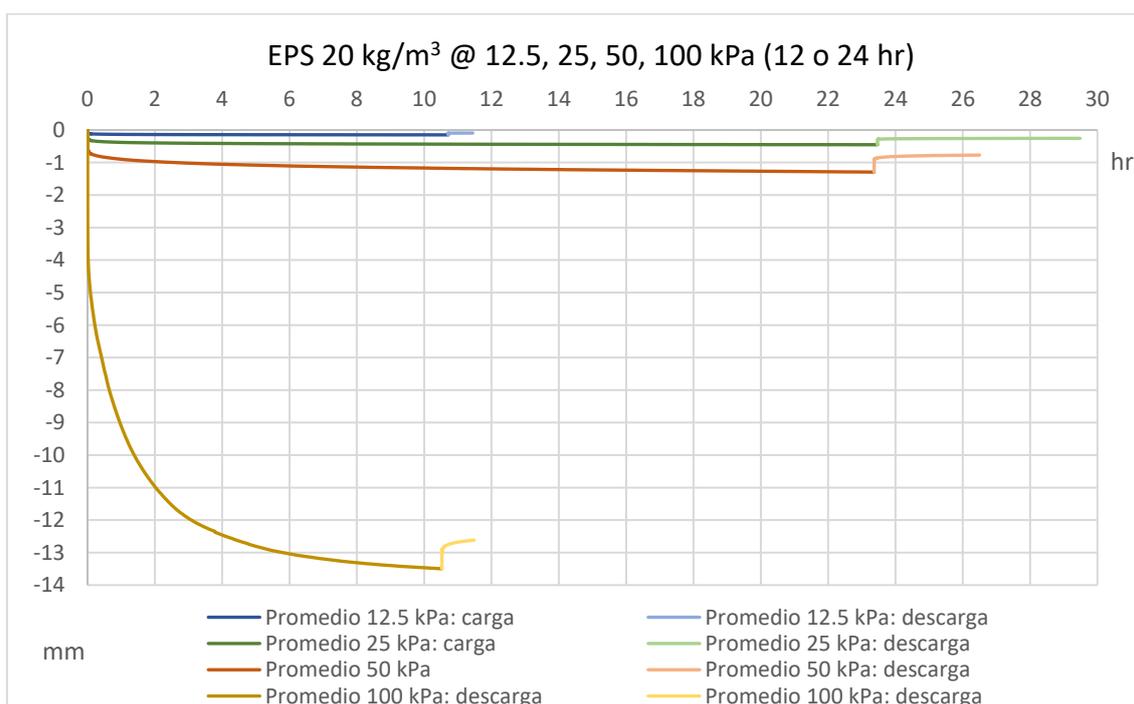


Figura 50. Comportamiento de las muestras de corta duración

Lo primero que llama la atención es la gran deformación que se ha tenido con 100 kPa si se compara con la obtenida a 50 kPa. Ahora bien, si se miran las gráficas sin mucha rigurosidad, la deformación bajo 25 kPa respecto a la de 12.5 kPa, es aproximadamente el doble; la de 50 kPa en relación a la de 25 kPa, también es del doble; pero la de 100 kPa en torno a la de 50 kPa, no es así. Es unas 10 veces mayor.

Para saber cuánto se ha deformado una respecto a la otra, se ha elaborado la Tabla 18. Para que todas estén bajo la misma condición, la comparación se hará tomando como referencia 10 horas de ensayo.

Muestra	Asent. instant. (mm)	Def. por asent. (%)	Variación con la anterior (%)	Asent. diferido a 10 hr (mm)	Def. por asent. (%)	Variación con la anterior (%)
Promedio 12.5 kPa	-0.107	0.5	-	-0.148	0.7	-
Promedio 25 kPa	-0.29	1.5	171	-0.432	2.2	191.9
Promedio 50 kPa	-0.669	3.3	130.7	-1.167	5.8	170.1
Promedio 100 kPa	-4.366	21.8	552.6	-13.465	67.3	1,053.8

Tabla 18. Comparación entre muestras de corta duración

En los tres primeros casos se aprecia que cuando se duplica la carga, el asentamiento es casi el triple del anterior. Pero no ocurre así al pasar de 50 kPa a 100 kPa. Aquí, el asentamiento es 11.5 veces el obtenido en el promedio de 50 kPa. Por lo que, este material ha fallado porque la deformación supera con creces el 10 % que estipula la Norma UNE-EN 826.

4.1.2. Pruebas de larga duración y con ciclos de carga

Tienen por objetivo determinar cuál es el asentamiento máximo que puede tener una muestra de EPS tras estabilizarse la deformación por fluencia. A su vez, ver qué tanto se recupera una vez retirada la carga. Se tendrá en cuenta diversos ciclos de carga y descarga.

4.1.2.1. Ensayo EPS de 20 kg/m³ a 50 kPa: carga, descarga y recarga

Esta fue la primera muestra ensayada. Estuvo sometida a un esfuerzo constante de 50 kPa. La lectura de datos bajo carga se realizó durante 96.1 horas (4 días). Luego, se descargó por un periodo de 42.8 horas (1.78 días) para más tarde volverla a cargar (recarga) con el mismo esfuerzo anterior. El tiempo de la recarga fue parecido al de la carga inicial, unos cuatro días.

El comportamiento que experimentó esta muestra durante las distintas fases puede verse en la Figura 51.

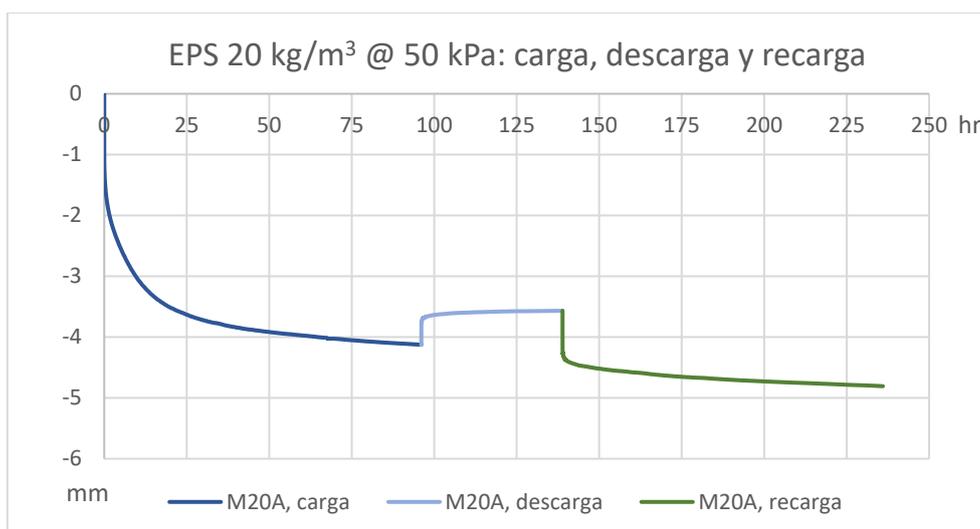


Figura 51. Comportamiento del EPS 20 kg/m³ a 50 kPa (M20A)

Se muestra que, para el tiempo ensayado, en ninguna de las fases, la fluencia no había logrado estabilizarse. Debido a esto, en los próximos ensayos no hubo un límite de tiempo para la realización de los mismos.

Este asentamiento instantáneo fue comparado con el promedio de las muestras de corta duración del apartado 4.1.1.3., arrojando diferencia entre los mismos. Por tal razón, se decidió reajustar este valor con el promedio de los de corta duración.

La Figura 52 muestra el comportamiento corregido para este caso.



Figura 52. Comportamiento corregido del EPS 20 kg/m³ a 50 kPa (kPa)

Para conocer mejor el comportamiento de la gráfica, se ha elaborado la Tabla 19.

Etapa	Asent. instant. (mm)	Def. por asent. (%)	Asent. diferido (mm)	Def. por asent. (%)	Recup. instant. (mm)	Def. por recup. (%)	Recup. diferida (mm)	Def. por recup. (%)
Carga	-0.962	4.8	-1.842	9.2	-	-	-	-
Descarga	-	-	-1.323	6.6	0.434	23.6	0.519	28.2
Recarga	-2.064	10.3	-2.503	12.5	-	-	-	-

Tabla 19. Análisis de resultados para M20A

4.1.2.2. EPS de 20 kg/m³ y 40 kg/m³ a 25 kPa cíclica

Esta prueba se realiza para analizar el comportamiento del EPS de 20 kg/m³ y de 40 kg/m³ bajo distintos ciclos de carga. Dichos ciclos se harán bajo una única tensión de 25 kPa.

El tiempo de aplicación de la primera carga fue de 97 horas, equivalentes a cuatro días, y el de la descarga duró 52 horas; en el segundo ciclo, la recarga duró aproximadamente 68 horas y la descarga unas 49; para el tercer ciclo solo se contabilizó una carga, cuya duración fue de 73 horas.

La muestra de EPS de 20 kg/m³ corresponde a la referencia M20R, mientras que la de EPS de 40 kg/m³, a la M40B. El desarrollo de esta prueba se muestra en la Figura 53.

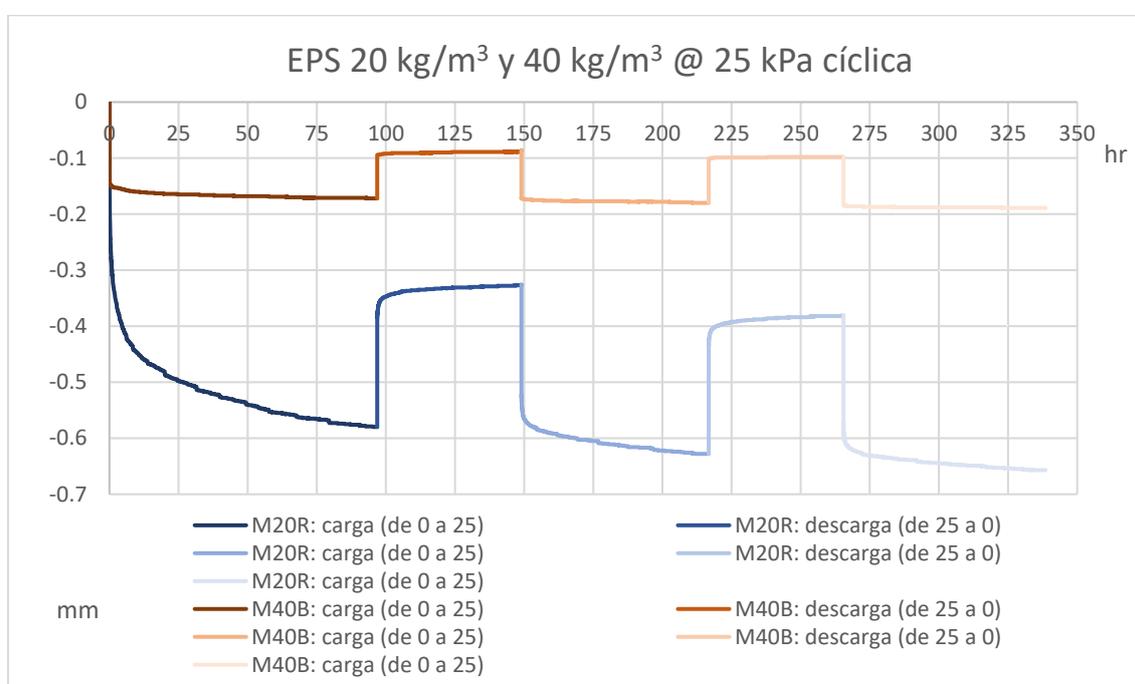


Figura 53. Comportamiento del EPS de 20 kg/m³ y 40 kg/m³ bajo ciclos de carga

A priori, se observa que el comportamiento que tiene cada muestra bajo esta tensión es distinto. Para el tiempo ensayado en cada ciclo, la muestra de EPS de 40 kg/m³ ha tenido muy poca variación entre el desplazamiento vertical inicial y final correspondiente a la carga o descarga en un ciclo determinado. Si se compara el asentamiento final de la última carga con el final de la primera, solo hay una diferencia de 0.017 mm.

Contemplando el mismo periodo de ensayo en la muestra de 20 kg/m³, no ha sucedido lo mismo. A los cuatro días de retirar la carga no se había logrado que la fluencia se estabilice, por lo que, al retirar y volver a cargar, este asentamiento seguía

incrementándose. En la etapa de descarga de cada ciclo, tampoco se había logrado una estabilización en la recuperación como sí pasó con la muestra de 40 kg/m³.

Los valores y porcentajes del desplazamiento final en cada fase de carga y descarga se presenta en las Tablas 20 y 21, para el EPS de 20 kg/m³ y 40 kg/m³, respectivamente.

EPS de 20 kg/m ³								
Etapa	Asent. instant. (mm)	Def. por asent. (%)	Asent. diferido (mm)	Def. por asent. (%)	Recup. instant. (mm)	Def. por recup. (%)	Recup. diferida (mm)	Def. por recup. (%)
1ª carga	-0.285	1.4	-0.58	2.9	-	-	-	-
1ª descarga	-	-	-0.326	1.6	0.21	36.2	0.254	43.8
2ª carga	-0.565	2.8	-0.628	3.1	-	-	-	-
2ª descarga	-	-	-0.381	1.9	0.196	31.2	0.247	39.3
3ª carga	-0.602	3.01	-0.657	3.29	-	-	-	-

Tabla 20. Análisis de resultados para la muestra de EPS 20 kg/m³ a 25 kPa cíclica

Si se observa en la tabla anterior el valor porcentual de la recuperación instantánea de la segunda descarga con el de la primera descarga, con valor de 31.2 % y 36.2 %, respectivamente, hay una diferencia porcentual de un 5 %. Esta diferencia se debe porque el cálculo se realizó tomando como referencia el asentamiento diferido hasta ese momento. Ahora bien, si comparamos gráficamente la recuperación de cada descarga, tanto la instantánea como la diferida, su comportamiento es el mismo.

EPS de 40 kg/m ³								
Etapa	Asent. instant. (mm)	Def. por asent. (%)	Asent. diferido (mm)	Def. por asent. (%)	Recup. instant. (mm)	Def. por recup. (%)	Recup. diferida (mm)	Def. por recup. (%)
1ª carga	-0.143	0.7	-0.172	0.9	-	-	-	-
1ª descarga	-	-	-0.088	0.4	0.076	44.19	0.084	48.8
2ª carga	-0.174	0.9	-0.180	0.9	-	-	-	-
2ª descarga	-	-	-0.098	0.5	0.079	43.89	0.082	45.6
3ª carga	-0.186	0.9	-0.189	0.9	-	-	-	-

Tabla 21. Análisis de resultados para la muestra de EPS 40 kg/m³ a 25 kPa cíclica

4.1.2.3. EPS de 20 kg/m³ a carga y descarga de: 25 kPa, 50 kPa y 100 kPa

En vista de los resultados anteriores con la muestra M20R de 20 kg/m³, se procedió a extender el ensayo hasta lograr una estabilización en la fluencia bajo un esfuerzo de 25 kPa. Por lo que, estuvo cargada de manera ininterrumpida durante 343 horas (14.3 días).

Esta cantidad de días no se tomó al azar. Para estas pruebas se tomó como objetivo tomar lecturas diariamente del desplazamiento vertical y que, entre un día y otro, haya una diferencia máxima de 0.002 mm. Se consideró que de esta manera se habría conseguido una estabilidad en la deformación vertical, o de no ser así, se estaría muy próximo a ello. Puede que se diera el caso que, luego de haber medido un milímetro de diferencia en 24 horas de ensayo, las muestras siguieran asentando; pero, si se hubiera tomado otro objetivo, por ejemplo, que en 48 horas haya una diferencia de 0 mm, alargaría mucho las pruebas.

El tiempo de descarga (de 25 a 0 kPa) fue de 288 horas (12 días). Luego de esto, se volvió a cargar duplicando la carga inicial, pasando a 50 kPa. El tiempo que duró cargado fue de 623 horas (26 días). La penúltima descarga (de 50 a 0 kPa) duró 169 horas (7 días).

Para terminar, se procede a cargarlo con un esfuerzo de 100 kPa. Se eligió este esfuerzo porque según la UNE-EN 826, para un EPS de 20 kg/m³ y sometido a un esfuerzo por compresión de 100 kPa, se espera una deformación de un 10 %.

La última carga tuvo una duración de 161 horas (6.7 días), mientras que la descarga (de 100 a 0 kPa), unas 78 horas.

El comportamiento de este material bajo estas condiciones de cargas y descargas se muestra en la Figura 54.

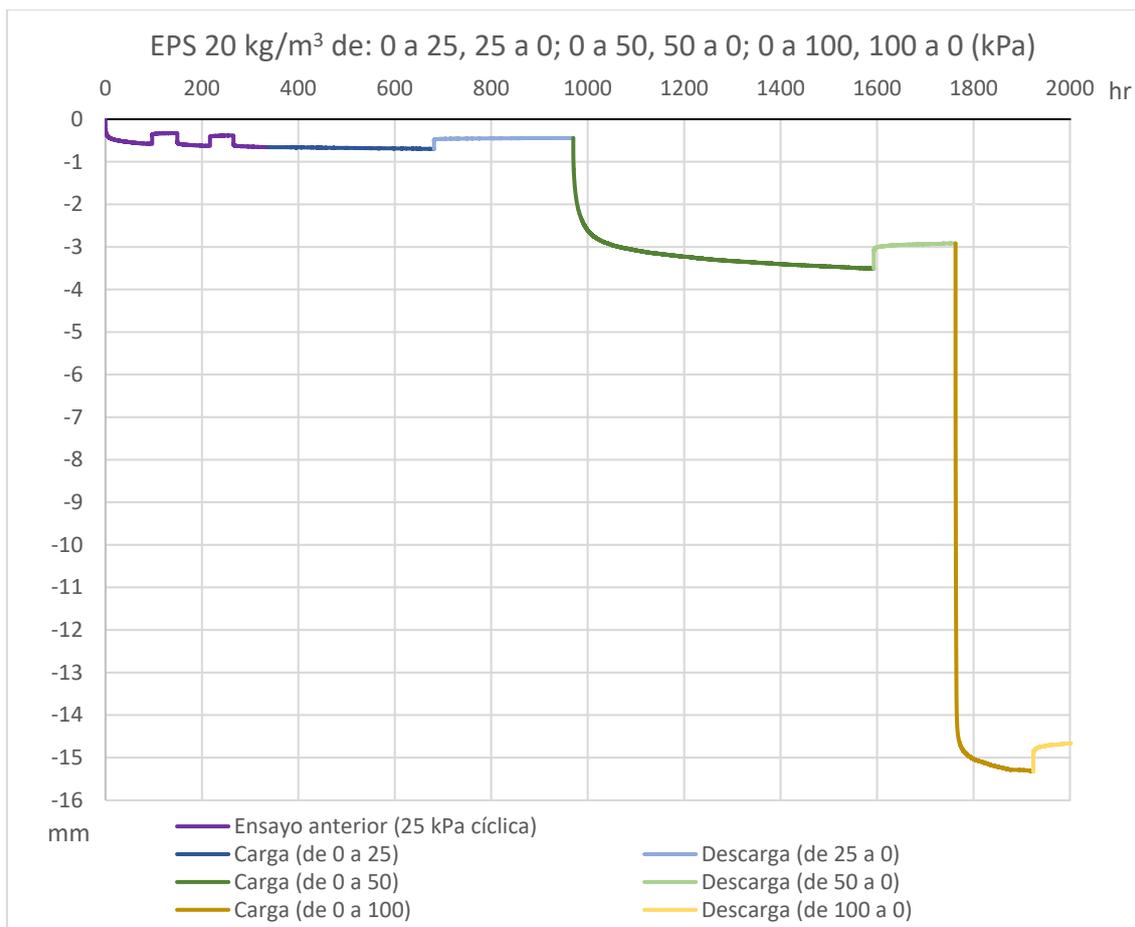


Figura 54. Comportamiento de la muestra M20R bajo distintos ciclos de carga

Lo primero que salta a la vista, al igual que en las pruebas de corta duración a 100 kPa, es la gran deformación producida cuando se le aplican los 100 kPa. Para ver qué tanto se ha deformado la muestra en cada fase, se ha elaborado la Tabla 22.

Etapa	Asent. instant. (mm)	Def. por asent. (%)	Asent. diferido (mm)	Def. por asent. (%)	Recup. instant. (mm)	Def. por recup. (%)	Recup. diferida (mm)	Def. por recup. (%)
De 0 a 25	-0.285	1.43	-0.697	3.5	-	-	-	-
De 25 a 0	-	-	-0.442	2.2	0.217	31.1	0.255	36.6
De 0 a 50	-2.448	12.2	-3.509	17.5	-	-	-	-
De 50 a 0	-	-	-2.917	14.6	0.504	14.4	0.592	16.9
De 0 a 100	-14.83	74.2	-15.32	76.6	-	-	-	-
De 100 a 0	-	-	-14.66	73.3	0.52	3.4	0.66	4.3

Tabla 22. Análisis de resultados para la muestra M20R bajo distintos ciclos de carga

La deformación máxima a 25 kPa fue de un 3.5 %. En la segunda fase se ha tenido un 17.5 %, valor que puso ser mayor, ya que, la fluencia no se había estabilizado.

Si se observa la recuperación porcentual (instantánea y total) en cada fase, se aprecia que ésta es mayor en los casos donde la carga a retirar era menor.

4.1.2.4. EPS de 20 kg/m³ a 25 kPa: muestra de referencia vs muestra nueva

Ahora se hará una comparación en el rango de los 25 kPa de la muestra anterior (M20R), la cual sufrió tres ciclos de carga y descarga a la tensión ya referida, con una nueva muestra que no ha sido sometida a ningún esfuerzo.

La muestra, cuya referencia es M20B, solo fue ensayada durante 630 horas, que es el tiempo correspondiente a la extensión de carga del ensayo anterior.

La Figura 55 muestra gráficamente el comportamiento de ambas pruebas.

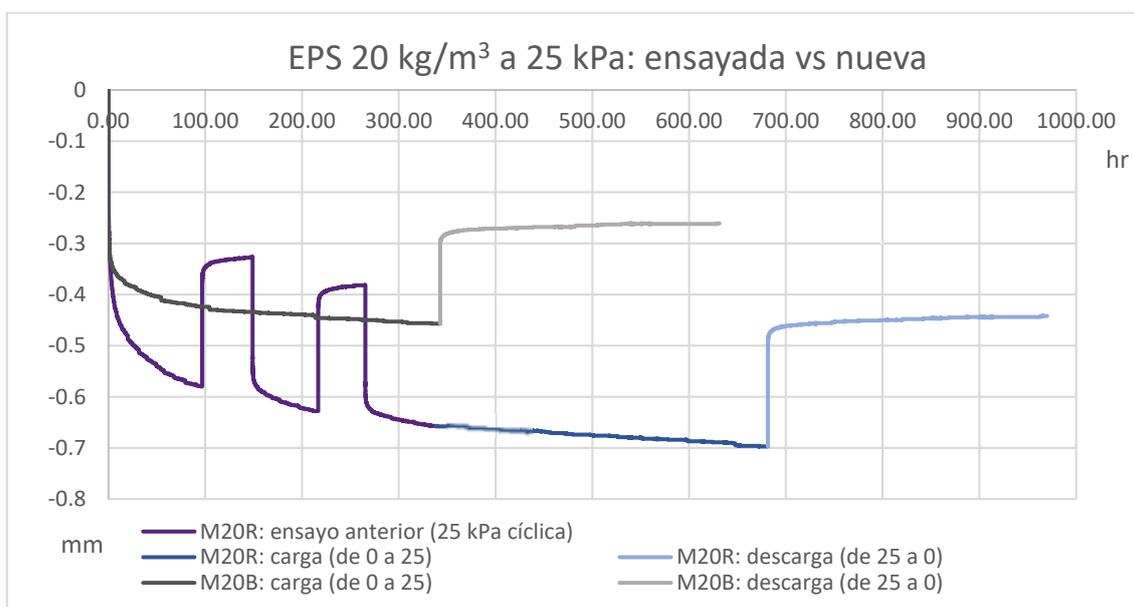


Figura 55. Comparación de M20R y M20B a 25 kPa

Tanto el asentamiento como la recuperación instantánea fue mayor en la M20R que en M20B. También, la pendiente de la deformación por fluencia también es mayor en la M20R.

Estas diferencias pudieran deberse a la densidad de cada muestra. La M20R es ligeramente menos densa, 16.81 kg/m³ en comparación con 18.33 kg/m³ de la M20B.

La comparación de cada muestra puede verse en la Tabla 23.

		M20R y M20B a 25 kPa							
	Etapa	Asent. instant. (mm)	Def. por asent. (%)	Asent. diferido (mm)	Def. por asent. (%)	Recup. instant. (mm)	Def. por recup. (%)	Recup. diferida (mm)	Def. por recup. (%)
Carga	M20R	-0.285	1.43	-0.697	3.5	-	-	-	-
	M20B	-0.300	1.5	-0.457	2.3	-	-	-	-
Desc.	M20R	-	-	-0.442	2.2	0.217	31.1	0.255	36.6
	M20B	-	-	-0.261	1.3	0.145	31.7	0.196	42.9

Tabla 23. Análisis de resultados para la muestra de EPS 20 kg/m³ a 25 kPa

Debido al comportamiento de cada muestra, lo que puede compararse casi en igualdad de condiciones es el porcentaje de la recuperación diferida. La M20R tuvo una recuperación de un 36.6 %, mientras que, la M20B fue de un 42.9 %.

Cabe recalcar que la duración de los ensayos no fue el mismo. Si tomamos esta misma condición, pero en los ensayos del apartado 4.1.1.2., el valor promedio de la recuperación diferida fue de un 43.6 %.

Siendo conservadores, se puede decir que la recuperación en una muestra de EPS de 20 kg/m³ sometida a 25 kPa está entre un 36 % a un 45 %.

4.1.2.5. EPS de 20 kg/m³ a 50 kPa: muestra de referencia vs muestra nueva

En este inciso se comparará el tramo de la muestra M20R que fue sometido a 50 kPa con una nueva, cuya referencia es M20C.

Aunque la M20R ha adquirido una leve deformación permanente debido a los tres ciclos anteriores de carga y descarga a 25 kPa, ambas muestras partirán gráficamente desde el origen, como se observa en la Figura 56.

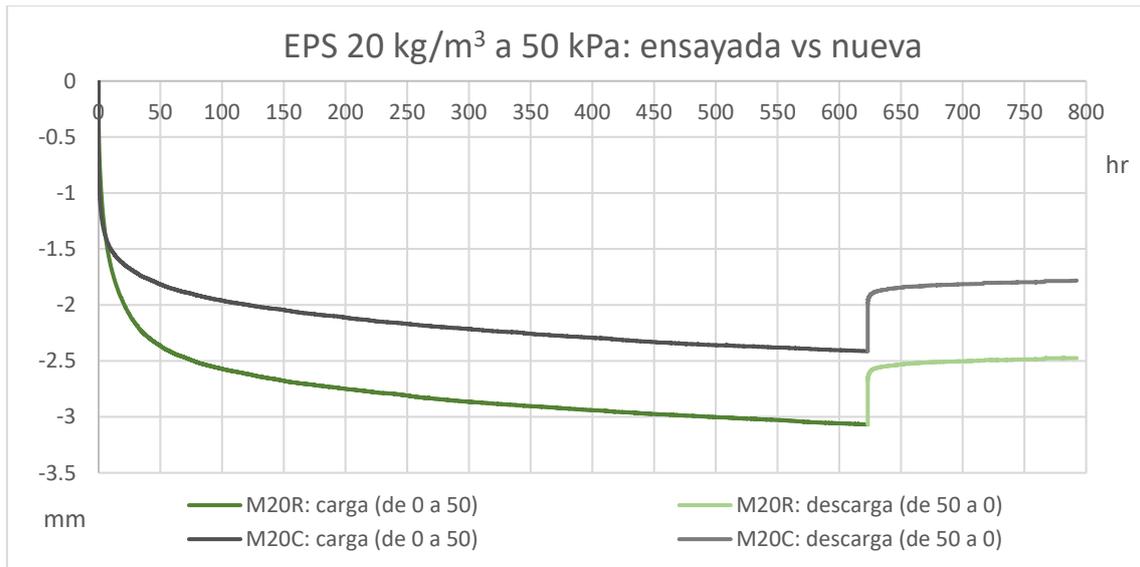


Figura 56. Comparación de M20R y M20C a 50 kPa

Se aprecia que ambas curvas tienen un comportamiento muy semejante. La diferencia es el mayor asentamiento de la M20R, que vuelve a experimentar una mayor deformación vertical respecto a la muestra nueva. Al igual que el caso anterior, la muestra con mayor asentamiento fue la menos densa, 16.81 kg/m³ vs 18.84 kg/m³.

La deformación por fluencia en ambas muestras es exactamente igual y esta no ha logrado estabilizarse tras 620 horas continuas bajo carga.

La comparación de cada muestra puede verse en la Tabla 24.

		M20R y M20C a 50 kPa							
	Etapa	Asent. instant. (mm)	Def. por asent. (%)	Asent. diferido (mm)	Def. por asent. (%)	Recup. instant. (mm)	Def. por recup. (%)	Recup. diferida (mm)	Def. por recup. (%)
Carga	M20R	- 2.448	12.2	- 3.509	17.5	-	-	-	-
	M20C	- 1.12	5.6	- 2.413	12.1	-	-	-	-
Desc.	M20R	-	-	- 2.917	14.6	0.504	14.4	0.592	16.9
	M20C	-	-	- 1.782	8.9	0.442	18.3	0.631	25.5

Tabla 24. Análisis de resultados para la muestra de EPS 20 kg/m³ a 25 kPa

Llama la atención cómo para una tensión de 50 kPa, la deformación por compresión supera el 10 % de lo citado en la Norma UNE-EN 826 en ambas muestras.

La recuperación de ambas estuvo entre un 17 % y un 26 %.

4.1.2.6. EPS de 20 kg/m³ a 100 kPa: muestra de referencia vs muestra nueva

Del mismo modo que los dos ensayos anteriores, aquí se comparará la muestra M20R con una nueva (M20K), pero a 100 kPa. La Figura 57 muestra gráficamente el comportamiento de ambas pruebas.

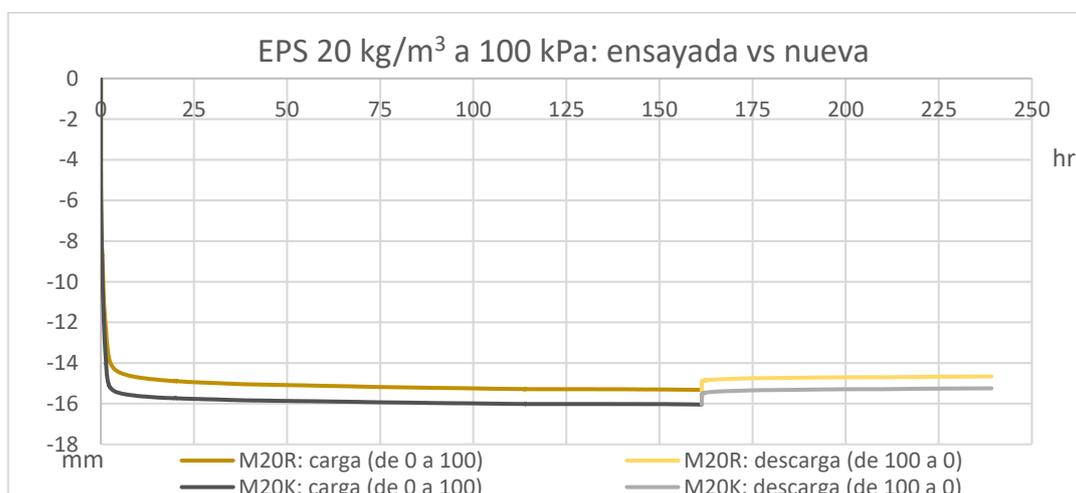


Figura 57. Comparación de M20R y M20K a 100 kPa

El comportamiento observado es prácticamente idéntico en ambas muestras. El asentamiento de la M20K fue ligeramente superior al de la M20R y se corresponde si observa su, 16.04 kg/m³ vs 16.81 kg/m³.

La comparación de cada muestra puede verse en la Tabla 25.

		M20R y M20K a 100 kPa							
	Etapa	Asent. instant. (mm)	Def. por asent. (%)	Asent. diferido (mm)	Def. por asent. (%)	Recup. instant. (mm)	Def. por recup. (%)	Recup. diferida (mm)	Def. por recup. (%)
Carga	M20R	-14.83	74.2	-15.32	76.6	-	-	-	-
	M20K	-15.01	75.0	-16.04	80.2	-	-	-	-
Desc.	M20R	-	-	-14.66	73.3	0.520	3.4	0.660	4.3
	M20K	-	-	-15.25	76.2	0.487	3.0	0.798	5.0

Tabla 25. Análisis de resultados para la muestra de EPS 20 kg/m³ a 100 kPa

La deformación máxima de cada muestra supera el 75 % y, al momento de descargar, solo hay una recuperación entre un 4 – 5 %.

Considerando las pruebas de corta duración a 100 kPa y estas dos muestras a la misma carga, este EPS ha tenido una deformación excesiva. Por consiguiente, este material ha fallado.

4.1.2.7. Resumen

A diferencias de los ensayos de corta duración, donde no se pudo verificar que las muestras de menor densidad tuvieran mayor deformación, en estas pruebas de larga duración, sí ha ocurrido.

La Figura 58 refleja que no se pudo conseguir que la deformación se estabilizara en las muestras de EPS de 20 kg/m³ ensayadas a 25 kPa y 50 kPa, a pesar de que cada ensayo tuvo una duración de más de 620 horas bajo carga.

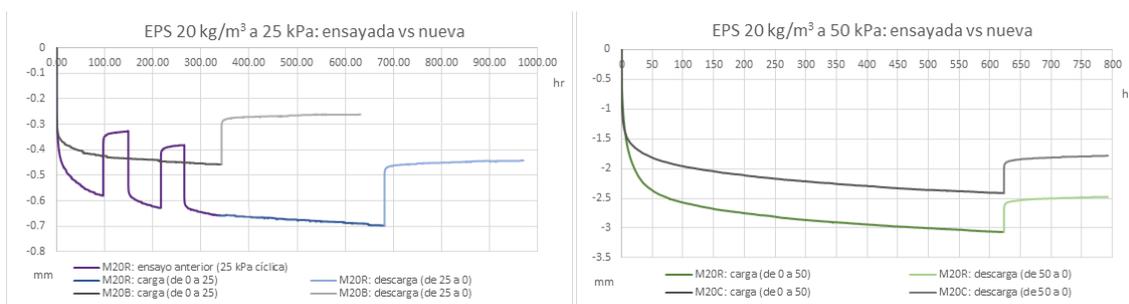


Figura 58. Comparación entre muestras a 25 kPa y 100 kPa

La deformación en ambos casos supera el 1 % y según Horvath (2010) las deformaciones mayores a este porcentaje se incrementan con el tiempo debido a la fluencia y por debajo del 1 % se encuentran en el rango elástico.

Si se observa la gráfica esfuerzo-deformación en pruebas de creep de Horvath (2010) en una muestra de EPS de 23.5 kg/m³ (Figura 59), el material tiene fluencia aún pasadas 1000 horas.

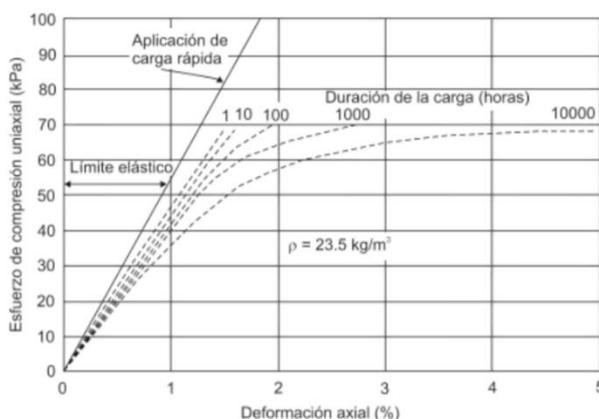


Figura 59. Comportamiento esfuerzo-deformación en pruebas de creep (Horvath, 2010)

4.2. Resultados de ensayos a compresión simple

Las ocho muestras cúbicas descritas en la Tabla 10, 4 de 20 kg/m^3 y 4 de 40 kg/m^3 , que fueron ensayadas a compresión simple y de las cuales surgirán los resultados del coeficiente de Poisson y el módulo de Young, estuvieron sometidas a una velocidad vertical de desplazamiento constante. Por lo que, la fuerza varía en función de la resistencia que le presenta la muestra para poder cumplir con la velocidad de desplazamiento asignada.

En la Figura 60 se observan las muestras mientras eran ensayadas a compresión simple.



Figura 60. Las ocho muestras cúbicas ensayadas a compresión simple

Los ensayos correspondientes al coeficiente de Poisson serán presentados en los apartados 4.2.1. y 4.2.2. para las densidades de 20 kg/m^3 y 40 kg/m^3 , respectivamente. Los del módulo de Young en los apartados 4.2.3 y 4.2.4., en el mismo orden de las densidades descritas anteriormente.

4.2.1. Coeficiente de Poisson en EPS de 20 kg/m^3

Estas muestras se ensayaron con posterioridad a las de 40 kg/m^3 . La razón de la explicación se debe a que, en las muestras de menor densidad, la punta del medidor de los transductores penetraba levemente. Por tal razón, se decidió en la última muestra (la M206) utilizar unas pequeñas láminas de plástico para distribuir el área de la punta de los transductores.

El comportamiento de cada muestra se presenta en la Figura 61.

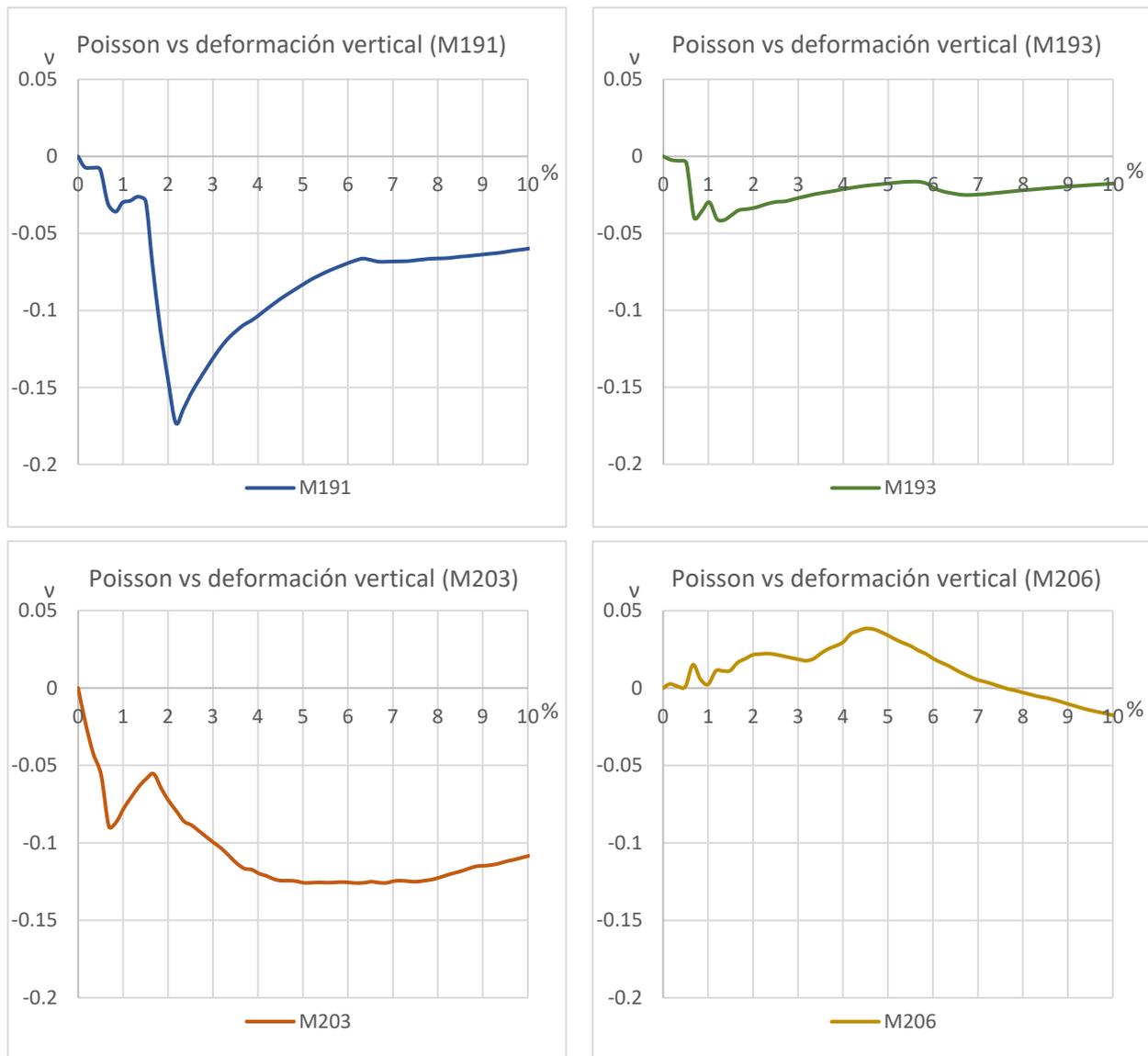


Figura 61. Coeficiente de Poisson de las muestras M de EPS 20 kg/m³

El comportamiento de cada muestra es totalmente distinto. Obviando la M206, las tres anteriores se mantuvieron con valores de Poisson negativos.

Aproximadamente entre el 0 y 5 % de la deformación vertical es donde mayor variación ha tenido la deformación transversal. Por ello, el coeficiente de Poisson ha tenido grandes fluctuaciones y picos durante este rango. A partir del intervalo mencionado, estas variaciones son mínimas, tendiendo a estabilizarse.

Las anteriores gráficas ahora serán contrastadas con las del coeficiente de Poisson relativo para ver si el cambio observado anteriormente se corresponde con el del estado anterior.

M191:

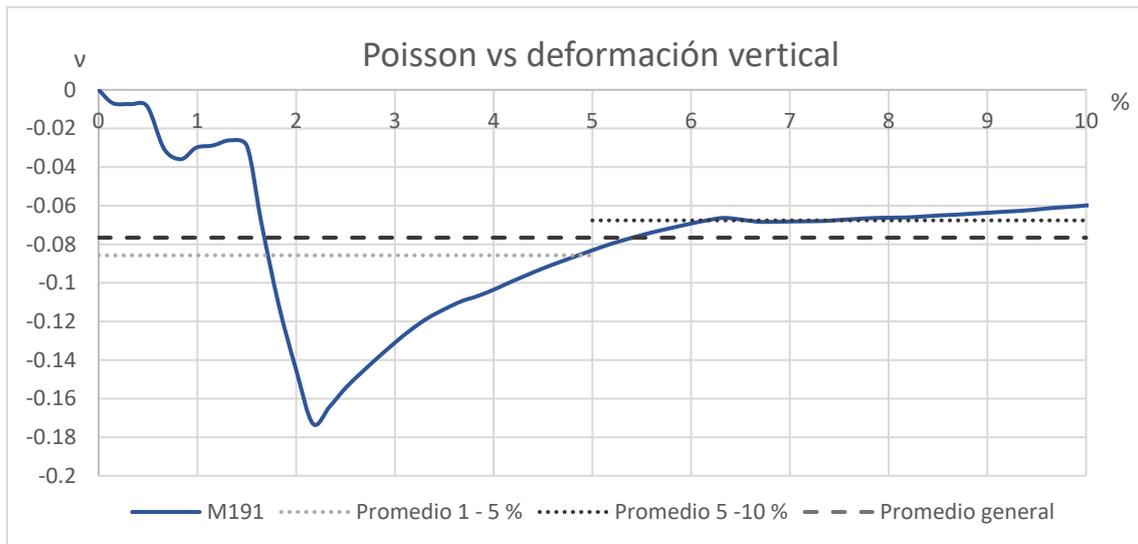


Figura 62. Coeficiente de Poisson y su promedio para la muestra M191



Figura 63. Coeficiente de Poisson relativo para la muestra M191

M193:

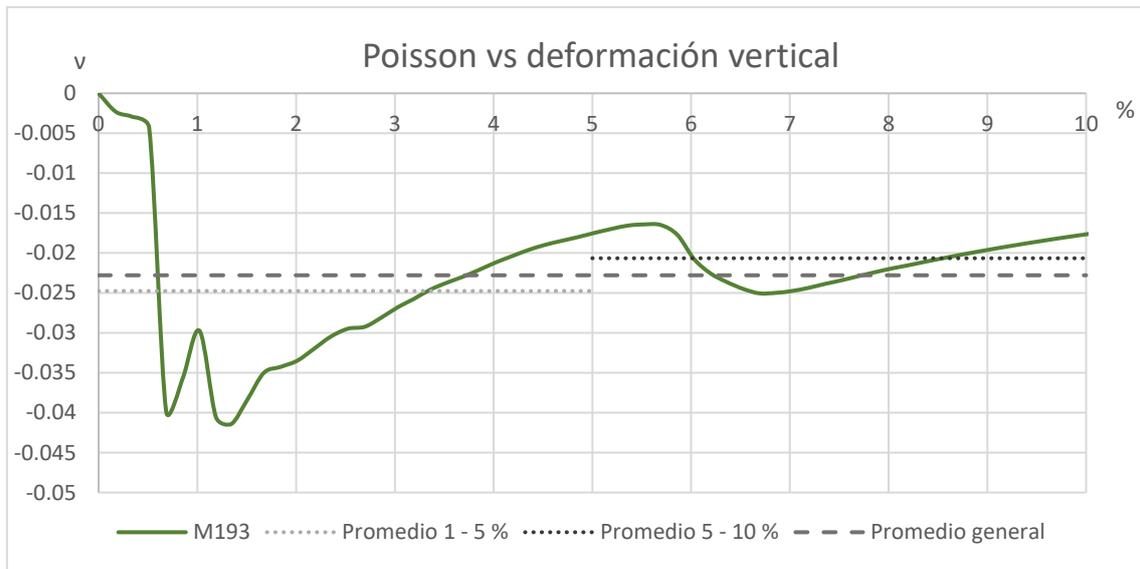


Figura 64. Coeficiente de Poisson y su promedio para la muestra M193

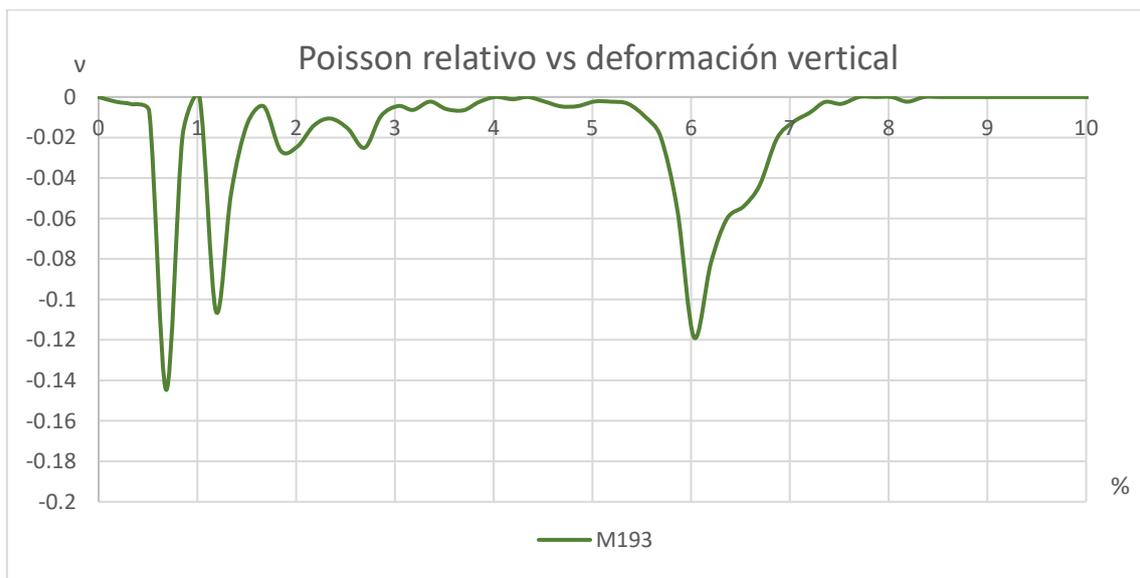


Figura 65. Coeficiente de Poisson relativo para la muestra M193

M203:

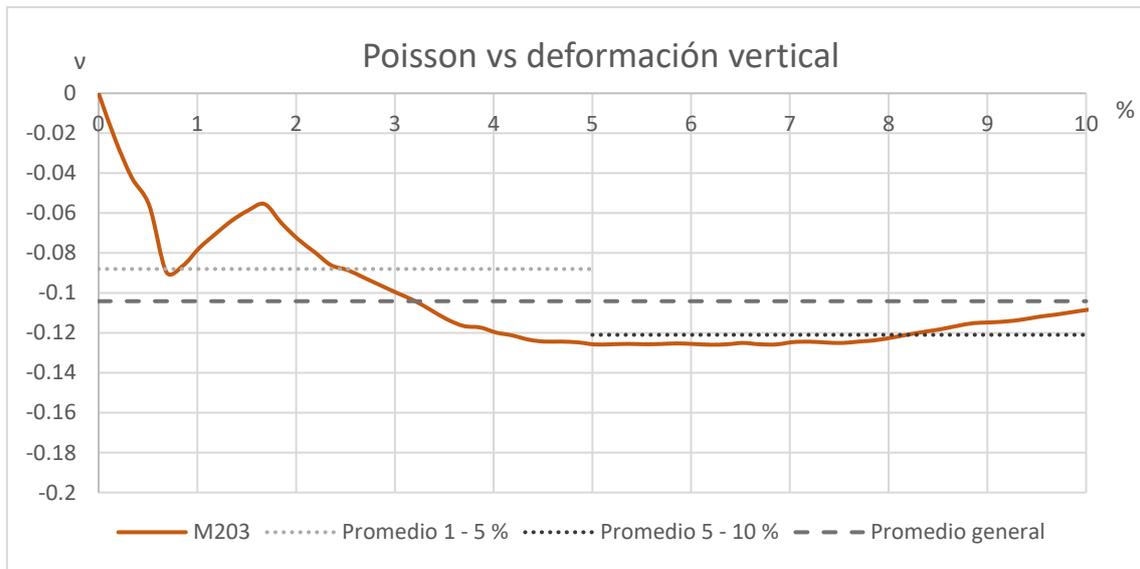


Figura 66. Coeficiente de Poisson y su promedio para la muestra M203

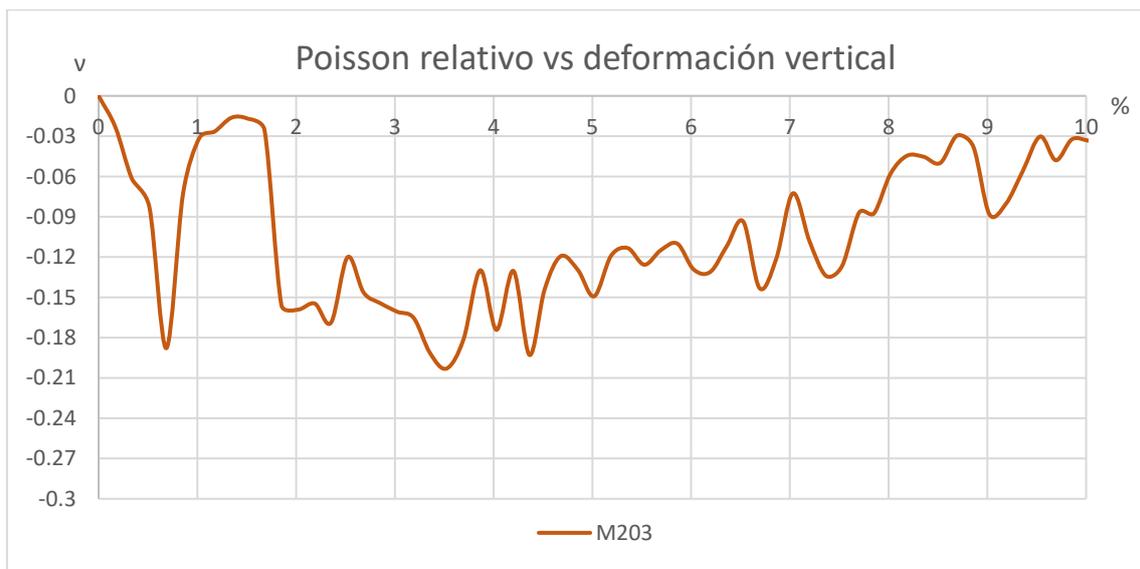


Figura 67. Coeficiente de Poisson relativo para la muestra M203

M206:

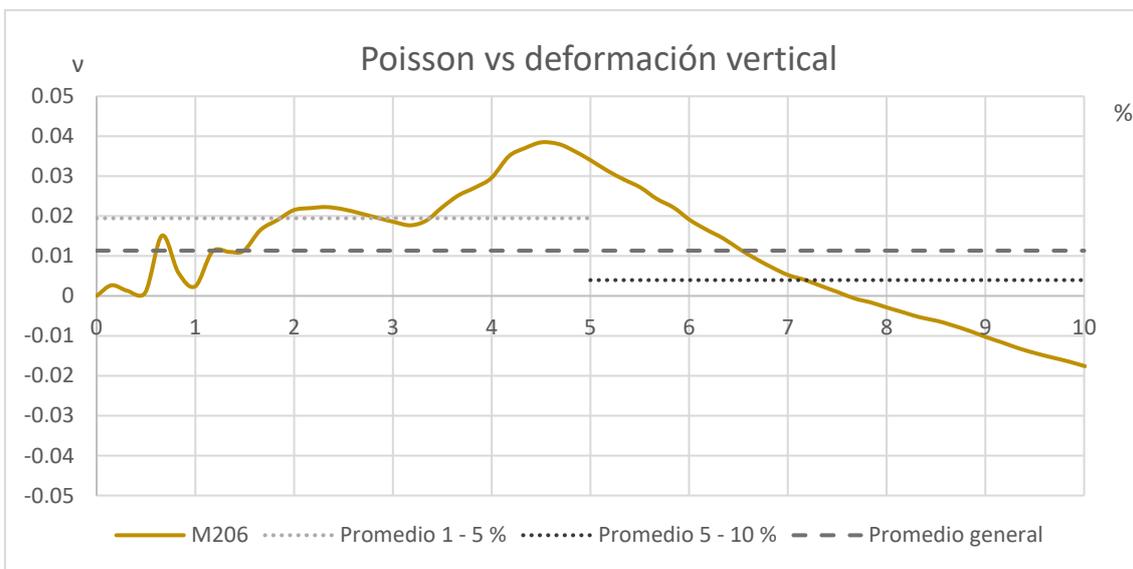


Figura 68. Coeficiente de Poisson y su promedio para la muestra M206

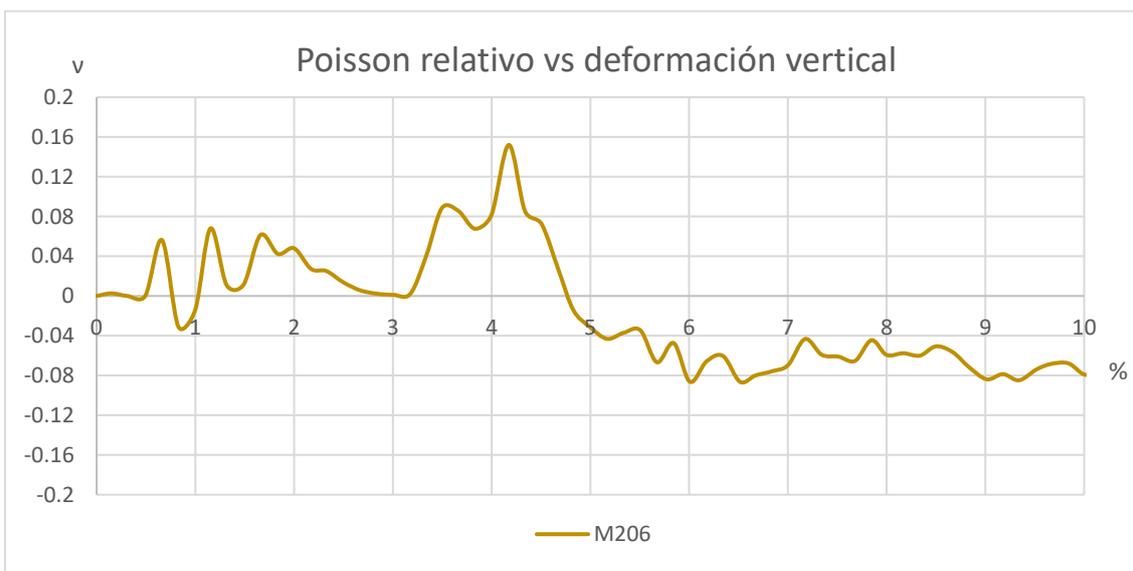


Figura 69. Coeficiente de Poisson relativo para la muestra M206

Guardando las diferencias, el comportamiento de las gráficas de Poisson relativo tienen cierto parecido a las gráficas de origen. Algunos de estos parecidos son determinados picos y cambios de pendientes, aunque no coincidan con el mismo valor.

Anteriormente se dijo que, aproximadamente, entre el 0 y 5 % de la deformación vertical era cuando más se deformaba transversalmente. Viendo las gráficas del Poisson relativo de cada muestra y comparando el último intervalo (5 al 10 %) con el anterior, las fluctuaciones y picos son menores.

Se esperaba que, al calcular y graficar el coeficiente de Poisson de las dos formas, el resultado fuera muy parecido; ya que, un pequeño incremento en la deformación vertical respecto a dicha deformación previa, también le correspondería un pequeño incremento o decremento en la deformación transversal. Pero al no ser un material elástico-lineal no ha ocurrido así. Se ve en algunos casos como el Poisson relativo es secuencialmente cero.

El comportamiento promedio de las cuatro muestras se refleja en la Figura 70.

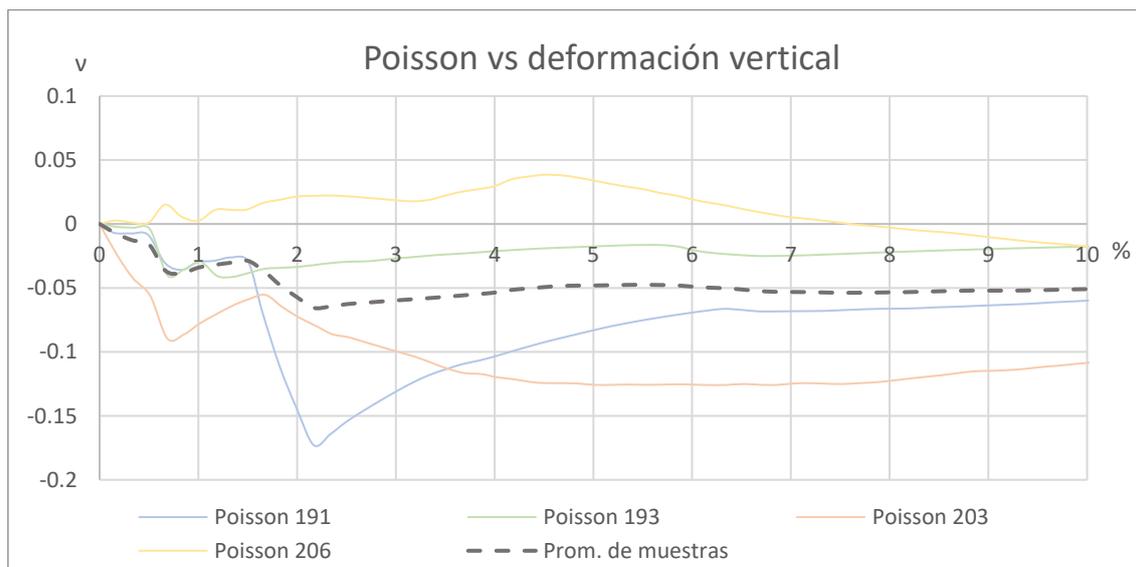


Figura 70. Coeficiente de Poisson promedio de las muestras M de EPS 20 kg/m³

Para dar un valor o rango de valores al coeficiente de Poisson en estas muestras de 20 kg/m³, se contemplará algunos puntos. El primero es que se descarta la posibilidad de que sea negativo a pesar de obtenerlo en tres pruebas. Suponemos que la porción que penetraba el sensor de los transductores a las muestras, se correspondía con la deformación debida al hinchamiento. El segundo punto es que se le dará mayor veracidad a la muestra que fue ensayada con las pequeñas láminas de plástico (M206).

Considerando lo anterior, el coeficiente de Poisson para este EPS de 20 kg/m³ está entre **0.01 – 0.04**.

4.2.2. Coeficiente de Poisson en EPS de 40 kg/m³

Debido a la mayor densidad de las muestras, el sensor de desplazamiento de los transductores no penetraba las muestras. El comportamiento de cada muestra es presentado en la Figura 71.

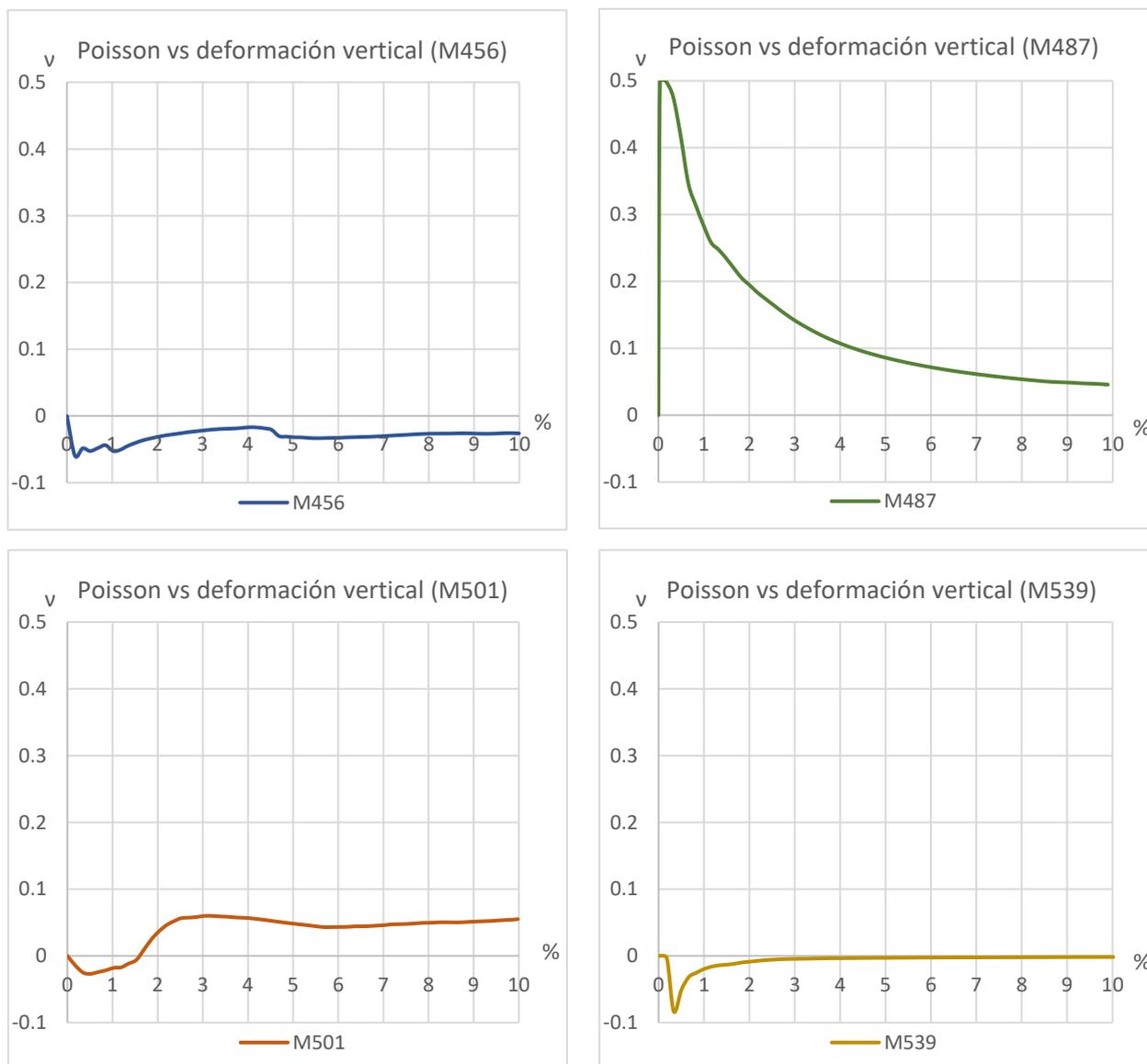


Figura 71. Coeficiente de Poisson de las muestras M de EPS 40 kg/m³

Vuelve a suceder que cada muestra presenta un comportamiento distinto. Obviando esto, se podría intuir que la M456 y la M539 tienen cierta semejanza. En ambas, el coeficiente de Poisson desciende bruscamente hasta un mínimo absoluto antes de llegar al 1 % de la deformación. Luego, las gráficas se van recuperando y se tornan más o menos estables.

Caso contrario sucede con la M487. Esta parte desde un máximo absoluto y describe un comportamiento asintótico.

Para seguir con la temática anterior, estas gráficas se contrastarán con las del coeficiente de Poisson relativo para ver si el cambio observado anteriormente se corresponde con el del estado anterior.

M456:

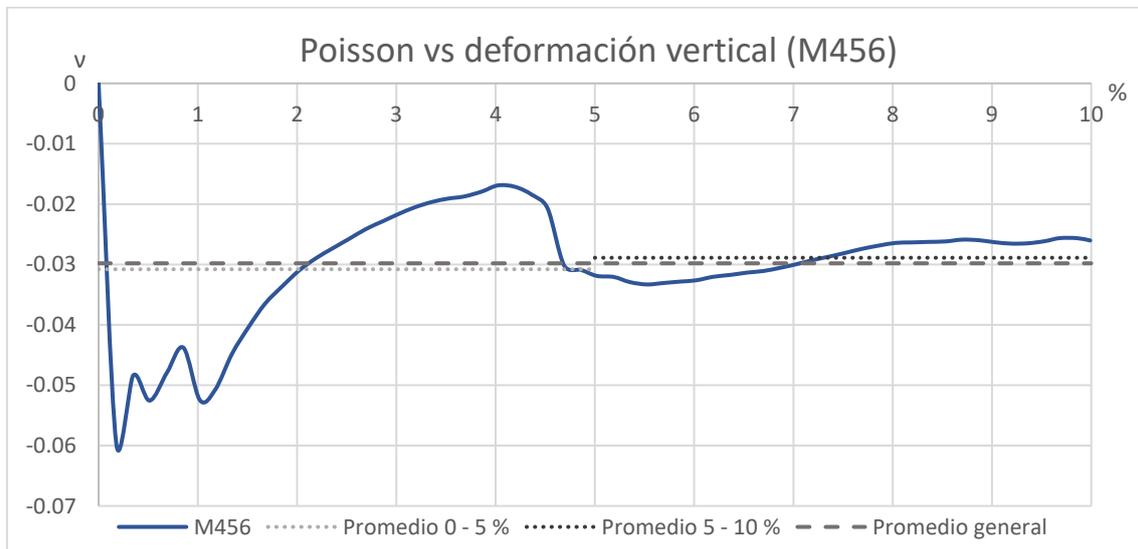


Figura 72. Coeficiente de Poisson y su promedio para la muestra M456

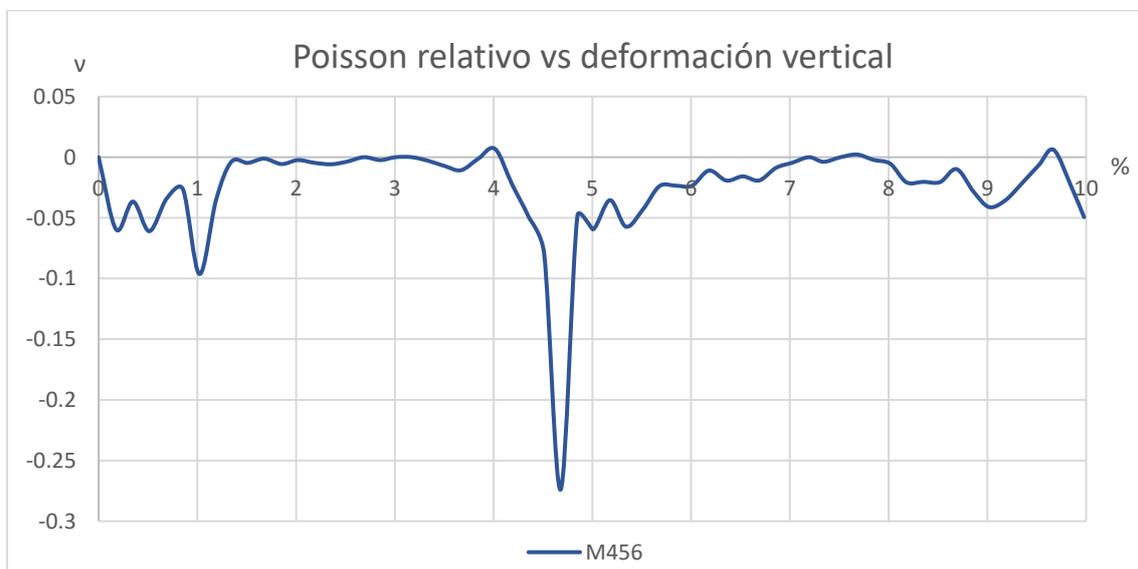


Figura 73. Coeficiente de Poisson relativo para la muestra M456

M487:

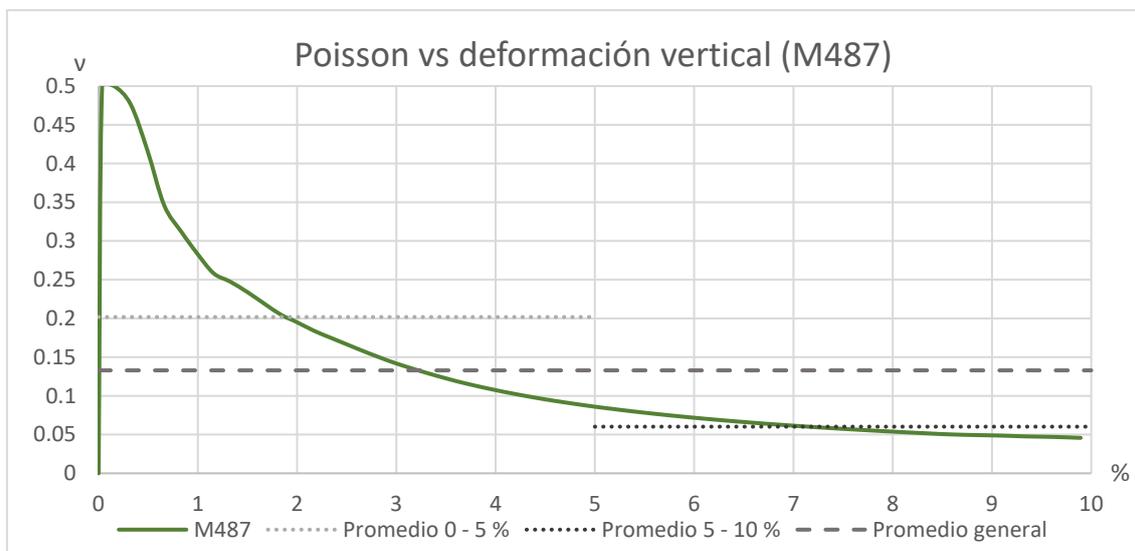


Figura 74. Coeficiente de Poisson y su promedio para la muestra M487



Figura 75. Coeficiente de Poisson relativo para la muestra M487

M501:

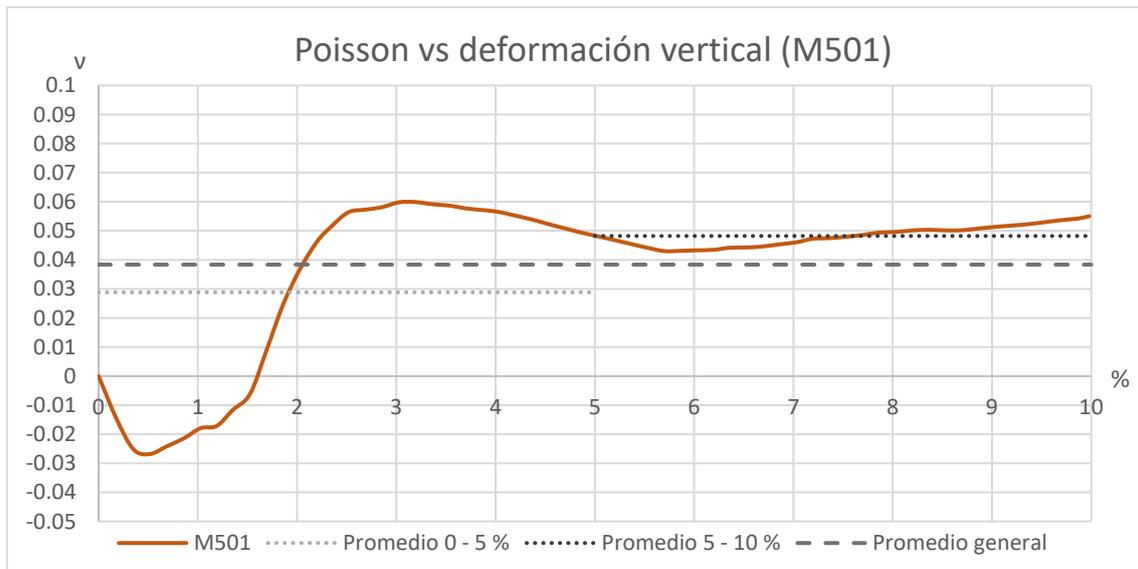


Figura 76. Coeficiente de Poisson y su promedio para la muestra M501

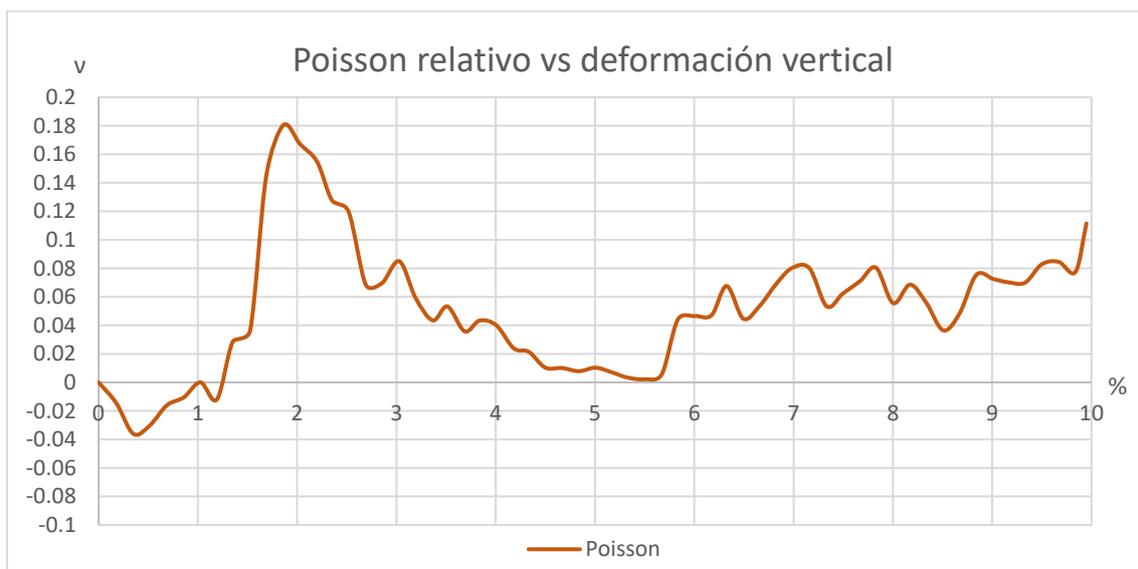


Figura 77. Coeficiente de Poisson relativo para la muestra M501

M539:

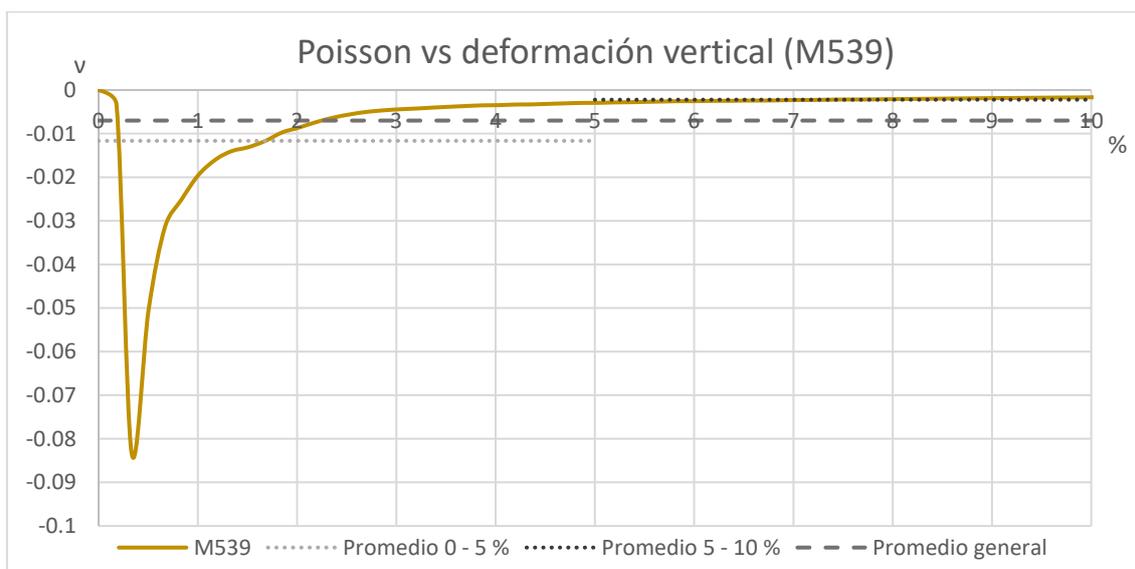


Figura 78. Coeficiente de Poisson y su promedio para la muestra M539

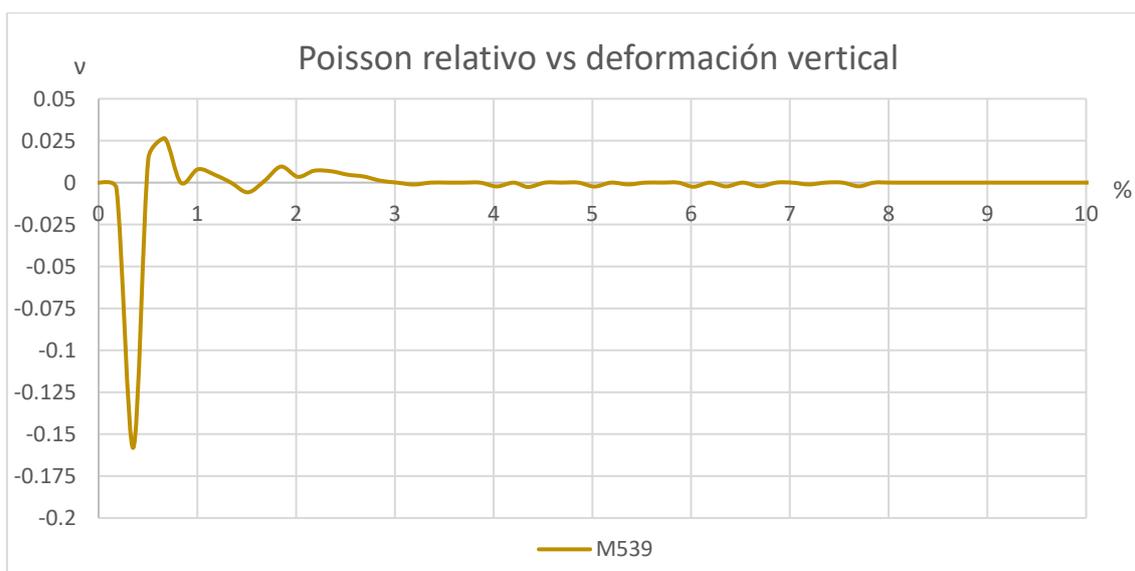


Figura 79. Coeficiente de Poisson relativo para la muestra M539

Observando las gráficas, acontece lo mismo que con las muestras de 20 kg/m^3 , el comportamiento gráfico de las de Poisson relativo se corresponde con las de origen. También ocurre que, al principio es cuando más el material se deforma lateralmente, pero luego esta deformación es mínima o prácticamente nula en algunos casos.

De ocho muestras analizadas, en seis de ellas el coeficiente de Poisson en términos absoluto dio mayor antes del 3 % de la deformación vertical.

El comportamiento promedio de las cuatro muestras se refleja en la Figura 80.

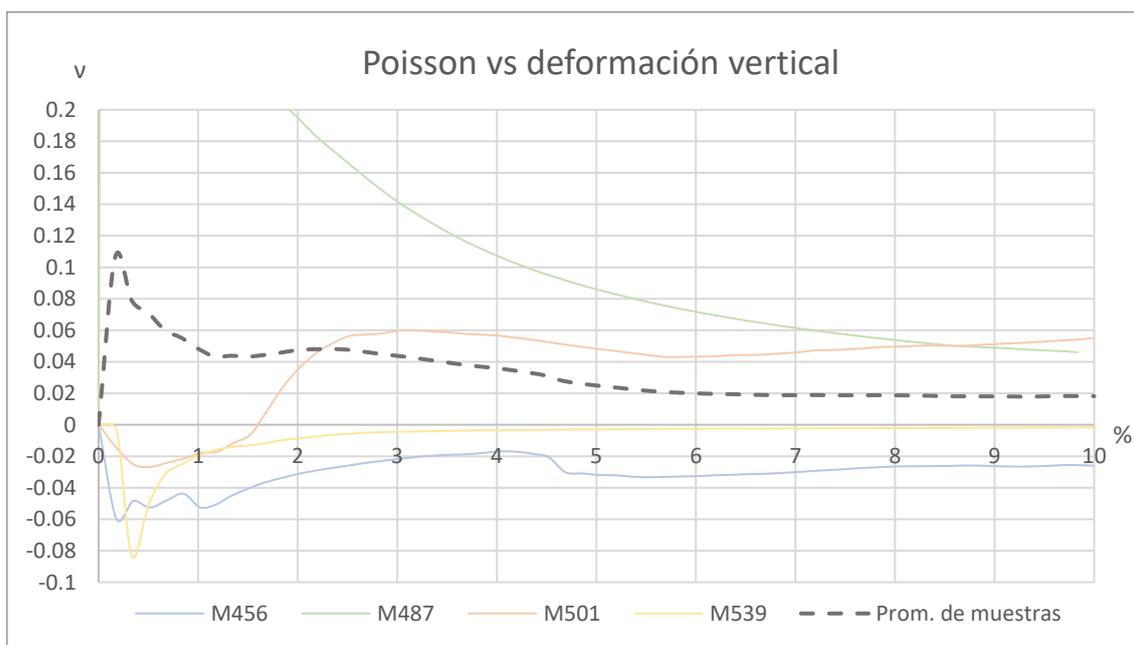


Figura 80. Coeficiente de Poisson promedio de las muestras M de EPS 40 kg/m³

La gráfica promedio está muy influenciada por la muestra M487. Si obviamos esta muestra que, como se aprecia, tiene unos valores muy altos y un comportamiento distinto a las demás, tenemos:

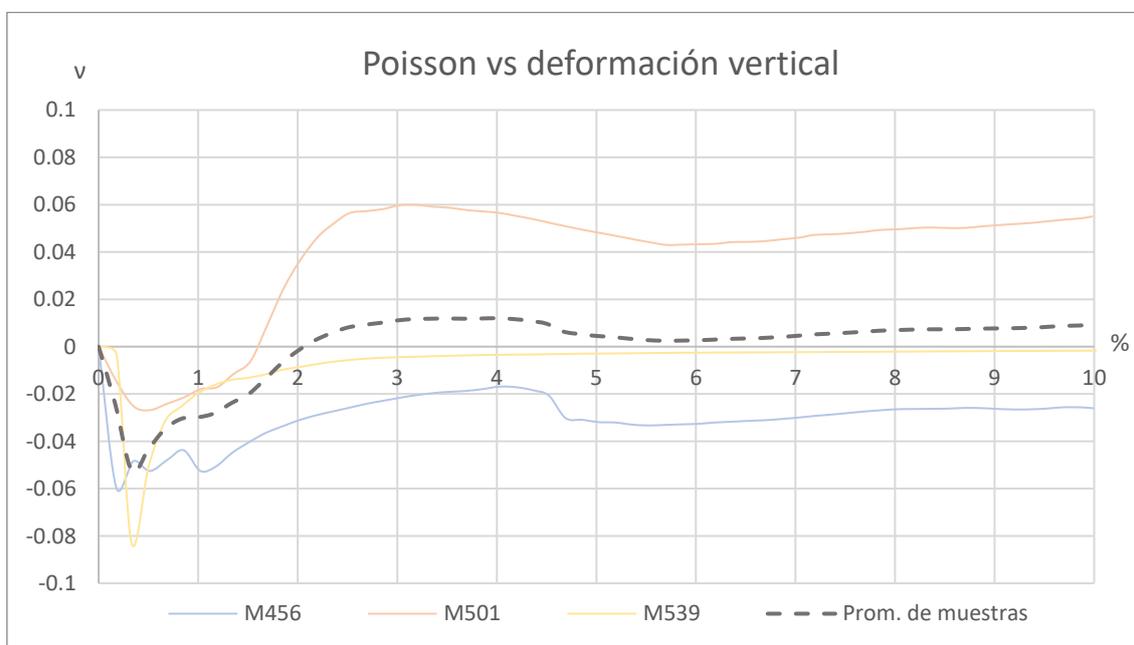


Figura 81. Coeficiente de Poisson promedio de tres muestras M de EPS 40 kg/m³

Las gráficas M456, M501 y M539 tienen un mínimo absoluto en el coeficiente de Poisson al comienzo de la deformación vertical (antes del 0.5 %), y si asumimos que esto fue porque los transductores se estaban acomodando a las muestras, entonces, se puede restar el desplazamiento de esta deformación para que actúe como un nuevo cero y ver así la evolución de estas gráficas. De acuerdo a lo anterior, se tiene:

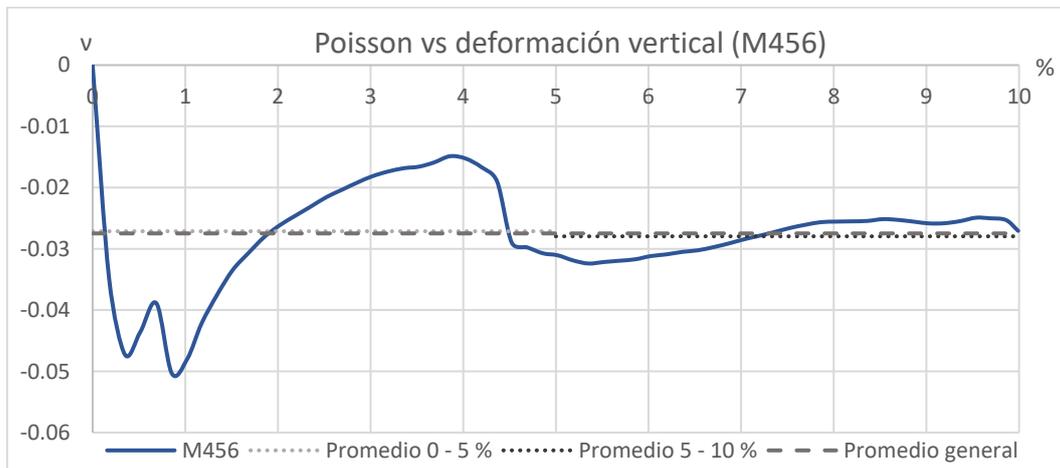


Figura 82. Coeficiente de Poisson mejorado y su promedio para la muestra M456

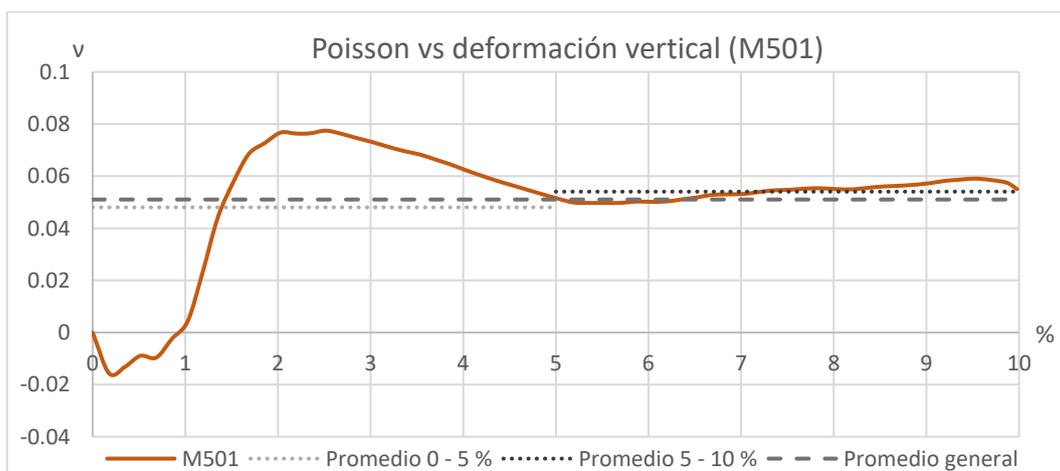


Figura 83. Coeficiente de Poisson mejorado y su promedio para la muestra M501

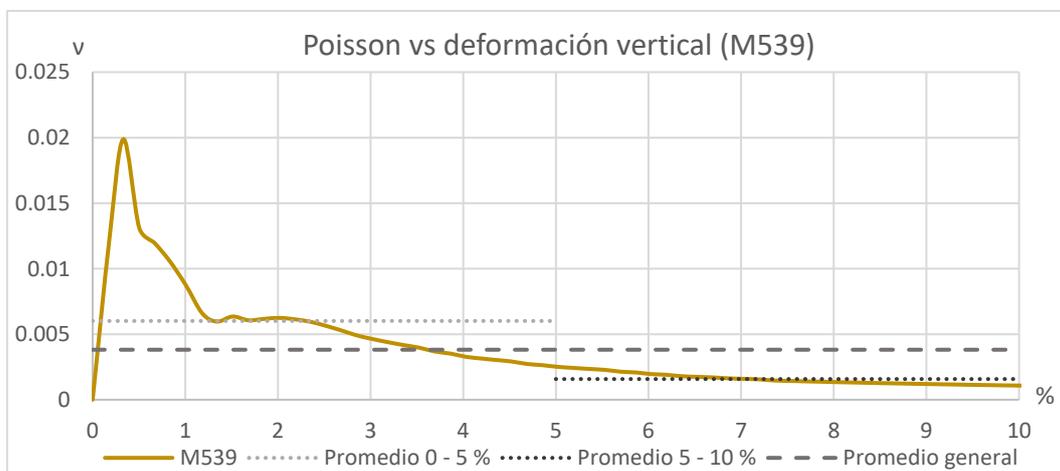


Figura 84. Coeficiente de Poisson mejorado y su promedio para la muestra M539

El comportamiento de las dos primeras gráficas es muy similar al original. El de la tercera (M539) es que cambia notablemente. El valor mínimo en la M456 pasó de -0.06 a -0.05 y el máximo de -0.017 a -0.015 ; en la M501, el mínimo de -0.027 a -0.016 ; y en la M539, de -0.083 a 0.001 en el mínimo y de -0.002 a 0.02 en el máximo.

El nuevo promedio de las gráficas anteriores es el siguiente:

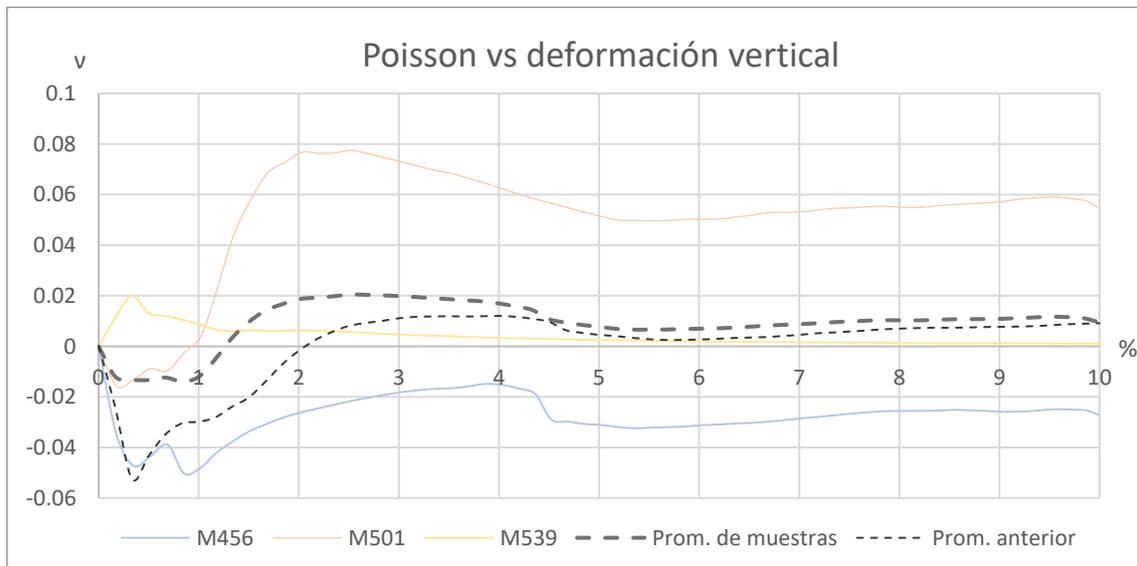


Figura 85. Coeficiente de Poisson mejorado promedio de tres muestras M de EPS 40 kg/m^3

En estas muestras, el sensor de los transductores no penetraba o casi no tanto a las muestras como en el anterior caso. Se aprecia en que luego de la corrección, de tres ensayos, solo en uno es negativo. Para asignar un rango en esta densidad, se tendrá en cuenta los valores obtenidos en la M501 y en el promedio de muestras.

Por lo tanto, el coeficiente de Poisson para este EPS de 40 kg/m^3 está entre **0.02 – 0.07**.

4.2.3. Módulo de Young en EPS de 20 kg/m³

a) Esfuerzo vs deformación

Los datos para calcular el módulo de elasticidad fueron proporcionados únicamente por la máquina multiensayo a través del software SCM3000 de Microtest. Por lo que, no se necesitó de la sincronización de otro dispositivo como en el caso anterior. Por consiguiente, se espera una mayor constancia y fiabilidad en los resultados.

El comportamiento de cada muestra es mostrado en la Figura 86.

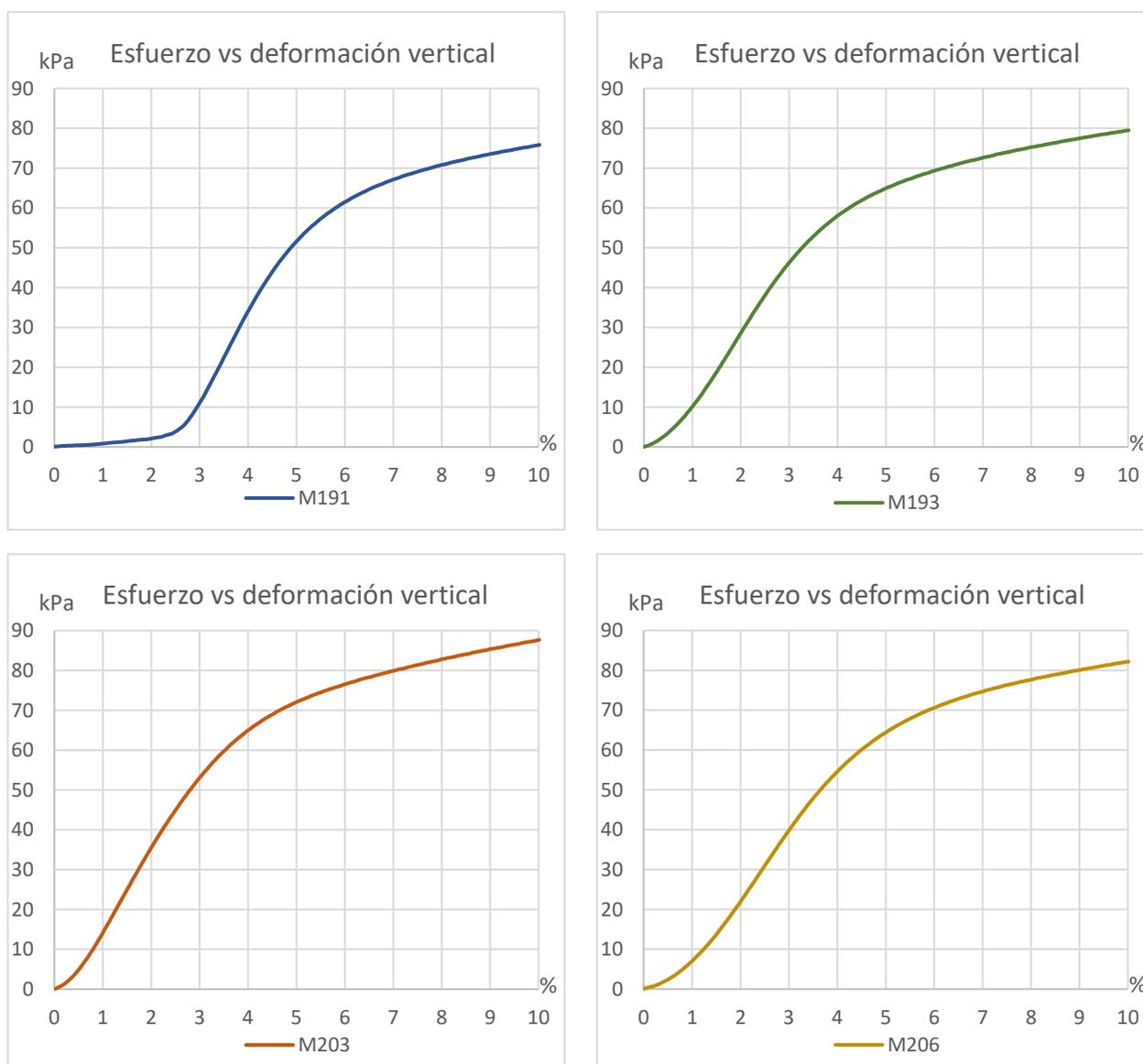


Figura 86. Esfuerzo-deformación de las muestras M de EPS 20 kg/m³

El comportamiento en todos los casos fue el mismo, con ligeras excepciones al inicio de la deformación de la muestra M191. El valor del esfuerzo al cabo del 10 % de la deformación estuvo entre 75.8 kPa a 87.7 kPa.

La resultante de las muestras anteriores se presenta en la Figura 87. Con esta es que se calculará el módulo de Young.

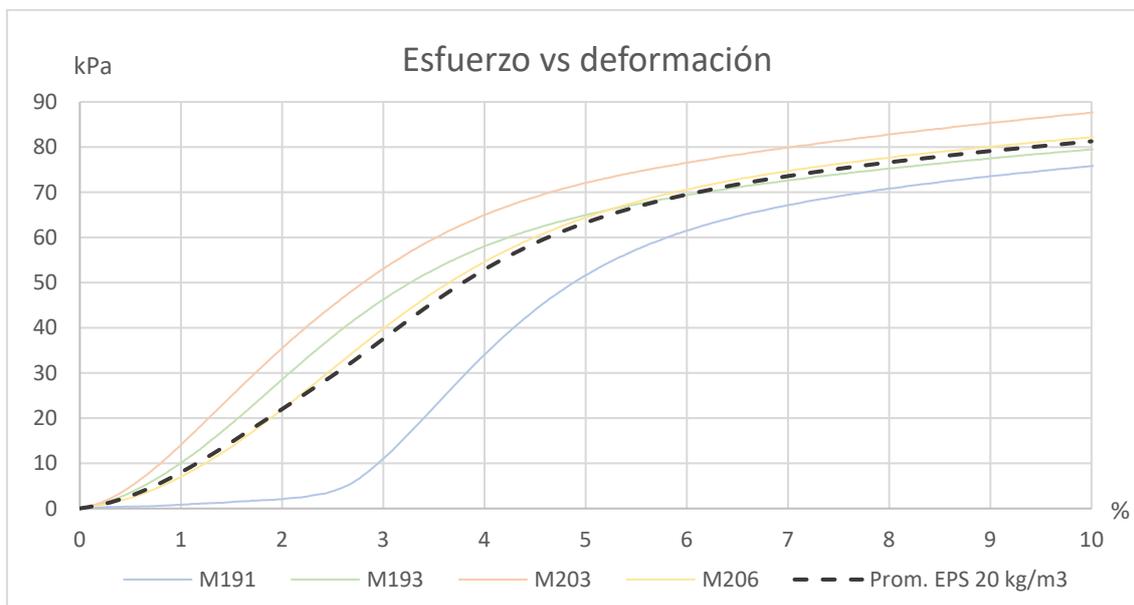


Figura 87. Módulo de Young promedio de muestras M de EPS 20 kg/m³

La leve curvatura que presentan en las gráficas antes del 1 % de la deformación pudiera deberse al acoplamiento entre el pistón de la máquina multiensayo y las muestras de EPS.

La Tabla 26 muestra el esfuerzo de compresión uniaxial obtenido al 2.5 %, 5 % y 10 % de la deformación vertical.

Dens. teor. (kg/m ³)	Dens. prom. (kg/m ³)	Esfuerzo de compresión uniaxial		
		2.5 % (kPa)	5 % (kPa)	10 % (kPa)
20	15.86	29.46	63.26	81.27

Tabla 26. Datos del esfuerzo de compresión uniaxial en EPS de 20 kg/m³

La variación del esfuerzo de cada muestra considerando su estado anterior es el siguiente:

M191:

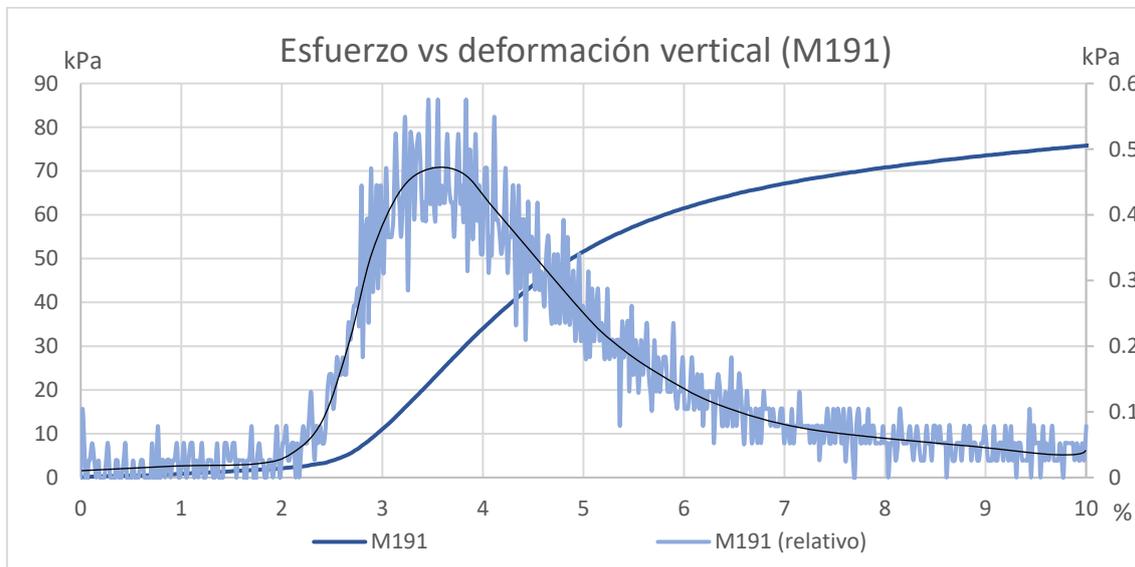


Figura 88. Esfuerzo-deformación para la muestra M191

M193:

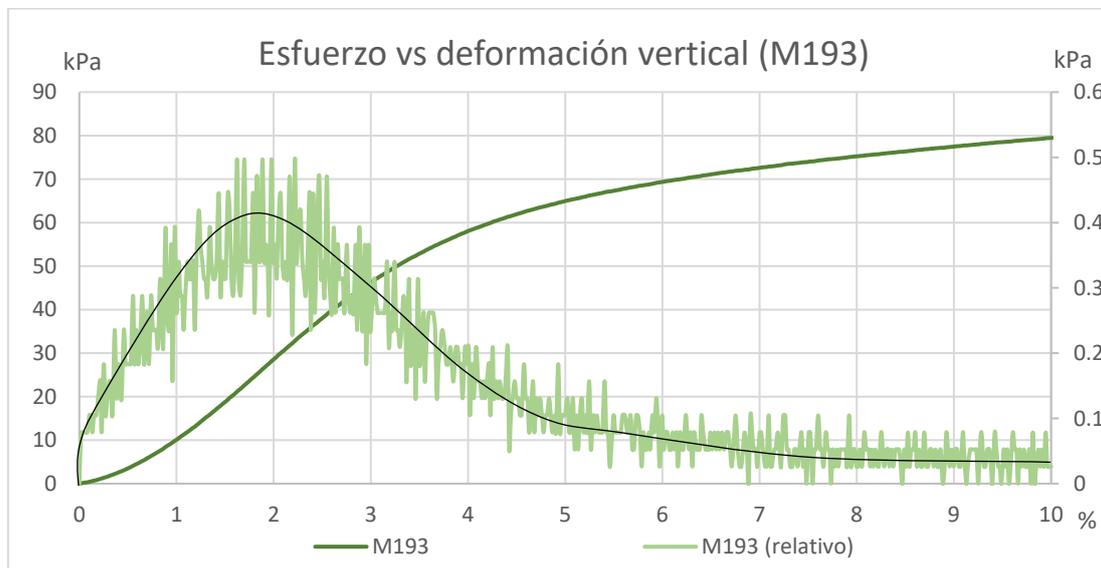


Figura 89. Esfuerzo-deformación para la muestra M193

M203:

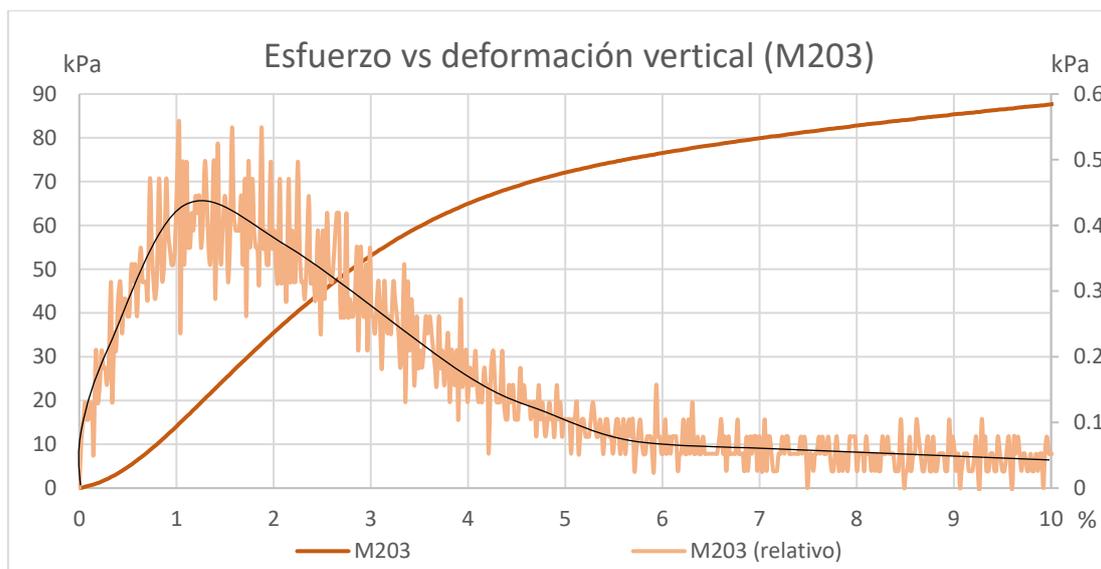


Figura 90. Esfuerzo-deformación para la muestra M203

M206:

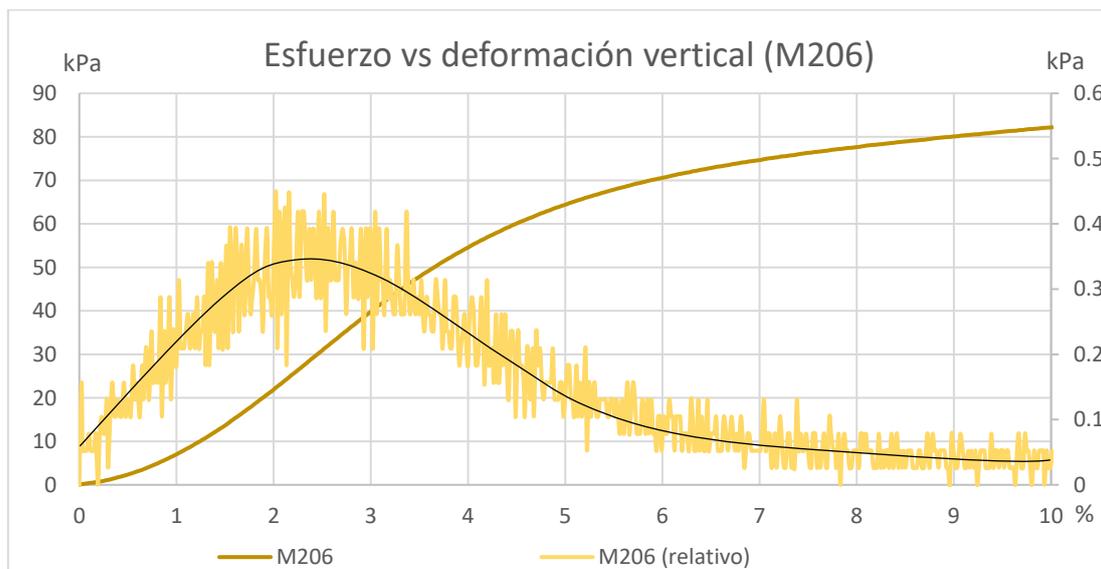


Figura 91. Esfuerzo-deformación para la muestra M206

El resultado arrojado en cada muestra del esfuerzo relativo concuerda con su respectiva gráfica esfuerzo-deformación. Los picos visualizados en estas gráficas, corresponden a lo explicado al inicio del apartado 4.2. Es la variación en la fuerza que tuvo que hacer la máquina multiensayo para mantener la velocidad de deformación constante igual a 5 mm/min.

b) Módulo de Young

Para el cálculo del módulo de Young se han considerado varias pendientes a lo largo de la gráfica esfuerzo-deformación. Estas pendientes estarán entre el 1 % – 4 %, 1.5 % – 5 % y 6.5 % – 10 % de la deformación (Figura 92). Por tanto:

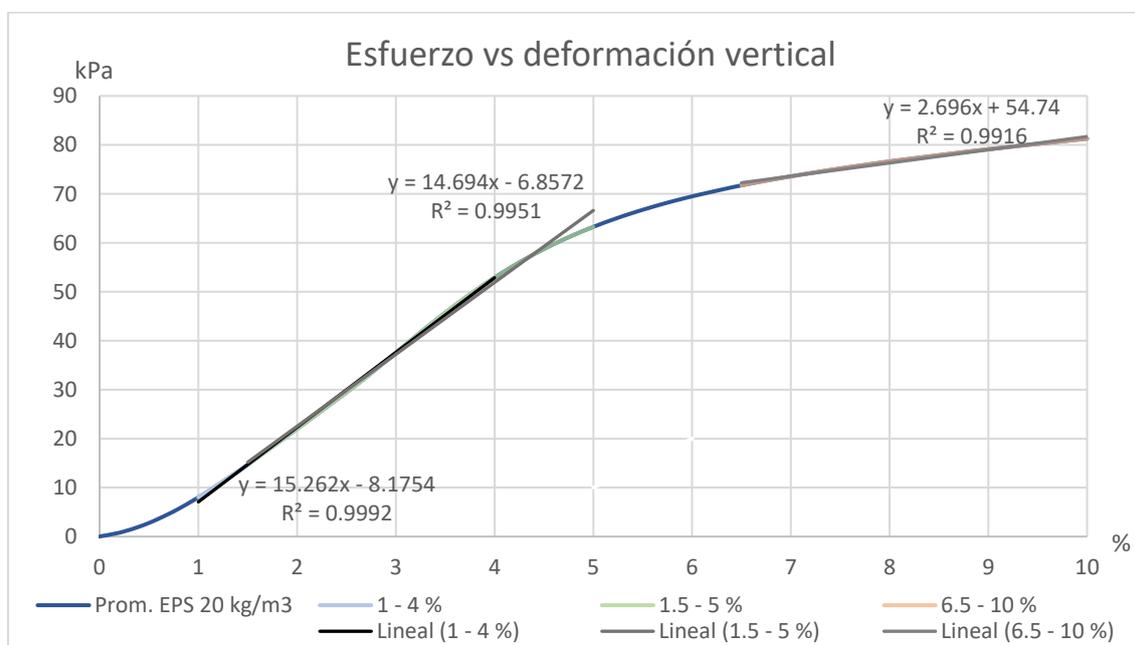


Figura 92. Cálculo del módulo de Young para el EPS de 20 kg/m³

La Tabla 27 muestra el módulo de Young para la deformación para el rango de deformación ya establecido.

Rango de def. (%)	Módulo de Young			Coef. de determ. (R²)
	Calculado (kPa)	Excel (kPa)	Promedio (kPa)	
1 – 4	1,496.5	1,526.2	1,511.4	0.9992
1.5 – 5	1,387.4	1,469.4	1,428.4	0.9951
6.5 – 10	272.7	269.6	271.2	0.9916

Tabla 27. Módulo de Young para distintos rangos de deformación en M de 20 kg/m³

4.2.4. Módulo de Young en EPS de 40 kg/m³

a) Esfuerzo vs deformación

Los resultados de las gráficas esfuerzo-deformación del EPS de 40 kg/m³ son los siguientes:

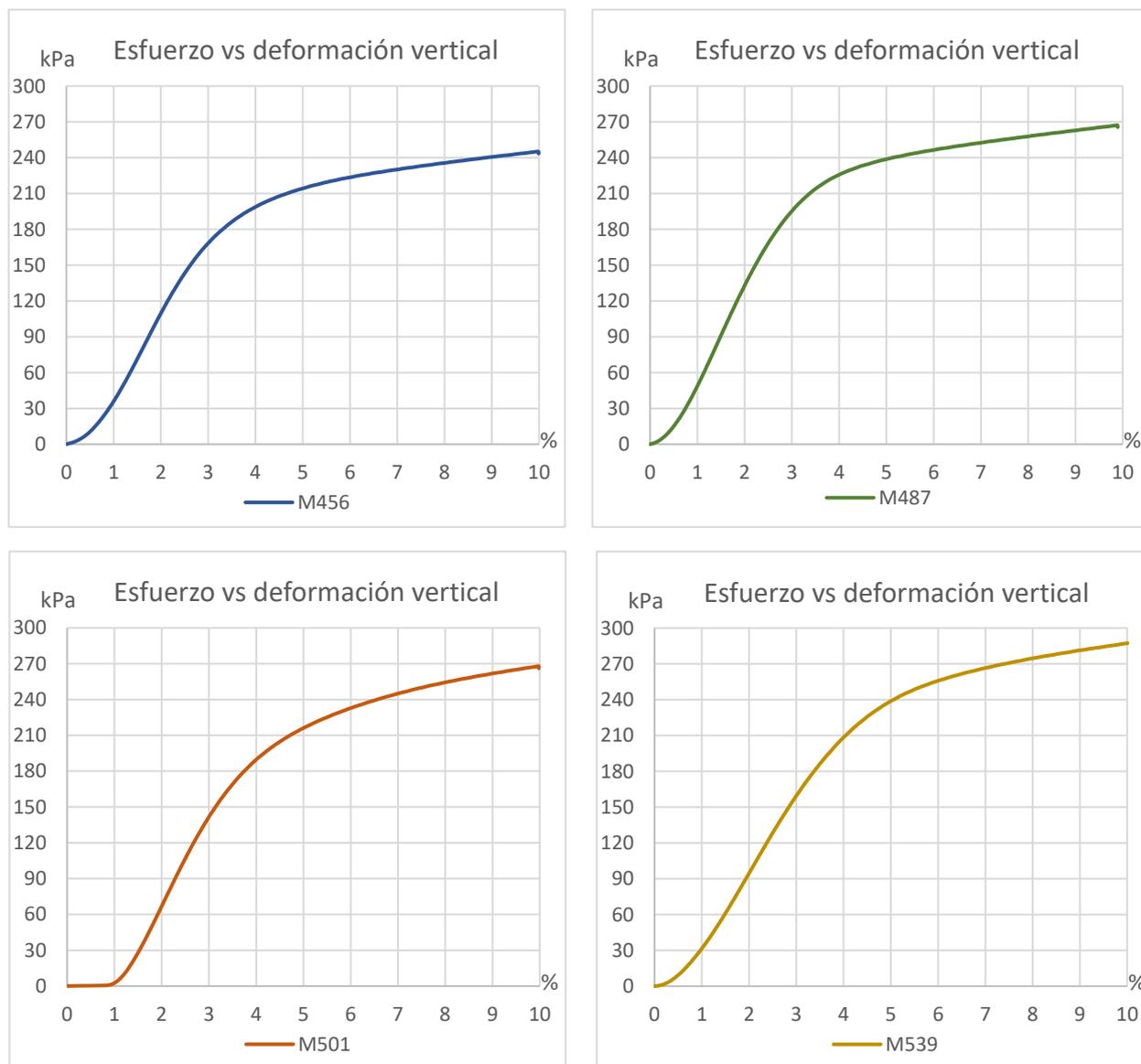


Figura 93. Esfuerzo-deformación de las muestras M de EPS 40 kg/m³

El comportamiento de cada muestra fue similar a las de 20 kg/m³ y a la de Horvart (2010). En estos casos, a mayor densidad de las muestras, mayor esfuerzo para la misma deformación. El valor del esfuerzo al cabo del 10 % de la deformación estuvo entre 243.5 kPa y 287.3 kPa.

A mayor densidad en las muestras, se obtuvo un mayor esfuerzo en el 10 % de la deformación.

El promedio de las de estas muestras se presenta en la Figura 94.

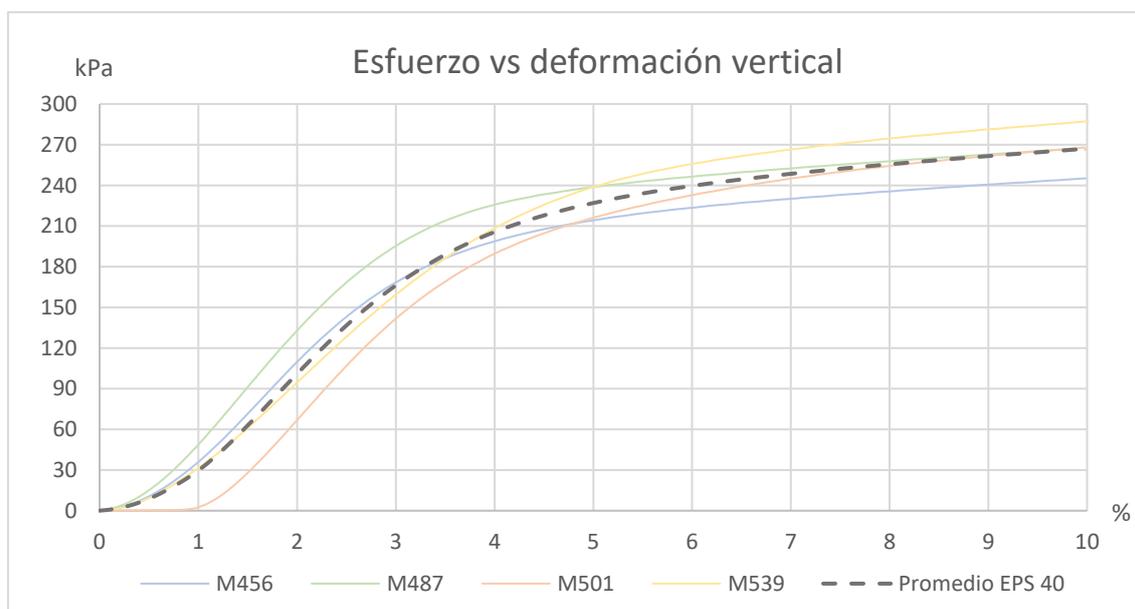


Figura 94. Módulo de Young promedio de muestras M de EPS 40 kg/m³

En estas muestras también se presentan la leve curvatura antes del 1 % de la deformación.

La Tabla 28 muestra el esfuerzo de compresión uniaxial obtenido al 2.5 %, 5 % y 10 % de la deformación vertical.

Dens. teór. (kg/m ³)	Dens. prom. (kg/m ³)	Esfuerzo de compresión uniaxial		
		2.5 % (kPa)	5 % (kPa)	10 % (kPa)
40	39.66	136.69	226.98	267.15

Tabla 28. Datos del esfuerzo de compresión uniaxial en EPS de 40 kg/m³

La variación del esfuerzo de cada muestra considerando su estado anterior es el siguiente:

M456:

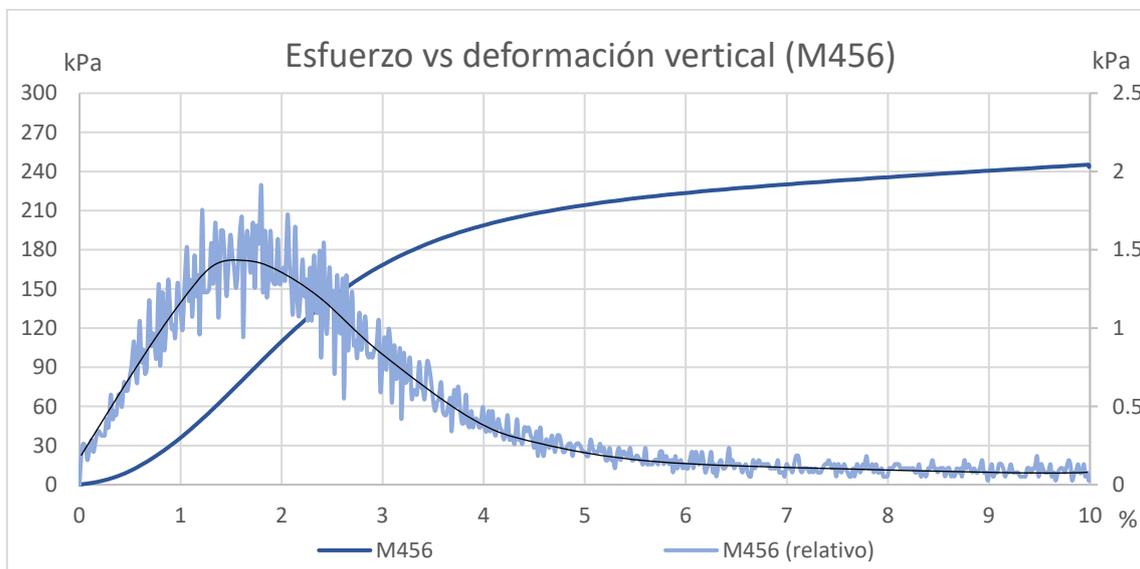


Figura 95. Esfuerzo-deformación para la muestra M456

M487:

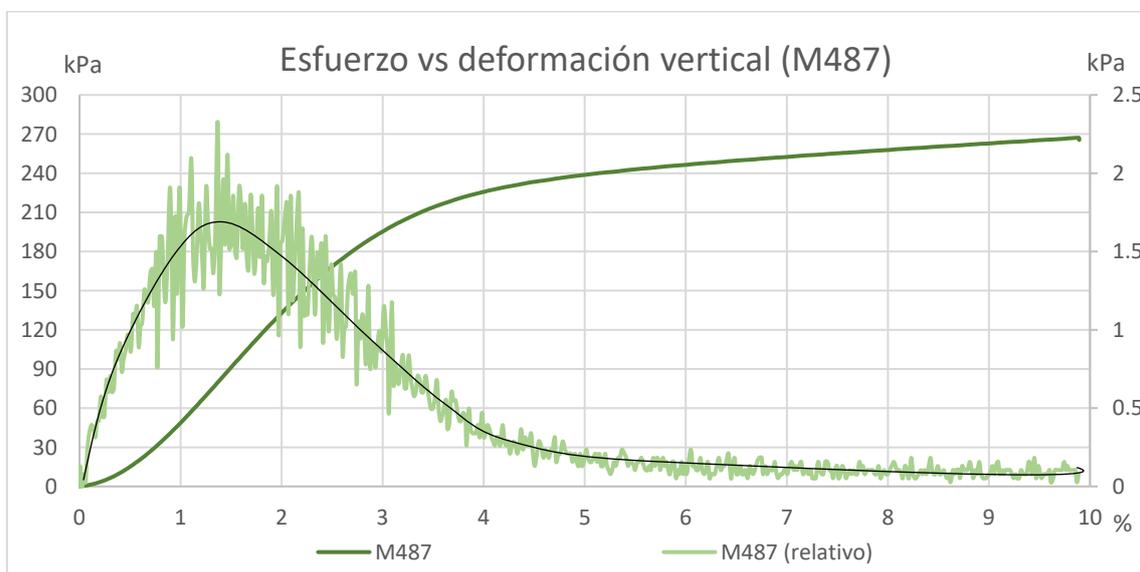


Figura 96. Esfuerzo-deformación para la muestra M487

M501:

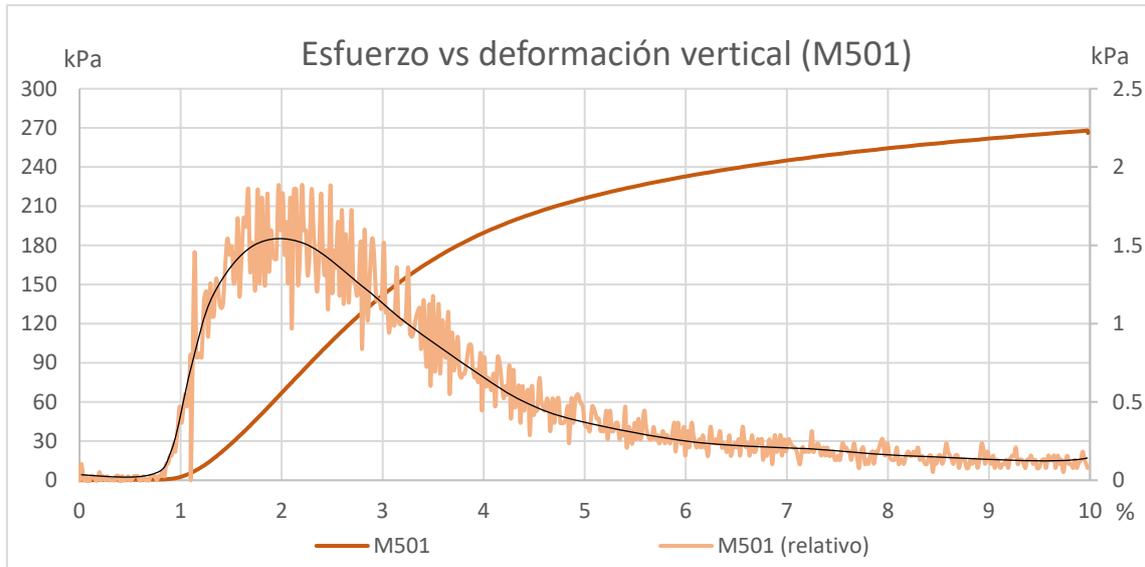


Figura 97. Esfuerzo-deformación para la muestra M501

M539:

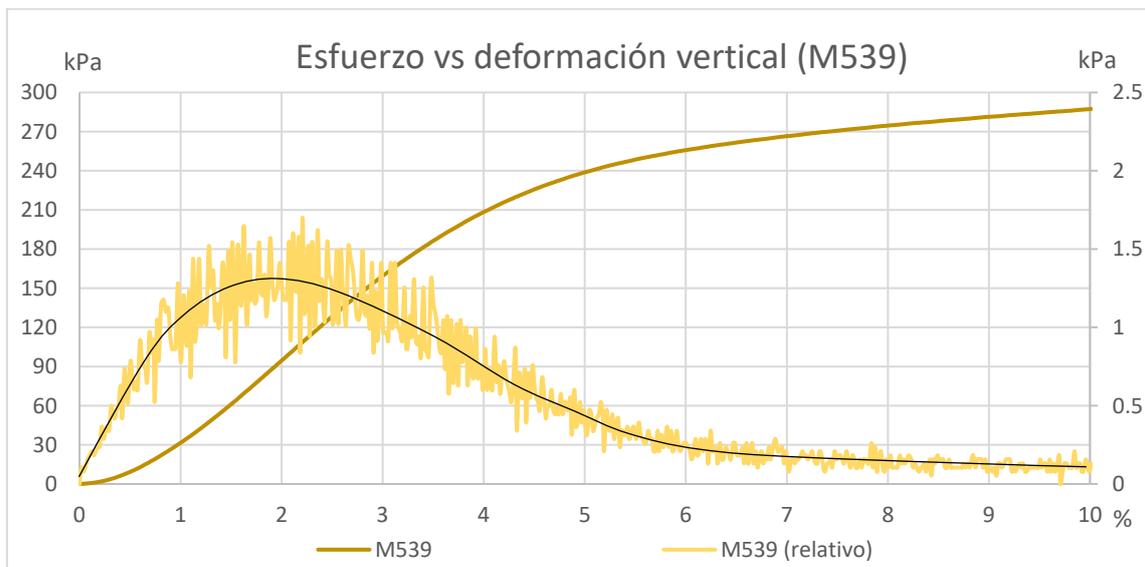


Figura 98. Esfuerzo-deformación para la muestra M539

b) Módulo de Young

Para poder hacer una comparación con las muestras anteriores, se utilizará el mismo rango de deformación para calcular las pendientes. Por consiguiente, en la Figura 99:

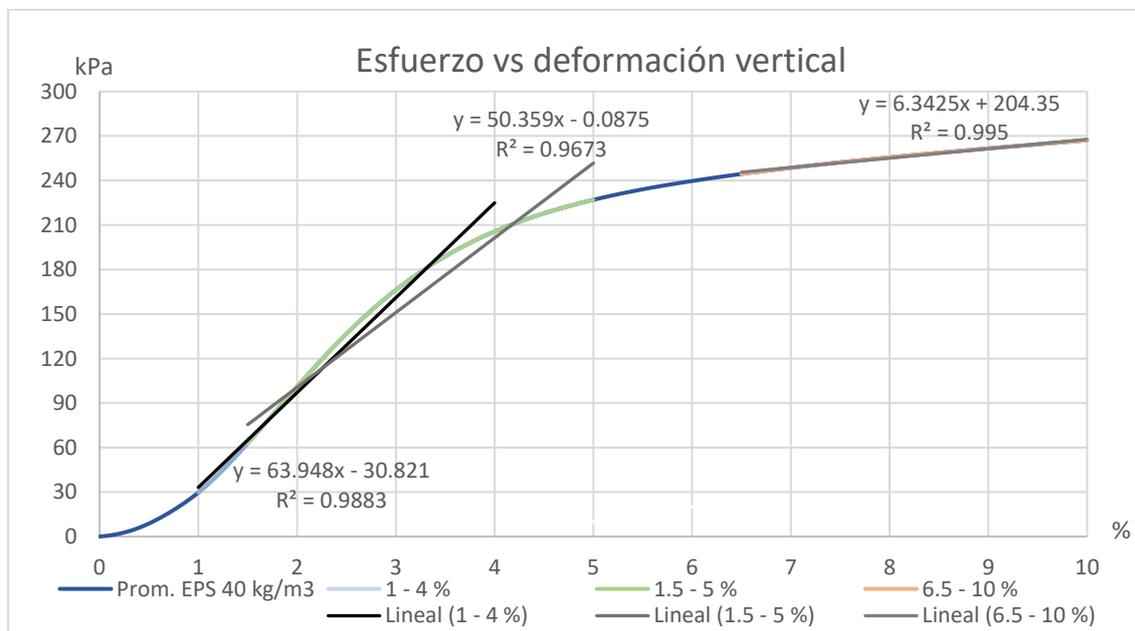


Figura 99. Cálculo del módulo de Young para el EPS de 40 kg/m³

El módulo de Young para este rango de deformación se muestra en la Tabla 29.

Rango de def. (%)	Módulo de Young			Coef. de determ. (R ²)
	Calculado (kPa)	Excel (kPa)	Promedio (kPa)	
1 - 4	5,863.3	6,394.8	6,129.1	0.9883
1.5 - 5	4,686.2	5,035.9	4,861.1	0.9673
6.5 - 10	649.0	634.3	641.7	0.995

Tabla 29. Módulo de Young para distintos rangos de deformación en M de 40 kg/m³

4.2.5. Resumen

El coeficiente de Poisson para una densidad determinada se muestra en la Tabla 30.

Densidad (kg/m ³)	Rango de def. (%)	Coef. de Poisson
15 – 20	1 – 10	0.01 – 0.04
35 – 40	1 – 10	0.02 – 0.07

Tabla 30. Coeficiente de Poisson obtenidos en los ensayos

Si comparamos estos datos con un artículo de Sanders (1996) citado por Elragi (2006) en el cual recoge varios autores y el módulo de Poisson que determinaron, hay cierta similitud con los datos de algunos autores (Tabla 31).

Referencia	Yamanaka, et al. (1991)	Momoi y Kokusyo (1996)	Negussey y Sun (1996)	Ooe, et al. (1996)	Sanders (1996)	Duskov et al. (1998)	GeoTech (1999a)
Coef. de Poisson	0.075	0.5	0.09 – 0.33	0.08	0.05 – 0.2	0.1	0.05

Tabla 31. Coeficiente de Poisson en función del autor (Sanders, 1996, citado por Elragi, 2006)

Como se aprecia, los autores no especifican la densidad del material ni su rango de deformación. Obviando esto, los valores de Yamanaka et al. (1991), Ooe et al. (1996), GeoTech (1999a) y Duskov et al. (1998) coinciden con los obtenidos tras los ensayos en la Tabla 30. Con un rango más alejado los de Sanders (1996) y Negussey y Sun (1996). Dada la poca información, considero los de Momoi y Kokusyo (1996) muy altos.

En los ensayos a compresión simple, las muestras tienen el mismo comportamiento que las presentadas por Negussey y Elragi (2000). En ambos ensayos se utilizaron el mismo tamaño de cubos (5 cm) e igual velocidad de desplazamiento (5 mm/min). La diferencia fue la densidad de las muestras, 16 kg/m³ y 40 kg/m³ para las pruebas aquí realizadas, y 12 kg/m³ y 33 kg/m³ en las de Negussey y Elragi (2000).

En la Figura 100 se hace una superposición de los resultados obtenidos en las Figura 87 y 94 con los presentados por Negussey y Elragi (2000) en la Figura 4 del apartado 2.1.3.3. relacionados a la curva esfuerzo-deformación.

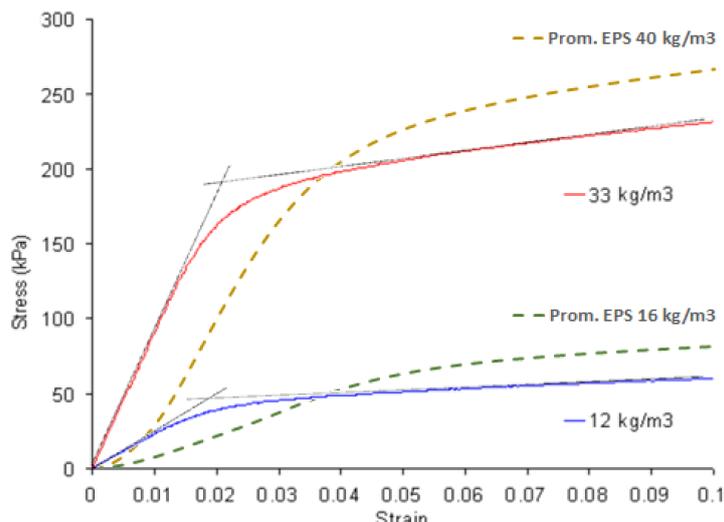


Figura 100. Comparación de la curva esfuerzo-deformación entre Negussey y Elragi (2000) y los obtenidos en los ensayos

Quitando la leve curvatura del principio que, como se explicó anteriormente, pudiera deberse a la adaptación del pistón de carga y los cubos de EPS, el comportamiento obtenido se corresponde con los de Negussey y Elragi (2000). Por ejemplo, el esfuerzo obtenido fue mayor al de los autores ya citados debido a la mayor densidad de las muestras. También, al igual que en el de ellos, puede simplificarse con la división en dos líneas rectas conectadas a una parte curva.

Si se compara el mismo comportamiento con el de Horvath (2010) presentado en el inciso 2.1.3.4. para el mismo rango de deformación (Figura 101), confirma la similitud de los datos.

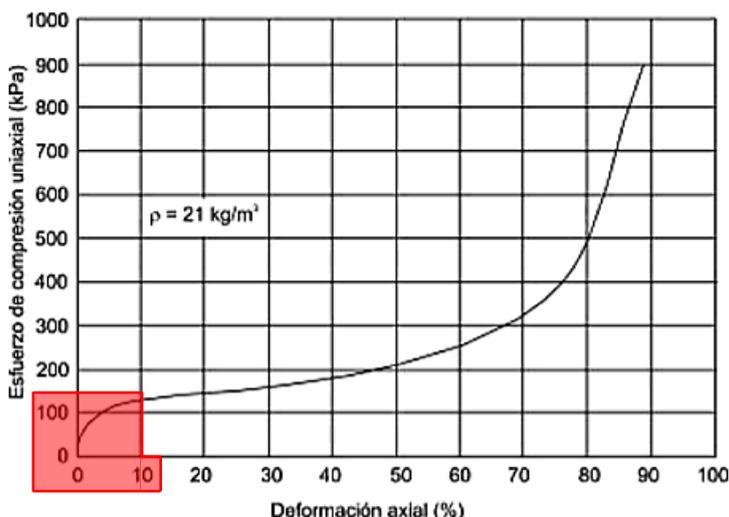


Figura 101. Curva esfuerzo-deformación bajo carga rápida (Horvath, 2010)

Como se observa, la densidad es prácticamente la misma que estamos utilizando: 21 kg/m^3 en comparación a los 20 kg/m^3 teóricos del EPS.

Martínez Moreno (2018) ensayó muestras de EPS de 20 y 40 kg/m³ a compresión simple en el mismo laboratorio en que se realizaron estas pruebas. Sus resultados serán comparados con los aquí obtenidos en la Tabla 32.

Para determinar el esfuerzo al 10 % de la deformación en los ensayos de Horvath (2010) de la Figura 101, la imagen fue ampliada en un software y a través de la relación de pixeles, se llegó a un valor aproximado.

Autor	Dens. teór. (kg/m ³)	Dens. prom. (kg/m ³)	Esfuerzo de compresión uniaxial		
			2.5 % (kPa)	5 % (kPa)	10 % (kPa)
Este trabajo	20	15.86	29.46	63.26	81.27
(Martínez M., 2018)	20	–	–	≈ 69.3	≈ 84.8
(Horvath, 2010)	21	–	–	–	≈ 128.8

Tabla 32. Comparación de datos de esfuerzo de compresión uniaxial en EPS de 20 kg/m³

Los valores de Martínez Moreno (2018) prácticamente coinciden con los aquí ensayados. Los de Horvath (2010) son superiores porque su densidad también lo era, 21 kg/m³ frente a los 15.86 ≈ 16 kg/m³ promedio.

La comparación de las muestras de EPS de 40 kg/m³ con los de Martínez (2018) se detalla en la Tabla 33.

Autor	Dens. teór. (kg/m ³)	Dens. prom. (kg/m ³)	Esfuerzo de compresión uniaxial		
			2.5 % (kPa)	5 % (kPa)	10 % (kPa)
(Santos, S., 2019)	40	39.66	136.69	226.98	267.15
(Martínez M., 2018)	40	–	–	≈ 227.6	≈ 265.2

Tabla 33. Comparación de datos de esfuerzo de compresión uniaxial en EPS de 40 kg/m³

Los esfuerzos de compresión uniaxial para una deformación específica coinciden con los obtenidos por Martínez Moreno (2018).

Para analizar la variación que han tenido las muestras ensayadas a compresión simple, se ha elaborado la Tabla 34.

	Esfuerzo de compresión uniaxial						Variación 2.5 % – 5 %	Variación 5 % – 10 %
	Dens. teor. (kg/m ³)	Dens. prom. (kg/m ³)	2.5 % (kPa)	5 % (kPa)	10 % (kPa)			
EPS 20 kg/m ³	20	15.86	29.46	63.26	81.27	114.7	28.5	
EPS 40 kg/m ³	40	39.66	136.69	226.98	267.15	66.1	17.7	
Variación (%)	100	150.1	364.0	258.8	228.7	–	–	

Tabla 34. Comparación de datos de esfuerzo de compresión uniaxial entre muestras EPS de 20 y 40 kg/m³

El aumento en la densidad no se corresponde en igual medida con el del esfuerzo. El material menos denso experimentó un mayor aumento porcentual a medida que se duplicaba la deformación.

Barnetson (2004) también definió la resistencia a la compresión del EPS para una deformación del 10 % en función de la densidad (Tabla 35).

Densidad (kg/m³)	15	25	40	50
Resistencia a la tracción (kPa)	200	350	600	750
Resistencia a la flexión (kPa)	200	400	700	900
Resistencia a la compresión para una deformación del 10 % (kPa)	90	180	320	400

Tabla 35. Propiedades físicas del EPS en función de la densidad. (Barnetson, 2004)

Para la densidad promedio de 15.86 kg/m³, la resistencia a la compresión conseguida fue un 9.7 % menor respecto a los 90 kPa publicados por Barnetson (2004). Asimismo, con la de 39.66 kg/m³, fue un 16.5 % inferior a los 320 kPa.

El módulo de Young o tangente entre el 1 – 4 % de la deformación en el EPS de 20 kg/m³ fue de 1,500 kPa y para el mismo rango en el de 40 kg/m³, fue de 6,100 kPa. Estos valores son menores a los obtenidos por Horvath (1995), Miki (1996), Duskov (1997) y Eriksson & Trank (1991) citados en el apartado 2.1.3.7. debido a que estos calculan el módulo tangencial inicial.

Para la modelización en Plaxis, el E_{50} calculado en el EPS de 20 kg/m³ fue de 1,250 kPa, y para el de 40 kg/m³ es de 5,400 kPa.

5 Aplicaciones

Mediante el software Plaxis se pretende simular un problema común. Se trata de un terreno blando en el cual se construirá una carretera de dos carriles. La sección transversal del terreno es de 25.00 m de ancho y 7.00 m de espesor. El material corresponde a una arcilla blanda cuyas propiedades serán descritas más adelante.

Se evaluarán tres casos posibles:

- Caso 1: construcción del terraplén de la carretera directamente sobre el terreno blando.
- Caso 2: sustitución de una sección de 15.00 m x 4.10 m de la arcilla blanda por bloques de EPS de 20 kg/m³. Sobre dichos bloques se construirá el terraplén de la carretera.
- Caso 3: igual que el Caso 2, pero por bloques de 40 kg/m³.

La sección del terraplén es mostrada en la Figura 102.

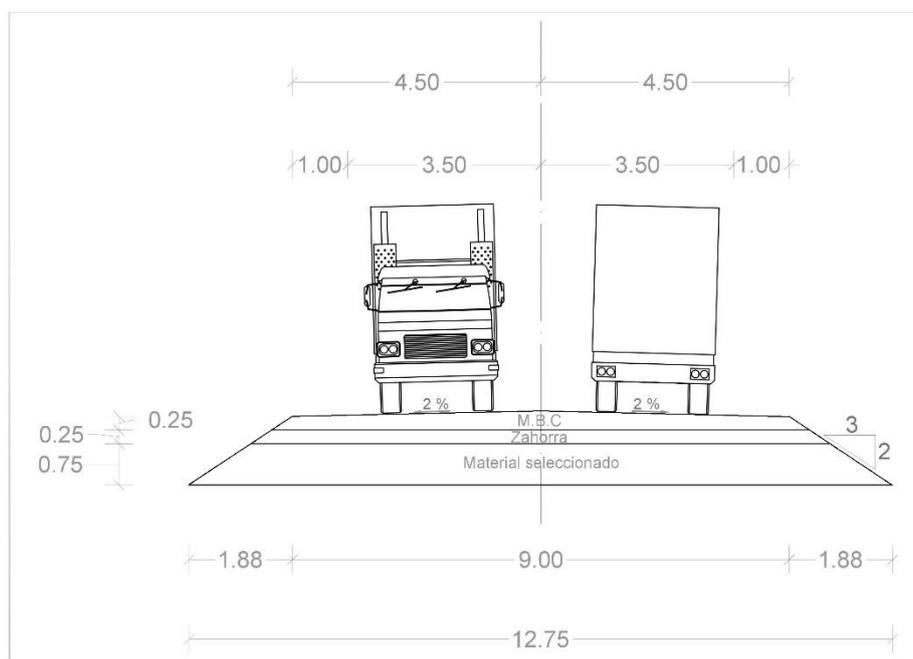


Figura 102. Sección transversal del terraplén elegido

Para la arcilla blanda y el terraplén se utilizará el modelo Mohr-Coulomb. En cambio, para el EPS se utilizará el modelo Hardening Soil debido a que este material no es elástico-lineal (Figura 87). A diferencia del primero, éste emplea la teoría de la plasticidad en vez de la teoría de la elasticidad.

La geometría y selección de los materiales del terraplén fue tomada de Fernández-Pacheco (2019). La Figura 103 muestra distintos tipos de secciones posibles.

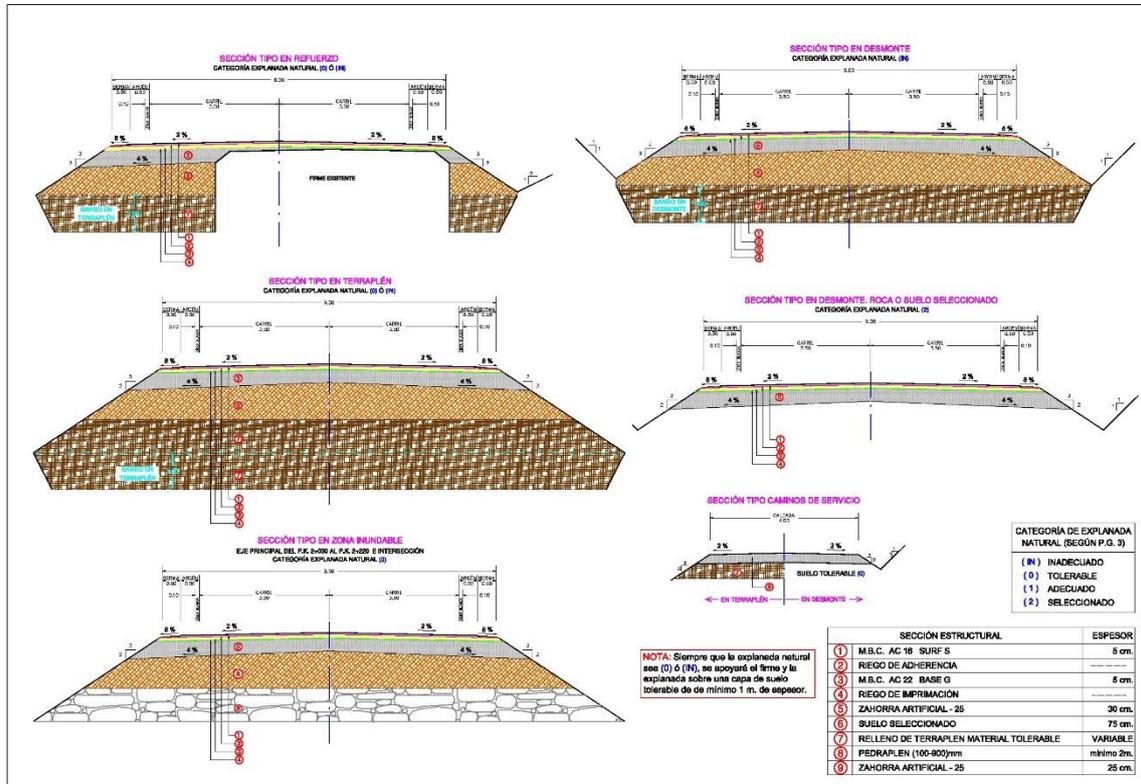


Figura 103. Tipos de secciones para terraplenes de carreteras (FPIngenieros, 2019)

Las principales propiedades de la arcilla blanda se obtuvieron de Kahlstöm (2013), descritas por Subsea 7 (2010).

La Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía especifica el módulo de Young y coeficiente de Poisson para distintos tipos de mezclas bituminosas (Figura 104). De esta instrucción también se tomaron los datos para el material del terraplén (zahorra).

Tipo de mezcla	E (MPa)	ν
Densas y semidensas	6.000	0,33
Gruesas	5.000	0,33
Drenantes y abiertas	4.000	0,35
Discontinua en capa fina	4.000	0,35
De alto módulo	11.000	0,30
Abiertas en frío	1.500	0,35

Figura 104. Características mecánicas de mezclas bituminosas para una temperatura equivalente de 20 °C (Consejería de Obras Públicas y Transportes)

Por lo tanto, los parámetros de entrada en Plaxis para los distintos casos analizados son los siguientes:

Parámetro	Símbolo	Unidad	Arcilla blanda	M.S/ zahorra	M.B.C	EPS 20	EPS 40
Modelo del material	–	–	Mohr-Coulomb		Elástico-lineal	Hardening Soil	
Tipo de comportamiento	–	–	Drenado		No poroso	Drenado	
Peso espec. aparente	γ	kN/m ³	17	19.5	23	0.2	0.4
Peso espec. saturado	γ_{sat}	kN/m ³	20	22.6	23	0.2	0.4
Módulo de Young	E'	kN/m ²	750	18,500	5,000,000	1,500	6,100
Módulo de Young al 50 % de tensión desviadora	E'_{50}	kN/m ²	–	–	–	1,250	5,400
Módulo edométrico	E'_{oed}	kN/m ²	–	–	–	1,250	5,400
Módulo de Young carga-descarga	E'_{ur}	kN/m ²	–	–	–	2,500	10,800
Coef. de Poisson	ν'	–	0.3	0.3	0.33	0.02	0.06
Cohesión	c'	kN/m ²	1	5	–	62.15 ⁽¹⁾	62.15 ⁽¹⁾
Ángulo de rozamiento	ϕ'	°	25	36	–	23.25 ⁽¹⁾	23.25 ⁽¹⁾
Ángulo de dilatación	ψ	°	0	0	–	0	0

Tabla 36. Propiedades de los materiales para la modelización en Plaxis

donde:

M.S es material seleccionado

M.B.C es mezcla bituminosa en caliente

⁽¹⁾ son datos pertenecientes a Martínez Moreno (2018)

Como bien explica CST (2018), en España y en el resto de Europa existen unas normas sobre el peso de los camiones y sus cargas que son de obligado cumplimiento. Para ello se debe tener en cuenta la masa máxima autorizada para transporte terrestre o MMA, además del peso máximo autorizado de camiones y su longitud (Figura 105).

Para el diseño, se consideraron camiones de 2 ejes con una masa máxima de 18 toneladas.

MMA Transporte Terrestre	2 Ejes	3 Ejes	4 Ejes	+ Ejes
Vehículos de Motor	18 TN	25/26 TN	31/22 TN	
Remolques	18 TN	24 TN		
Trailer			36/38 TN	40 TN CST ²⁰¹⁸
Trenes de Carretera			36 TN	40 TN

Figura 105. Tabla masa máxima autorizada para transporte terrestre (CST, 2018)

5.1. Caso 1: arcilla blanda

En este primer caso se va a considerar la construcción del terraplén de carretera directamente sobre el suelo blando. Se tendrán en cuenta tres fases y se comprobará si el terreno resiste cada una de ellas. El inicio de cada fase dependerá de la culminación de la anterior.

Estas fases son:

- **Fase inicial o fase cero:** no hay ningún tipo de construcción sobre el terreno blando.
- **1^{ra} fase:** se construye el terraplén, formado por 0.75 m de material seleccionado y 0.25 m de zahorra.
- **2^{da} fase:** se construye la carpeta asfáltica de 0.25 m de espesor.
- **3^{ra} fase:** es cuando se aplica la carga de diseño, igual a 90 kN.

La Figura 106 muestra la modelización de la sección transversal del caso 1 en Plaxis.

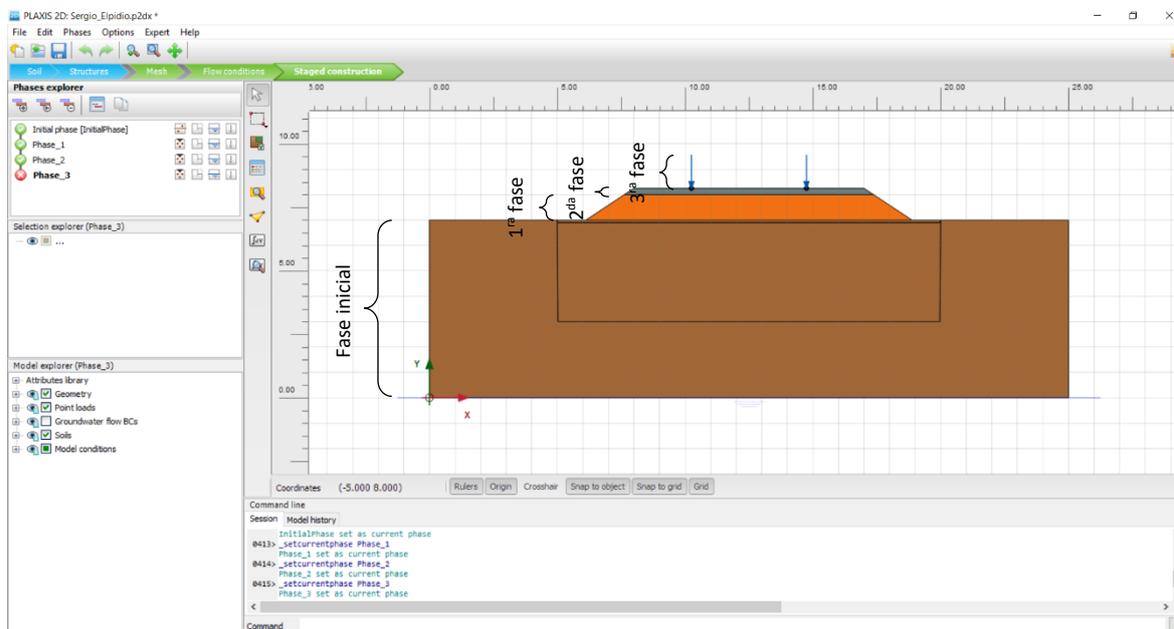


Figura 106. Interfaz de Plaxis 2D durante la modelización del caso 1

Se eligieron cuatro puntos a distintas profundidades para conocer el valor del desplazamiento vertical de cada fase respecto a la anterior.

Si se considerara un plano de coordenadas en la parte inferior izquierda de la modelización, la ubicación de los puntos sería la siguiente (Figura 107):

- A = (6.13, 7.00): es donde comienza el talud del terraplén del lado izquierdo.
- B = (12.50, 7.00): está entre el terraplén y el suelo blando y es el eje central de la modelización.
- C = (12.50, 2.90): está a 4 m por debajo de B. Para los casos 2 y 3 estará centralmente en la frontera entre el geofom y el terreno blando.
- D = (5.00, 2.90): está a un cuarto de la longitud del terreno blando a la misma altura que C. Coincidirá más adelante con la esquina entre el geofom y el terreno blando.

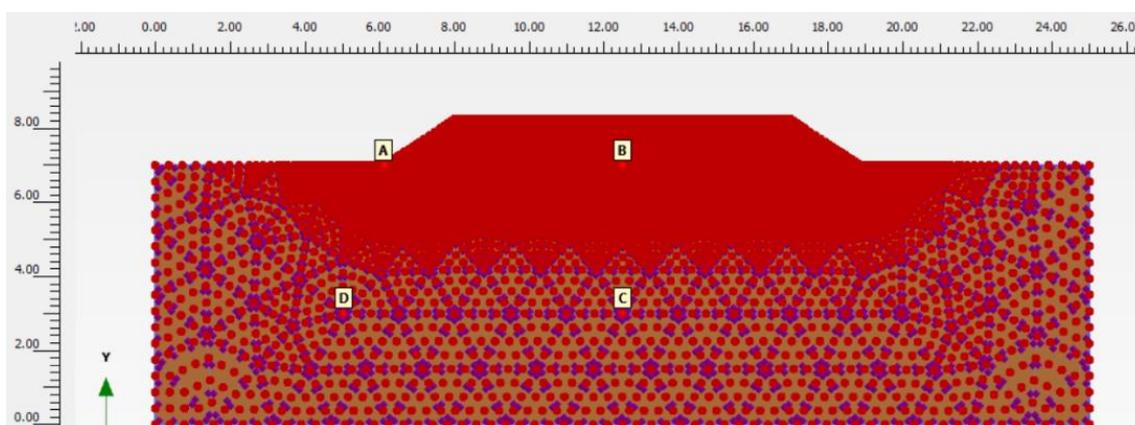


Figura 107. Puntos donde se desea conocer el desplazamiento vertical del caso 1

Una vez obtenidos los puntos, la distribución del mallado y tras caracterizar los distintos tipos de suelo, se procedió a analizar la modelización.

La Figura 108 muestra la deformada y un desplazamiento máximo de 13.67 cm tras la finalización de la construcción del terraplén (1^{ra} fase).

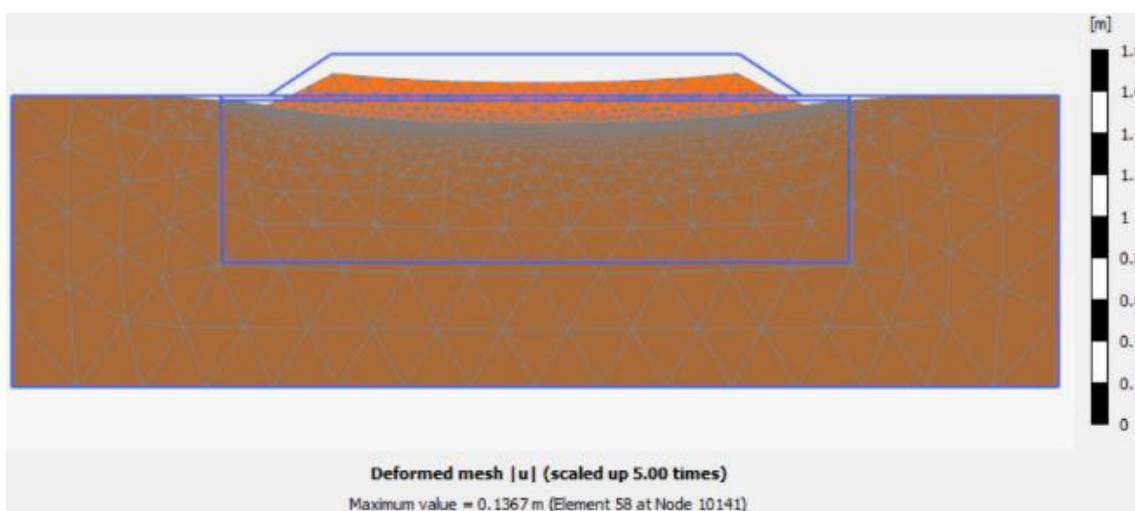


Figura 108. Deformada de la 1ra fase (caso 1). Escala del desplazamiento aumentada 5 veces

El terreno blando aún soporta la terminación de la segunda fase. En esta fase el desplazamiento vertical obtenido fue de 17.13 cm (Figura 109).

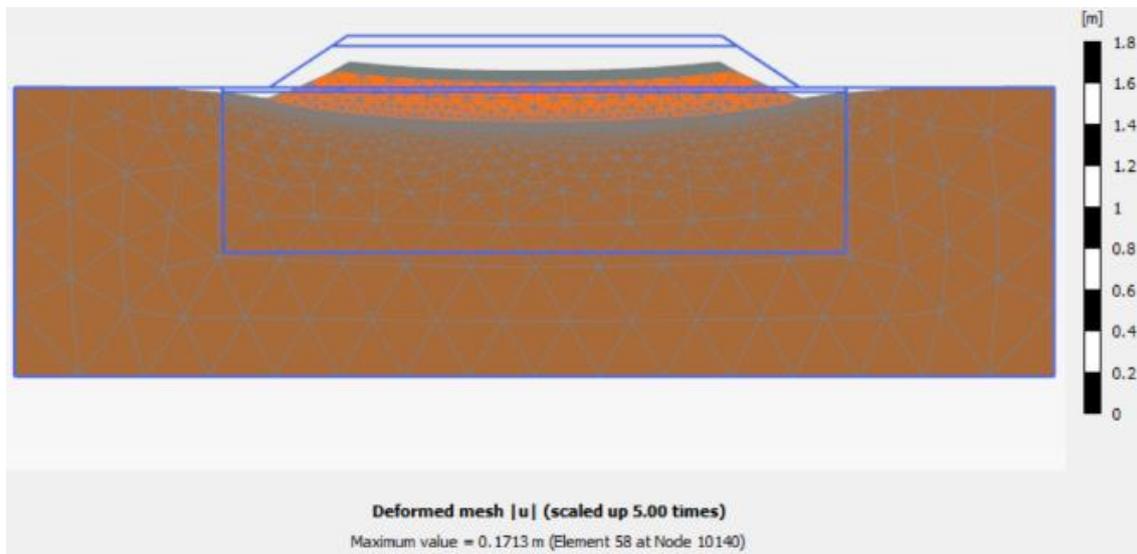


Figura 109. Deformada de la 2da fase (caso 1). Escala del desplazamiento aumentada 5 veces

Como se verá más adelante, para la tercera fase el terreno blando no soporta la carga total de diseño. El desplazamiento obtenido es de 25.56 cm y es mostrado en la Figura 110.

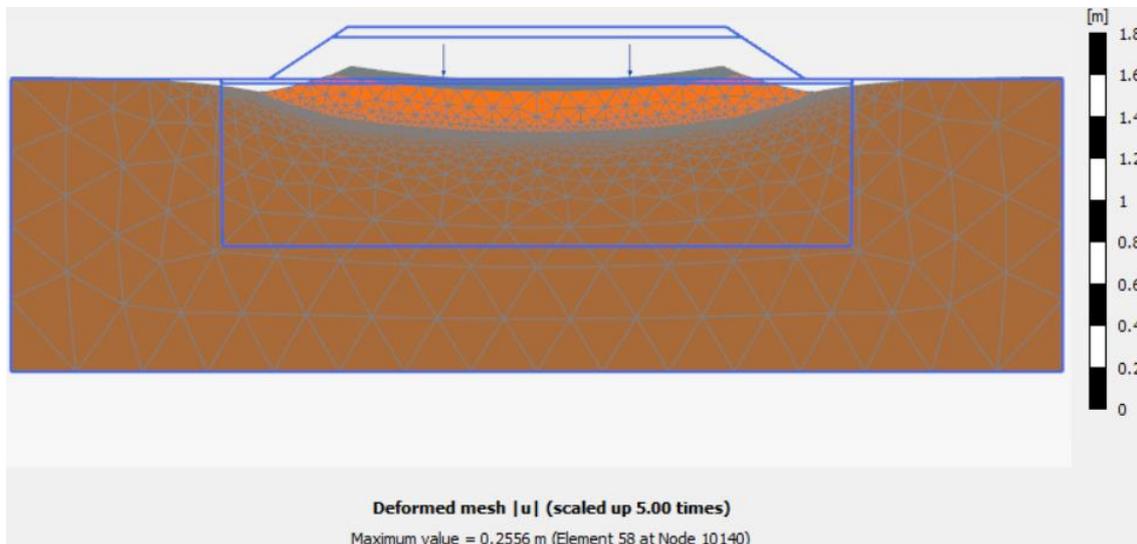


Figura 110. Deformada de la 3ra fase (caso 1). Escala del desplazamiento aumentada 5 veces

La Figura 111 detalla el valor de los desplazamientos de toda la sección transversal considerada.

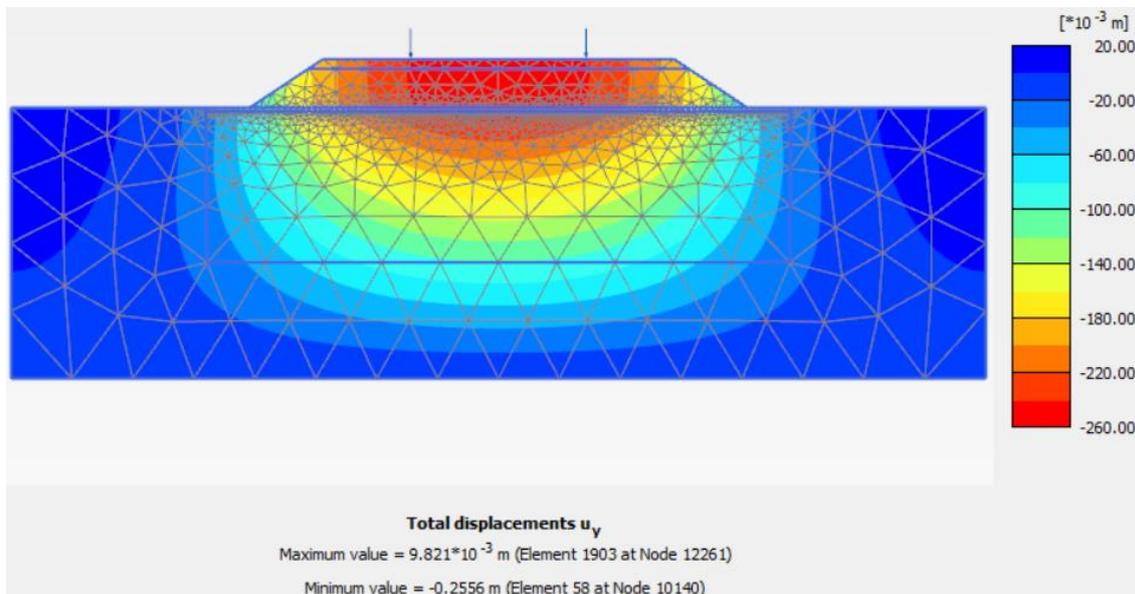


Figura 111. Desplazamiento vertical de la 3ra fase (caso 1) en toda la sección

El terreno solo pudo soportar el 65 % de la carga de diseño. Para saber el desplazamiento de cada punto en las distintas fases se presenta un gráfico lineal en la Figura 112.

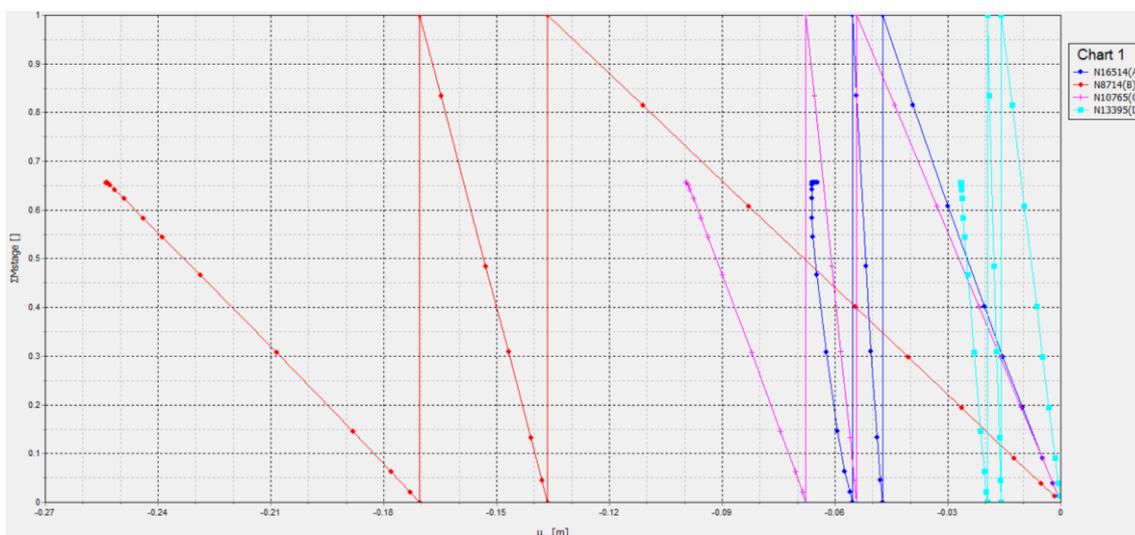


Figura 112. Proporción de fase alcanzada vs el desplazamiento (caso 1)

Entender este gráfico es sencillo. El eje de abscisas corresponde al desplazamiento y el eje de ordenadas al porcentaje de la carga.

Si se observa la gráfica correspondiente al punto B (la roja) de derecha a izquierda, ésta aumenta linealmente. Significa que la primera fase llegó al 100 % y experimentó un asentamiento de 0.136 m. La segunda fase inicia con este desplazamiento previo y por

esto es que se visualiza la línea vertical entre el final de la primera pendiente y el comienzo de la segunda. Al completarse esta fase el desplazamiento aumentó a 0.17 m. Como se explicó anteriormente, la tercera fase llegó al 65 % de la carga aplicada con un desplazamiento de 0.255 m.

De acuerdo con el gráfico, el punto B experimentó mayor desplazamiento vertical, seguido del C, A y D. La Tabla 37 muestra su valor en las distintas fases.

Caso 1			
Punto	Desplazamiento (m)		
	1 ^{ra} fase	2 ^{da} fase	3 ^{ra} fase
A	0.047	0.055	0.065
B	0.137	0.170	0.255
C	0.054	0.067	0.100
D	0.016	0.019	0.027

Tabla 37. Desplazamientos en los puntos seleccionados del caso 1

5.2. Caso 2: EPS de 20 kg/m³

En este segundo caso se va a sustituir una sección de 15.00 m x 4.10 m del terreno blando por otra sección de 15.00 m x 4.00 m de bloques de EPS de 20 kg/m³. Los 0.10 m restantes es para la colocación de la geomembrana y nivelación del terreno para la construcción del terraplén, que contará con la misma sección del caso anterior.

Se tendrán en cuenta las mismas fases que en el caso 1. Si el terreno soporta el 100 % de la carga de diseño aplicada, se considerará una cuarta fase. Esta última no dependerá de la tercera, sino de la segunda. Esto se debe a que se quiso comprobar si bajo este esquema el terreno soportaría el triple de la carga de diseño. Por tanto, las fases son:

- **Fase inicial o fase cero:** el terreno ha sido excavado con las dimensiones previamente especificadas y se han colocado los bloques de EPS de 20 kg/m³.
- **1^{ra} fase:** se construye el terraplén, formado por 0.75 m de material seleccionado y 0.25 m de zahorra sobre los bloques de EPS.
- **2^{da} fase:** se construye la carpeta asfáltica de 0.25 m de espesor.
- **3^{ra} fase:** se aplica la carga de diseño, igual a 90 kN.
- **4^{ta} fase:** se triplica la carga de diseño al cabo de la 2^{da} fase.

La modelización de la sección transversal del caso 2 es mostrada en la Figura 113.

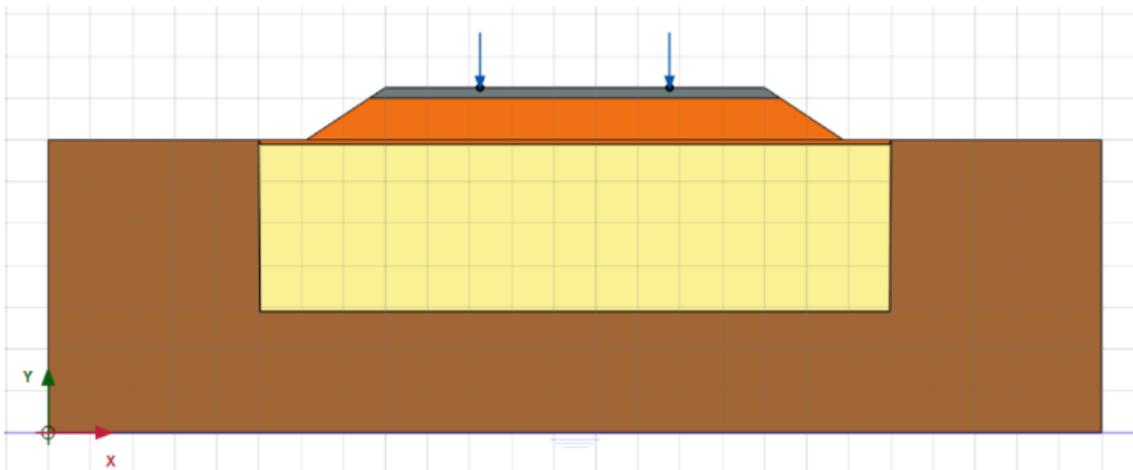


Figura 113. Modelización para el caso 2 y 3

Para medir el desplazamiento se tomaron los mismos puntos del caso 1 (A, B, C y D). Se añadió un punto extra (E) para también medirlo en la parte central de la arcilla por debajo de los bloques de EPS. Este punto estará a 1.45 m por debajo de C (Figura 114).

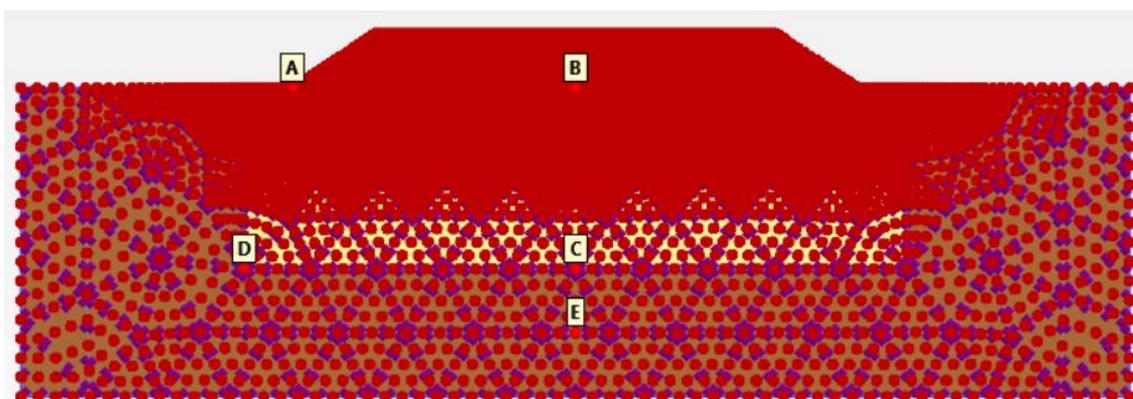


Figura 114. Puntos donde se desea conocer el desplazamiento vertical del caso 2

Tras analizar este modelo, el terreno soportó la 3ra fase. La deformada de esta fase se muestra en la Figura 115.

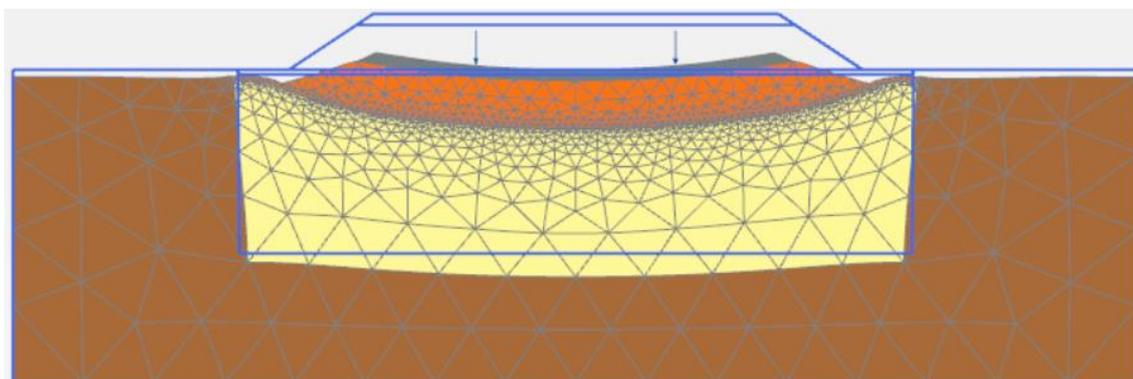


Figura 115. Deformada de la 3ª fase (caso 2). Escala del desplazamiento aumentada 5 veces

Los desplazamientos de toda la sección aparecen en la Figura 116.

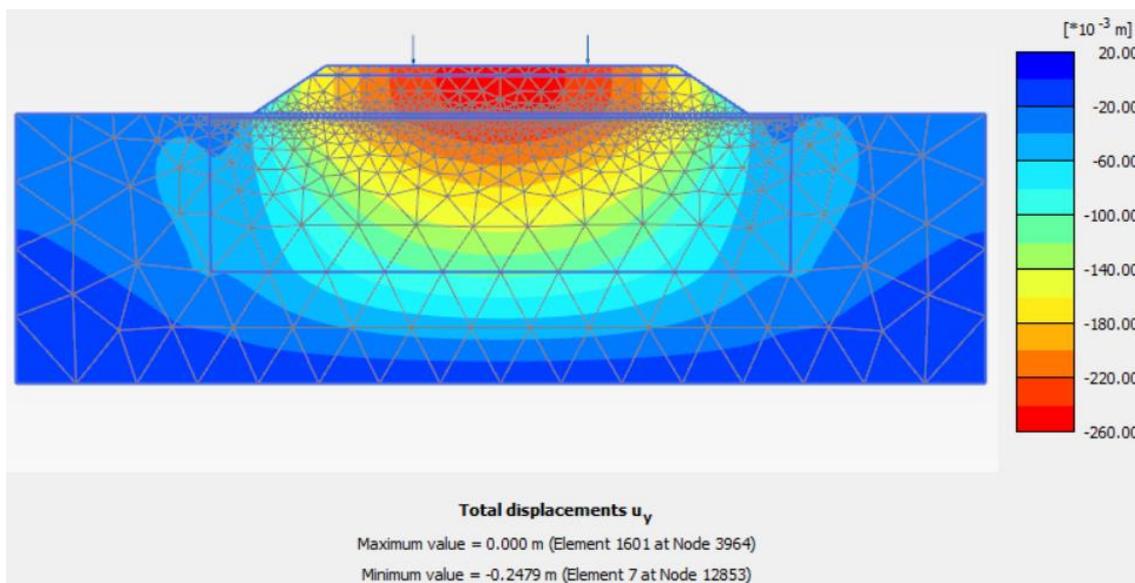


Figura 116. Desplazamiento vertical de la 3ra fase (caso 2) en toda la sección

El terreno soportó la carga de diseño de 90 kN. También, resistió el triple de la carga de diseño de la cuarta fase.

El desplazamiento de los puntos B, C y E desde la primera fase hasta la cuarta es mostrado en la Figura 117, y en las mismas fases para el A y D en la Figura 118.

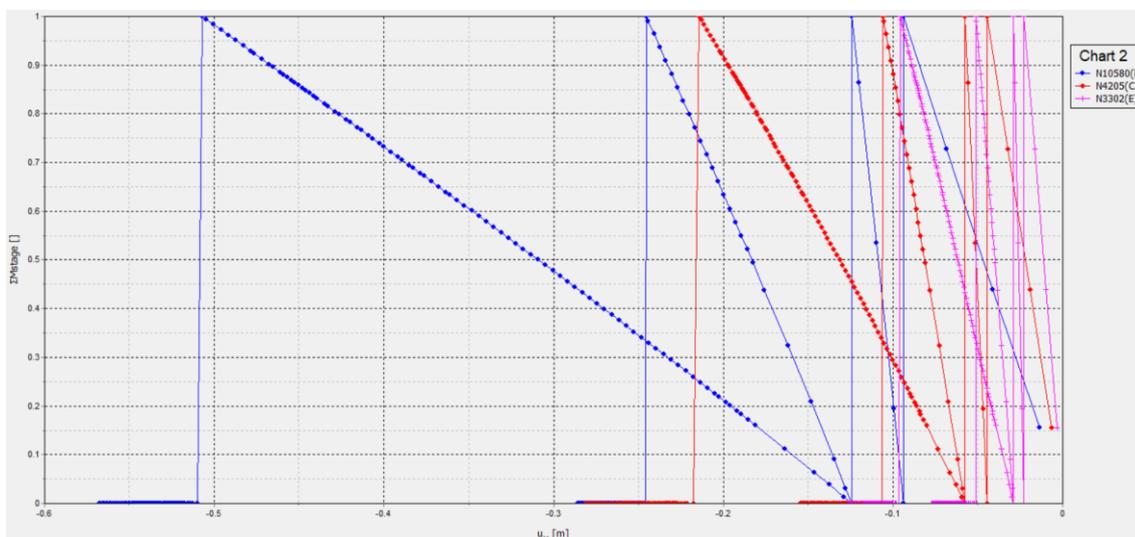


Figura 117. Proporción de fase alcanzada vs el desplazamiento para los puntos B, C y E (caso 2)

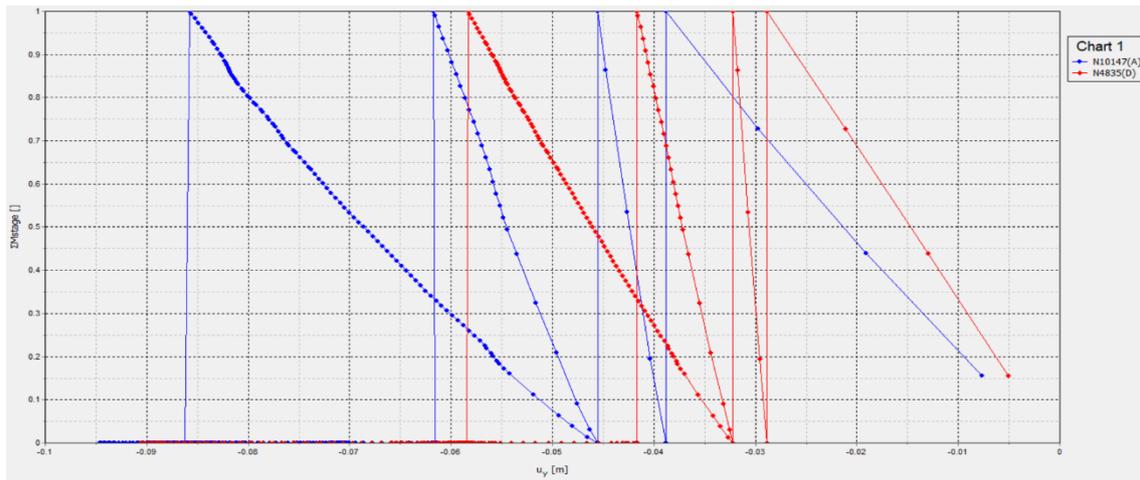


Figura 118. Proporción de fase alcanzada vs el desplazamiento para los puntos A y D (caso 2)

La Tabla 38 refleja el valor de los desplazamientos de cada punto en cada fase.

Caso 2				
Punto	Desplazamiento (m)			
	1 ^{ra} fase	2 ^{da} fase	3 ^{ra} fase	4 ^{ta} fase
A	0.039	0.045	0.062	0.086
B	0.094	0.124	0.246	0.511
C	0.044	0.058	0.107	0.239
D	0.029	0.032	0.042	0.058
E	0.022	0.029	0.051	0.096

Tabla 38. Desplazamientos en los puntos seleccionados del caso 2

El factor de seguridad obtenido en el punto B y C para la tercera y cuarta fase se muestra en la Figura 119.

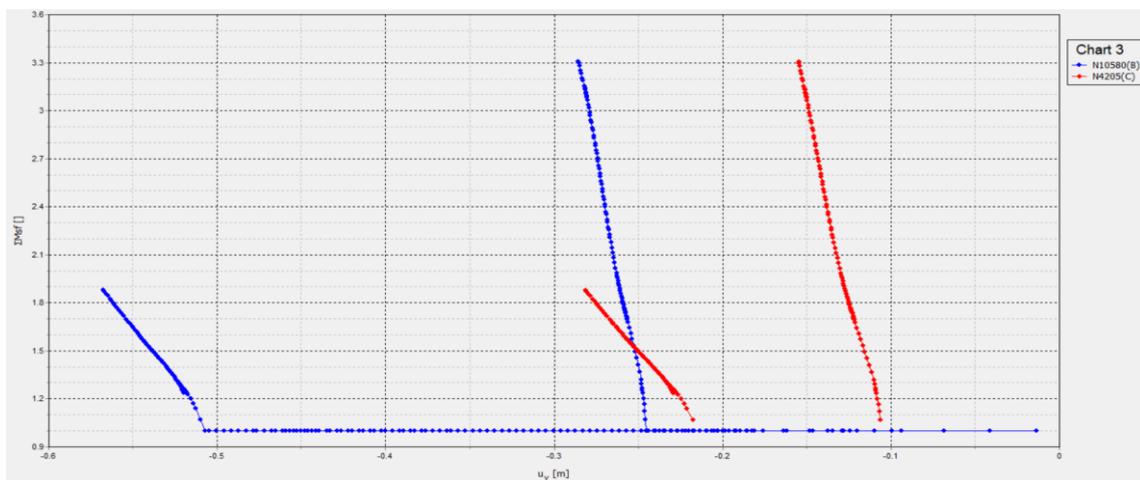


Figura 119. Factor de seguridad para los puntos B y C en la 3^{ra} y 4^{ta} fase del caso 2

El factor de seguridad obtenido en los dos puntos (B y C) al cabo de la 3^{ra} fase fue de 3.3, en cambio, para los mismos puntos en la 4^{ta} fase bajó a 1.9.

5.3. Caso 3: EPS de 40 kg/m³

Todo el proceso constructivo y las consideraciones de cargas son iguales que en el caso 2, con la diferencia de que se utilizarán bloques de EPS de 40 kg/m³.

Se espera que para esta densidad y propiedades el material también cumpla. La interrogante estará en la variación de los desplazamientos de los puntos seleccionados respecto al caso 2.

Tras el respectivo análisis, la deformada de esta fase se muestra en la Figura 120.

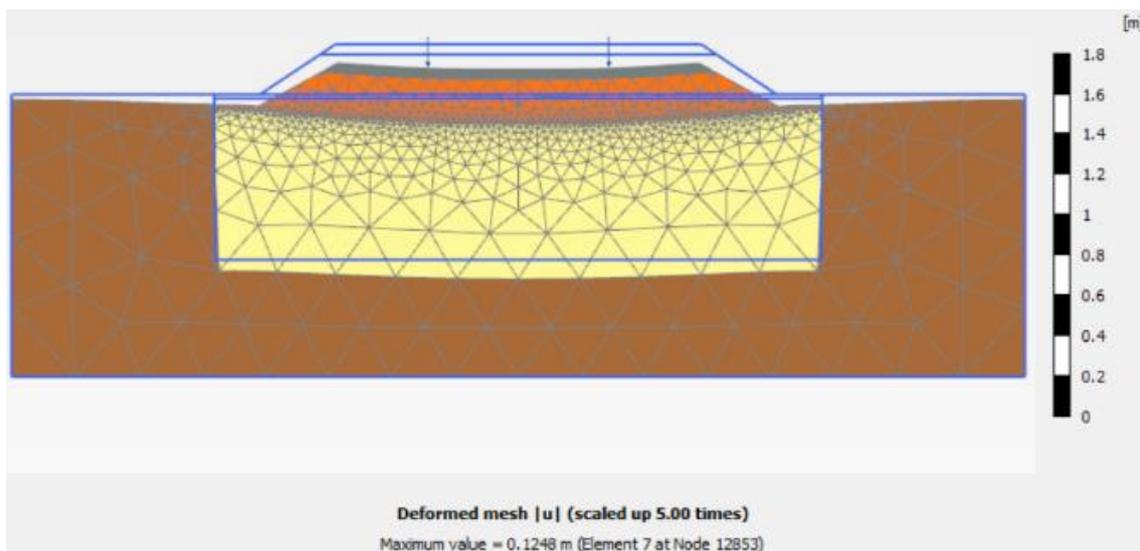


Figura 120. Deformada de la 3ra fase (caso 3). Escala del desplazamiento aumentada 5 veces

Los desplazamientos de toda la sección aparecen en la Figura 121.

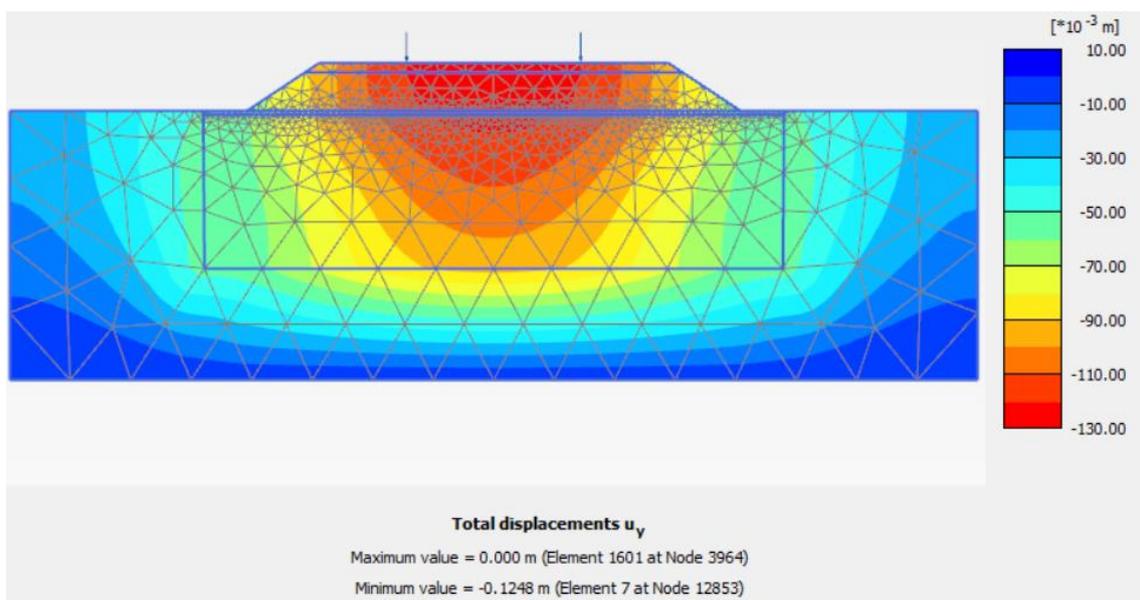


Figura 121. Desplazamiento vertical de la 3ra fase (caso 3) en toda la sección

La Figura 122 muestra los desplazamientos de los puntos B, C y E desde la primera hasta la cuarta fase, y en la Figura 123, los correspondientes a los puntos A y D.

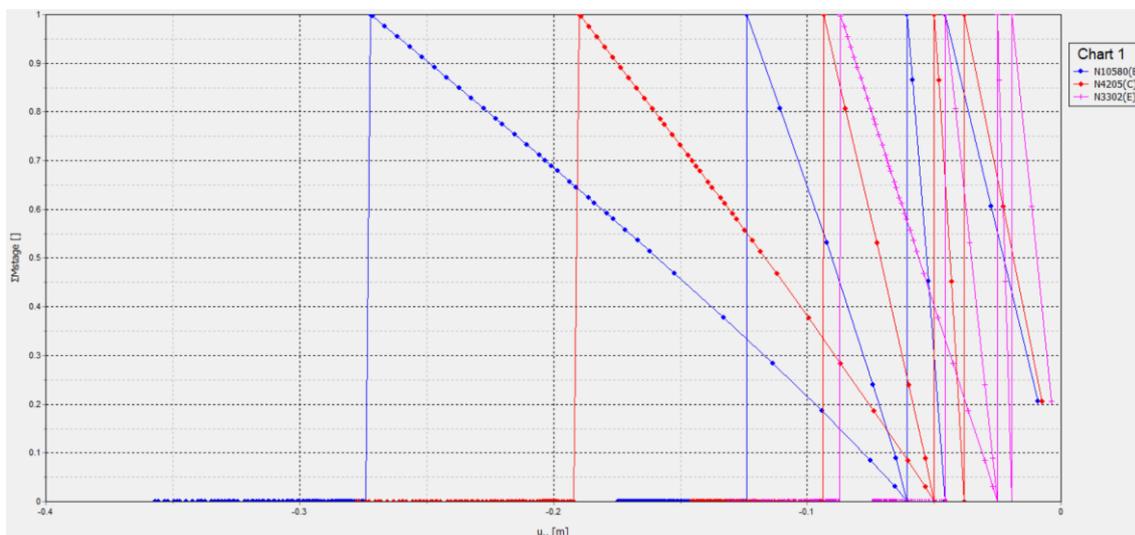


Figura 122. Proporción de fase alcanzada vs el desplazamiento para los puntos B, C y E (caso 3)

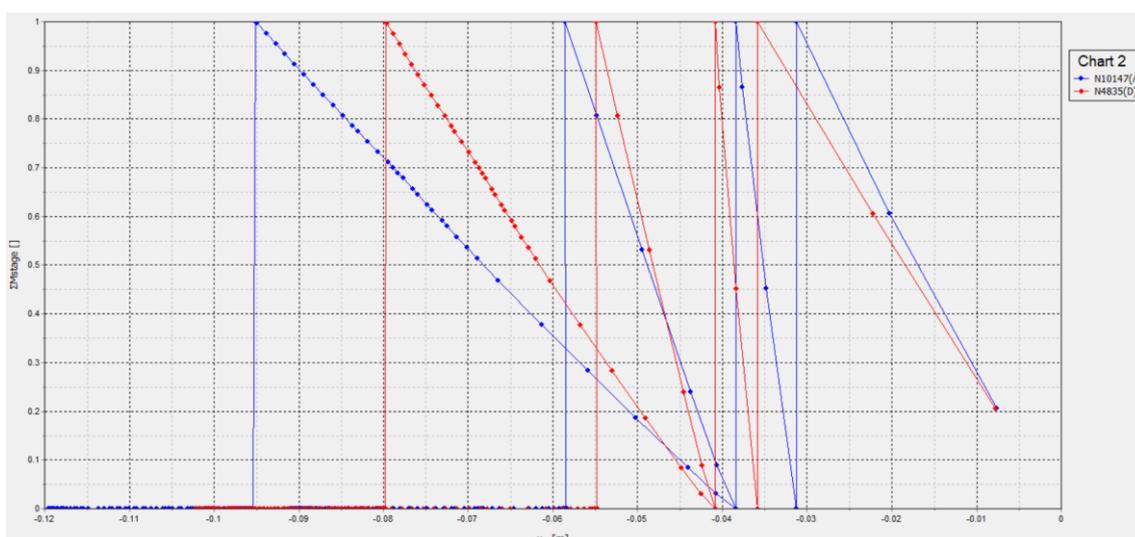


Figura 123. Proporción de fase alcanzada vs el desplazamiento para los puntos A y D (caso 3)

La Tabla 39 refleja el valor de los desplazamientos de cada punto en cada fase.

Caso 3				
Punto	Desplazamiento (m)			
	1 ^{ra} fase	2 ^{da} fase	3 ^{ra} fase	4 ^{ta} fase
A	0.031	0.038	0.058	0.095
B	0.046	0.061	0.124	0.274
C	0.038	0.050	0.094	0.192
D	0.036	0.041	0.055	0.080
E	0.020	0.025	0.046	0.087

Tabla 39. Desplazamientos en los puntos seleccionados del caso 2

En la Figura 124 se presenta el factor de seguridad obtenido en el punto B y C para la tercera y cuarta fase.

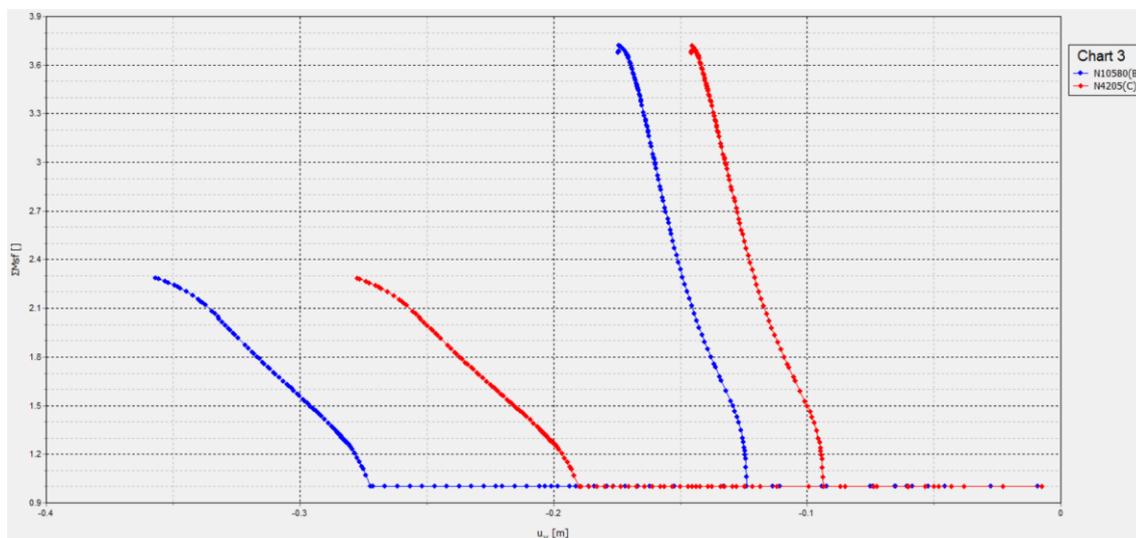


Figura 124. Factor de seguridad para los puntos B y C en la 3^{ra} y 4^{ta} fase del caso 3

Respecto a las muestras de 20 kg/m³, el factor de seguridad aumentó. En los puntos B y C fue de 3.7 al cabo de la tercera fase. En la cuarta, pasaron de 1.9 a 2.3.

5.4. Resumen

Como fue evidente, el terreno blando por sí solo no pudo resistir el 100 % de la carga de diseño (solamente el 65 %). Al emplearse el geofoam se pudo buscar una solución a este problema.

El EPS de 20 kg/m³ pudo resistir las cargas de diseño y la consideración de la cuarta fase del triple de dicha carga. El punto B fue el que experimentó mayor desplazamiento vertical al completarse la tercera fase, con 0.246 m.

El de 40 kg/m³ también cumplió en cada fase y en comparación con el anterior, se obtuvieron menores desplazamientos y mayor factor de seguridad.

La Tabla 40 muestra una comparativa del desplazamiento vertical en cada punto en función de las fases constructivas y, obviamente, del caso en cuestión (1, 2 o 3). En la Tabla 41 se comparan los factores de seguridad obtenidos en la tercera y cuarta fase de los casos 2 y 3.

Punto	Fase 1					Fase 2				
	Desplazamiento (m)			Variación (%)		Desplazamiento (m)			Variación (%)	
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1 al 2	Caso 2 al 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1 al 2	Caso 2 al 3
A	0.047	0.039	0.031	- 17.0	- 20.5	0.055	0.045	0.038	- 18.2	- 15.6
B	0.137	0.094	0.046	- 31.4	- 51.1	0.170	0.124	0.061	- 27.1	- 50.8
C	0.054	0.044	0.038	- 18.5	- 13.6	0.067	0.058	0.050	- 13.4	- 13.8
D	0.016	0.029	0.036	81.2	24.1	0.019	0.032	0.041	68.4	28.1
E	-	0.022	0.020	-	- 9.1	-	0.029	0.025	-	- 13.8

Punto	Fase 3					Fase 4				
	Desplazamiento (m)			Variación (%)		Desplazamiento (m)			Variación (%)	
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1 al 2	Caso 2 al 3	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 1 al 2	Caso 2 al 3
A	0.065*	0.062	0.058	-	- 6.4	-	0.086	0.095	-	10.5
B	0.255*	0.246	0.124	-	- 49.6	-	0.511	0.274	-	- 46.4
C	0.100*	0.107	0.094	-	- 12.1	-	0.239	0.192	-	- 19.7
D	0.027*	0.042	0.055	-	31.0	-	0.058	0.080	-	37.9
E	-	0.051	0.046	-	- 9.8	-	0.096	0.087	-	- 9.38

Tabla 40. Comparativa del desplazamiento vertical de cada punto en función a los casos considerados y sus fases

donde:

* datos obtenidos al 65 % de la fuerza aplicada. No fueron considerados en la comparación

Caso 1 es el terreno blando sin EPS

Caso 2 es la solución con EPS de 20 kg/m³

Caso 3 es la solución con EPS de 40 kg/m³

Punto	Fase 3			Fase 4		
	Factor de seguridad		Variación (%)	Factor de seguridad		Variación (%)
	Caso 2	Caso 3	Caso 2 al 3	Caso 2	Caso 3	Caso 2 al 3
B	3.3	3.7	12.1	1.9	2.3	21.0
C						

Tabla 41. Comparativa del factor de seguridad obtenidos en la tercera y cuarta fase de los casos 2 y 3

Si se comparan las fases en las que el terreno blando soportó todas las cargas en un 100 % (fases 1 y 2) con la primera solución de EPS (caso 2), hay una disminución en los desplazamientos verticales que oscila entre un 17 – 31.4 %. Aun este material

resistiendo completamente la carga de diseño en la fase 3, obtuvo menores desplazamientos que el terreno en el caso uno resistiendo solamente el 65 %.

Al comparar los resultados del EPS de 20 kg/m^3 con el de 40 kg/m^3 , los desplazamientos de este último, de manera general, fueron menores a los del caso 2. También, el factor de seguridad fue levemente mayor en los puntos evaluados (B y C) en relación al de 20 kg/m^3 .

6 Conclusiones

Luego de varios estudios en las propiedades y comportamientos del geofom teniendo en cuenta su densidad, se han podido establecer varias conclusiones al respecto.

En las pruebas de corta duración en los ensayos edométricos, el aumento porcentual obtenido al aumentar geoméricamente la carga partiendo de 12.5 kPa hasta 50 kPa fue entre 170 % – 192 %. Esto no sucedió cuando se duplicó a 100 kPa. Aquí la variación respecto a los 50 kPa fue 11.5 veces mayor y, por tanto, se superó el 10 % de la deformación.

En los ensayos edométricos de larga duración y con ciclos de carga, tras más de 620 horas a un esfuerzo de compresión constante de 25 o 50 kPa, no se pudo conseguir que se estabilizara la deformación por fluencia en las muestras de 20 kg/m³.

La deformación por fluencia fue menor en las muestras de mayor densidad.

El porcentaje de recuperación del EPS de 20 kg/m³ es el siguiente: entre 36 % – 45 % al pasar de 25 kPa a 0 kPa, de 20 – 25 % si el esfuerzo es de 50 kPa y se retira por completo, y de un 5 % si sucede lo mismo a 100 kPa.

Aunque hubo algunos inconvenientes para determinar el coeficiente de Poisson, se pudo obtener unos valores que coinciden con los de algunos autores de referencia, aunque estos autores no especificaron la densidad ni el rango de deformación con el cual establecieron dicho coeficiente.

Por tanto, para una densidad entre 15 a 20 kg/m³ y cuyo rango de deformación esté entre el 1 – 10 %, el coeficiente de Poisson está entre 0.01 y 0.04. En el mismo rango de deformación, pero a una densidad variable entre 35 a 40 kg/m³, el valor es de 0.02 a 0.07.

Los ensayos a compresión simple fueron realizados con una velocidad de deformación baja. Los valores obtenidos del esfuerzo de compresión uniaxial para las muestras de 20 y 40 kg/m³ coinciden con los obtenidos por autores de referencia.

El esfuerzo de compresión uniaxial en las muestras de 20 kg/m³ al 5 % de la deformación fue de 63.3 kPa y de 81.3 kPa para el 10 %. En las de 40 kg/m³ fue de 227 kPa para el 5 % y de 267.2 kPa en el 10 %. Como se aprecia, un aumento en la densidad no se corresponde en igual medida con el del esfuerzo.

El módulo de Young o tangente entre el 1 – 4 % de la deformación para el EPS de 20 kg/m³ fue de 1,500 kPa. Para el mismo rango de deformación, pero en el de 40 kg/m³, es de 6,100 kPa. Estos resultados fueron menores a los obtenidos por diversos autores ya citados, debido a que éstos calcularon el módulo tangencial inicial.

El E₅₀ obtenido para el EPS de 20 kg/m³ fue de 1,250 kPa y para el EPS de 40 kg/m³, 5,400 kPa.

Al realizar las modelizaciones en Plaxis, los dos tipos de EPS pudieron resistir la carga de diseño con un buen factor de seguridad. Incluso, resistieron tres veces este valor. La principal diferencia fue el mayor desplazamiento vertical en el menos denso.

En algunos puntos donde se midieron los desplazamientos, el EPS de mayor densidad registró hasta un 50 % menos en comparación con el de 20 kg/m³. Por tanto, para este problema se emplearía el de 40 kg/m³ para tener menores asentamientos.

7 MReferencias

ACH Foam Technologies, (2009). Kansas City, Estados Unidos. Recuperado de: <https://www.achfoam.com>

Asociación Nacional de Poliestireno Expandido (ANAPE), (2019). Madrid, España. Recuperado de: <http://anape.es>

Aabøe, R., (2011). 40 years of experience with the use of EPS Geofomo blocks in road construction.

Aabøe, R., Floyd, S., Duškov, M., Frydenlund, T. E., Nath Mandal, J., Negussey, D., Tolga, A., Tsukamoto, H., y Vaslestad, J., (2018). Geofomo blocks in civil engineering applications. 5th International Conference on Geofomo Blocks in Construction Applications.

Beer, F. P., Johnston, E. R., y DeWolf, J. T., (2004). "Mecánica de Materiales", 3ª Ed. México DF, México: McGraw-Hill Interamericana.

Consejería de Economía y Hacienda, (2012). Guía sobre materiales aislantes y eficiencia energética. Madrid, España. Recuperado de: <http://www.fenercom.com>

CST Grupo, (2018). España. Recuperado de: <https://www.cstgrupo.com>

Damtew, T., Vaslestad, J., y Refsdal, G., (2011). Case histories EPS geofomo embankments from Eastern Norway. 4th International Conference on Geofomo Blocks in Construction Applications EPS 2011 Norway.

Dávila Martín, J. M., (2013). La utilización de poliestireno expandido en obras de geotecnia (Tesis doctoral). Universidad de Sevilla, Sevilla, España.

Desjarlais, A. O., y Zarr, R. R., (2002). "Insulation materials. Testing and applications", 4th Vol. Bridgeport, Estados Unidos: ASTM International.

Dusenberry, K., y Bygness, R., (2006). Geofomo provides lightweight fill for York Bridge in Washington. Geosynthetics. 24(4), 2-7

Eaves, D., (2004). "Handbook of polymer foams". Shropshire, Reino Unido: Rapra Technology Limited.

Elragi, A. F., (2006). Selected engineering properties and applications of EPS geofomo.

Enporex S. A., (2019). Recuperado de: <https://www.enporex.com.ar>

EPS Industry Alliance, (2012). Recuperado de: <https://www.epsindustry.org>

Fernández-Pacheco Ingenieros, S.L., (2019). España. Recuperado de: <http://www.fpingenieros.com>

Foam-Control Geofom, (2018). Recuperado de: <https://www.geofom.com>

Gere, J. M., (2006). "Mecánica de materiales", 6ª Ed. México DF, México: Cengage Learning Editores S. A.

Hibbeler, R. C., (1997). "Mecánica de materiales", 3ª Ed. Naucalpan de Juárez, México: Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A.

Horvath, J. S., (2010). Emerging trends in failures involving EPS-Block geofom fills. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 24(4), 365-372.

Horvath, J. S., (2013). Cellular geosynthetics in highway applications. 64th Highway Geology Symposium

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, (2007). Guía Técnica para la Rehabilitación de la Envolvente Térmica de los Edificios: Soluciones con aislamiento de poliestireno expandido (EPS). Madrid, España.

Isotex Dominicana S.A.S., (2019). Construcción de carreteras, aislamientos, suelos y otras aplicaciones en la construcción. Santo Domingo, Rep. Dom. Recuperado de: <https://isotexdominicana.com>

Junta de Andalucía: Consejería de Obras Públicas y Transportes, (2007). Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía. Andalucía, España.

Kahlstöm, M., (2013). Plaxis 2D Comparison of Mohr-Coulomb and Soft Soil Material Models (Tesis de maestría). Universidad Tecnológica de Luleå, Luleå, Suecia.

Martínez Martínez, N., (2012). Construcción con paneles estructurales de poliestireno expandido (Tesis de grado). Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España.

Martínez Moreno, E., (2018). Investigating material Characteristics of eps geofom with different laboratory methods (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España.

Microtest, S. A. Máquinas multiensayo electromecánicas EM1/.../FR. Madrid, España.

Muros de contención de Allan Block, (2008). Allan Block. Recuperado de: <http://www.allanblock.es>

Negussey, D., y Jahanandish, M., (1993). Comparison of some engineering properties of expanded polystyrene with those of soils. Transportation Research Board, 43-50.

Nieto L., A., Camacho T., J. F., Ruiz B., E. F., (2009). Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos Mohr-Coulomb y Hardening Soil en suelos arcillosos. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 8(15), 75-91.

Pérez García, N., Garnica Anguas, P., Pérez Salazar, A., Juárez Hidalgo, R., y Castro Mondragón, F., (2016). Evaluación de las propiedades mecánicas del poliestireno expandido. Querétaro, México.

Popov, E. P., (2000). "Mecánica de sólidos", 2ª Ed. Naucalpan de Juárez, México: Pearson Education.

Rougeron, C., (1977). "Aislamiento acústico y térmico en la construcción". Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados, S. A.

Snow, R., Webb P.E., J., y Sander, M., (2010). Light rail on gefoam West Valley UTA TRAX Project. AREMA Conference and Exposition, Orlando, Estados Unidos.

Stark, T. D., Arellano, D., Horvath, J. S., y Leshchinsky, D., (2004). Geofom applications in the design and construction of highway embankments. Washington DC, Estados Unidos.

Südmährer Land an der Thaya, (2019). Recuperado de: <http://www.suedmaehren.at>

Sun, M., (1997). Engineering behavior of geofom (expanded polystyrene) and lateral pressure reduction in substructures (Tesis de maestría). Universidad de Siracusa, Nueva York, Estados Unidos.

Tecnopor, S.A., (2019). Recuperado de: <http://geofom.com.bo>

Tejedor L., A., (2014). Comportamiento triaxial consolidado y sin drenaje de la marga azul del Guadalquivir con modelos elastoplásticos y elementos finitos axilsimétricos (Tesis de grado). Universidad de Sevilla, Sevilla, España.

Tepper, H., (2012, 27 de agosto). El EPS en aplicaciones de ingeniería civil: propiedades y prestaciones del producto. Interempresas. Recuperado de: <https://www.interempresas.net>

Textos Científicos, (2005). Recuperado de: <https://www.textoscientificos.com>

Tolga Özer, A., y Akanay, E., (2018). First geofam roadway embankment application in Turkey. 5th International Conference on Geofam Blocks in Construction Applications.

Valestad, J., (2018). Applications of EPS geofam. State of the art. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España.

Valestad, J., Floyd, S., Aabøe, R., Burkart, H., Ahmed, T., y Arellano, D., (2018). Bridge foundations supported by EPS geofam embankments on soft soil. 5th International Conference on Geofam Blocks in Construction Applications.

Van Dorp, T., (1988). "Expanded polystyrene foam as light fill and foundation material in road structures". International Congress on Expanded Polystyrene, Milan, Italia.

UNE 103-405-94. Ensayo de consolidación unidimensional de un suelo en edómetro.

UNE-EN 826. Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación del comportamiento a compresión.

UNE-EN 14933. Productos aislantes térmicos y de relleno ligero para aplicaciones en la ingeniería civil. Productos manufacturados de poliestireno expandido (EPS).