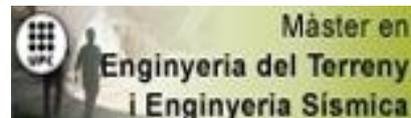


TREBALL FINAL DE MÀSTER



TÍTOL

**CARACTERIZACION EXPERIMENTAL DE LA
RESPUESTA AL CORTE DE ARIDOS PARA BALASTO**

AUTOR

NAHUEL MANZO COSTANZO

TUTOR

JEAN VAUNAT

ESPECIALITAT

INGENIERIA GEOTECNICA

DATA

9 DE DICIEMBRE DE 2014



**Dept. d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica
E.T.S. Enginyers de Camins, Canals i Ports**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



RESUMEN

"Si el ferrocarril lograba sobreponerse a las adversidades del siglo XX pasaría a ser el medio de transporte del siglo XXI", se ha dicho en varias ocasiones. Esto puede verse reflejado en el crecimiento que han experimentado las líneas de alta velocidad en la primer década del siglo XXI alrededor del mundo.

Esta necesidad de mantener la competitividad con otros medios de transporte, ha obligado al ferrocarril a profundizar en materia de investigación brindando soluciones que lo hagan más eficiente, principalmente reduciendo los costes relacionados a mantenimiento e infraestructura.

En el caso de las vías en balasto, aproximadamente el 90% de las vías que existen en el mundo, el coste de mantenimiento puede ser reducido significativamente resolviendo una de las problemáticas que conlleva un elevado coste, la durabilidad de la capa de balasto.

El deterioro de las partículas que componen la capa de balasto tiene origen en las vibraciones que se generan con el paso de los ejes de los vehículos, provocando distintos tipos de rotura en las partículas de balasto que disminuyen la capacidad del conjunto a resistir cargas y por tanto conservar una geometría de vía adecuada.

De los tipos de rotura que se originan, los que más perjudican a la durabilidad del conjunto son la rotura por fragmentación y por abrasión. Este tipo de deterioro además de redondear los áridos y de quitar la trabazón del conjunto, generan finos que al acumularse modifican el comportamiento mecánico de la capa de balasto.

En base a esta problemática se está llevando a cabo una investigación que consiste en recubrir los áridos con neumático reciclado con el objeto de disminuir el deterioro que soportan los áridos aumentando el área y disminuyendo la rigidez del contacto entre partículas. A éste árido recubierto se lo denomina NEOBALLAST. Otro beneficio asociado que se intenta obtener es el de disminuir las vibraciones y el ruido que se generan con el paso de trenes reutilizando caucho reciclado, brindando de esta manera una solución ambiental a la problemática de los neumáticos fuera de uso.

En la presente Tesina se describe el comportamiento de los mencionados áridos ensayados en el Corte Directo Tradicional y el Corte Directo de Gran Tamaño del Laboratorio de Geotecnia de la UPC y en base a los parámetros obtenidos se realiza un análisis de la influencia que tiene el recubrimiento aplicado sobre el árido original. Este ensayo es el paso previo a la realización de ensayos dinámicos y ayuda a definir el tipo de recubrimiento más conveniente para continuar con las siguientes etapas de proyecto.

De esta manera se contribuye a la búsqueda de alternativas que solucionen la problemática existente en la capa de balasto y se complementan áreas de estudio, empleando ensayos tradicionalmente de Mecánica de Suelos y Geotecnia para estudiar la infraestructura ferroviaria.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a la gente que, ya sea desde cerca o desde lejos, me llena de energía y cariño para ir superando cada etapa que me toca afrontar. Simplemente por estar ahí siempre: a Alexandra; a mis viejos y mis hermanos; a Leandro, Tania y Luquitas; a Jorge, Amanda y la chuni; y a Oscar, Joel y el Malla; los quiero mucho.

No me olvido del apoyo académico que también, siempre estuvo y está presente. Muchas gracias a Andrés López Pita y Jean Vaunat por su conducción en el presente trabajo, a Jordi y Jose por vuestra colaboración en el Laboratorio de Caminos, y a Rodrigo y a Víctor por su amistad y gran ayuda para realizar gran parte de los trabajos asociados a la presente investigación en el Laboratorio de Geotecnia de la UPC.

INDICE

RESUMEN	1
AGRADECIMIENTOS.....	3
1. OBJETIVO Y ALCANCE DE LA TEISS	8
2. ESTADO DEL ARTE SOBRE LA VIA EN BALASTO.....	9
2.1 LA VIA SOBRE BALASTO.....	9
2.1.1 Los carriles.....	9
2.1.2 Fijaciones y placas de asiento.....	10
2.1.3 Las traviesas.....	11
2.1.4 El balasto.	12
2.2 EL PAPEL DEL BALASTO.....	14
2.2.1 Obtención del balasto y transporte.....	14
2.2.2 Embalastado y bateo.....	15
2.2.3 Geometría y distribución granulométrica del balasto.....	16
2.2.4 Propiedades mecánicas y físicas del balasto.....	18
2.2.5 Propiedades del balasto según el criterio americano.....	21
2.3 CALIDAD GEOMETRICA DE LA VIA.....	23
2.3.1 Defectos geométricos de vía.....	23
2.3.2 Causas de los defectos geométricos.....	24
2.3.3 Importancia del balasto en la geometría de la vía.....	26
2.3.4 Determinación del espesor de balasto.....	26
3. PROYECTO NEOBALLAST.....	30
3.1. MOTIVOS DEL PROYECTO.....	30
3.2. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	31
3.3. TIPOS DE RECUBRIMIENTOS Y METODOLOGIA IMPLEMENTADA.....	33
4. ENSAYOS DE CORTE DIRECTO.....	39
4.1. TIPOLOGIAS.....	39
4.1.1. <i>Corte directo de gran tamaño.</i>	39
4.1.2. <i>Corte directo convencional.</i>	42
4.2. MUESTRAS ENSAYADAS.....	43
4.2.1. <i>Muestras de corte de gran tamaño.</i>	44
4.2.2. <i>Muestras de corte convencional.</i>	44
4.3. RESULTADOS.....	45
4.3.1. <i>Balasto natural</i>	46

4.3.2.	<i>Materiales de recubrimiento</i>	50
4.3.3.	<i>Balasto recubierto</i>	59
5.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	69
5.1.	PARAMETROS MOHR-COULOMB	69
5.1.1.	<i>Balasto natural y balastos recubiertos (CDGT)</i>	69
5.1.2.	<i>Caucho en polvo (CDC)</i>	70
5.2.	COMPORTAMIENTO DEL BALASTO Y NEOBALLAST EN LOS PRIMEROS 10 mm	71
5.3.	COMPORTAMIENTO DEL BALASTO Y NEOBALLAST BAJO CICLOS EN EL CDGT.	73
5.4.	GRANULOMETRIA DE LAS MUESTRAS LUEGO DE LOS ENSAYOS.	74
6.	CONCLUSIONES	75
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	76

1. OBJETIVO Y ALCANCE DE LA TEISS

La presente tesis tiene por objetivo caracterizar el comportamiento del árido utilizado como balasto sometido al ensayo de corte directo de gran tamaño. Del mismo modo se ensaya árido recubierto con caucho reciclado y se realiza una comparativa entre los resultados obtenidos de ambos escenarios.

Hay varios motivos por los cuales se ha decidido realizarle un recubrimiento a los áridos, siendo la resistencia al desgaste y a la fragmentación los de mayor interés. Otras bondades que se intentan obtener son: ampliar el área de contacto entre áridos reduciendo las tensiones de transmisión, disminuir las vibraciones que se generan con el paso de trenes y disminuir el ruido.

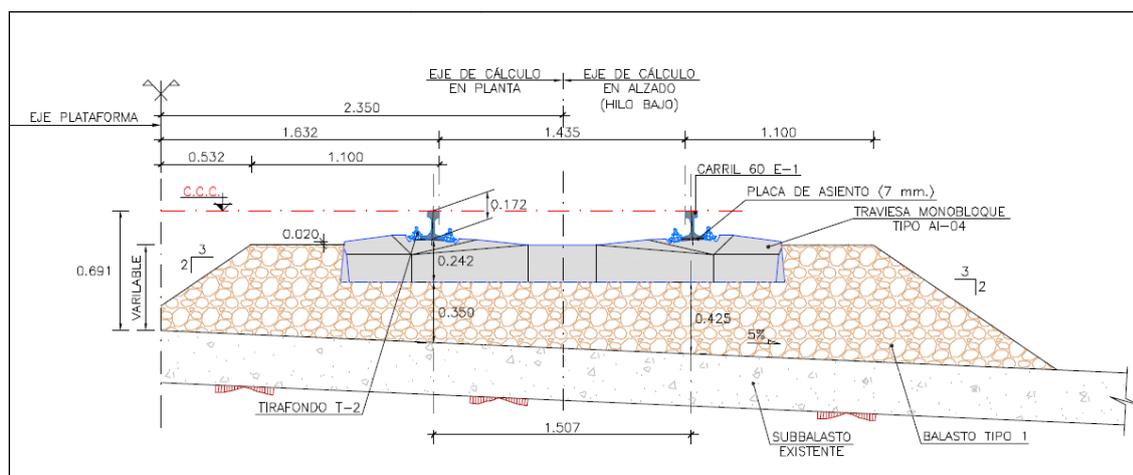
Algunas de las características mencionadas han podido ser evaluadas, como los esfuerzos y el deterioro de las muestras, mientras que otras, como las vibraciones y el ruido, quedan fuera del alcance del presente ensayo.

Asimismo, a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de corte directo se obtiene una importante base de partida para realizar los siguientes ensayos cíclicos y posteriormente los previstos ensayos in situ.

2. ESTADO DEL ARTE SOBRE LA VIA EN BALASTO

2.1 LA VIA SOBRE BALASTO.

La vía férrea tradicional está constituida por una serie de elementos que permiten el guiado de los trenes y el soporte de las cargas inducidas por su circulación. Esta se encuentra conformada por la superestructura que abarca los carriles, las fijaciones, las placas de asiento, las traviesas, el balasto y el subbalasto, y la infraestructura que está conformada por la plataforma (Fig. 2.1).



Figura

2.1. Sección típica de vía en balasto.

Los elementos que conforman la superestructura se encargan de transmitir las cargas de los trenes hacia la plataforma, disminuyendo las tensiones a medida que se transmiten de elemento a elemento. La disminución de estas cargas se efectúa aumentando las respectivas superficies de contacto entre componentes de la superestructura reduciendo las tensiones iniciales del contacto rueda-carril en 20.000 veces hasta alcanzar la plataforma. De este modo las tensiones de 300 Mpa que se generan en el contacto rueda-carril, alcanzan la plataforma con un valor inferior al de punzonamiento de la misma.

2.1.1 Los carriles.

Los carriles son los elementos de contacto entre el vehículo y la vía. Estos desempeñan un rol muy importante asegurando:

- La transmisión y redistribución de cargas verticales desde las ruedas hacia las traviesas a través de las placas de asiento.
- El guiado lateral de las ruedas y por tanto la absorción y transmisión de los esfuerzos transversales y la transmisión a las traviesas.

- Una superficie de rodadura lisa y la distribución de esfuerzos de frenado y de aceleración
- El retorno de la corriente de tracción de las líneas electrificadas, y la conducción de corriente para los circuitos de vía para los aparatos de seguridad

En un carril se diferencian tres partes: cabeza, patín y el alma (Fig. 2.2). A su vez los distintos tipos de carriles se diferencian por su peso por metro lineal, que se encuentra estandarizado en algunos valores de referencia: 45 kg/ml, 49 kg/ml, 54 kg/ml y 60 kg/ml. Los primeros dos tipos se utilizan mayormente en líneas secundarias, el de 54 se utiliza en líneas con velocidades de entre 140 y 160 km/h, mientras que los carriles de 60 se utilizan en líneas con velocidades mayores a los 160 km/h.

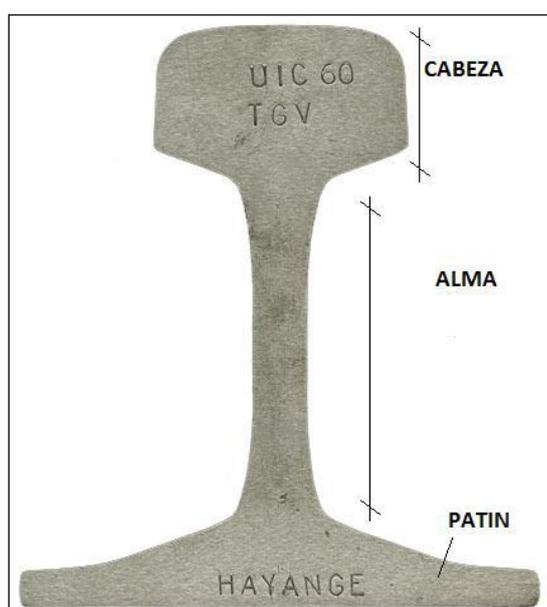


Figura 2.2. Carril UIC 60 (TGV).

2.1.2 Fijaciones y placas de asiento.

En los comienzos del ferrocarril las fijaciones carril-traviesa se realizaban de manera rígida, mediante escarpas o tirafondos. El paso del tiempo puso de manifiesto que este tipo de fijación se aflojaba y dejaban de cumplir su función de manera correcta por lo que se comenzaron a implementar las fijaciones de tipo elásticas que son las que se utilizan comúnmente en la actualidad (Fig. 2.3).



Figura 2.3. Fijación elástica tipo Omega.

El sistema de fijación permite una conexión segura de carriles a traviesas. Sus principales funciones son:

- La transmisión de cargas del carril a la traviesa, y el amortiguamiento de las vibraciones que produce el paso del material rodante.
- La resistencia longitudinal a movimientos por dilatación de los carriles soldados y el arriostamiento frente a pandeo.
- Posicionar el carril en la elevación e inclinación deseadas.
- El aislamiento eléctrico de los carriles.

2.1.3 Las traviesas.

Las traviesas tienen varias funciones. Proporcionan en particular:

- La transmisión de cargas de los carriles al balasto
- Propician la elevación e inclinación de 1/20 de la superficie de los carriles
- Brindan resistencia mecánica suficiente en dirección vertical y horizontal

Inicialmente las traviesas se hicieron de metal y de madera aumentando su estabilidad y resistencia con la invención del hormigón armado. Los únicos inconvenientes que han acarreado estos componentes se deben a su baja capacidad de absorber vibraciones y al elevado peso. A pesar de estos inconvenientes, las traviesas de hormigón armado (Fig. 2.4) son las más utilizadas en las vías principales y de alta velocidad. Las traviesas se apoyan sobre el balasto, el cual dota de una mayor resistencia lateral y longitudinal de la vía.



Figura 2.4. Traviesas sobre balasto.

En lo que respecta a las innovaciones introducidas en la superficie de contacto de las traviesas con la capa del balasto, destacan las suelas bajo traviesa que aumentan la superficie de contacto entre estos materiales y reducen las tensiones sobre los bordes de las traviesas. Su utilización en líneas de alta velocidad mostró una mejora de la vida del balasto, una mejor absorción de ruido y reducción de vibraciones y de asentamientos locales.

2.1.4 El balasto.

La capa de material granular que se coloca bajo las traviesas (Fig. 2.5) desempeña un importante papel en el comportamiento de una vía frente a las acciones tanto verticales como transversales ejercidas por el material ferroviario, así como frente a las acciones climáticas. El material utilizado proviene de rocas con altas resistencias a compresión e impacto. Estas suelen tener origen ígneo o metamórfico, aunque en algunas partes del mundo se utilizan también rocas sedimentarias.



Figura 2.5. Vía en balasto

En el ámbito de los esfuerzos verticales, el balasto debe cumplir tres funciones principales:

- a) Contribuir a proporcionar elasticidad y amortiguamiento a la vía, para reducir la magnitud de las sollicitaciones dinámicas ejercidas por los vehículos
- b) Disminuir el nivel de presiones que llegue a la superficie de la plataforma, para evitar que supere la capacidad resistente
- c) Soportar la abrasión que las partículas pueden tener como consecuencia de su contacto con infraestructuras rígidas, tal como sucede en las vías que discurren sobre puentes de hormigón.

2.2 EL PAPEL DEL BALASTO

La vía en balasto ha sido y es, la tipología que predomina en los tendidos ferroviarios construidos alrededor del mundo. A pesar de la reciente aplicación de las losas de hormigón como variante de la vía tradicional, conformando la vía en placa, el predominio de las vías en balasto es absoluto y esto se justifica debido al menor coste que requieren este tipo de infraestructuras.

Dentro de las funciones más importantes que aporta la capa de balasto al conjunto de la infraestructura, podemos destacar:

- La transmisión uniforme hacia la plataforma de las tensiones recibidas de las traviesas producidas por la circulación de formaciones.
- La dotación de una elasticidad determinada al conjunto de vía.
- La estabilización de las traviesas, frente a las cargas longitudinales y transversales producidas por los trenes.
- La amortiguación de las vibraciones y la absorción del ruido, dotando de una mayor calidad y confort a la circulación.
- La estructura semirrígida que permite realizar correcciones del perfil en caso de deformaciones mediante el bateo, nivelación y estabilización.
- El drenaje eficaz de la estructura de vía eliminando de esta manera los problemas de hielo y deshielo.

Para cumplir las funciones mencionadas, es necesario disponer de un cierto espesor de balasto. Esta magnitud se sitúa entre 25 y 35 cm ya que con valores inferiores no se lograría el objetivo perseguido y con valores superiores se incrementaría el asiento de vía y previsiblemente el aumento también de los defectos geométricos. Para hacer frente a la abrasión, se exige que el balasto tenga un cierto coeficiente de Deval, en general mayor a 15.

2.2.1 Obtención del balasto y transporte.

El balasto se obtiene por trituración de rocas sanas y debe cumplir ciertas especificaciones en cuanto a calidad del material madre y en su granulometría. Se transporta en camiones hasta donde puede ser cargado en trenes especiales con tolvas que permiten su descarga en la vía.

Según lo establecido por la norma UNE EN 13450 el balasto deberá proceder de:

- La extracción de rocas de cantera, seguida de machaqueo, cribado y clasificación, con o sin posterior tratamiento industrial que implique una modificación térmica o de otro tipo.
- La reutilización de balasto procedente de obras ferroviarias.

Las rocas para extracción del balasto han de ser de naturaleza silícea y, preferentemente, de origen ígneo o metamórfico. Por tanto no se admitirán las de naturaleza caliza ni dolomítica. Asimismo el balasto no podrá contener fragmentos de: madera, materia orgánica, metales, plásticos, rocas alterables, ni de materiales tixotrópicos, expansivos, solubles, putrescibles, combustibles ni polucionantes (desechos industriales). Tampoco se admitirá balasto constituido por cantos rodados ni por mezcla de rocas de diferente naturaleza geológica.

Cuanto mayor son los requisitos exigidos, mayor es la dificultad para encontrar áridos naturales que los cumplan y, a su vez, mayor es el coste del transporte, ya que hay que buscarlos en ubicaciones lejanas a la obra. Es entonces, que existen solo una serie de canteras dentro del territorio español que constan de una certificación emitida por Adif y garantiza la calidad del balasto exigida (Fig. 2.6).

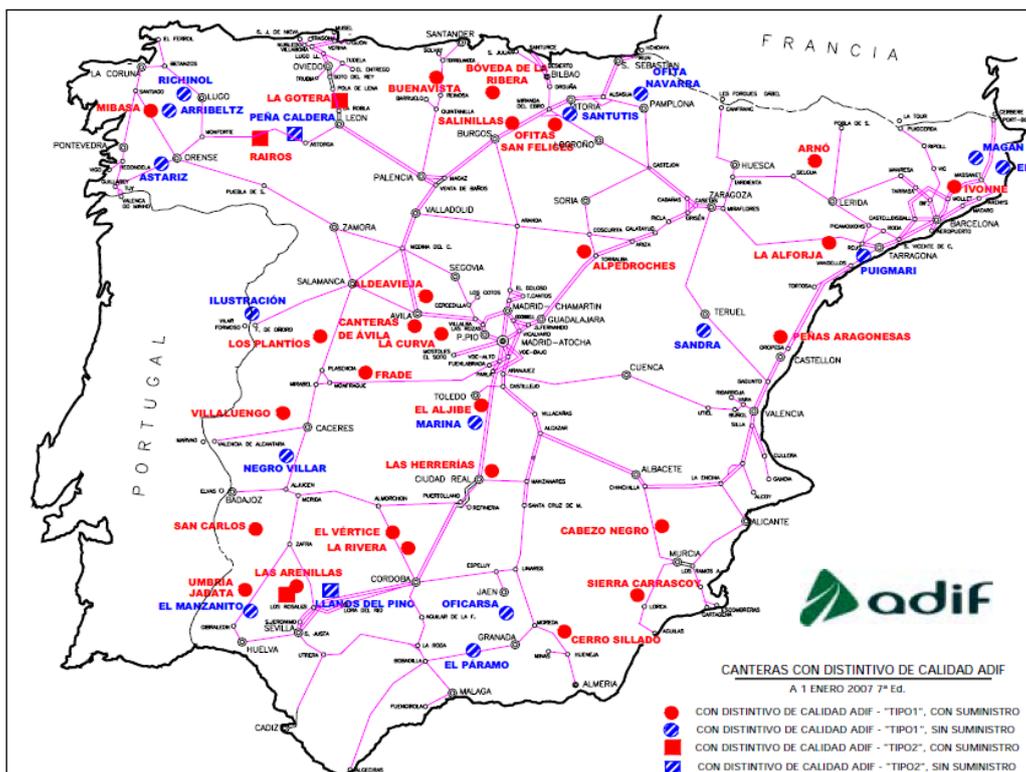


Figura 2.6. Canteras con distintivo de calidad ADIF.

2.2.2 Embalastado y bateo.

Uno de los procedimientos para efectuar el montaje de una vía es colocar inicialmente el emparrillado de la vía y hacer circular sobre él los vagones tolvas que descargan el balasto sobre la infraestructura. Para que el balasto proporcione el apoyo requerido a las traviesas

es necesario que las partículas que configuran dicha capa, experimenten un proceso de compactación mediante la realización de una operación llamada *bateo de la vía*.

Esta operación de bateo consiste en la introducción bajo la cara inferior de las traviesas de unos bates metálicos vibratorios (Fig. 2.7) que llevan a cabo la citada compactación del balasto. El ferrocarril dispone para ello, de las denominadas maquinas bateadoras un ejemplo de las cuales se muestra en la figura 2.8. Para que el bateo sea posible y eficaz, es preciso que las partículas de balasto tengan unas ciertas dimensiones que faciliten el bateo y una dureza determinada para que la inmersión de los bates en la capa de balasto no la deteriore en exceso.

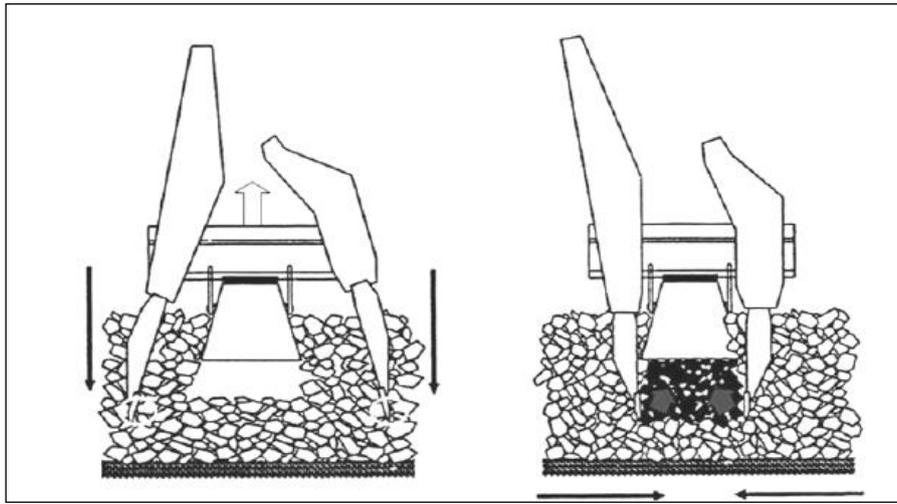


Figura 2.7. Movimiento de bates durante el proceso de bateo de vía.



Figura 2.8. Bateadora.

2.2.3 Geometría y distribución granulométrica del balasto.

Normativa Europea.

Desde el punto de vista práctico, la experiencia ha puesto de relieve la idoneidad de disponer partículas de balasto con tamaños comprendidos entre 20 y 60 mm. En la figura 2.9 se muestra el huso granulométrico del balasto para todo tipo de líneas y condiciones de explotación Ferroviaria según la orden FOM 1269:2006.

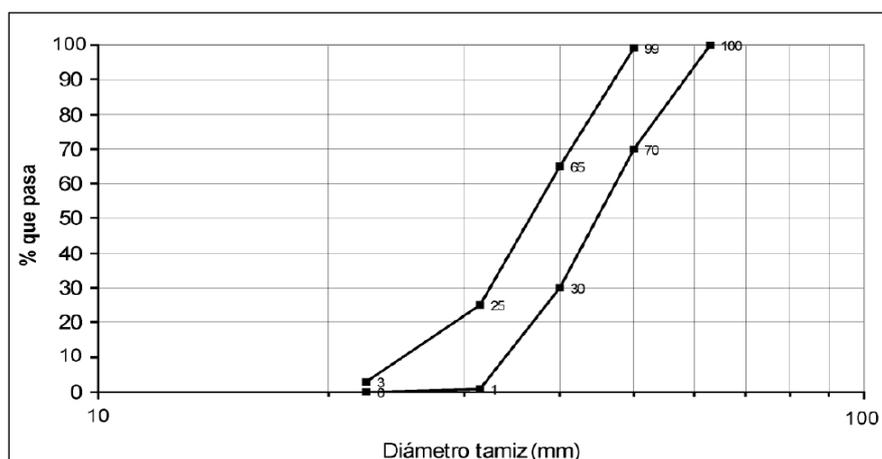


Figura 2.9. Huso granulométrico para todo tipo de balastos.

Dentro de los husos granulométricos permitidos por la normativa, existen distintas categorías de balasto en función de la distribución granulométrica. En la tabla 2.1, extraída de la norma UNE EN 13450, se distinguen los tipos de balasto clasificados de la A a la F, siendo los primeros los de mayor utilización y calidad.

Tabla 2.1. Categorías Granulométricas.

Tamaño de tamiz mm	Tamaño de balasto 31,5 mm a 50 mm			Tamaño de balasto 31,5 mm a 63 mm		
	Porcentaje que pasa en masa (%)					
	Categoría granulométrica					
	A	B	C	D	E	F
80	100	100	100	100	100	100
63	100	97 a 100	95 a 100	97 a 99	95 a 99	93 a 99
50	70 a 99	70 a 99	70 a 99	65 a 99	55 a 99	45 a 70
40	30 a 65	30 a 70	25 a 75	30 a 65	25 a 75	15 a 40
31,5	1 a 25	1 a 25	1 a 25	1 a 25	1 a 25	0 a 7
22,4	0 a 3	0 a 3	0 a 3	0 a 3	0 a 3	0 a 7
31,5 a 50	≥ 50	≥ 50	≥ 50	–	–	–
31,5 a 63	–	–	–	≥ 50	≥ 50	≥ 85

NOTA 1 – La especificación de pasar por el tamiz de 22,4 mm se aplica al balasto cuyas muestras se hubieran tomado en el lugar de producción.

NOTA 2 – En algunas circunstancias, se podrá emplear como alternativa un tamiz de 25 mm en lugar del tamiz de 22,4 mm, aplicándose una tolerancia de 0 a 5 (0 a 7 para la categoría F).

Fuente: UNE EN 13450

Conjuntamente con la clasificación general, se debe tener en cuenta que las porciones de material fino de las distintas categorías de balasto no excedan unos máximos establecidos. Este condicionante tiene por objeto evitar que se pierda la porosidad de la capa de balasto y

la pérdida de las características elásticas de ésta. En las tablas 2.2 y 2.3 se determinan los valores anteriormente mencionados (UNE EN 13450).

Tabla 2.2. Categorías para el contenido de partículas finas.

Tamaño de tamiz mm	Porcentaje máximo que pasa en masa			
	Categoría de partículas finas			
	A	B	Declarada	C
0,5	0,6	1,0	> 1,0	Sin especificación

NOTA – La especificación se aplica al balasto cuyas muestras se hubieran tomado en el lugar de producción.

Fuente: UNE EN 13450

Tabla 2.3. Categorías para el contenido de finos.

Tamaño de tamiz mm	Porcentaje máximo que pasa en masa				
	Categoría de partículas de finos				
	A	B	C	Declarada	D
0,063	0,5	1,0	1,5	> 1,5	Sin especificación

NOTA – La especificación se aplica al balasto cuyas muestras se hubieran tomado en el lugar de producción.

Fuente: UNE EN 13450

En paralelo se obliga a reducir al mínimo la presencia de partículas lajosas, tanto por la dificultad que presenta su bateo, como por su tendencia al deslizamiento. De este modo la normativa establece que las partículas que forman el balasto tendrán formas poliédricas definidas por caras de fractura con aristas vivas, con la dimensión mayor no superior a 3 veces la dimensión menor (espesor). A su vez el espesor mínimo de los elementos granulares será de 25 mm y el porcentaje de piedras cuya longitud máxima sea superior a 100 mm será $\leq 4\%$

2.2.4 Propiedades mecánicas y físicas del balasto.

Cuando el eje de un vehículo se desplaza a lo largo de la vía, se producen en ésta dos fenómenos simultáneos: el primero una flexión vertical que, en función de la capacidad vertical resistente, afecta a una mayor o menor longitud de vía (3 a 4 metros); el segundo, el levantamiento de una parte delantera de la vía en la dirección al movimiento.

La deflexión vertical presenta un valor máximo bajo el punto de aplicación de la carga (eje del vehículo) que suele oscilar entre 1,5 y 2 mm bajo la acción de una carga por rueda de 10 toneladas. La magnitud de la onda de levante suele ser de aproximadamente 1/10 de la deflexión vertical, es decir, de 0,15 a 0,20 mm. Aun cuando la pequeña elevación de la vía y su posterior anulación al continuar el movimiento de los vehículos pudieran parecer no tener influencia práctica, la realidad es distinta.

En efecto, el sucesivo golpeteo de las traviesas sobre el balasto, correspondiente a los sucesivos ejes que pasan por una vía (el paso de un solo tren de mercancías puede representar el efecto de más de 150 ejes) y el cada vez mayor uso de traviesas pesadas (300

a 380 kg) frente a las primitivas traviesas de madera (80 kg de peso), pueden ocasionar un rápido deterioro de las partículas de balasto.

Para cumplir con la condición de dureza, se exige que la roca de origen de las partículas de balasto tenga una a compresión simple de al menos 120 Mpa. Las rocas que más frecuentemente cumplen estas condiciones son las de origen ígneo y metamórfico.

En lo que respecta a los criterios de fragmentación del balasto, se exige que este material tenga un coeficiente de Los Ángeles (CLA) inferior a un cierto valor. Los criterios de referencia se sitúan en las siguientes magnitudes: $CLA \leq 15$ para líneas con velocidades máximas iguales o superiores a 200 km/h, y $CLA \leq 18$ para las líneas convencionales.

En función del tipo de balasto, la norma UNE EN 13450 define los valores del CLA requerido. Para el balasto tipo 1 el CLA ha de ser igual o inferior a 14%, para el tipo 2 igual o inferior al 16 % y por último el balasto clase 3 ha de tener un $CLA \leq 20\%$.

Con ocasión de la construcción de líneas de alta velocidad en Europa, los ferrocarriles franceses establecieron, para el balasto, el denominado *coeficiente de dureza global* (DR), que agrupa los coeficientes anteriores indicados: Coeficiente de Deval y coeficiente de Los Ángeles (Fig. 2.10). Para las líneas principales con velocidades de hasta 200 km/h y fuerte tráfico, el coeficiente de dureza global deseable se sitúa en el entorno de 17. Para líneas de alta velocidad el valor requerido es de 20.

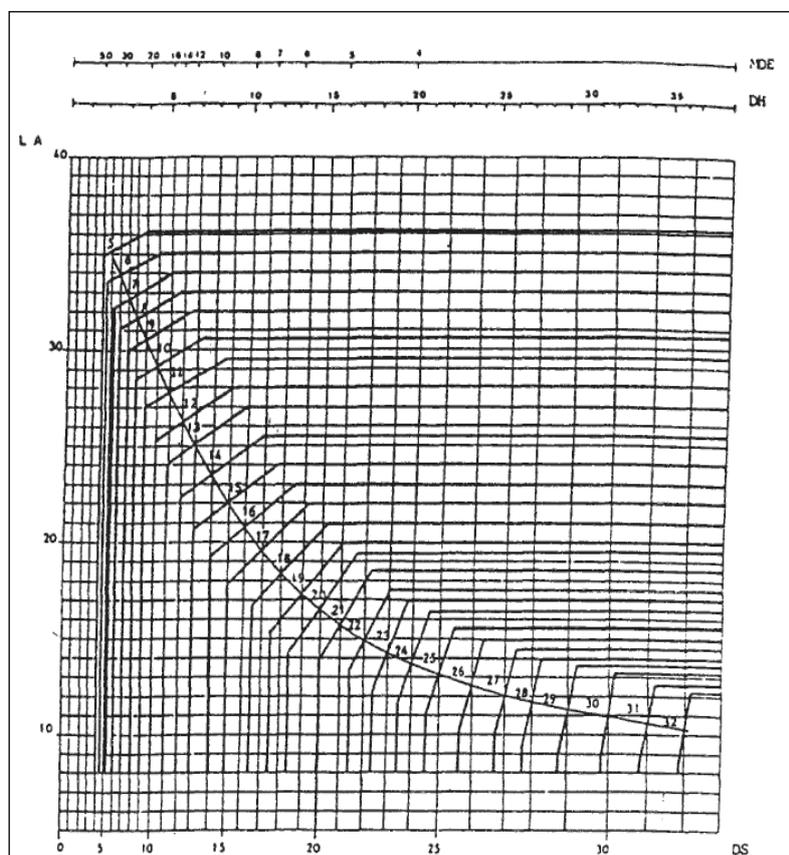


Figura 2.10. Ábaco de determinación de coeficiente de dureza global (DR).

Nótese en la citada figura 9 como para el primer grupo de líneas ($V \leq 200$ km/h) un DR de 17 corresponde a un coeficiente de Los Ángeles de 20 y un coeficiente de Deval superior a 15. Para líneas de alta velocidad, en donde DR = 20, los coeficientes de resistencia a la fragmentación (Los Ángeles) y de resistencia a la abrasión (Deval) se sitúan en torno de 17 y 20 respectivamente.

Con carácter de síntesis; en la figura 2.11 se expone un esquema de referencia para reducir las funciones que cabe exigir a los materiales utilizables como balasto, incluyendo también las variables de resistencia, tamaño o forma que permiten verificar el mayor o menor cumplimiento de las citadas funciones.

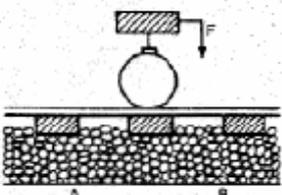
Elemento que desencadena la función	Esquema de actuación	Función del balasto	Factor conmensurable
Acciones Verticales		Proporcionar elasticidad y amortiguamiento	Espesor de balasto
		Resistencia a la abrasión	Coficiente Deval
		Disminución de presiones sobre la plataforma	Espesor de balasto
Acciones Verticales		Dimensiones, Dureza	Tamaños granulométricos Resistencia a compresión roca
		Resistencia al Choque	Coficiente de los Ángeles
Acciones Horizontales		Dimensiones Compactación	Tamaños Granulometría
Acciones Climáticas		Filtración Resistencia al hielo	Granulometría Resistencia a los Sulfatos

Figura 2.11. Esquema de referencia para el establecimiento de las funciones y características del balasto.

2.2.5 Propiedades del balasto según el criterio americano.

La normativa norteamericana que determina las propiedades del balasto es la "AREMA Volumen 1, Capítulo 1, Apartado 2". Realiza una subdivisión muy parecida a la europea, solo que las unidades en las que se miden las partículas son pulgadas y por tanto quedan definidos los tipos de balasto en diferentes subdivisiones. La tabla 2.4 detalla los tipos de balasto clasificados según los tamices atravesados.

Tabla 2.4. Gradaciones recomendadas para el balasto.

Size No. (See Note 1)	Nominal Size Square Opening	Percent Passing									
		3"	2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8
24	2 1/2" - 3/4"	100	90-100		25-60		0-10	0-5	-	-	-
25	2 1/2" - 3/8"	100	80-100	60-85	50-70	25-50	-	5-20	0-10	0-3	-
3	2" - 1"	-	100	95-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-
4A	2" - 3/4"	-	100	90-100	60-90	10-35	0-10	-	0-3	-	-
4	1 1/2" - 3/4"	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-	-
5	1" - 3/8"	-	-	-	100	90-100	40-75	15-35	0-15	0-5	-
57	1" - No. 4	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5

Note 1: Gradation Numbers 24, 25, 3, 4A and 4 are main line ballast materials. Gradation Numbers 5 and 57 are yard ballast materials.

Fuente: Arema volumen 1, capítulo 1, apartado 2

En cuanto a las propiedades de los materiales se establecen condiciones para los materiales dependiendo el tipo de roca del que provengan según los ensayos ASTM correspondientes. La tabla 2.5 refleja los requerimientos según la roca de origen.

Tabla 2.5. Valores recomendados según tipo de ensayo y materiales que conforman el balasto.

Property	Ballast Material							
	Granite	Traprock	Quartzite	Limestone	Dolomitic Limestone	Blast Furnace Slag	Steel Furnace Slag	ASTM Test
Percent Material Passing No. 200 Sieve	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%	C 117
Bulk Specific Gravity (See Note 2)	2.60	2.60	2.60	2.60	2.65	2.30	2.90	C 127
Absorption Percent	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	5.0	2.0	C 127
Clay Lumps and Friable Particles	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	C 142
Degradation	35%	25%	30%	30%	30%	40%	30%	See Note 1
Soundness (Sodium Sulfate) 5 Cycles	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	C 88
Flat and/or Elongated Particles	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	D 4791

Note 1: Materials having gradations containing particles retained on the 1 inch sieve shall be tested by ASTM C 535. Materials having gradations with 100% passing the 1 inch sieve shall be tested by ASTM C 131. Use grading most representative of ballast material gradation.
 Note 2: The limit for bulk specific gravity is a minimum value. Limits for the remainder of the tests are maximum values.

Fuente: Arema volumen 1, capítulo 1, apartado 2

Realizando un primer análisis, se denota la utilización de piedra caliza (limestone) como balasto, por parte de los ferrocarriles norteamericanos. En contraste con esto, la orden FOM

1269 (2006) imposibilita la utilización de este tipo de rocas con motivo de la karstificación que las mismas sufren al estar en contacto con agua.

Asimismo, la figura 2.12 representa la comparación de husos granulométricos utilizados en vías principales, entre la normativa norteamericana y la española. Esta comparación se ha realizado teniendo en cuenta los balastos: clase 24, 25, 3, 4A y 4 de la AREMA, y los clase A, B, C, D E y F de la norma UNE EN 13450.

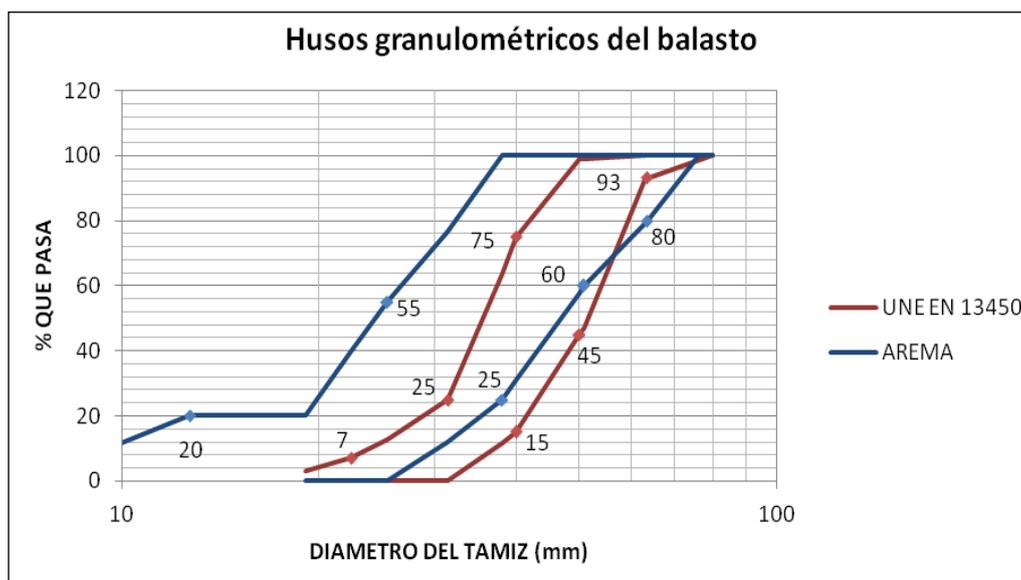


Figura 2.12. Comparativa entre husos granulométricos para vías principales.

En la comparación efectuada se puede apreciar la mayor aceptación de áridos de menor diámetro por parte de la normativa norteamericana, lo que la sitúa con una postura menos exigente que la europea.

Estas mayores restricciones de la normativa europea están asociadas a la necesidad de una mejor calidad de vía, ya que en Europa predomina el transporte de viajeros, mientras que en Norteamérica los ferrocarriles son utilizados principalmente para el transporte de mercancías.

2.3 CALIDAD GEOMETRICA DE LA VIA.

La calidad geométrica de la vía tiene un papel fundamental en la seguridad, en el confort y en la fiabilidad de las infraestructuras ferroviarias y, consecuentemente, en la determinación de las acciones de mantenimiento. Estas requieren importantes recursos financieros, por lo que se torna esencial estudiar con rigor la evolución de las características de la vía durante el período de vida útil del sistema.

2.3.1 Defectos geométricos de vía.

La experiencia alcanzada a través de la explotación de líneas de ferrocarril ha puesto de manifiesto que, en relación con la calidad de la vía, como camino de rodadura, era posible obtener información suficiente si se conocía y cuantificaba la magnitud de los siguientes parámetros:

- Nivelación longitudinal de cada hilo de carril
- Nivelación transversal entre ambos hilos de carril
- Ancho de vía
- Alineación de cada uno de los dos carriles
- Alabeo

Se establecen las siguientes definiciones asociadas a cada uno de los términos indicados anteriormente y se visualizan en la figura 2.13.

Nivelación longitudinal

Parámetro que define las variaciones de cota de la superficie de rodadura de cada hilo de carril, respecto a un plano de comparación.

Nivelación transversal

Parámetro que establece la diferencia de cota existente entre las superficies de rodadura de los hilos de carril en una sección normal al eje de la vía

Ancho de vía

Parámetro que determina la distancia existente entre las caras activas de las cabezas de los carriles, a 14 mm, por debajo de la superficie de rodadura.

Alineación

Parámetro que, para cada hilo de carril, representa la distancia en planta respecto a la alineación teórica.

Alabeo

Parámetro que representa la distancia entre un punto existente de la vía y el plano formado por los otros tres puntos.

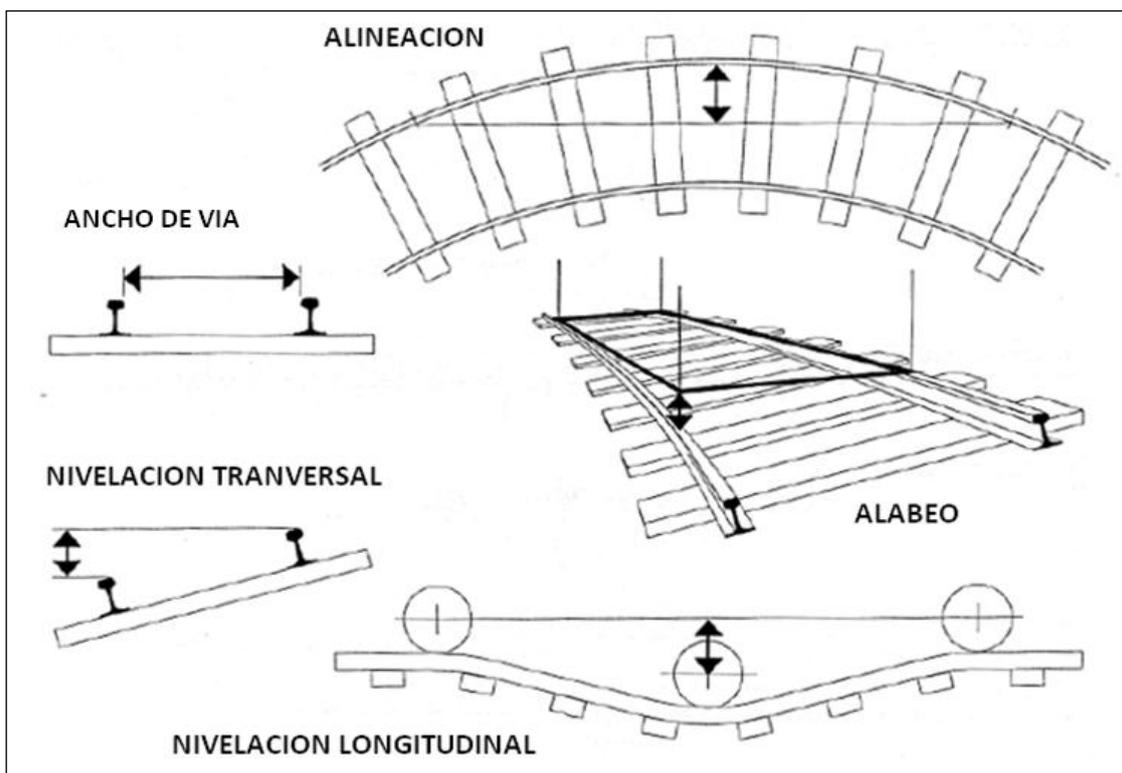


Figura 2.13. Tipos de defectos geométricos de la vía. (Fuente: Chiara Paderno, 2010)

Con carácter de síntesis, puede decirse que los defectos de nivelación longitudinal, medidos en mm, afectan al movimiento de galope de los vehículos. Los defectos de nivelación transversal afectan al balanceo de los vehículos. Las irregularidades existentes en el ancho de vía inciden en el movimiento trasversal (o de lazo) de los vehículos, así como los defectos de alineación. Finalmente los defectos de alabeo en una vía pueden ser la causa del descarrilamiento de los vehículos ferroviarios.

2.3.2 Causas de los defectos geométricos.

El tipo de tren y de material rodante circulante sobre la vía (en particular la edad de las suspensiones y la relación entre masas suspendidas y no suspendidas) son los principales causantes de la degradación de la misma. Los efectos de las imperfecciones de contacto entre rueda y carril generan sobrecargas dinámicas, las cuales perjudican la durabilidad de la estructura. Estas sobrecargas son proporcionales a las cargas no suspendidas. La velocidad de los trenes desempeña en este caso un rol principal ya que es la que amplifica las cargas dinámicas.

A causa de las sobrecargas dinámicas inducidas por los defectos, con el paso de los trenes, se ha puesto de manifiesto una relación directa entre el estado del material y el estado geométrico de la vía. Es así que un carril en buen estado se somete a un desgaste muy rápido si la geometría del conjunto no es buena. Del mismo modo que una vía donde la geometría inicial es buena, se degradará rápidamente si existen defectos en los

componentes. Por consecuencia, las tareas de mantenimiento deberán identificar el origen de las pérdidas de geometría y actuar de modo conjunto, tanto sobre la mejora de la geometría como la de eliminar los defectos existentes en los componentes de la vía. La figura 2.14 presenta un esquema en el cual se evidencia la relación existente entre el estado del material y la geometría de vía.

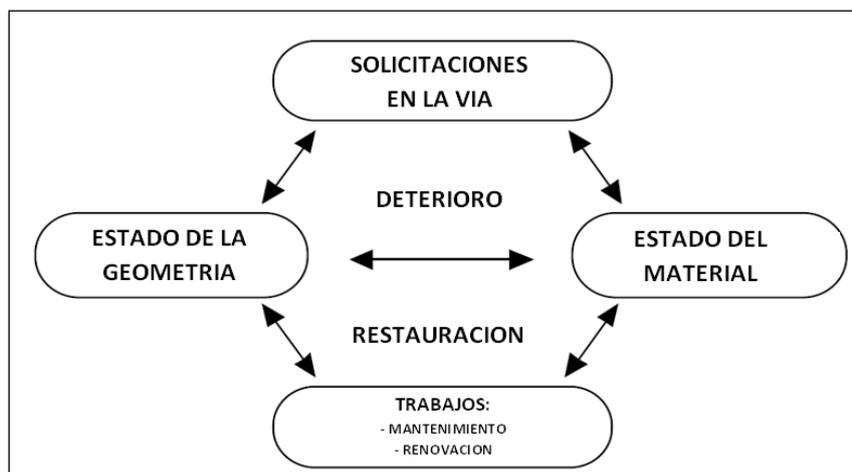


Figura 2.14. Relación entre geometría de vía y estado del material que la compone. (Fuente: Chiara Paderno, 2010)

Para una carga estática constante, el estado geométrico de la vía se degrada de manera diferente en un lugar que en otro, debido a que las cargas dinámicas de los trenes no son a lo largo de toda la vía iguales. El hecho de que el soporte de los carriles no sea continuo en toda su longitud se traduce en que las traviesas no reciban todas las mismas tensiones. Asimismo, debe considerarse que tanto la plataforma como el subbalasto no presentan una geometría perfecta, lo que se traduce en asentamientos diferenciales de las traviesas y el fenómeno de la danza de traviesas que quedan suspendidas por los carriles. Este fenómeno empeora la situación, ya que las traviesas más próximas a las traviesas suspendidas han de soportar esfuerzos mayores, lo que se traduce en mayores asentamiento y la pérdida del funcionamiento elástico del conjunto

Un problema más grande se presenta en las zonas de transición entre las vías en balasto y las vías en placa o sobre puentes: los asentamientos en estas zonas se acentúan a causa de la gran variación de rigidez en un pequeño tramo. Estudios más recientes han demostrado que una transición moderada en la rigidez de vía en estos casos se traduce en una importante reducción de asientos.

Es así que la geometría de vía nunca se deteriora de manera homogénea, esto radica en que son producto del paso de los vehículos y de las sobrecargas dinámicas que estos generan.

2.3.3 Importancia del balasto en la geometría de la vía.

Una vez mencionados los distintos tipos de problemas que aparecen en torno a la geometría de la vía, es inevitable citar la importancia que tiene la capa de balasto a la hora de mantener el posicionamiento necesario de las vías para brindar una circulación en condiciones de los vehículos.

El motivo por el cual se ha de prestar una particular atención sobre este componente de vía se debe a la menor vida útil que el mismo presenta, es decir, que la capa de balasto suele ser el elemento de vía que pierde sus características iniciales más rápidamente frente a los demás. La figura 2.15 refleja los asentamientos que padecen la capa de balasto, subbalasto y la plataforma con la acción del tráfico. La vida útil de los otros elementos que componen la vía (carriles, traviesas y fijaciones) es ampliamente superior a la de los mencionados anteriormente.

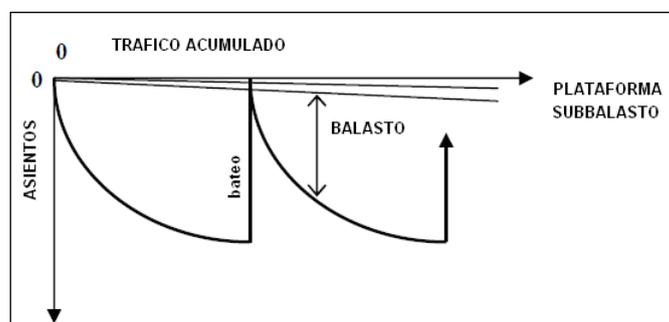


Figura 2.15. Asientos en función del tráfico de las capas de balasto, subbalasto y plataforma. (Fuente: Chiara Paderno, 2010)

De la figura 1.3.3 se puede apreciar la gran diferencia existente entre la pérdida de forma de la capa de balasto frente a las otras 2. Esto se traduce en la necesidad de ir bateando la vía con el objetivo de devolver a ésta su estado inicial y por consiguiente una geometría adecuada para la circulación.

2.3.4 Determinación del espesor de balasto

Durante mucho tiempo, prácticamente hasta mediados de los años 50 del siglo XX, los problemas de diseño del sistema de balasto-plataforma se concretaban en la determinación del espesor necesario de aquel para evitar que el nivel tensional en la plataforma superase el admisible por ésta. Lógicamente, y en consecuencia, la atención del tema se centraba en conocer la forma en que desde la cara inferior de la traviesa tenía lugar la distribución de presiones verticales en profundidad.

La mayor parte de las expresiones propuestas para calcular la reducción de presiones con la profundidad tuvieron un carácter empírico o semiempírico, siendo los trabajos llevados a cabo por el profesor Talbot (Fig. 2.16) uno de los más interesantes ya que significan,

posiblemente, los primeros trabajos experimentales sobre la forma de trabajo de los materiales granulares.

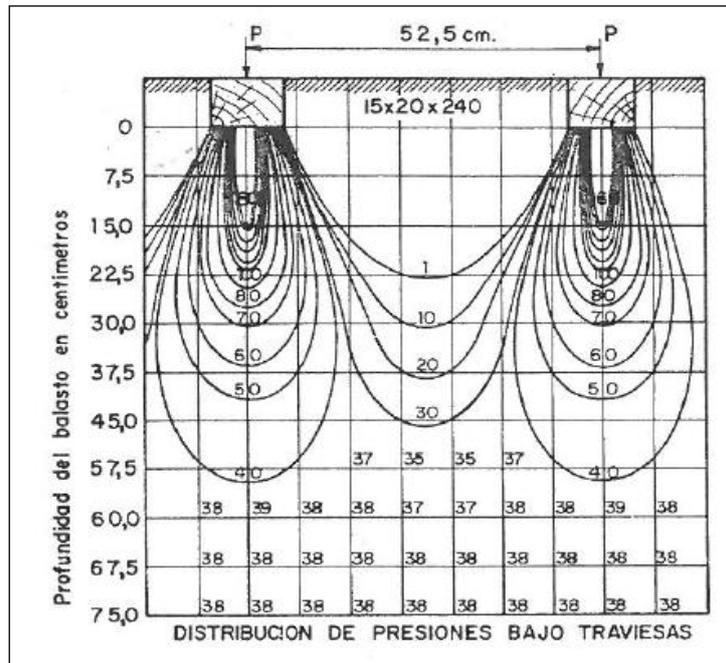


Figura 2.16. Resultados de Talbot sobre la distribución de presiones bajo las traviesas. (Fuente: Talbot, 1917)

Luego de varios modelos empíricos propuestos, y de las experiencias de cada una de las administraciones de Alemania, Francia, Italia, Estados Unidos y España entre otras, se han determinado los espesores de balasto óptimos según indica la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Espesores de balasto y subbalasto utilizados en algunas redes (1962)

Red	Balasto	Espesor de Subbalasto
DB	30 cm	20 a 40 cm en infraestructuras poco resistentes
SNCF	30 cm	NO
RENFE	30 cm	NO
SNCF	15 a 20 cm	20 a 15 cm
NS	20 cm	Pt. Arcillosa; 50 cm arena
FS	35 cm	Pt. Poco permeable: 20 cm NO

Fuente: A. López Pita

En todos los casos el espesor de balasto escogido ronda los 30 cm, el cual garantiza que las tensiones que arriban a la plataforma sean menores que la que puede soportar la misma, y de este modo eliminar posibles deformaciones de la misma (Fig. 2.17). En los casos en los

que se ha escogido un menor espesor de la capa, se requiere una plataforma con mayor capacidad portante.

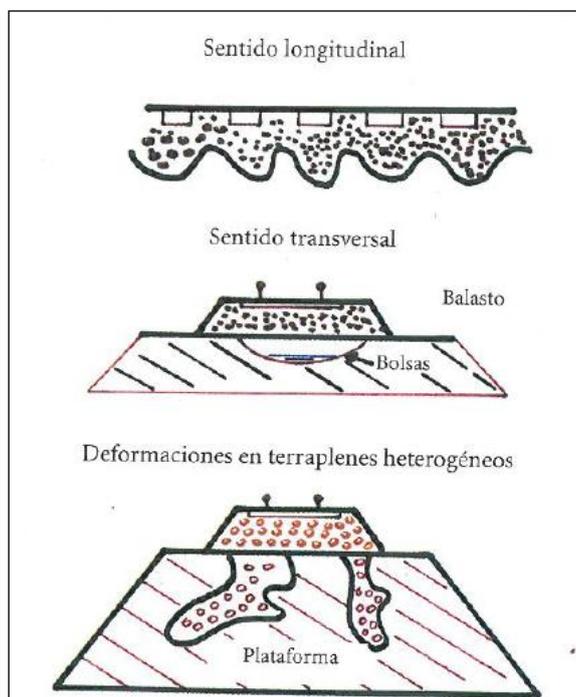


Figura 2.17. Deformaciones en la plataforma. (Fuente: A. López Pita)

En lo que respecta al análisis realizado para dimensionar la capa de balasto de las líneas de alta velocidad, se ha optado por utilizar un método basado en la carga de hundimiento de una zapata (asimilada a una traviesa), tal como se muestra en la figura 2.18.

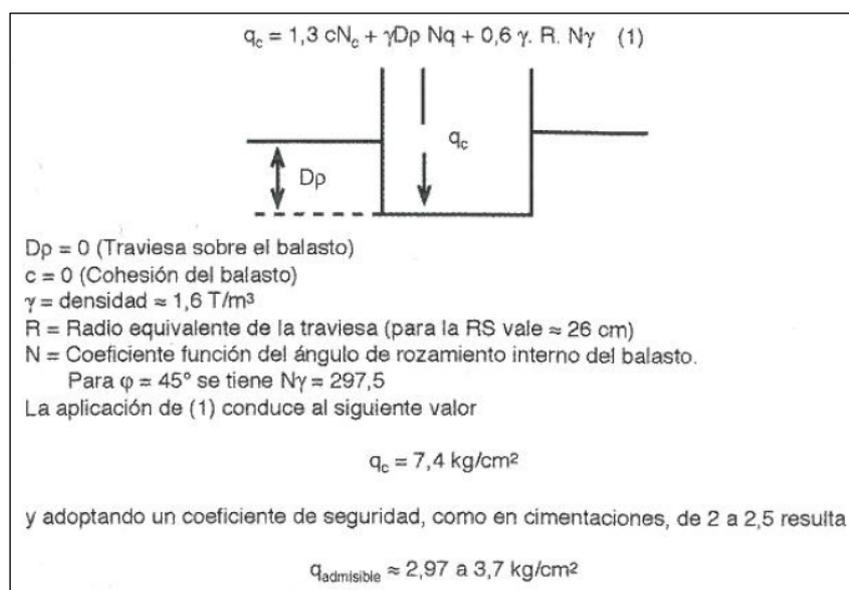


Figura 2.18. Evaluación de la tensión admisible por la capa de balasto. (Fuente: A. López Pita)

Naturalmente, no sólo el balasto interviene en la reducción del nivel de presiones que alcanza la plataforma y, por otro lado, las distintas experiencias habían puesto de relieve problemas de contaminación del balasto con la infraestructura, sobre todo en caso de suelos arcillosos, fenómenos de helada en la plataforma de líneas de ferrocarril en algunos países, etc.

Esta situación condujo inicialmente a la SNCF, y posteriormente a la UIC, a establecer, siguiendo la tendencia marcada por la carretera para el dimensionamiento de firmes, un catálogo de secciones estructurales tipo en el que se recogiesen indicaciones precisas sobre la naturaleza, espesores y características de los distintos estratos a colocar desde la cara inferior de las traviesas hasta la superficie de la plataforma. La ficha 719 de la UIC define así cuatro tipos de calidad de suelos y tres tipos de plataforma y dejando los espesores de balasto y subbalasto a determinar según el tráfico existente en cada línea.

3. PROYECTO NEOBALLAST

3.1. MOTIVOS DEL PROYECTO

A lo largo de las últimas décadas se han realizado varias investigaciones, diseños y construcciones relacionadas a la vía en placa. El punto de comparación reiterado ha sido la vía en balasto para poder determinar cuál habría de ser la infraestructura en el futuro.

De esta comparativa ha surgido un nuevo paradigma referente a materiales que puedan combinar las bondades de ambas infraestructuras y den una solución óptima a las necesidades existentes. Hace una década la vía en placa era vista como una mejor solución que la vía en balasto, a pesar que el coste inicial era mucho más elevado se preveía que los costes de mantenimiento serían prácticamente nulos. La experiencia ha puesto de manifiesto que las previsiones no han sido del todo acertadas y por tanto la vía en balasto sigue siendo una excelente opción para nuevas infraestructuras.

De esta manera, las propiedades de la vía en balasto (como el bajo coste de mantenimiento, valores de elasticidad convenientes, alta capacidad de drenaje, buen comportamiento frente a vibraciones y ruido, etc.) habrían de ser combinadas con las fortalezas de la vía en placa (bajo mantenimiento, alta durabilidad, etc.) para obtener la mejor solución posible.

Sumado a esto nuevas problemáticas han aparecido en lo que refiere al balasto de alta calidad, dada su característica de recurso natural, en algunos sitios comienza a escasear mientras que en otros directamente no es posible obtenerlo. Como resultado de ello, en proyectos de localidades específicas, las distancias de transporte que se han de efectuar para llevar el material adecuado son muy elevadas, lo que se traduce no solo en incremento de costes económicos sino también de impactos ambientales.

Todo esto ocurre en un contexto en donde las políticas europeas han incrementado las exigencias en lo que a materia de medio ambiente refiere, y en donde las soluciones sostenibles y durables son las más promovidas desde la Comisión Europea. En este sentido, ha habido una gran preocupación por los problemas relacionados al ruido y las vibraciones generados en la vía a lo largo de los últimos años. Las conclusiones que se han ido obteniendo son las de migrar desde la situación actual, que consiste en mitigar el ruido y las vibraciones, hacia escenarios donde se prevenga desde un inicio este tipo de problemáticas.

Soluciones como el balasto prefabricado, balasto modificado in situ mediante riegos de polímeros y geomantas han sido desarrollados para incrementar la durabilidad (LCC) y mejorar el comportamiento de la infraestructura. A pesar de ello no se han publicado artículos que comprueben la utilidad de estos materiales mediante un razonamiento técnico-económico-ambiental.

NEOBALLAST es un proyecto de innovación con el objetivo de desarrollar un balasto alternativo, con la idea de que hay un gran campo en el que se puede innovar respecto al balasto tradicional, pero al mismo tiempo creyendo que esta tipología de vía tiene un gran futuro. Éste balasto mejorado busca combinar las bondades de la vía en balasto mientras se prolonga la durabilidad, se reduce el mantenimiento y se adquieren propiedades propias de la vía en placa. Al comportarse como un balasto de alta calidad, se darían soluciones a la escases de canteras de alta calidad al mismo tiempo

que está diseñado para mejorar significativamente el comportamiento frente a ruido y vibraciones de la infraestructura de vía.

3.2. DESARROLLO DEL PROYECTO

El proyecto se ha dividido en diversas fases las cuales se desarrollan de manera escalonada: desde el estado del arte de la mecánica de funcionamiento de la vía en balasto, pasando por la determinación de los materiales y procedimientos a emplear para conformar el árido recubierto, la realización de ensayos de laboratorio y finalizando con el ensayo en un tramo de pruebas. La razón de éste estudio gradual es el de hallar la mejor solución posible a los problemas que se presentan en la vía en balasto.



Figura 3.1. Primer reunión del consorcio en Santa Perpetua (MAPEI).

Los estudios del comportamiento del balasto frente a las cargas inducidas por el material rodante, han puesto de manifiesto lo perjudicial que es la generación de finos en la capa de balasto, a tal punto que diversas administraciones deciden renovar la capa de balasto cuando los finos exceden el 30% de la misma (GODDART, INFRABEL, RTSE París, Diciembre 2013).

Otro de los problemas importantes al que se enfrenta la vía en balasto es el del ruido y las vibraciones que se generan con el paso de las formaciones. En este sentido vale la pena remontarse a los estudios realizados por la Deutsche Bahn en donde se pone de manifiesto que la disminución de la rigidez, reduce la velocidad de vibración de las partículas de la capa de balasto

A partir del estado del arte realizado sobre el comportamiento del balasto, se han definido 4 diferentes tipos de recubrimientos a efectuar sobre los áridos, sobre los cuáles se realizan los ensayos que certifican las mejoras buscadas. El principal elemento que conforma el recubrimiento es polvo de neumático reciclado, el cual se puede aplicar variando su granulometría.

Esta diversidad de granulometrías conjuntamente con los diferentes procesos de conformación del recubrimiento explican la existencia de más de una muestra a ensayar.



Figura 3.2. Muestras NEOBALLAST cortadas.



Figura 3.3. Muestras NEOBALLAST.

Una vez definidas las muestras se decidió establecer 2 etapas de ensayos para comparar el NEOBALLAST con el balasto natural.

La primera etapa de ensayos consiste en caracterizar el comportamiento de los áridos aislados, mientras que la segunda tiene por objetivo caracterizar el comportamiento del conjunto de áridos

La etapa 1 estuvo conformada por los siguientes ensayos:

- Resistencia a la Fragmentación por el método de Los Ángeles
- Ensayo de densidad y absorción de agua
- Ensayo Micro – Deval
- Ensayo de Resistencia al Sulfato Magnésico

Mientras que la etapa 2 se encuentra en desarrollo y está conformada por:

- **Corte Directo de Gran Tamaño**
- Ensayo de carga cíclica
- Ensayo in situ

Las pruebas iniciales se han realizado en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña bajo supervisión de Andrés López Pita. Los ensayos llevados a cabo han sido los que determinan la resistencia a la fragmentación por el Método de Los Ángeles (UNE EN 1097-2:2010 Anejo A) y los ensayos de que determinan la densidad de las partículas y la absorción de agua (UNE – EN 1097-6:2001).

Los siguientes ensayos que se han realizado dentro de la etapa uno son los de resistencia al Sulfato Magnésico (UNE EN 1367-1:2010) y de resistencia al desgaste o Micro-Deval (UNE EN 1097-1:2011). Estos ensayos se han encargado a los laboratorios de EPTISA. Al igual que en el caso del ensayo de Los Ángeles, los resultados obtenidos han sido muy positivos.

La etapa a la cual está vinculada la presente tesina es la relacionada a los ensayos de **Corte Directo de Gran Tamaño**, los cuales son el comienzo del estudio del conjunto de la capa de balasto y presentan una mayor complicación que los ensayos correspondientes a la primer etapa.

3.3. TIPOS DE RECUBRIMIENTOS Y METODOLOGIA IMPLEMENTADA.

Hay dos factores a tener en cuenta al momento de preparar las muestras de NEOBALAST: la granulometría del caucho a emplear y la metodología utilizada para conformar las muestras.

Luego de realizadas las primeras pruebas en el mes de Mayo de 2013 en la planta de Mapei de Santa Perpetua, y habiendo probado diferentes combinaciones entre granulometría y metodología, se decide que las muestras que se someterán a ensayo serían cuatro, las cuáles surgen de los dos métodos y de las dos granulometrías siguientes.

		METODOLOGIA	
		sumergir y rebozar	sumergir, rebozar y sumergir
CAUCHO	0 a 0,5 mm	05 SR (muestra A)	05 SRS (muestra B)
	0 a 0,8 mm	08 SR (muestra C)	08 SRS (muestra D)

- MUESTRA "A" 05.SR: Árido recubierto con poliuretano PU BINDER 031 y caucho en polvo de entre 0 y 0,5 mm.
- MUESTRA "B" 05.SRS: Árido recubierto con poliuretano PU BINDER 031 y caucho en polvo de entre 0 y 0,5 mm y una vez curado se baña nuevamente en poliuretano.
- MUESTRA "C" 08.SR: Árido recubierto con poliuretano PU BINDER 031 y caucho en polvo de entre 0 y 0,8 mm.
- MUESTRA "D" 08.SRS: Árido recubierto con poliuretano PU BINDER 031 y caucho en polvo de entre 0 y 0,8 mm y una vez curado se baña nuevamente en poliuretano.

Las muestras A y C pierden el caucho en polvo que no ha ligado con el poliuretano al moverlas o transportarlas. Por este motivo solo se ha ensayado una de éstas (la C) bajo corte directo de gran tamaño, con el objetivo de comparar si existe o no gran diferencia con la D.

Para el preparado de cada una de las muestras a ensayar se utilizan:

- Cajas plásticas de Nº17
- Centrifugadora mecánica
- Recipiente con escurridor
- Recipiente donde poner el poliuretano

La estimación de las cantidades de materiales empleadas para la conformación del recubrimiento se realiza por diferencia de pesos.

Se realiza el pesaje inicial del árido, el caucho y el poliuretano (figs. 3.4 a 3.7).



Figuras 3.4 a 3.7. Pesaje inicial de materiales.

En tandas se sumerge el árido en poliuretano, se lo deja escurriendo y luego se lo centrifuga durante 120 segundos como detalla la figura 3.8.



Figura 3.8. Bañado, escurrido y centrifugado de poliuretano sobre árido para balasto.

Luego de centrifugado, se colocan los áridos en la caja plástica y se los va cubriendo con caucho en polvo, de manera que no se toquen entre ellos durante la etapa de curado. La figura 3.9 detalla esta etapa del procedimiento.

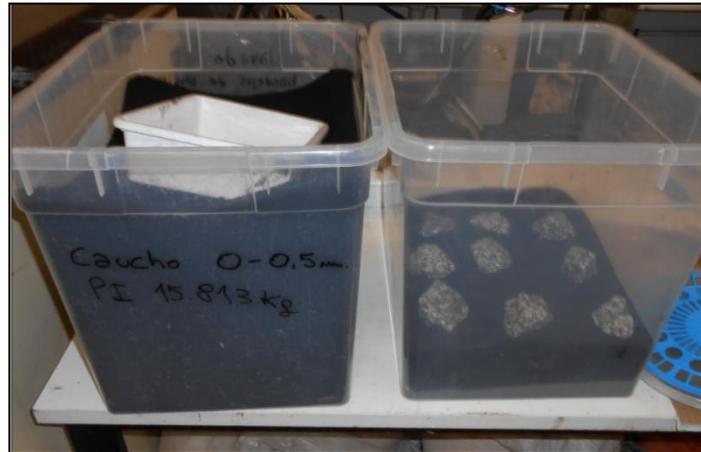


Figura 3.9. Recubrimiento del árido con el caucho en polvo.

Luego del curado del poliuretano (entre 24 y 48 horas dependiendo del grado de humedad del ambiente), se tamiza y se separa el árido recubierto del caucho en polvo (Fig 3.10). Este procedimiento se realiza 3 veces con el fin de eliminar el caucho excedente que no ha quedado adherido al árido.



Figura 3.10. Tamizado del árido recubierto

Se toman los pesos finales del caucho, poliuretano y del árido recubierto y se cuantifican los porcentaje de materiales empleados para cada muestra.

En el caso de las muestras que llevan otro baño de poliuretano se realiza el mismo procedimiento que con el primer baño. Se sumerge el árido en poliuretano, se lo escurre, centrifuga y se lo deja curando vigilando que no haya contacto entre áridos como se visualiza en la figura 3.11.



Figura 3.11. Curado del poliuretano correspondiente al segundo baño.

La metodología empleada para preparar las muestras es la misma en los cuatro casos, con la excepción que las muestras “B” y “D” se recubren al final con una capa de poliuretano.

A través de la reiterada preparación de muestras se ha ido mejorando la metodología de recubrimiento, optimizando las cantidades de productos empleados. La optimización se centra principalmente en utilizar la cantidad mínima necesaria de ligante que garantice la correcta adherencia del caucho al árido.

Las mejoras introducidas se pueden dividir en los siguientes dos campos:

- Optimización del proceso mediante centrifugado
- Mejora en la fluidez por variación de temperatura de los áridos

CENTRIFUGADO.

Las primeras muestras se realizaban sumergiendo las partículas y dejándolas escurrir durante un tiempo considerable antes de realizar el recubrimiento con caucho. Este procedimiento incurría en una elevada utilización de ligante por lo que se decidió buscar una alternativa. De esta forma se optó por centrifugar los áridos una vez sumergidos de modo que se reduzca lo máximo posible la cantidad de ligante utilizada. En una primera etapa se empleo un centrifugador de cocina como prueba a pequeña escala y a partir de su buen funcionamiento se ha empleado una centrifugadora de mayor tamaño y velocidad de revoluciones como se observa en la figura 3.11.



Figura 3.12. Centrifugadora de gran tamaño.

Los resultados de la utilización de la centrifugadora han sido positivos. Se pasó de utilizar un 4% en peso de poliuretano a porcentajes de entre 1% a 3%. Con la finalidad de reducir aún más la cantidad de ligante empleado se ha variado las temperaturas de trabajo.

VARIACION DE TEMPERATURA.

Para variar la temperatura del ligante se colocaron los áridos en estufa (Fig. 3.12) y una vez alcanzados los 35° se los ha sumergido en el ligante. Una vez sumergidos se los escurrió rápidamente y se los centrifugó.

Con esta metodología se redujo la cantidad de poliuretano utilizada de un mismo tipo de muestra hasta un 1,8%



Figura 3.12. Calentamiento del árido a recubrir

RESULTADOS.

	may-13			jun-13 (con centrifugado)			ene-14 (con ΔT)		
	PRIMERAS MUESTRAS			SEGUNDAS MUESTRAS			TERCERAS MUESTRAS		
	Piedra	Caucho	Poliuretano	Piedra	Caucho	Poliuretano	Piedra	Caucho	Poliuretano
05 SRS				98,29%	1,68%	2,94%	97,43%	1,80%	0,78%
08 SR	93,16%	3,62%	3,22%	98,25%	1,74%	1,01%	98,13%	0,74%	1,13%
08 SRS				98,27%	1,70%	3,11%	96,32%	2,59%	1,08%

4. ENSAYOS DE CORTE DIRECTO.

4.1. TIPOLOGIAS

Los cortes de mayor interés en el presente estudio se han realizado en la máquina de corte directo de gran tamaño, aunque con la intención de obtener información sobre los materiales empleados en el recubrimiento, se han realizado también ensayos en el equipo de corte directo convencional.

4.1.1. Corte directo de gran tamaño.

El ensayo de Corte Directo (Figs. 4.1 y 4.2), consiste básicamente en llenar un cajón de 300x300x200 mm, conformado por un marco inferior y un marco superior, con el material a ensayar. Luego se aplica una carga normal como confinamiento y por último se aplican desplazamientos horizontales constantes al marco inferior y se registran la carga necesaria para efectuar los desplazamientos (equivalente a la resistencia de fricción interna del material), los desplazamientos horizontales y los desplazamientos verticales. Todo el equipamiento está provisto por una celda de carga del tipo aro dinámico, y 3 LVDT de distintos rangos de medición, los cuales están conectados a una computadora que registra y almacena la información.



Figura 4.1. Equipo de Corte Directo desmontado, previo al ensayo.



Figura 4.2. Controlador hidráulico del equipo empleado en el ensayo de Corte Directo.

Las piezas mecánicas que conforman el cajón son, la placa porosa inferior (Fig. 4.3), el marco inferior (Fig. 4.4), el marco superior (Fig. 4.5) y la placa porosa superior (Fig. 4.6). Dichas piezas se colocan en el orden previamente citado. La placa porosa superior se coloca una vez puesta en posición la muestra a ensayar.



Figura 4.3. Marco inferior colocado y lubricación de placa porosa inferior.



Figura 4.4. Placa porosa inferior colocada.



Figura 4.5. Colocación del marco superior.



Figura 4.6. Colocación de placa porosa superior (una vez colocada la muestra).

La preparación de la muestra no tiene grandes detalles, pero si se ha cuidado no superar un tamaño máximo determinado, en función del marco que conforma el cajón (300 mm x 300 mm). Se coloca el material intentando acomodar de la mejor manera las distintas partículas, buscando la mejor compactación posible (Fig. 4.7). A modo de testigos se han pintado algunas piedras de color, para poder ver los puntos de contacto con los áridos vecinos una vez finalizado el ensayo (Fig. 4.8). Una vez colocado todo el material dentro del cajón, se lo retira, se lo pesa y se lo vuelve a colocar (Figs. 4.9 y 4.10).



Figura 4.7. Primera capa de muestra.



Figura 4.8. Piedras coloreadas como testigos.



Figura 4.9. Retiro y peso de la muestra total.



Figura 4.10. Muestra nuevamente colocada y lista para ensayar.

Para la ejecución del ensayo ha sido necesario calibrar tanto la celda de carga, como los LVDT, ya que el equipo se encontraba desmontado a la hora de efectuar el ensayo.

La calibración de la celda, se hace estableciendo escalones de cargas conocidas o registradas con un flexímetro a la vez que se registran con un LVDT, y por comparación se va trazando la recta de calibración (Fig. 4.11). Es deseable obtener valores de coeficiente de correlación R^2 cercanos a 1. En la calibración efectuada de carga y descarga se obtuvo un R^2 de 0,997 (Fig. 4.12).

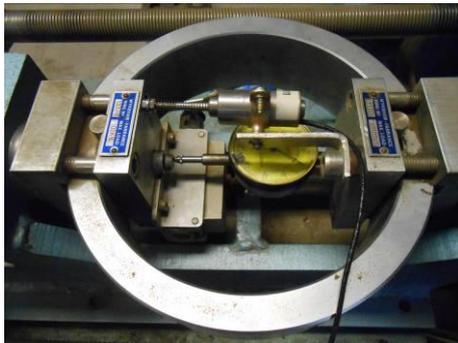


Figura 4.11. Montaje de celda de carga para calibración.

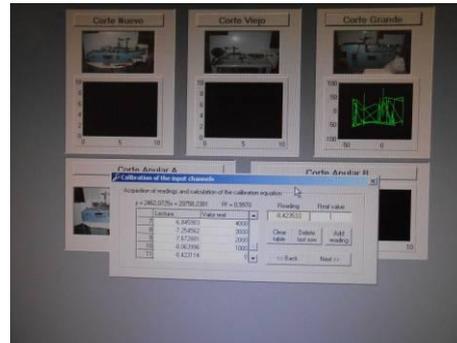


Figura 4.12. Programa de calibración, carga y descarga.

Los LVDT también han sido calibrados poniéndolos en serie con flexímetros de precisión con certificado de calibración en validez (Fig. 4.13). Para ello se utiliza una pieza metálica (denominada “tótem”) que permite el montaje en simultáneo de ambos elementos en serie (Fig. 4.14). A su vez se utilizan piezas de bronce conformadas por un cilindro y un tapón, con rosca milimétrica, que permiten ejecutar los desplazamientos conocidos en distintos escalones de deformación.



Figura 4.13. Calibración LVDT.



Figura 4.14. Elementos para calibración de LVDT.

El ensayo posee dos instancias de ejecución. En la primera se carga la muestra con la carga normal y se registran los posibles asentamientos en los distintos intervalos de tiempo. Una vez que los desplazamientos verticales no sufren modificaciones, se puede iniciar la segunda etapa del ensayo que es la aplicación de los desplazamientos horizontal para efectuar el corte de la muestra (Fig. 4.15). La velocidad de corte empleada ha sido de 6 mm/minuto.



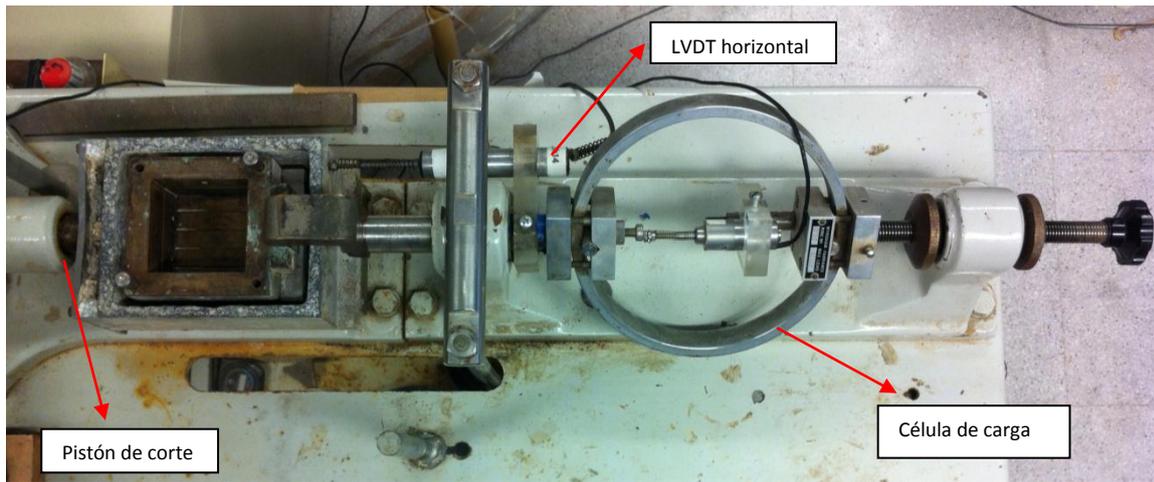
Figura 4.15. Equipo de corte en funcionamiento

4.1.2. Corte directo convencional.

El procedimiento para la realización del corte directo convencional es prácticamente igual al previamente mencionado sólo que cambian las dimensiones de la muestra ensayada y la velocidad de corte. El diámetro del anillo de corte es de 50 mm mientras que la altura deseada al momento de cortar la muestra es de 24 mm. La velocidad de corte empleada fue de 0,25 mm/hora.

El equipo de corte directo (Fig. 4.16) está compuesto por:

- Célula de carga de 300 kg
- LVDT que mide desplazamientos verticales
- LVDT que mide desplazamientos horizontales
- Piedras porosas y anillos de corte (Fig. 4.17)



Figura

4.16. Equipo de corte directo convencional.

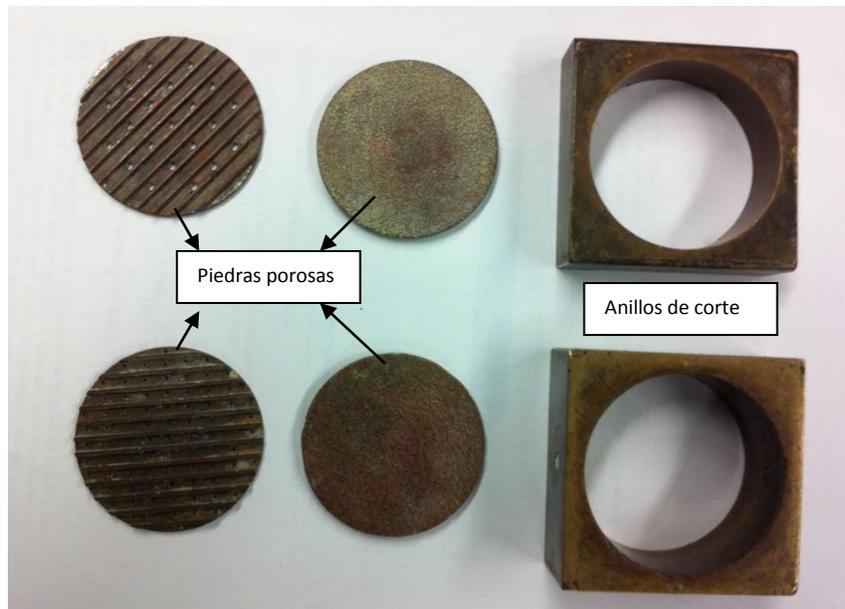


Figura 4.17. Piedras porosas y anillos de corte.

4.2. MUESTRAS ENSAYADAS

Ya calibrados los equipos de corte directo, comienzan los ensayos sobre las diversas muestras.

Sobre cada muestra se realizará un ensayo multietapas, el cual consiste en realizar 3 cortes sobre la muestra variando la carga normal aplicada, con el objetivo de obtener los parámetros de Mohr-Coulomb de cada muestra.

Basados en las cargas que normalmente soporta el balasto de una infraestructura ferroviaria y para mantener correlación entre ambos ensayos, los escalones de carga normal establecidos en ambos tipos de corte serán los mismos:

- Primer corte con 111 KPa de carga normal

- Segundo corte con 166 KPa de carga normal
- Tercer corte con 222 KPa de carga normal

4.2.1. Muestras de corte de gran tamaño.

Para el caso del corte de gran tamaño, una vez se aplique la tercera carga normal (222 KPa) se realizarán 4 ciclos de corte con el objetivo de obtener datos que describan el comportamiento residual de la muestra una vez formada la superficie de corte, dado que este equipo cuenta con la capacidad de cortar la muestra en ambos sentidos.

Muestras a ensayar:

- Balasto Natural
- NEOBALLAST tipo 08-SR
- NEOBALLAST tipo 05-SRS
- NEOBALLAST tipo 08-SRS

Las 4 muestras están compuestas por áridos cuarcíticos (Cumesa, La Alforja) de granulometría entre 31,5 y 40 mm y cada muestra pesa en torno a los 23.000 ± 100 g, obteniendo densidades aparentes de 1,25 a 1,3 tn/m³.

Datos del ensayo multietapas:

- Velocidad de corte = 6 mm/min
- Rango de desplazamiento horizontal = 50 mm
- Dimensiones del cajón de corte: 30cm x 30cm x 20 cm ($v = 18.000 \text{ cm}^3$)
- Célula de carga horizontal de 10 KN
- Primer Carga Normal: 10 KN ==> (111 KPa)
- Segunda Carga Normal: 15 KN ==> (166 KPa)
- Tercer Carga Normal: 20 KN ==> (222 KPa)

4.2.2. Muestras de corte convencional.

En el caso del corte directo convencional no es posible realizar los ciclos en el último escalón de carga ya que el equipo sólo permite realizar el corte en sólo un sentido. En el éste equipo ensayaremos sólo los componentes que conforman el recubrimiento con la intención de determinar la granulometría de caucho más conveniente y de obtener información que describa los comportamientos de los diferentes recubrimientos.

Muestras a ensayar:

- Caucho en polvo entre 0 y 0,5 mm
- Caucho en polvo entre 0 y 0,8 mm
- Probetas de caucho en polvo entre 0 y 0,5 mm con poliuretano (iguales proporciones que el recubrimiento 05 SR)
- Probetas de caucho en polvo entre 0 y 0,5 mm con poliuretano (iguales proporciones que el recubrimiento 08 SR)



4.3. RESULTADOS

Para facilitar la interpretación de datos, primero se presentan los resultados obtenidos al ensayar el balasto natural, luego los correspondientes de los ensayos sobre recubrimientos en el equipo de corte directo convencional y por últimos los resultados de ensayar el balasto recubierto en el equipo de corte directo de gran tamaño.

Los datos obtenidos a partir de los ensayos realizados se han tratado de manera de obtener información significativa. Las variables obtenidas directamente del ensayo son:

- P_z : Esfuerzo normal (kg)
- P_x : Esfuerzo de corte (kg)
- U_z : Desplazamientos verticales (mm)
- U_x : Desplazamientos horizontales (mm)

A partir de la geometría de los ensayos y de las variables directas se obtienen las siguientes variables indirectas.

- Tensión normal (KPa). Esfuerzo normal respecto al área de aplicación

$$\sigma_z = P_z / Area$$

- Tensión de corte (KPa). Esfuerzo cortante respecto al área de corte

$$\tau_x = P_x / Area$$

- Coeficiente K_τ (KPa/mm). Incremento de carga respecto al incremento de desplazamiento horizontal de un milímetro. En el caso del corte de gran tamaño se ha calculado para rangos de un milímetro, mientras que para el corte convencional se han empleado rangos de un cuarto de milímetro.

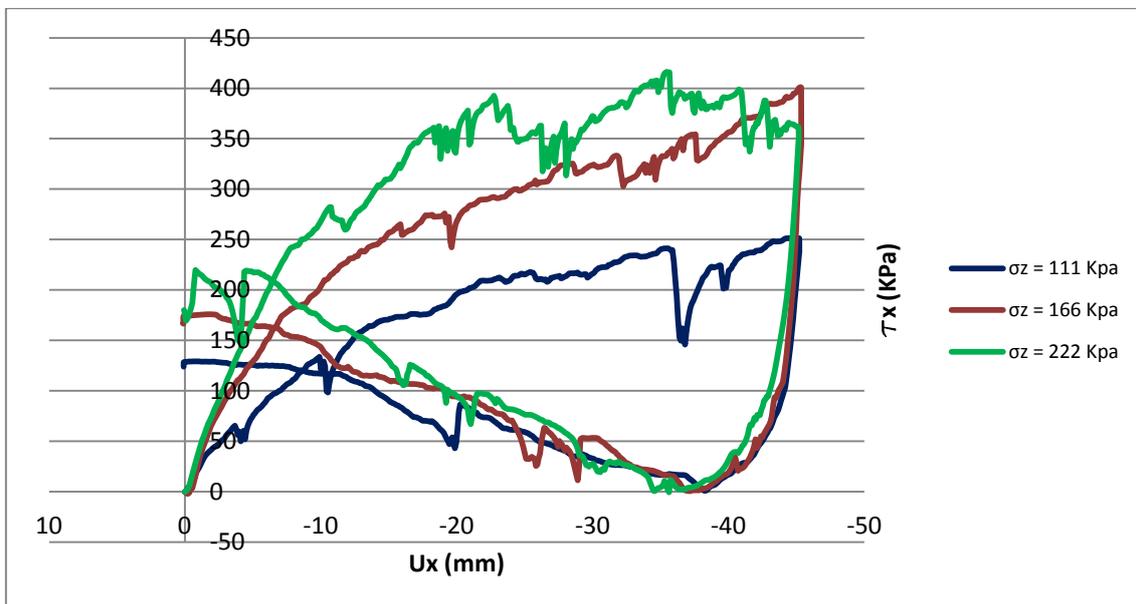
$$K_\tau = \frac{\tau_{x_{i+1}} - \tau_{x_i}}{U_{x_{i+1}} - U_{x_i}}$$

Los análisis de datos se realizan en función del desplazamiento horizontal que la muestra va experimentando de modo de reflejar la variación de parámetros en las distintas etapas del corte de las muestras.

4.3.1. *Balasto natural*

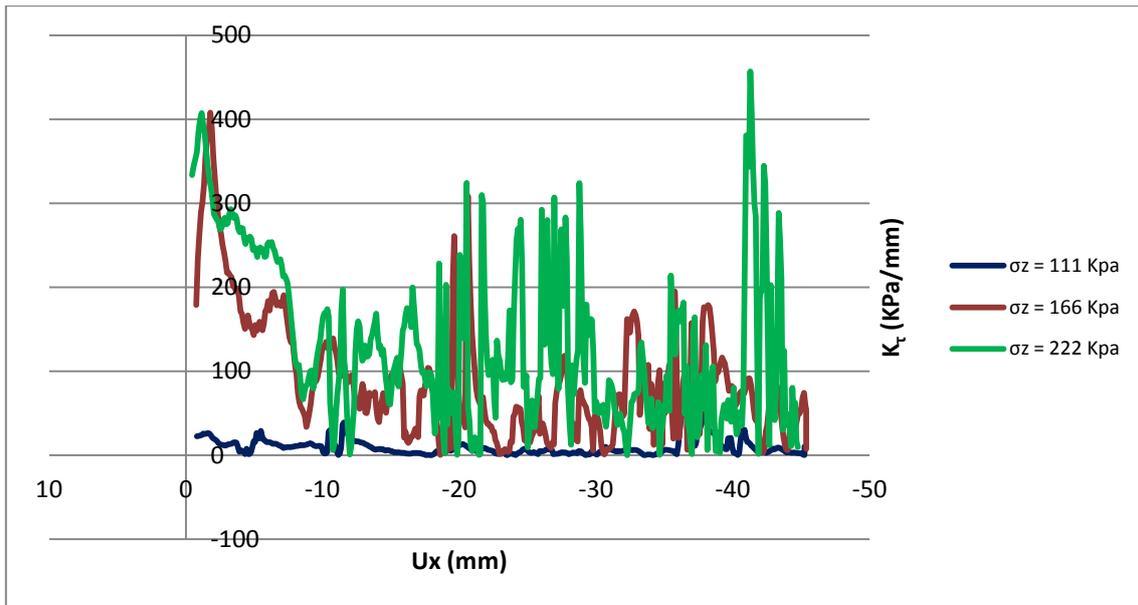
Una vez realizados los ensayos sobre el árido natural en el corte directo de gran tamaño y tratados los datos, se realizan las gráficas que reúnen los resultados de los 3 escalones de carga y facilitan la interpretación a medida que se va aumentando la carga normal.

Para todos los escalones de carga el comportamiento es similar, en todos ellos se pueden diferenciar tres etapas en las que el comportamiento del material es diferente: desde el inicio hasta los primeros 5 a 8 mm en los que el incremento de carga respecto al incremento de desplazamiento es máximo y corresponde al acomodamiento de las partículas, luego una etapa entre los 5 y 20 mm en los que se define la superficie de corte y por último la etapa en que se superan los 20 mm de desplazamiento en los que la superficie de corte ya se encuentra definida y en la que se comienzan a quebrar las partículas de balasto produciendo saltos de carga que se pueden apreciar fácilmente en la gráfica 4.1.



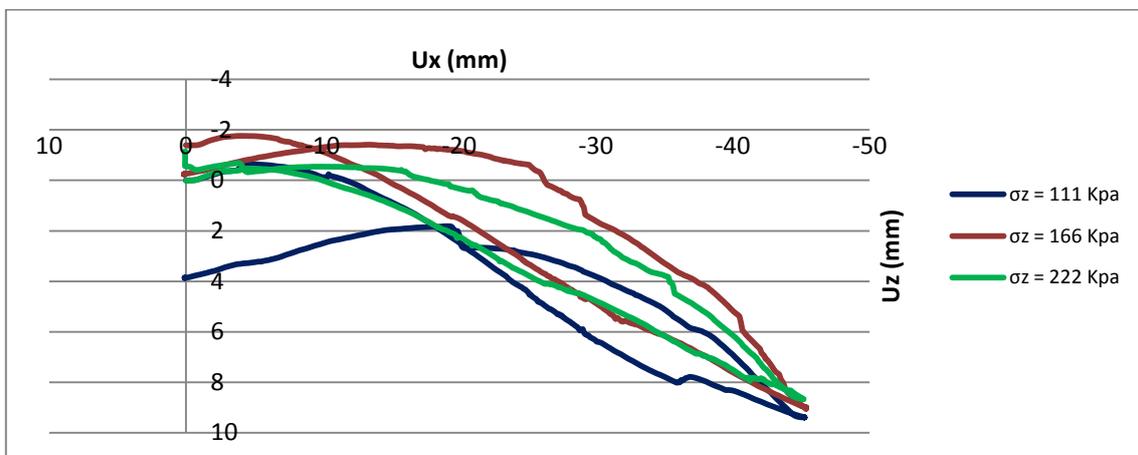
Gráfica 4.1. Tensión de corte en función del desplazamiento horizontal (balasto natural).

Las tres etapas diferenciables mencionadas se pueden apreciar en términos del coeficiente K_τ de la muestra. Como se aprecia en la gráfica 4.2, en los primeros instantes del corte los valores de K_τ son los mayores, luego hay un rango en que disminuye y se estabiliza (entre los 8 y 20 mm) y una vez que la superficie de corte está definida comienzan a haber variaciones bruscas en K_τ debidas a la rotura del material.



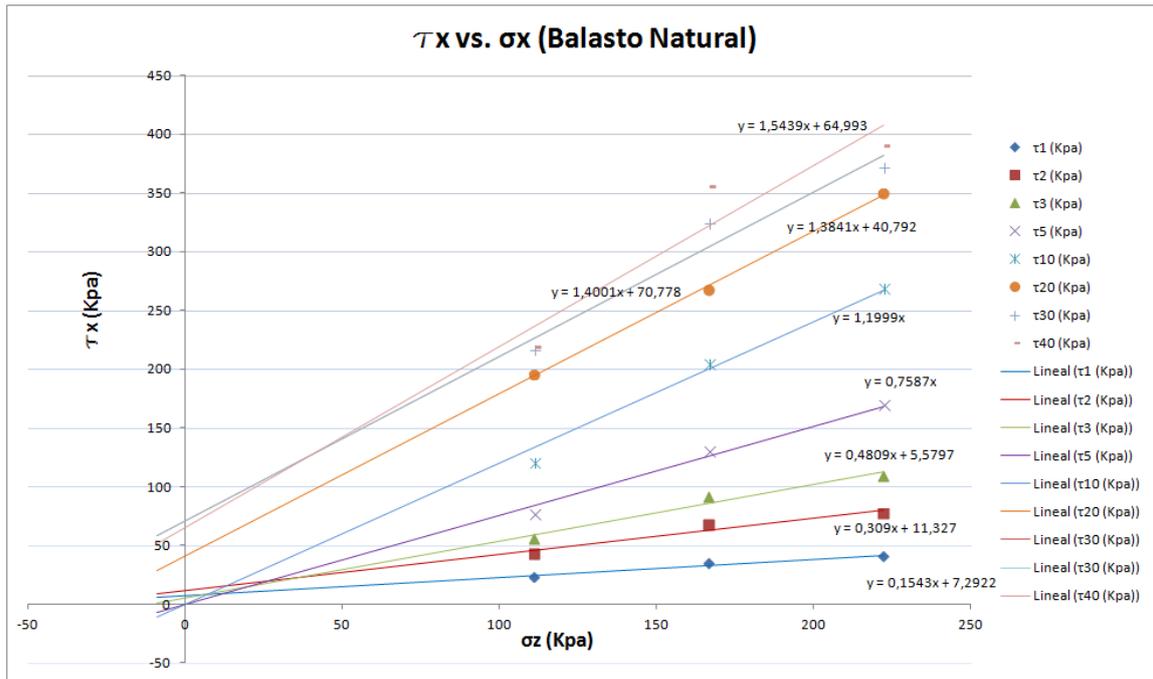
Gráfica 4.2. Coeficiente K_{τ} respecto del desplazamiento horizontal (balasto natural)

El desplazamiento vertical respecto al horizontal (Gráfica 4.3) que experimenta la muestra permite realizar una interpretación sobre el comportamiento de la muestra a medida que se le impone el desplazamiento horizontal. En las tres muestras ensayadas existe una dilatancia inicial seguida por una contractancia y por tanto un aumento de densidad, y a medida que se avanza en el corte el asiento vertical va aumentando progresivamente.



Gráfica 4.3. Desplazamiento vertical respecto del desplazamiento horizontal (balasto natural)

A partir de los valores obtenidos se representan los tres puntos correspondientes a los escalones de carga normal aplicados en función de la resistencia a cortante. Dado que la tensión cortante va variando según el desplazamiento horizontal, se realizan varios análisis y se los diferencia mediante una envolvente τ_i , siendo "i" el desplazamiento horizontal en milímetros para el cual se determinan los valores de τ . Se aprecia que, para cualquier desplazamiento, la envolvente de rotura se puede aproximar mediante un criterio Mohr-Coulomb.



Gráfica 4.4. Tensión de corte respecto de tensión vertical (balasto natural)

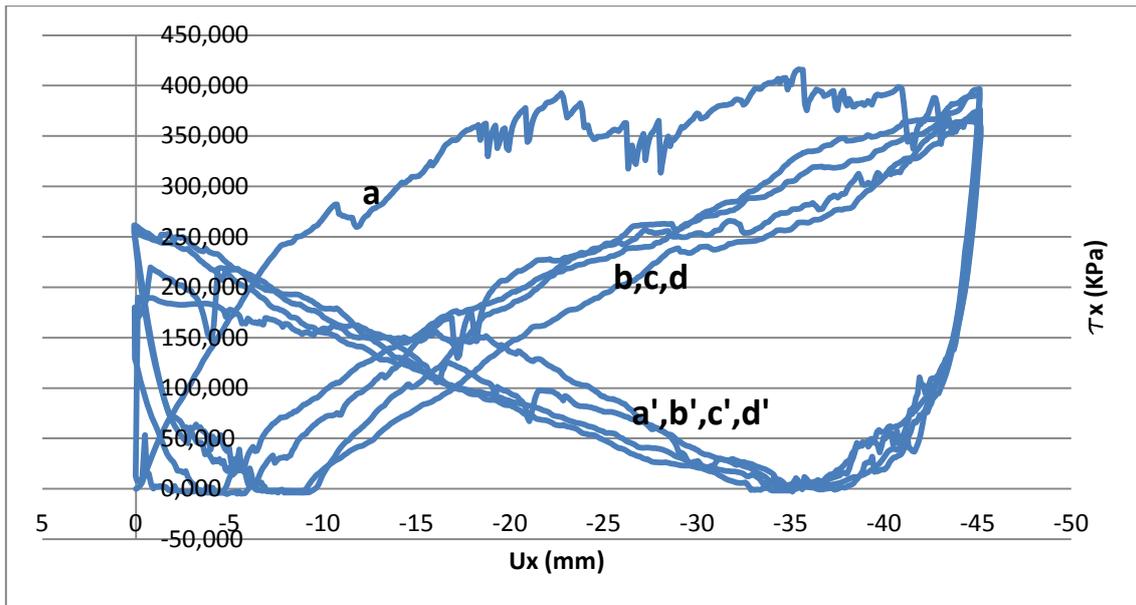
Los valores correspondientes del ángulo de fricción y de la cohesión movilizados para cada τ_i se reflejan en la tabla 4.1. Se observa primero un endurecimiento del material que alcanza una resistencia a corte máxima o de pico caracterizada por un ángulo de fricción igual a 57 grados y una cohesión de 65KPa, seguido por una degradación de resistencia al corte y un reblandecimiento del material.

Tabla 4.1. Parámetros Mohr-Coulomb (balasto natural)

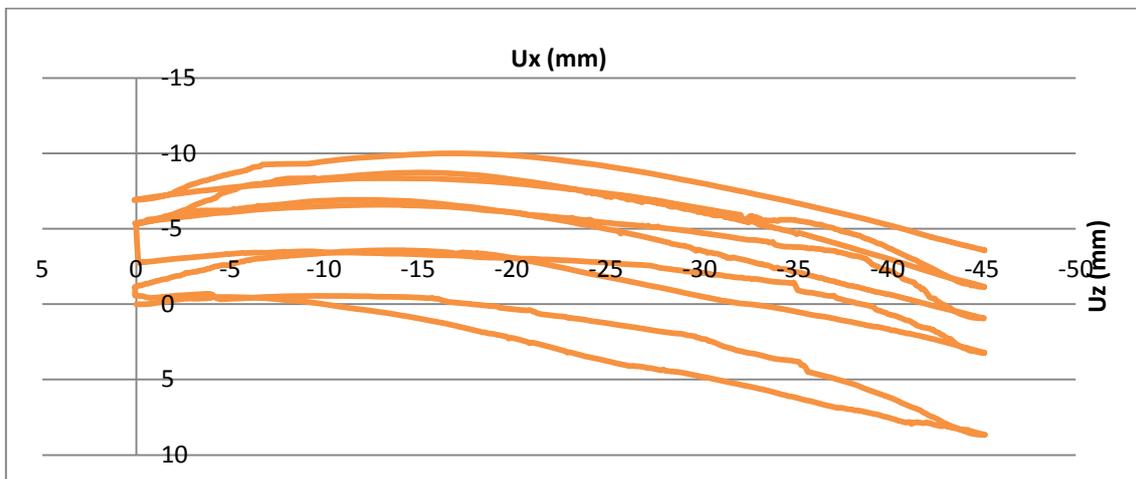
	Ux (mm)	BALASTO NAT	
		ϕ (°)	c (KPa)
τ_{f1}	1	8,77	7,29
τ_{f2}	2	17,17	11,33
τ_{f3}	3	25,68	5,58
τ_{f5}	5	37,19	0,00
τ_{f10}	10	50,19	0,00
τ_{f20}	20	54,15	40,79
τ_{f30}	30	54,46	70,78
τ_{f40}	40	57,07	64,99

CICLOS.

En el último escalón de carga y con el objetivo de medir el grado de trituración del material bajo ciclos, se ha cortado la muestra cuatro veces en cada sentido obteniendo los resultados que se detallan en las siguientes gráficas.



Gráfica 4.5. Tensión de corte respecto de tensión vertical (ciclos en balasto natural).



Gráfica 4.6. Desplazamiento vertical respecto del desplazamiento horizontal (ciclos balasto natural).

Como se aprecia en las gráficas 4.5 y 4.6, el comportamiento del material al aplicar ciclos varía sustancialmente respecto al comportamiento inicial. A lo largo del corte inicial (a) se forma la superficie de rotura como se ha explicado anteriormente. Durante los ciclos posteriores, se vuelve a movilizar la resistencia al corte a lo largo de la superficie existente. La similitud observada en las curvas u_x - τ_x demuestran que la resistencia al corte alcanza un valor estacionario al final de la primera etapa. Este valor es inferior al valor de corte requerido para generar la superficie de rotura.

Luego de realizados los ciclos se extrae el material y se lo tamiza obteniendo así el porcentaje de finos generados durante el ensayo.

Tabla 4.2. Granulometría del balasto natural luego de cargas cíclicas

Granulometría	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Tamiz	% que pasa
40 - 31,5	23056	20766		
31,5 - 25	0	1404	31,5	9,93%
25 - 20	0	248	25	3,84%
20 - 12,5	0	178	20	2,77%
< 12,5	0	460	12,5	2,00%

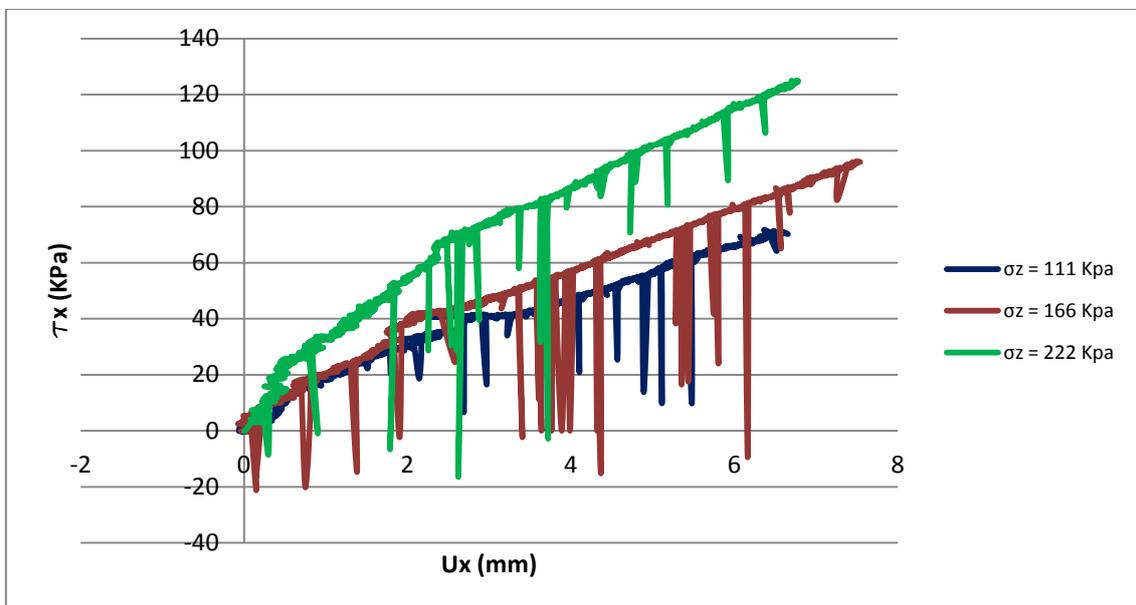
Como puede verse en la tabla 4.2, la granulometría inicial se encuentra comprendida únicamente entre los 31,5 y 40 mm, mientras que una vez finalizado el ensayo el material triturado que se encuentra por debajo del tamiz 31,5 es aproximadamente igual al diez por ciento.

4.3.2. Materiales de recubrimiento.

Los ensayos de los materiales utilizados para recubrir los áridos se han realizado en el equipo de corte directo convencional. Antes de realizar las dos probetas de caucho en polvo se han hecho edómetros con el material suelto con el fin de estimar la compresibilidad del mismo y de este modo obtener la altura necesaria de muestra al momento de realizar el corte.

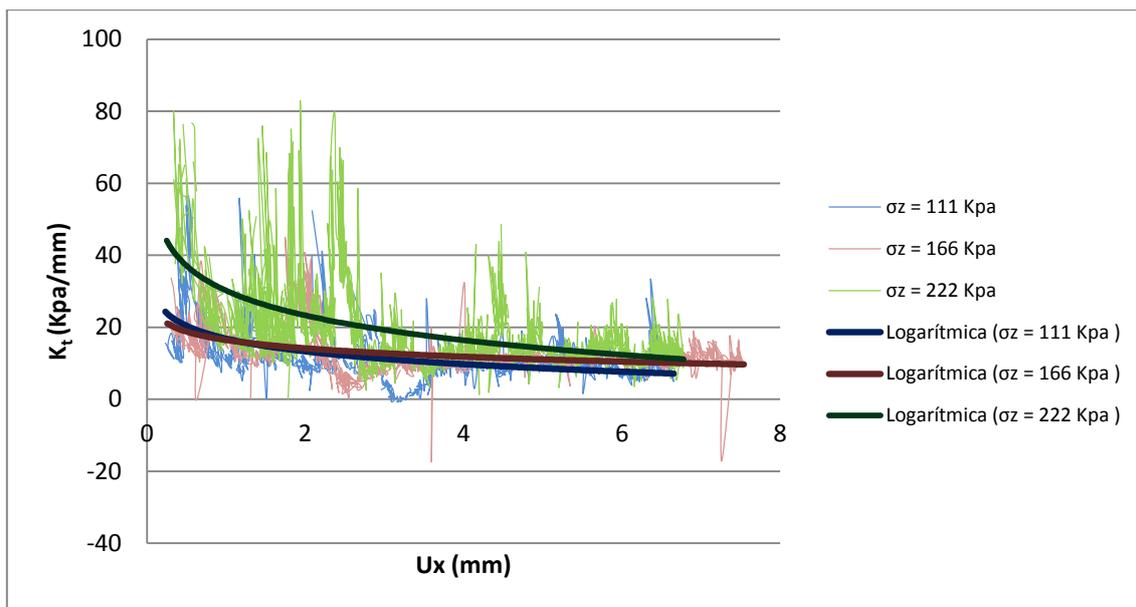
4.3.2.1. Caucho en polvo de 0 a 0,5 mm

La serie de gráficas presentadas a continuación describen los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados.



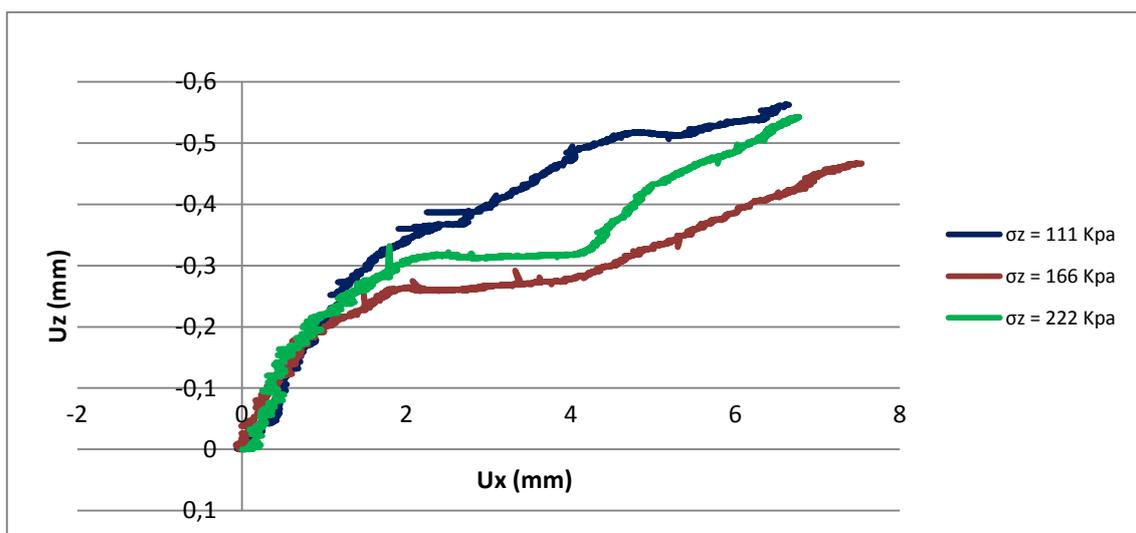
Gráfica 4.7. Tensión de corte respecto desplazamiento horizontal (caucho en polvo 05).

En los tres escalones de carga se pueden diferenciar dos etapas. La primera que corresponde al primer cuarto de milímetro en donde las tensiones aumentan con una mayor velocidad y la segunda pasada esta etapa donde las tensiones aumentan a una velocidad casi lineal.



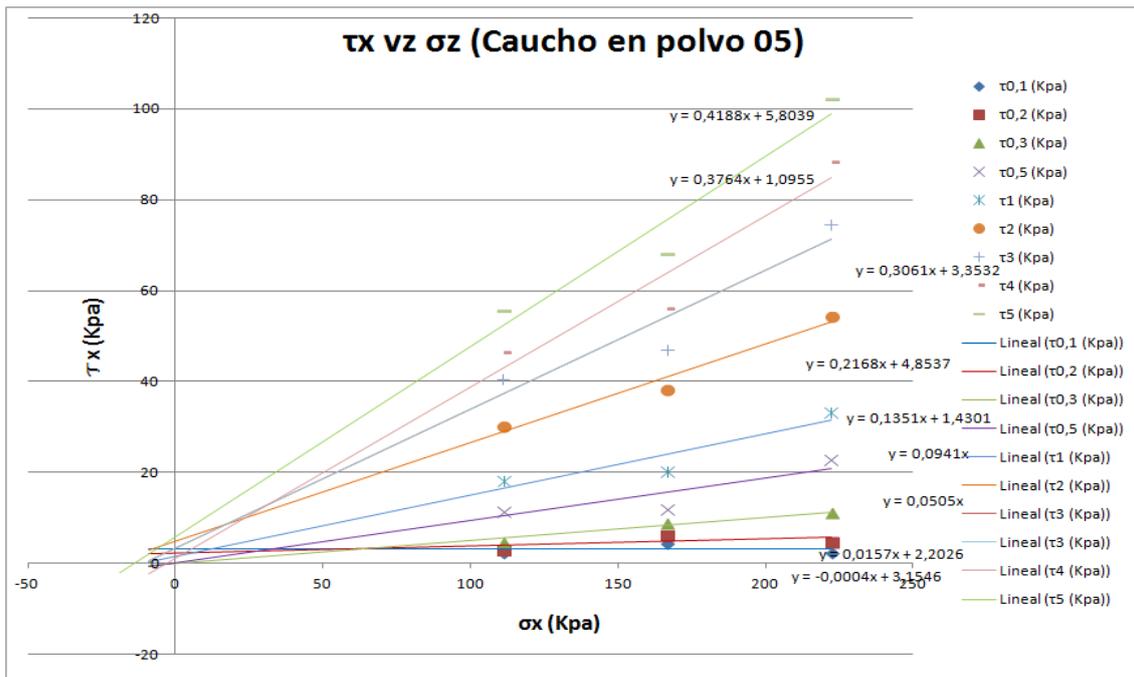
Grafica 4.8. Coeficiente K_{τ} respecto del desplazamiento horizontal (caucho en polvo 05)

Lo mencionado previamente se puede apreciar en la gráfica 4.8 donde los valores de K_{τ} tienen mayor valor y luego se estabilizan. Se han trazado aproximaciones logarítmicas con el objeto de definir la tendencia de estos datos..



Grafica 4.9. Desplazamiento vertical respecto del desplazamiento horizontal (caucho en polvo 05)

En la grafica 4.9 se puede apreciar como la muestra va perdiendo altura a medida que se va avanzando en el corte. Este comportamiento contractante es consistente con la baja densidad del material.



Gráfica 4.10. Tensión de corte respecto de tensión vertical (caucho en polvo 05).

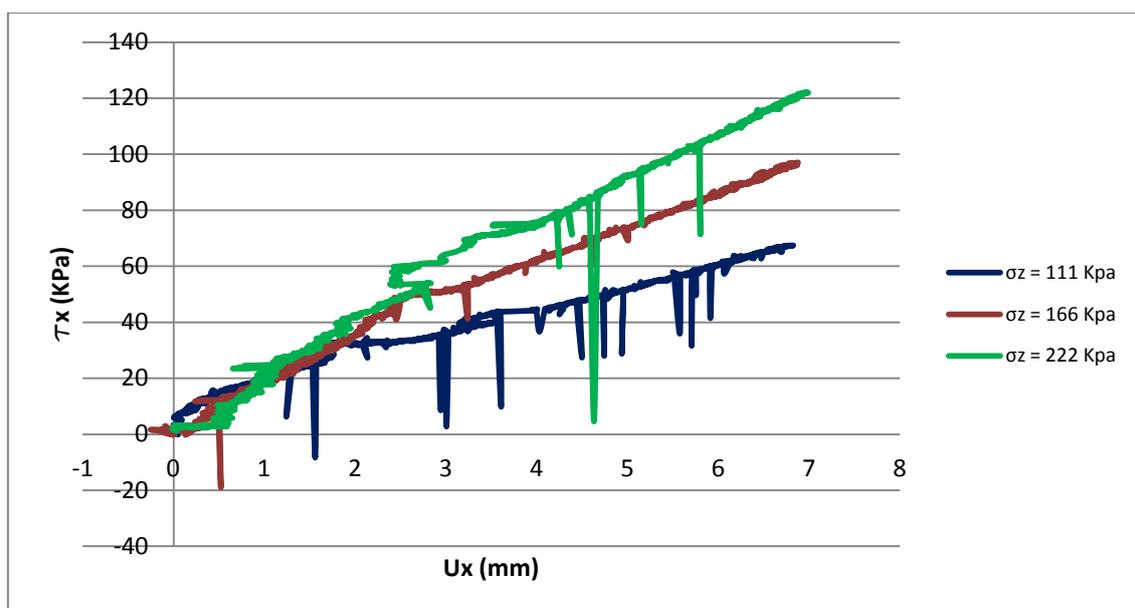
Al igual que se ha hecho para el balasto natural y a partir de la gráfica 4.10, se han calculado los parámetros de Mohr-Coulomb en función del desplazamiento horizontal experimentado que se detallan en la tabla 4.3. Se puede notar los bajos ángulos de corte movilizado y la ausencia de la fase de reblandecimiento.

Tabla 4.3. Parámetros Mohr-Coulomb (caucho en polvo 05)

	POLVO 05		
	Ux (mm)	ϕ (°)	c (KPa)
$\tau_{0,1}$	0,1	0,00	3,15
$\tau_{0,2}$	0,2	0,90	2,20
$\tau_{0,3}$	0,3	2,89	0,00
$\tau_{0,5}$	0,5	5,38	0,00
τ_1	1	7,69	1,43
τ_2	2	12,23	4,85
τ_3	3	17,02	3,35
τ_4	4	20,63	1,10
τ_5	5	22,73	5,80

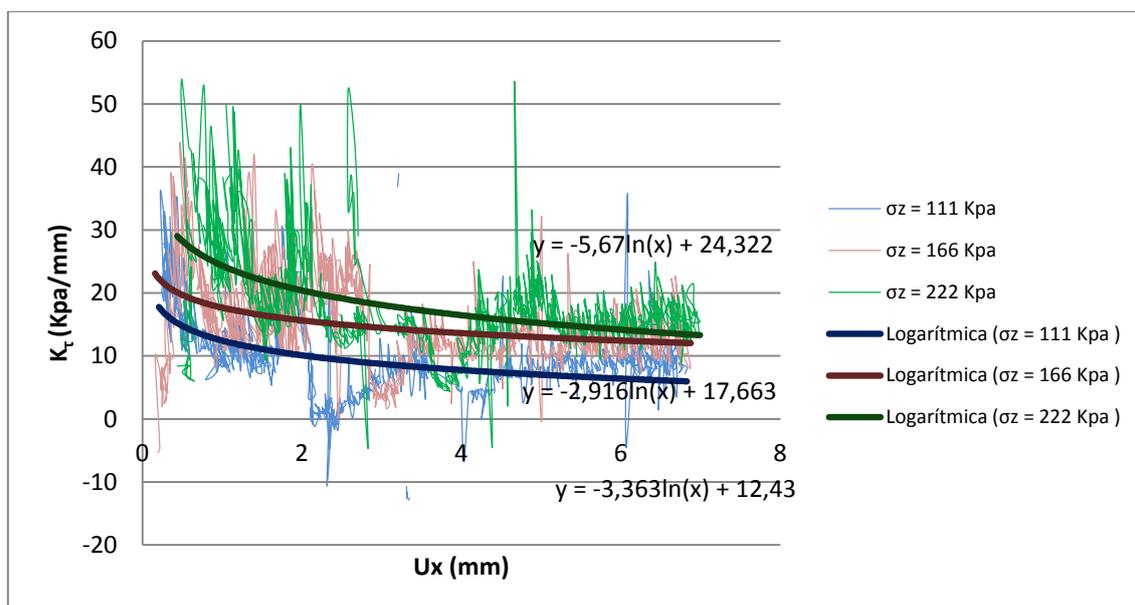
4.3.2.2. Caucho en polvo de 0 a 0,8 mm

Las curvas de tensión de corte vs desplazamiento obtenidas en el caucho en polvo se muestran en la gráfica 4.11. Se observa un acomodamiento del material para desplazamientos inferiores a 2 mm que vuelve difícil la interpretación del valor de la tensión de corte movilizada. Para desplazamientos superiores a 2 mm, se obtiene una respuesta típica de un material gobernado por la ley de fricción, caracterizado por un aumento de la tensión de corte movilizada con el valor de tensión normal.



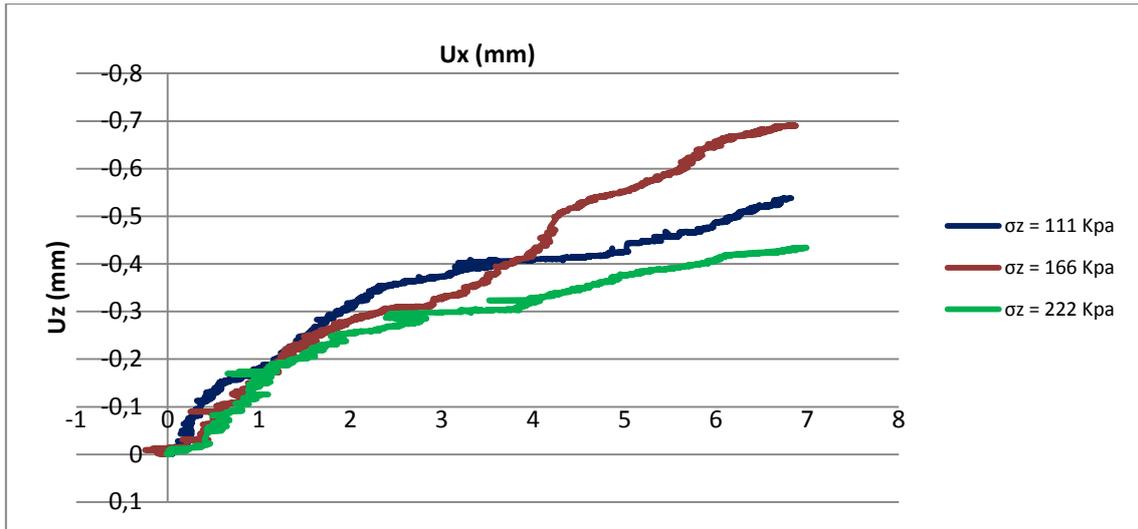
Grafica 4.11. Tensión de corte respecto desplazamiento horizontal (caucho en polvo 08).

Al igual que para el caucho 05, la curva $u_x-\tau_x$ se caracteriza por una forma bilineal con un cambio de pendiente alrededor de 3 mm. La variación correspondiente del coeficiente K_t se muestra en la gráfica 4.12. Evidencia grandes variaciones de este coeficiente alrededor de una tendencia que se puede aproximar por una relación logarítmica entre el desplazamiento horizontal y K_t .



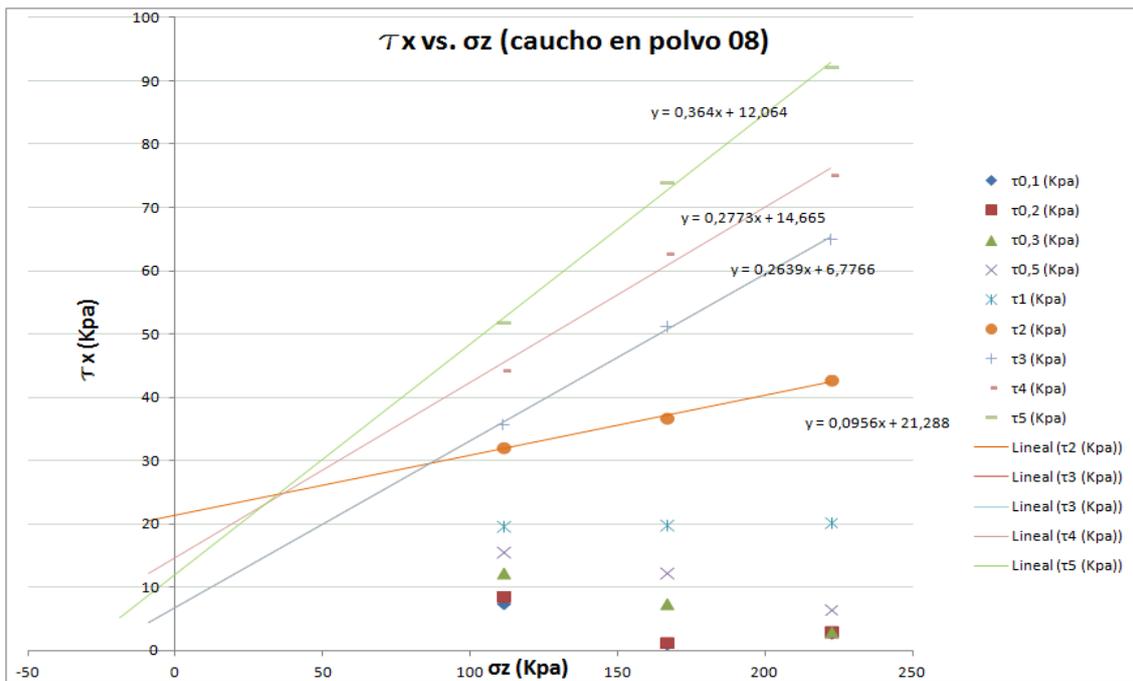
Grafica 4.12. Coeficiente K_t versus desplazamiento horizontal (caucho en polvo 08).

Se reporta en la gráfica 4.13 la variación del desplazamiento vertical a lo largo del corte para las tres tensiones verticales. Las curvas evidencian una respuesta contractante más marcada que el caso de las muestras de granulometría inferior.



Gráfica 4.13. Desplazamiento vertical respecto desplazamiento horizontal (caucho en polvo 08).

Se representa en la gráfica 4.14 la variación de la envolvente de corte movilizado con el desplazamiento horizontal para valores de u_x superiores a 1 mm. Los parámetros correspondientes se reportan en la tabla 4.4.



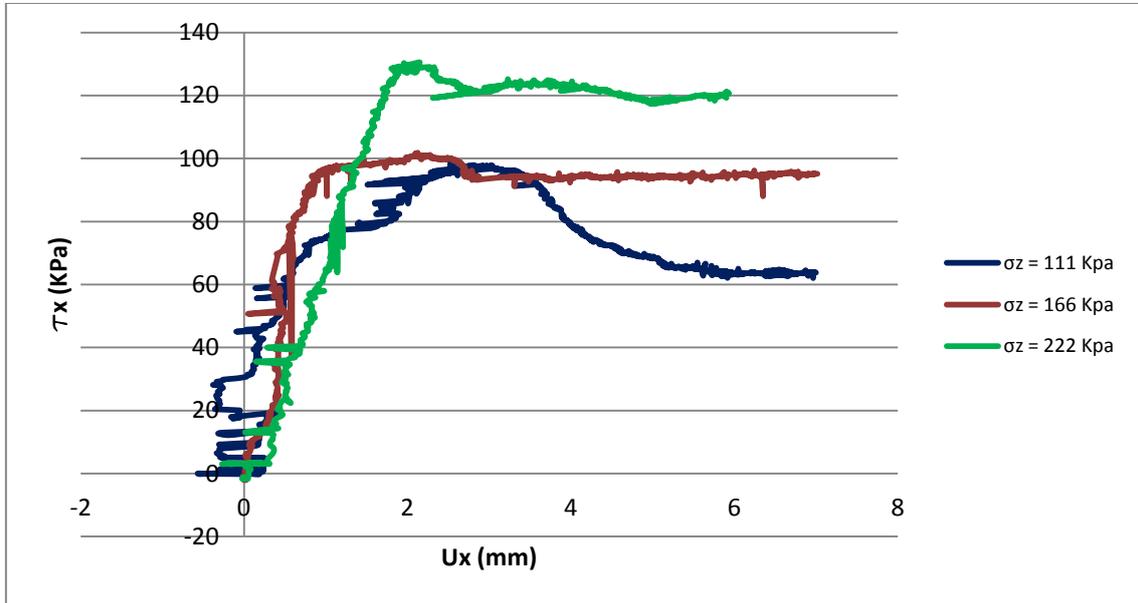
Gráfica 4.14. Tensión de corte respecto tensión vertical (caucho en polvo 08).

Tabla 4.4. Parámetros Mohr-Coulomb (caucho en polvo 08)

		POLVO 08	
	U_x (mm)	ϕ ($^\circ$)	c (KPa)
τ_2	2	5,46	21,29
τ_3	3	14,78	6,77
τ_4	4	15,50	14,67
τ_5	5	20,00	12,06

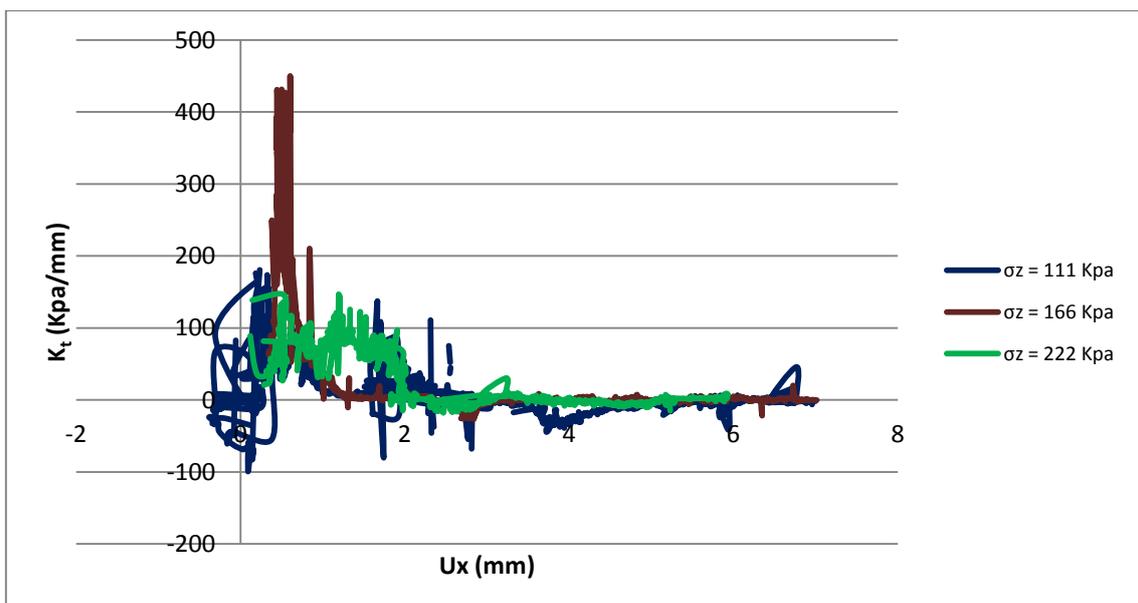
4.3.2.3. Mezcla de caucho en polvo de 0 a 0,5 mm con poliuretano

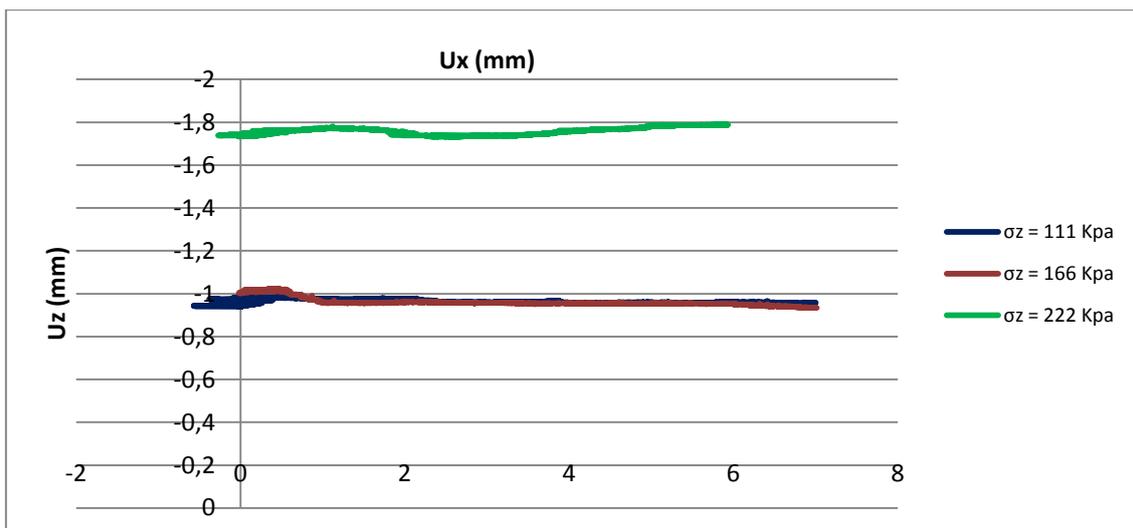
Para conformar las probetas se ha utilizado la misma dosificación que la empleada al recubrir los áridos con el recubrimiento 05-SR. Las proporciones empleadas son de 52 % de caucho en polvo y 48 % poliuretano PU Binder 031.



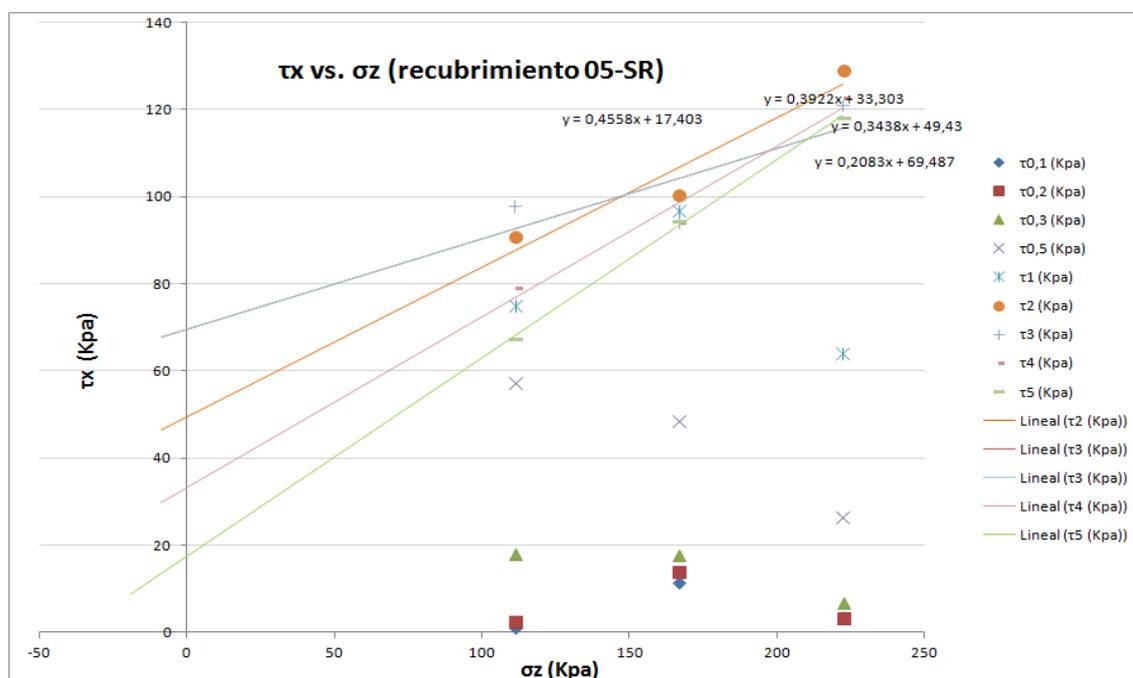
De la gráfica 4.15 resulta curiosa la existencia de picos de resistencia que luego disminuyen hasta alcanzar una resistencia menor para la superficie de corte. Este tipo de respuesta puede indicar la presencia de un mecanismo de roturas de partículas durante el ensayo. Esta interpretación se ve reforzada por la respuesta contractante del material observada en la gráfica 4.17 que permite desechar la dilatancia como el mecanismo de respuesta frágil de la muestra.

La variación del coeficiente K_t con el desplazamiento horizontal de la muestra evidencia de nuevo grandes variaciones así como una tendencia general a decrecer durante el corte.





Gráfica 4.17. Desplazamiento vertical respecto desplazamiento horizontal (recubrimiento tipo 05-SR)



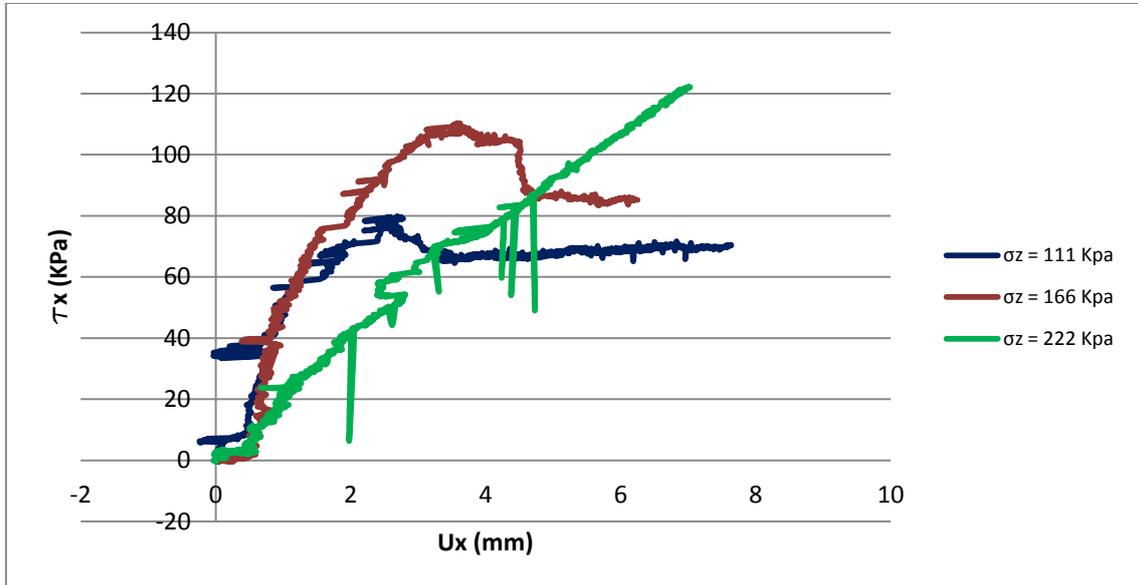
Gráfica 4.18. Tensión de corte respecto tensión vertical (recubrimiento tipo 05-SR)

Tabla 4.5. Parámetros Mohr-Coulomb (recubrimiento tipo 05-SR)

	RECUBRIMIENTO 05-SR		
	Ux (mm)	ϕ (°)	c (KPa)
τ_2	2	18,9	49,4
τ_3	3	11,8	69,5
τ_4	4	21,4	33,3
τ_5	5	24,5	17,4

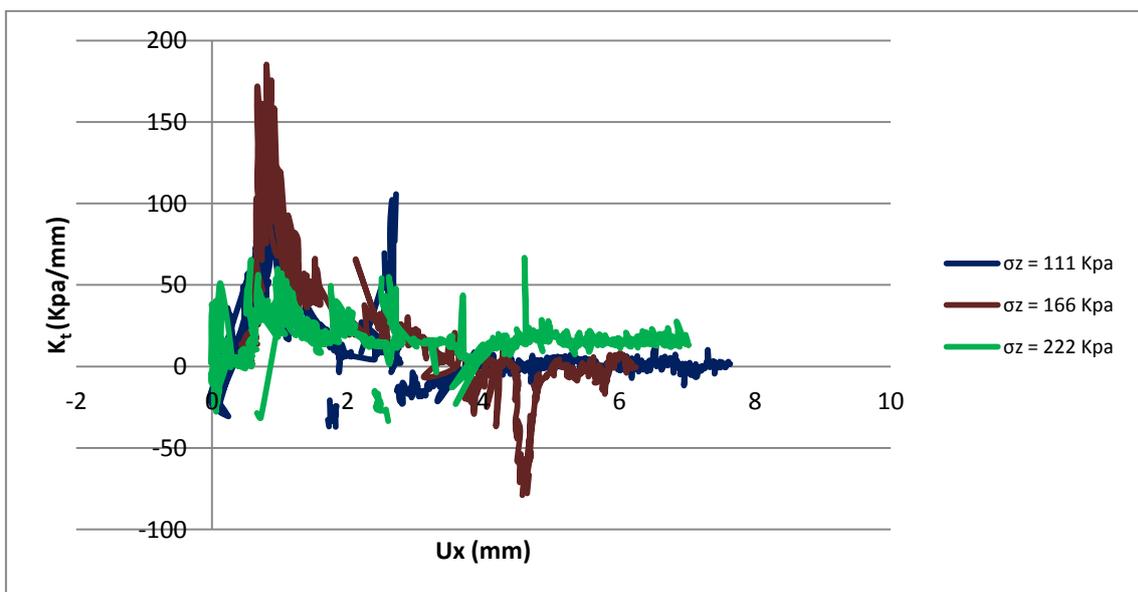
4.3.2.4. Mezcla de caucho en polvo de 0 a 0,8 mm con poliuretano

Para conformar las probetas se ha utilizado la misma dosificación que la empleada al recubrir los áridos con el recubrimiento 08-SR. Las proporciones empleadas son de 40 % de caucho en polvo y 60 % poliuretano PU Binder 031.



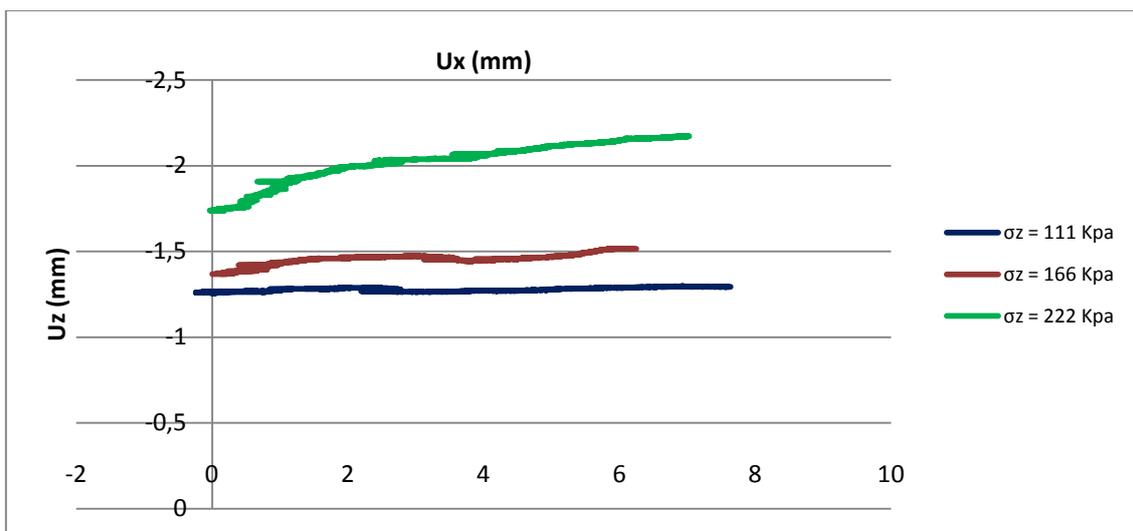
Grafica 4.19. Tensión de corte respecto desplazamiento horizontal (recubrimiento tipo 08-SR).

En la gráfica 4.19, se puede observar una respuesta similar a la de las muestras de mezcla Caucho/Poliuretano con granos de 0 a 0.5 mm para las cargas verticales de 111 y 166 kPa. Se caracteriza por una resistencia de pico seguido de un reblandecimiento del material y un contractancia del material (grafica 4.21). La variación de K_τ con el desplazamiento horizontal se presenta en la gráfica 4.20. La respuesta bajo la carga mayor (222 kPa) evidencia un crecimiento casi lineal del esfuerzo de corte con el desplazamiento horizontal, difícil de interpretar. Convendría realizar nuevos ensayos para poder analizar en más detalle la respuesta de este tipo de material bajo cargas altas, el valor de K_τ se mantiene casi constante.

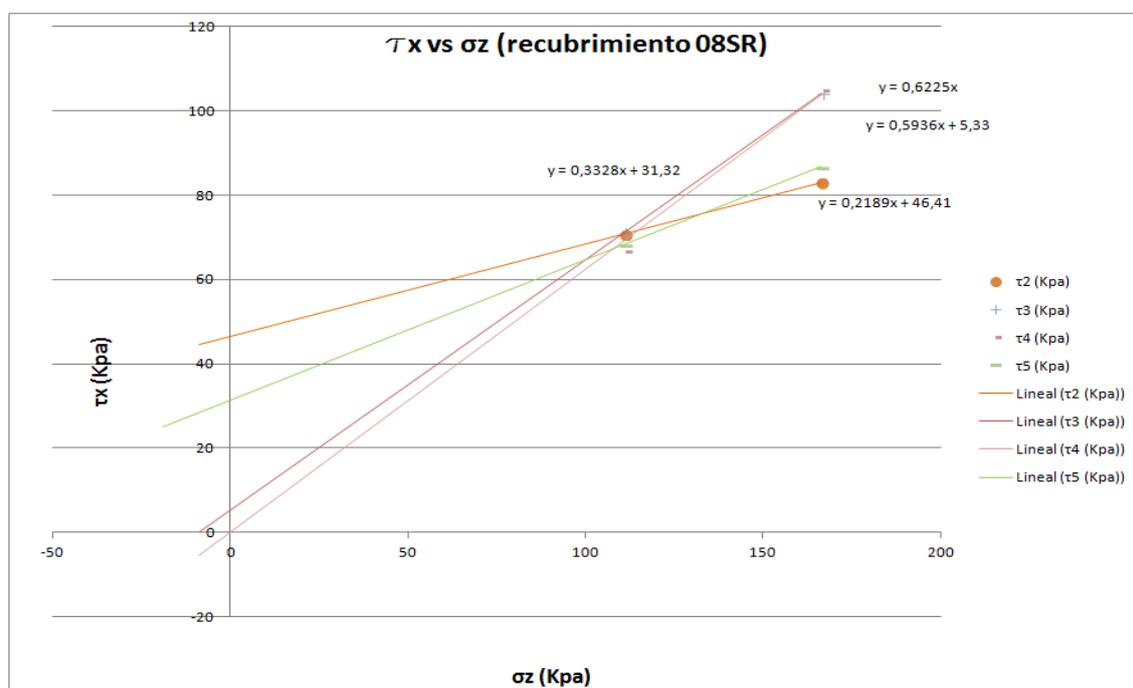


Grafica 4.20. Coeficiente K_τ respecto desplazamiento horizontal (recubrimiento tipo 08-SR).

En lo que respecta a los asentos verticales durante el corte son mínimos (Gráfica 4.21)



Gráfica 4.21. Desplazamiento vertical respecto desplazamiento horizontal (recubrimiento tipo 08-SR)



Gráfica 4.22. Tensión de corte respecto tensión vertical (recubrimiento tipo 08-SR)

Tabla 4.6. Parámetros Mohr-Coulomb (recubrimiento tipo 08-SR)

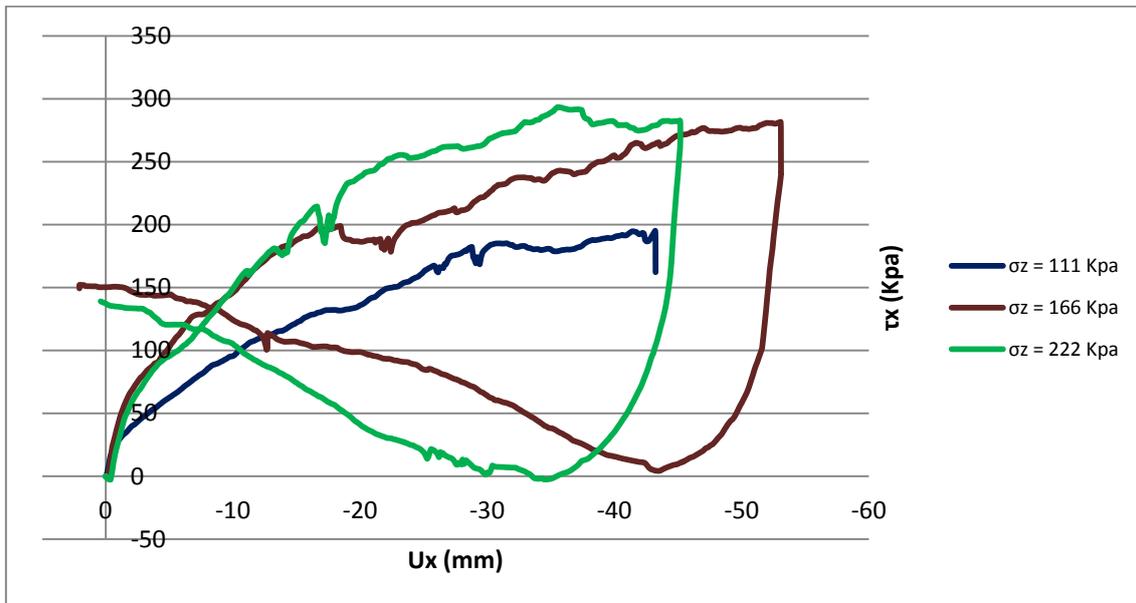
		RECUBRIMIENTO 08-SR	
	Ux (mm)	ϕ (°)	c (KPa)
τ_2	2	12,35	46,41
τ_3	3	18,41	31,32
τ_4	4	17,87	0,00
τ_5	5	30,69	5,33

4.3.3. Balasto recubierto

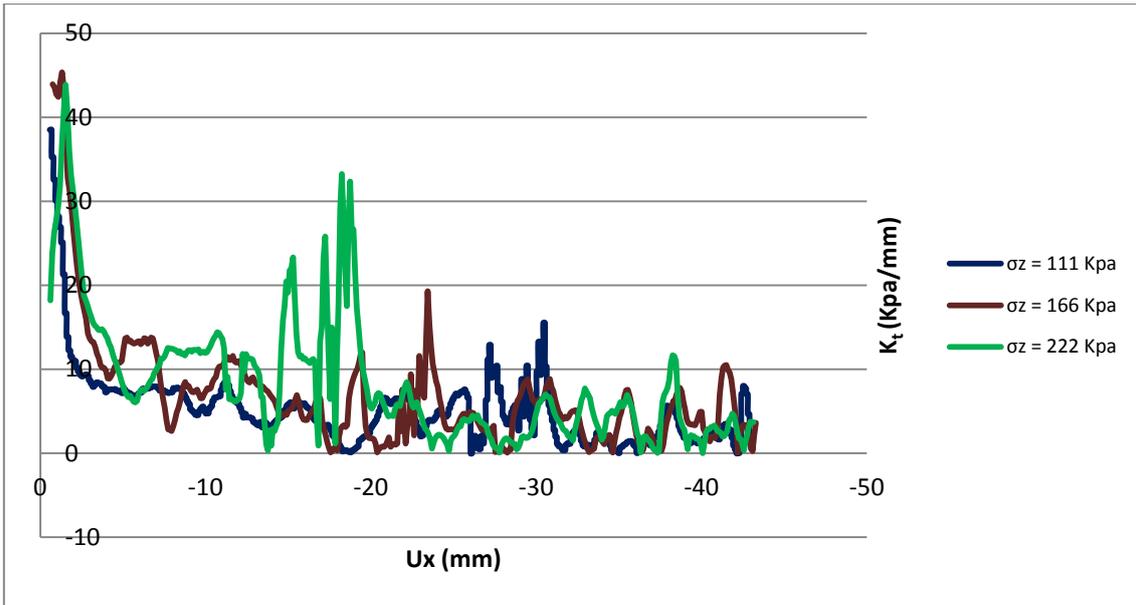
Ya presentados los resultados del balasto natural y de los materiales empleados como recubrimiento, se detallan los resultados obtenidos para el balasto recubierto con las tres tipologías mencionadas en el apartado 4.2.1.

4.3.3.1. NEOBALLAST tipo 08-SR

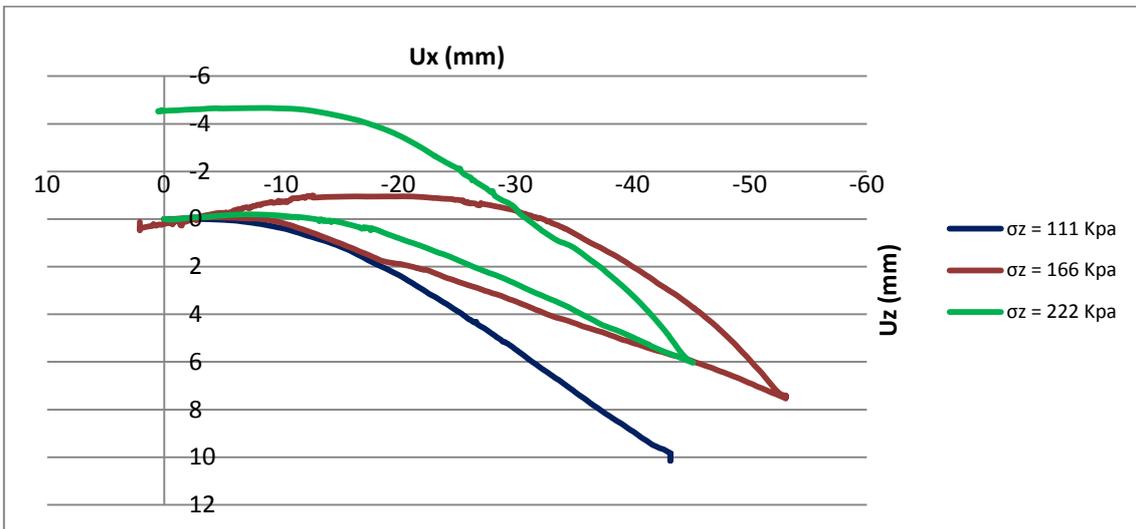
Al igual que para el balasto natural, en la gráfica 4.23 podemos observar nuevamente tres comportamientos diferenciados según el desplazamiento horizontal experimentado: 1) reacomodo inicial del material caracterizado por un aumento suave de la tensión de corte (hasta típicamente un desplazamiento de 10 mm), 2) proceso de formación de la superficie de corte, caracterizado por salto en la tensión de corte conforme se crea la superficie entre o través de las partículas (entre 10 y 30 mm para la carga de 111 KPa, 10 y 40 mm para la carga de 166 KPa y 10 y 35 mm para la carga de 222 KPa) 3) corte a lo largo de la superficie ya creada que alcanza su resistencia máxima. El momento de mayor K_τ se alcanza en el primer milímetro del corte directo e inverso como se aprecia en la gráfica 4.24.



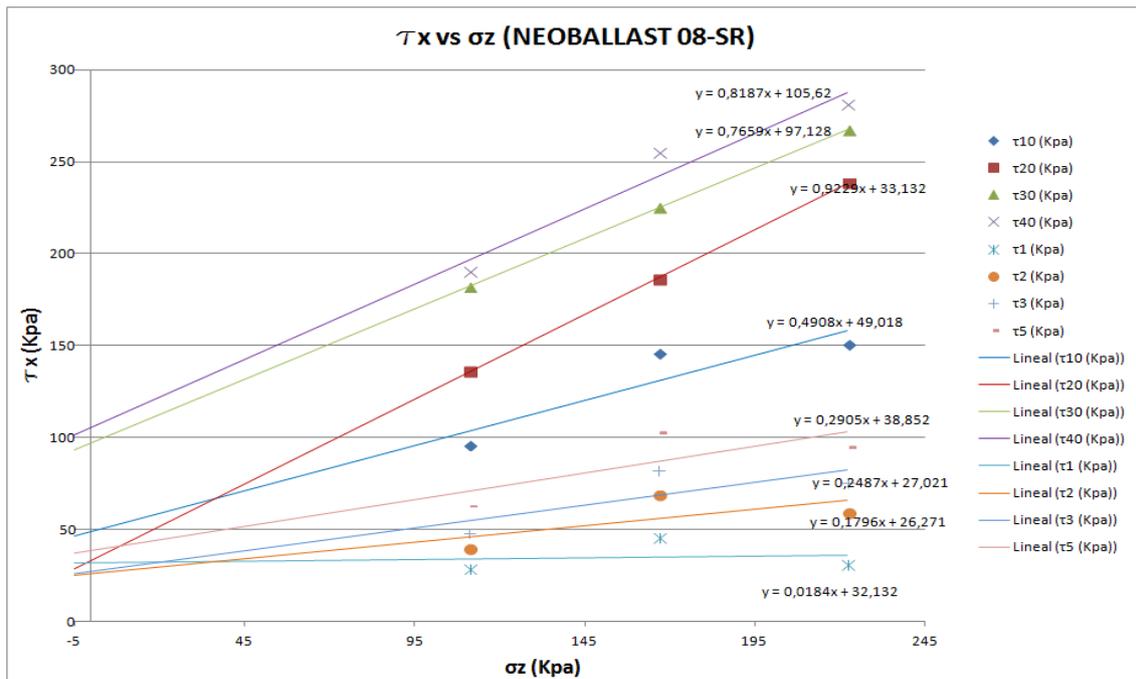
Gráfica 4.23. Tensión de corte en función del desplazamiento horizontal (NEOBALLAST 08-SR).



Grafica 4.24. Coeficiente K_t versus desplazamiento horizontal (NEOBALLAST 08-SR)



Grafica 4.25. Desplazamiento vertical respecto del desplazamiento horizontal (NEOBALLAST 08-SR)

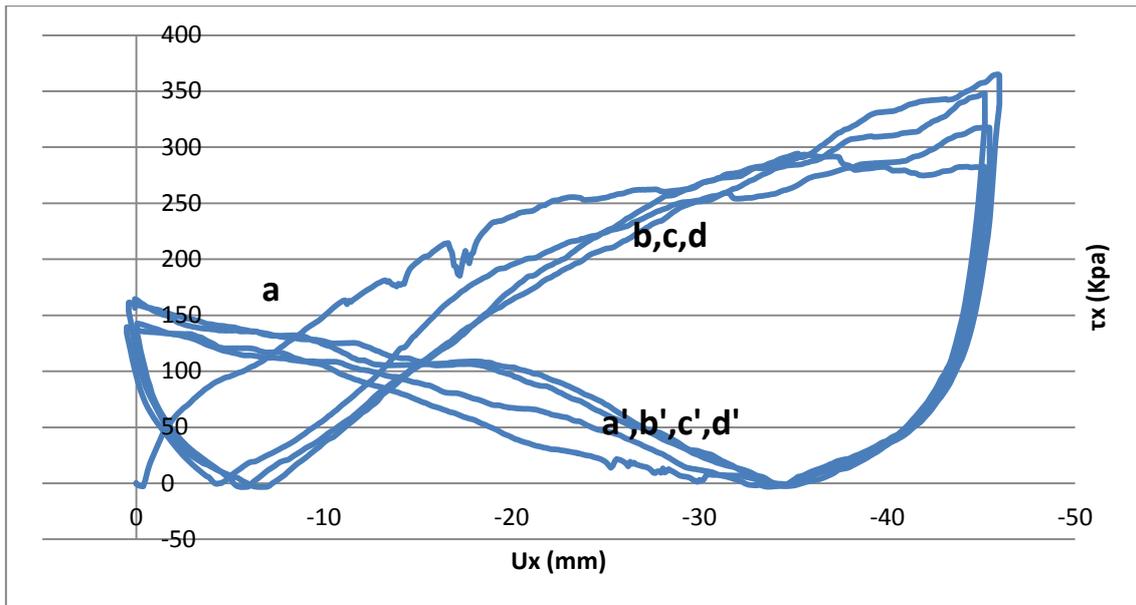


Gráfica 4.26. Tensión de corte versus tensión vertical (NEOBALLAST 08-SR)

Tabla 4.7. Parámetros Mohr-Coulomb (NEOBALLAST 08-SR)

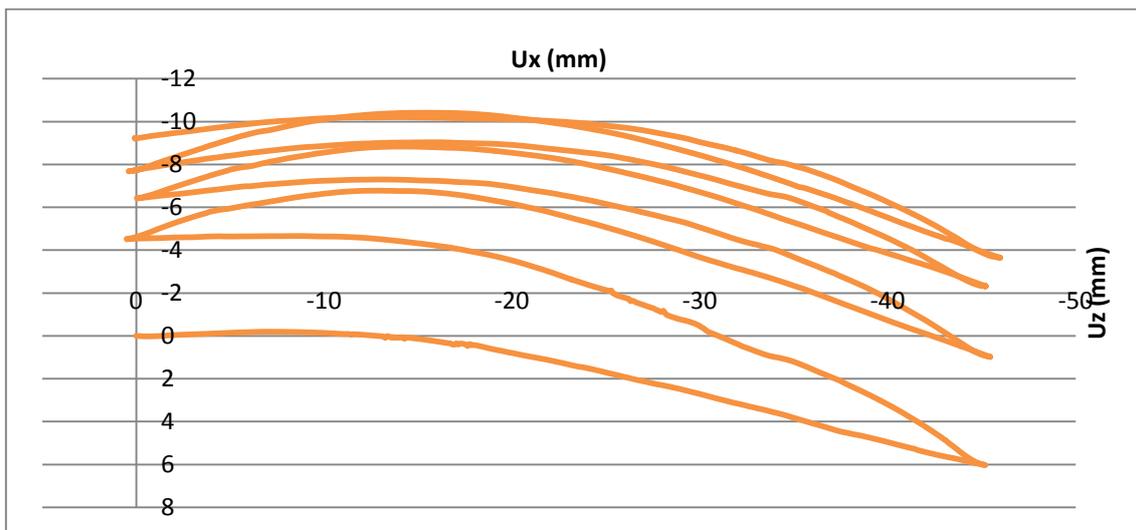
NEOBALLAST 08-SR			
	Ux (mm)	φ (°)	c (KPa)
τ1	1	1,05	32,13
τ2	2	10,18	26,27
τ3	3	13,97	27,02
τ5	5	16,20	38,85
τ10	10	26,14	49,02
τ20	20	42,70	33,13
τ30	30	37,45	97,13
τ40	40	39,31	105,62

En la gráfica 4.27 se detalla el comportamiento del material bajo cuatro ciclos de carga. De los recubrimientos empleados, el 08SR es el que menor cantidad de material de recubrimiento emplea. Se puede apreciar en la gráfica que los saltos en las tensiones de corte que correspondían a la rotura de material en el balasto natural se suavizan en el material recubierto y que el comportamiento luego de cada ciclo mantiene una mayor semejanza que para el balasto natural.



Gráfica 4.27. Tensión de corte versus tensión vertical (ciclos NEOBALLAST 08-SR)

En lo que respecta a los asentamientos verticales bajo las cargas cíclicas se mantiene el mismo orden de magnitud y comportamiento similar al experimentado por el balasto natural.



Gráfica 4.28. Desplazamiento vertical versus desplazamiento horizontal (ciclos NEOBALLAST 08-SR)

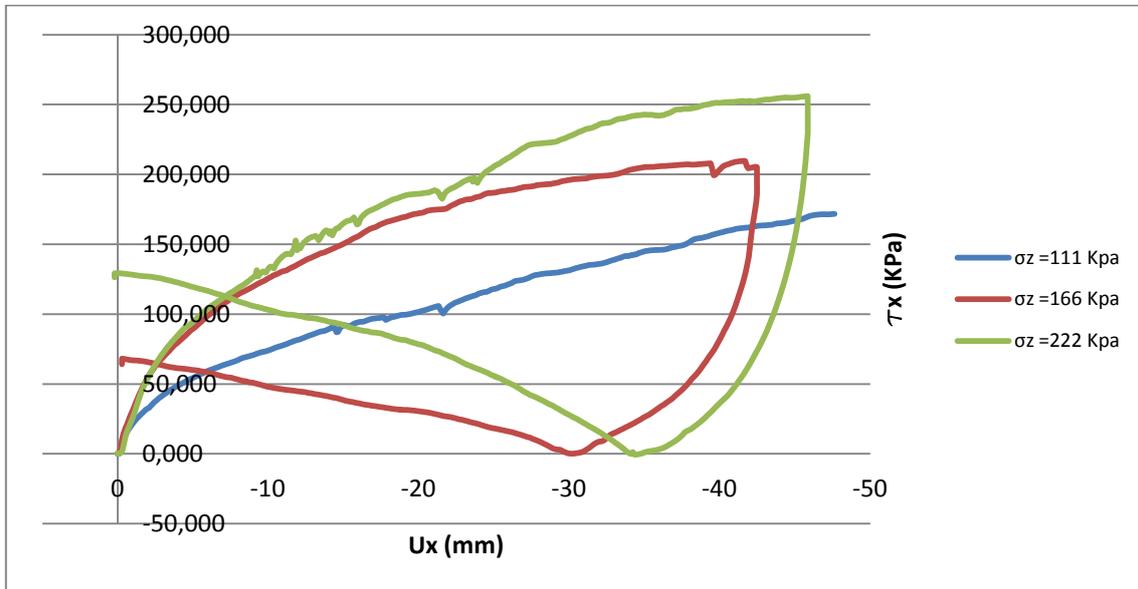
La menor cantidad de saltos en las tensiones de corte se traducen en menor rotura del material y por tanto, como se detalla en la tabla 4.8, menor cantidad de finos producidos que para los ensayos realizados sobre el balasto natural.

Tabla 4.8. Granulometría del NEOBALLAST 08-SR luego de cargas cíclicas

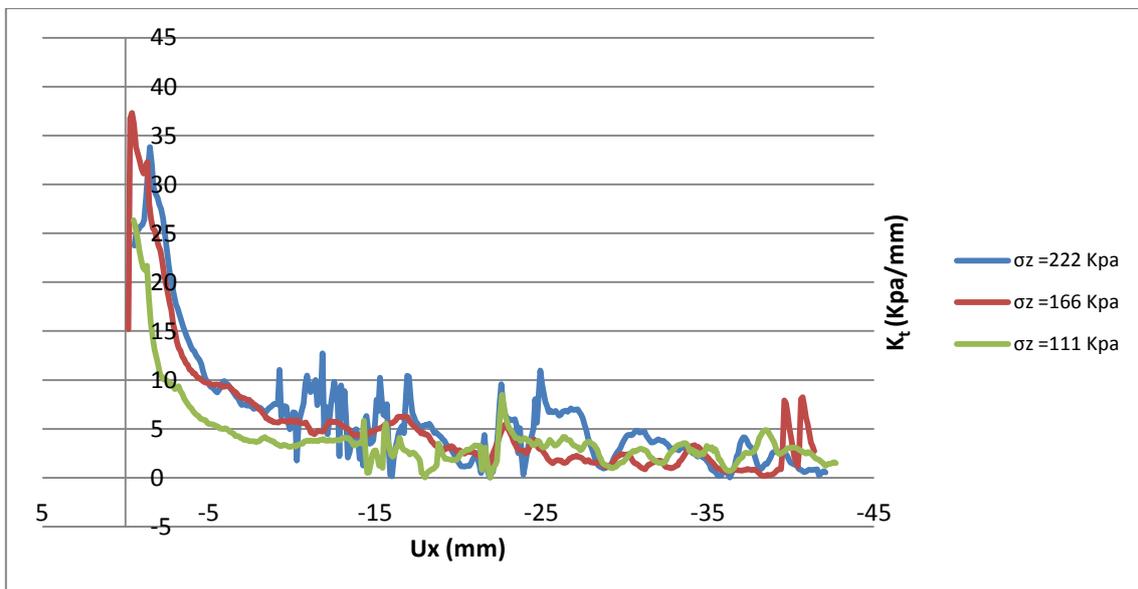
Granulometría	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Tamiz	% que pasa
40 - 31,5	23042	22700		
31,5 - 25	0	198	31,5	1,48%
25 - 20	0	0	25	0,62%
20 - 12,5	0	48	20	0,62%
< 12,5	0	96	12,5	0,42%

4.3.3.2. NEOBALLAST tipo 08-SRS

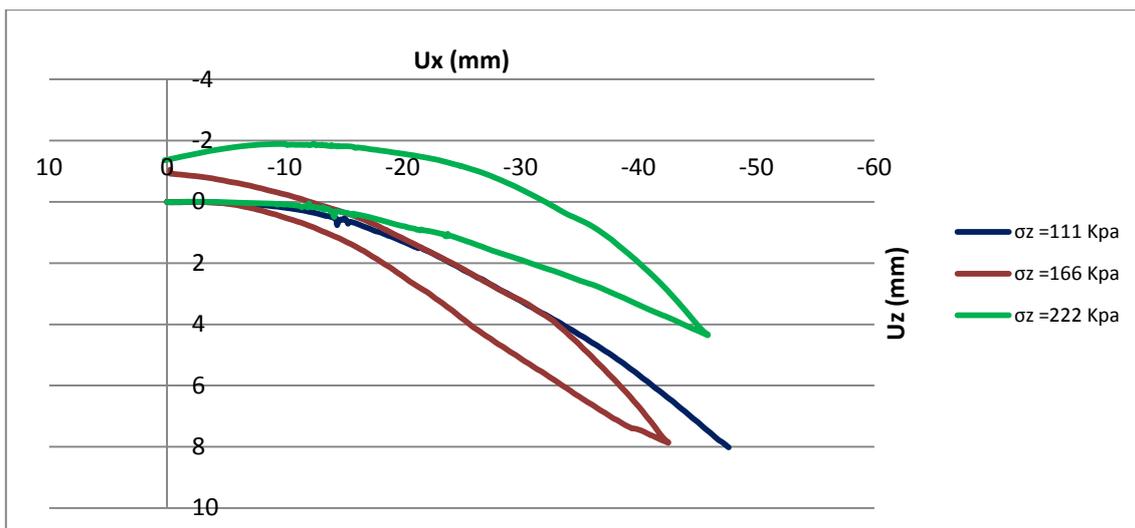
La presente tipología de NEOBALLAST es la que más cantidad de materiales de recubrimiento emplea. En la gráfica 4.29, se puede apreciar que los saltos en las tensiones de corte han prácticamente desaparecido aunque sigue existiendo alguna variación entre 10 y 30 mm, pudiendo evidenciar el fenómeno de creación de la superficie de rotura. El coeficiente K_{τ} siguen siendo mayor al inicio del proceso de corte (gráfica 4.30).



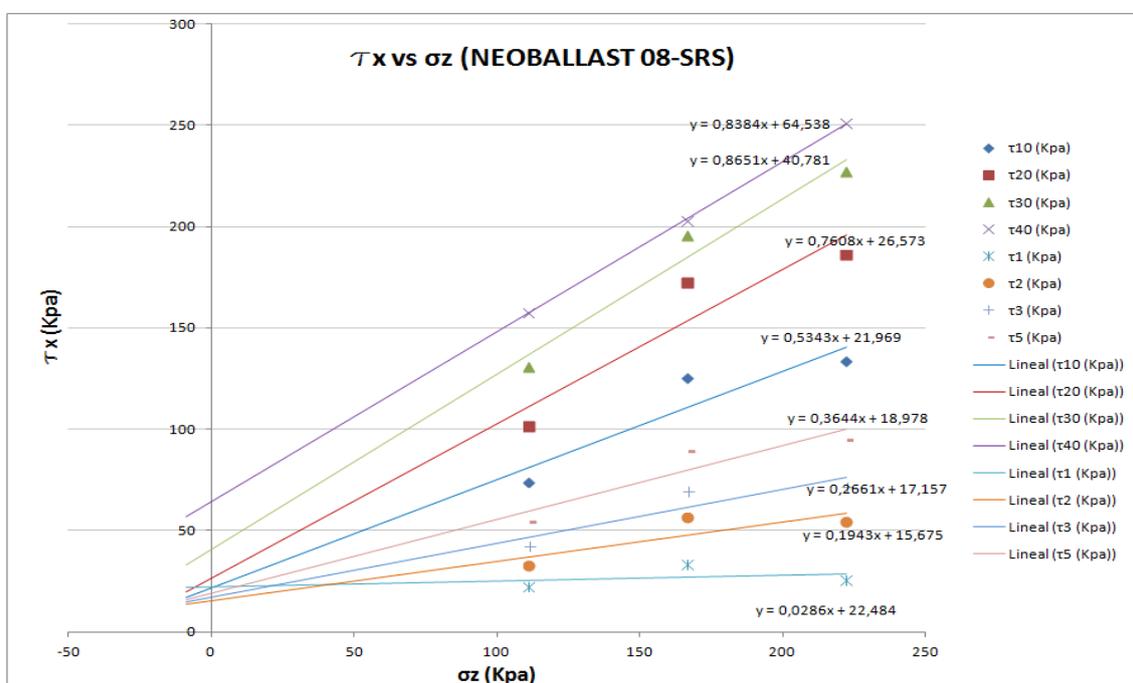
Grafica 4.29. Tensión de corte versus desplazamiento horizontal (NEOBALLAST 08-SRS).



Grafica 4.30. Coeficiente K_t versus desplazamiento horizontal (NEOBALLAST 08-SRS)



Gráfica 4.31. Desplazamiento vertical versus desplazamiento horizontal (NEOBALLAST 08-SRS)

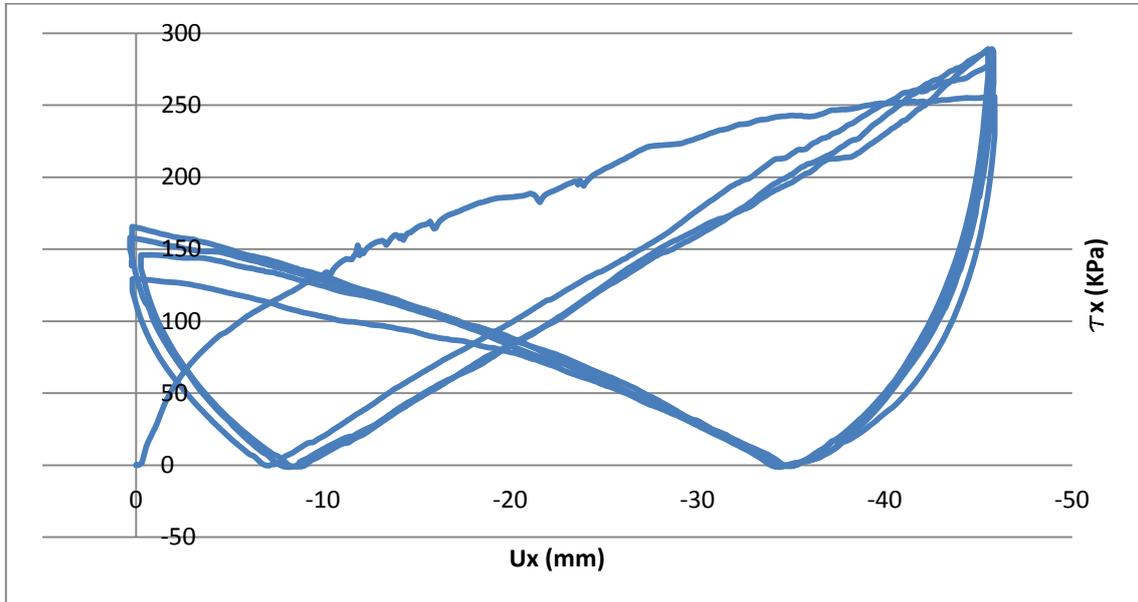


Gráfica 4.32. Tensión de corte versus tensión vertical (NEOBALLAST 08-SRS)

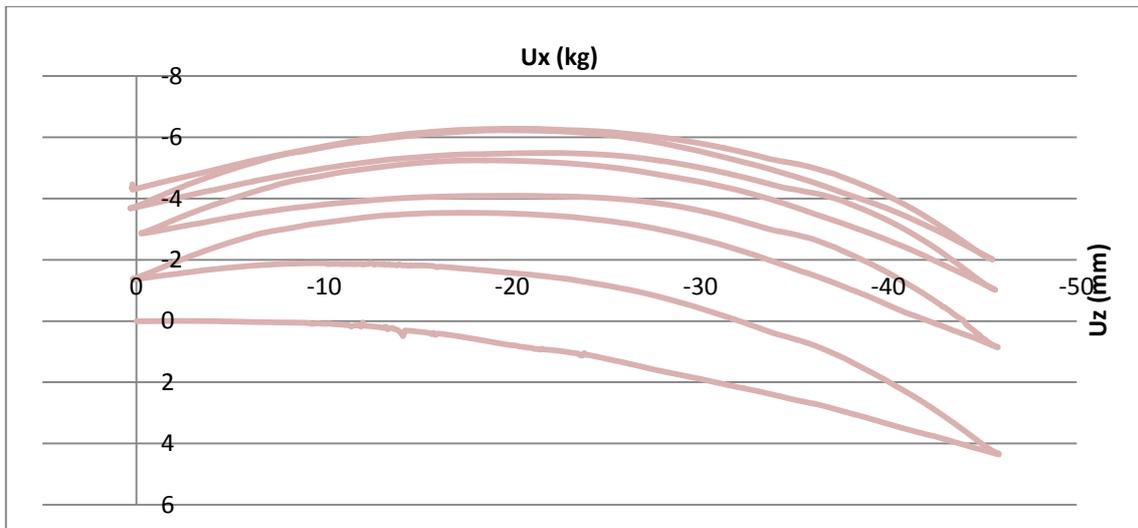
Tabla 4.9. Parámetros Mohr-Coulomb (NEOBALLAST 08-SRS)

NEOBALLAST 08-SRS			
	U_x (mm)	ϕ (°)	c (KPa)
τ_1	1	1,64	22,48
τ_2	2	11,00	15,68
τ_3	3	14,90	17,16
τ_5	5	18,59	18,98
τ_{10}	10	28,12	21,97
τ_{20}	20	37,26	26,57
τ_{30}	30	40,86	40,78
τ_{40}	40	39,98	64,54

En la gráfica 4.33 se puede apreciar el comportamiento del material sometido a ciclos. El solape de las curvas una vez formada la superficie de rotura es mayor que en los otros tipos de materiales, indicando que la rotura de partículas se limita al máximo. Los asientos verticales (Gráfica 4.34) continúan siendo del mismo orden.



Gráfica 4.33. Tensión de corte versus tensión vertical (ciclos NEOBALLAST 08-SRS)



Gráfica 4.34. Desplazamiento vertical versus desplazamiento horizontal (ciclos NEOBALLAST 08-SRS)

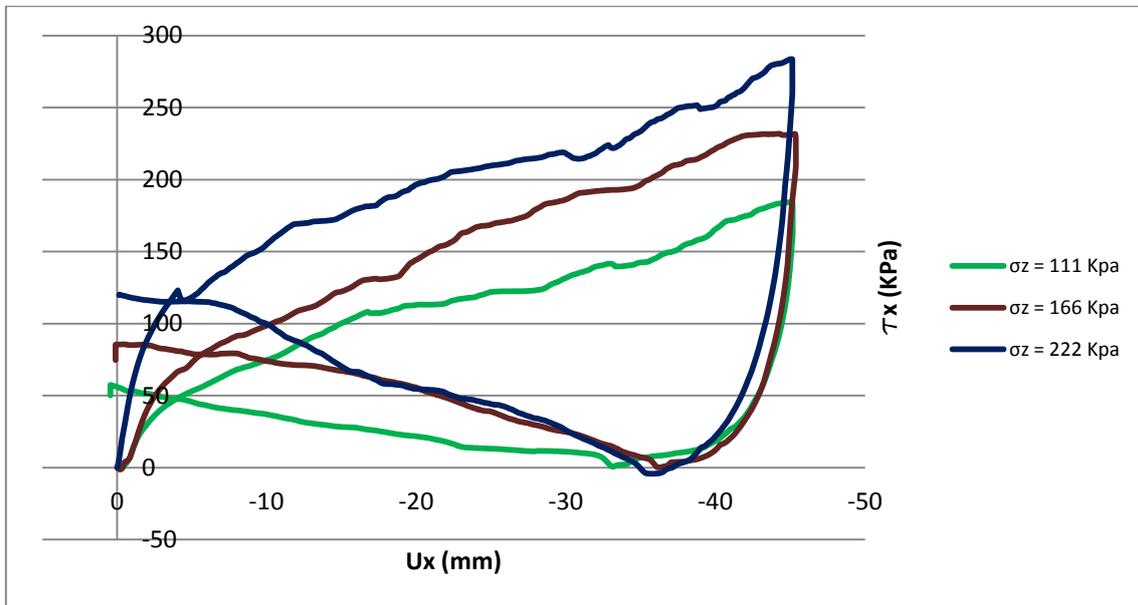
La granulometría de la muestra antes y después del ensayo no ha cambiado, confirmado la desactivación del fenómeno de rotura de partículas. Asimismo, se han producido mínimos deterioros en el recubrimiento a causa del desplazamiento impuesto.

Tabla 4.10. Granulometría del NEOBALLAST 08-SRS antes y después de cargas cíclicas

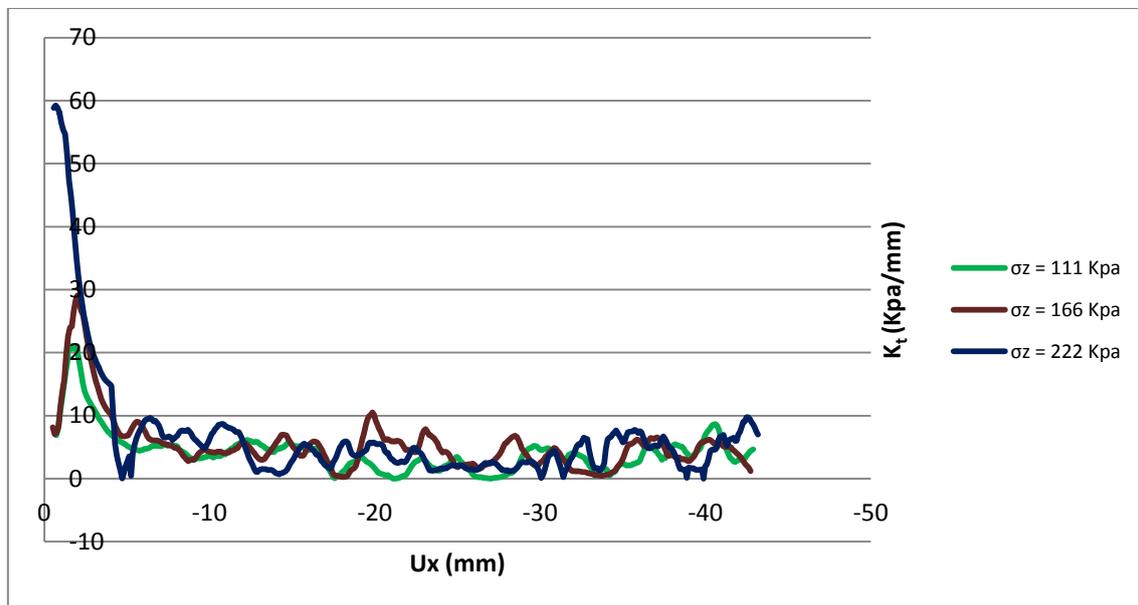
Granulometría	Peso inicial (g)	Peso final (g)
40 - 31,5	23059	23059

4.3.3.3. NEOBALLAST tipo 05-SRS

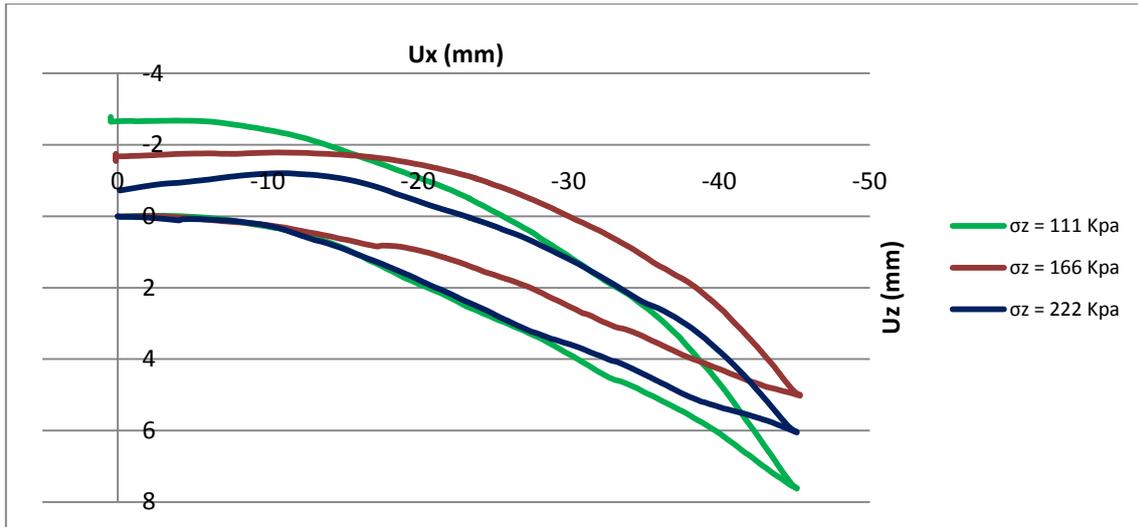
La presente tipología de recubrimiento utiliza una granulometría menor que las otras dos y emplea más materiales que el recubrimiento 08-SR y menos que el 08-SRS. La gráfica 4.35 detalla el comportamiento de las tensiones de corte frente al desplazamiento horizontal impuesto. Al igual que el NEOBALLAST 08-SRS la rotura de partículas ya no se produce pero el coeficiente K_t alcanza valores más elevados (gráfica 4.36), especialmente en el caso de mayor tensión vertical (222 KPa).



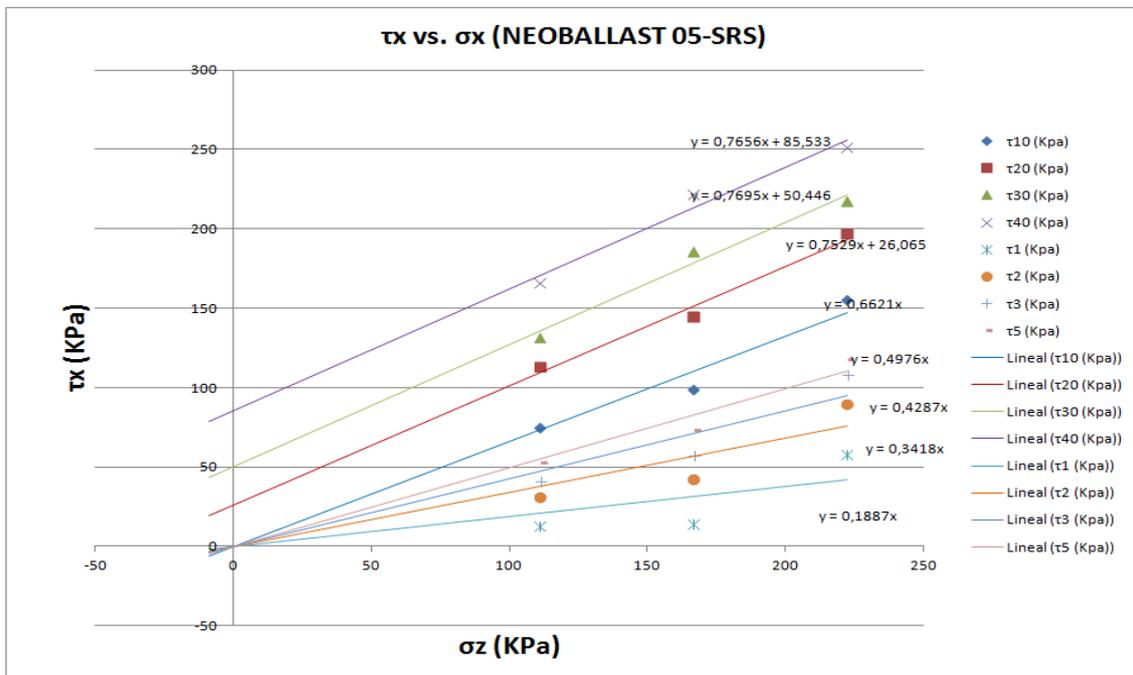
Grafica 4.35. Tensión de corte versus desplazamiento horizontal (NEOBALLAST 05-SRS).



Grafica 4.36. Coeficiente K_t versus desplazamiento horizontal (NEOBALLAST 05-SRS)



Grafica 4.37. Desplazamiento vertical versus desplazamiento horizontal (NEOBALLAST 05-SRS)

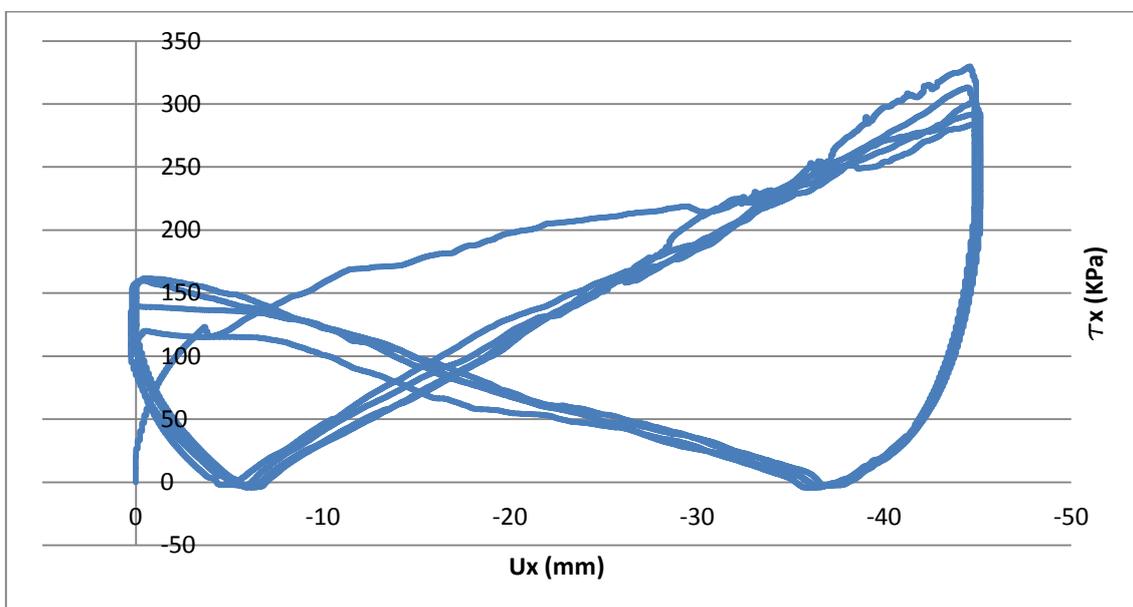


Grafica 4.38. Tensión de corte versus tensión vertical (NEOBALLAST 05-SRS)

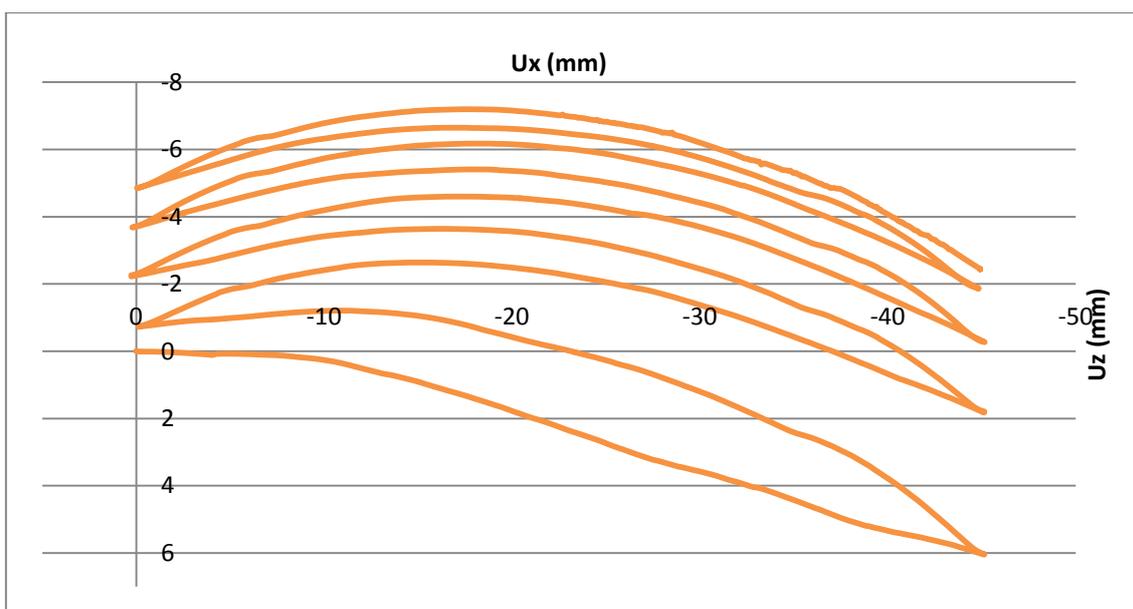
Tabla 4.11. Parámetros Mohr-Coulomb (NEOBALLAST 05-SRS)

	NEOBALLAST 05-SRS		
	Ux (mm)	ϕ (°)	c (KPa)
τ_{f1}	1	10,69	0,00
τ_{f2}	2	18,87	0,00
τ_{f3}	3	23,20	0,00
τ_{f5}	5	26,45	0,00
τ_{f10}	10	33,51	0,00
τ_{f20}	20	36,98	26,07
τ_{f30}	30	37,58	50,45
τ_{f40}	40	37,44	85,53

En lo que respecta al comportamiento bajo ciclos de cargas, se produce una situación muy parecida a la del árido recubierto con 08-SRS, manteniendo prácticamente los mismos resultados entre ciclo y ciclo como se aprecia en la gráfica 4.39.



Grafica 4.39. Tensión de corte versus tensión vertical (ciclos NEOBALLAST 05-SRS)



Grafica 4.40. Desplazamiento vertical versus desplazamiento horizontal (ciclos NEOBALLAST 05-SRS)

Tampoco se tiene rotura de material con éste recubrimiento por lo que la granulometría inicial y final del ensayo es la misma como se refleja en la tabla 4.12.

Tabla 4.12. Granulometría del NEOBALLAST 05-SRS antes y después de cargas cíclicas

Granulometría	Peso inicial (g)	Peso final (g)
40 - 31,5	22494	22494

5. ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

Ya presentados los resultados se realiza un análisis comparativo con la intención de poner de manifiesto los efectos que tiene recubrir los áridos. A partir de los parámetros de Mohr-Coulomb obtenidos, del comportamiento en los primeros 10 mm, de los valores del coeficiente K_r experimentadas, de la respuesta de los materiales bajo cargas cíclicas y del grado de trituración final de las muestras, se obtienen una serie de conclusiones que nos permiten realizar importantes avances de cara al objetivo final del proyecto.

5.1. PARAMETROS MOHR-COULOMB

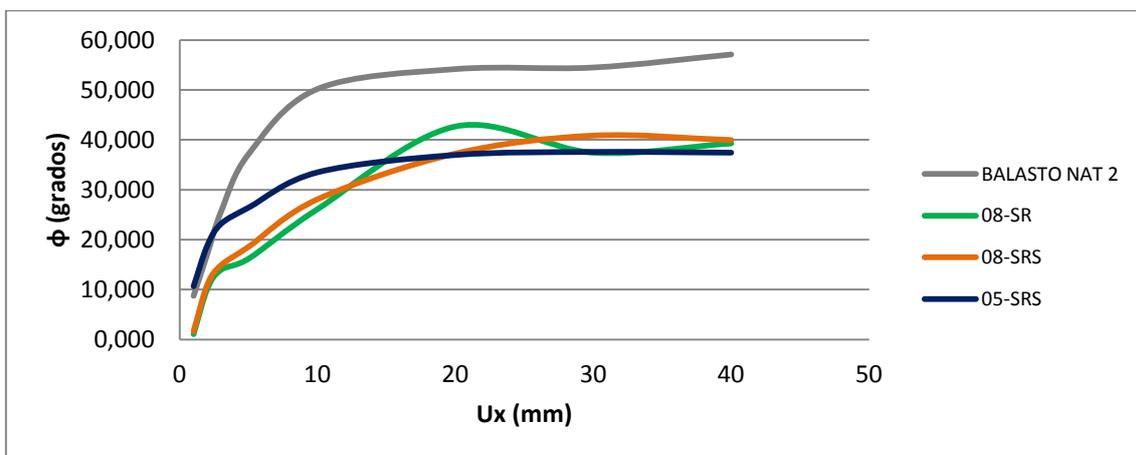
Por un lado se realiza la comparativa para los ensayos en la máquina de Corte Directo de Gran Tamaño (CDGT) y por el otro para los realizados en la de Corte directo Convencional (CDC).

5.1.1. Balasto natural y balastos recubiertos (CDGT)

Como se ha ido mencionando a lo largo del apartado 4, a partir de los datos registrados se han calculado el ángulo de fricción y la cohesión movilizados para cada una de las muestras ensayadas, ambos en función del desplazamiento horizontal.

En el caso del ángulo de fricción movilizado se pueden distinguir 3 etapas claras. Las primeras 2 correspondientes al ángulo de fricción movilizado (va variando) y la restante el correspondiente a la superficie de rotura ya creada (estable). La división dentro de la etapa de fricción movilizada se establece entre los rangos de desplazamiento horizontal 0 y 2 mm y entre los 2 y 15 a 20 mm aproximadamente.

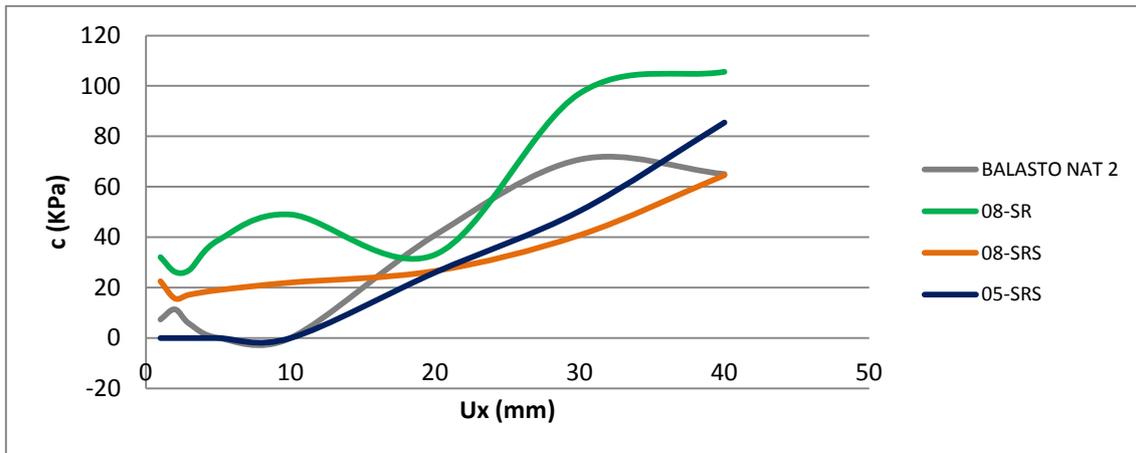
La etapa de entre 0 y 2 mm presenta coeficientes K_r similares para todas las muestras mientras que pasados los 2 mm de desplazamiento ya comienza a haber diferenciación de datos en las muestras como puede apreciarse en la gráfica 5.1. Entre los 2 y 20 mm el ángulo va aumentando hasta estabilizarse pasados los 20 mm de desplazamiento. Una vez formadas las superficies de rotura, el balasto natural alcanza ángulos de fricción del orden de los 55 grados mientras que las muestras recubiertas se quedan sobre los 40 grados.



Grafica 5.1. Ángulo de fricción movilizado versus desplazamiento horizontal (Corte Directo de Gran Tamaño)

En cuanto a la cohesión (grafica 5.2), se han obtenido resultados con una tendencia similar aunque con una dispersión importante en los primeros 20 mm. Para ajustar estos datos se habrían de realizar

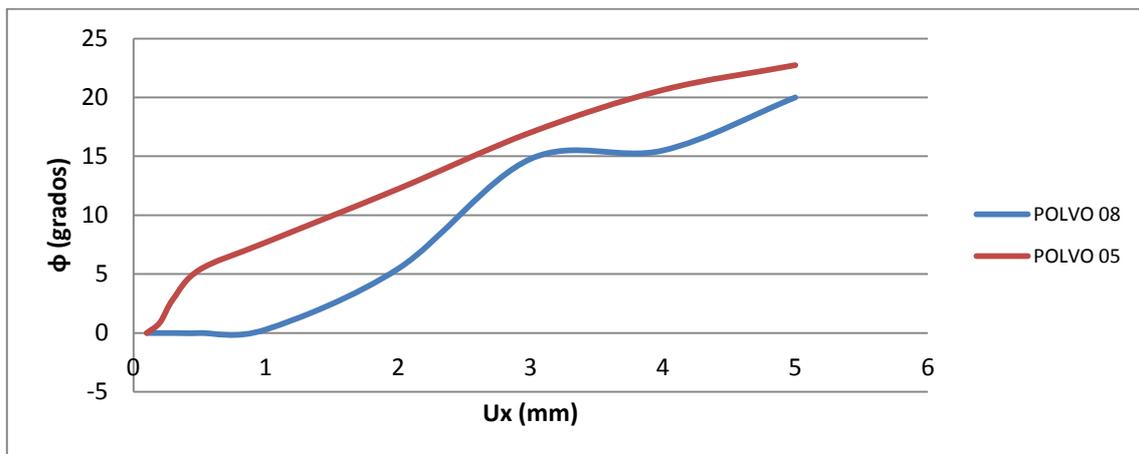
ensayos bajo cargas normales inferiores a 111 KPa y de éste modo obtener puntos más cercanos al eje de ordenadas en la gráfica " τ_x vs σ_z ".



Gráfica 5.2. Cohesión versus desplazamiento horizontal (Corte Directo de Gran Tamaño).

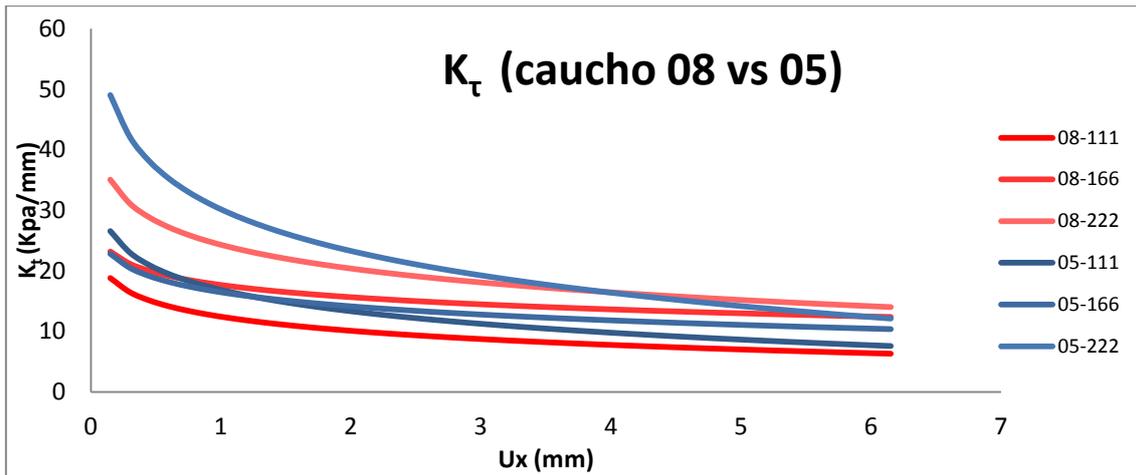
5.1.2. Caucho en polvo (CDC)

Se comparan los resultados obtenidos de ensayar el caucho en polvo con el objetivo de determinar la granulometría más conveniente para emplear en el recubrimiento de los áridos. Se grafica el ángulo de fricción movilizado de las muestras de caucho en polvo entre 0 y 0,5 mm y entre 0 y 0,8 mm.



Gráfica 5.3. Angulo de fricción movilizado versus desplazamiento horizontal (Corte Directo Convencional)

Como se puede apreciar en la gráfica 5.3 los valores para el ángulo de fricción movilizada en el caucho de menor granulometría son mayores y van en aumento desde el inicio del desplazamiento horizontal, información que se verifica en la gráfica 5.4 donde se aprecia que los valores del coeficiente K_f para el caucho en polvo 05 son más elevados.



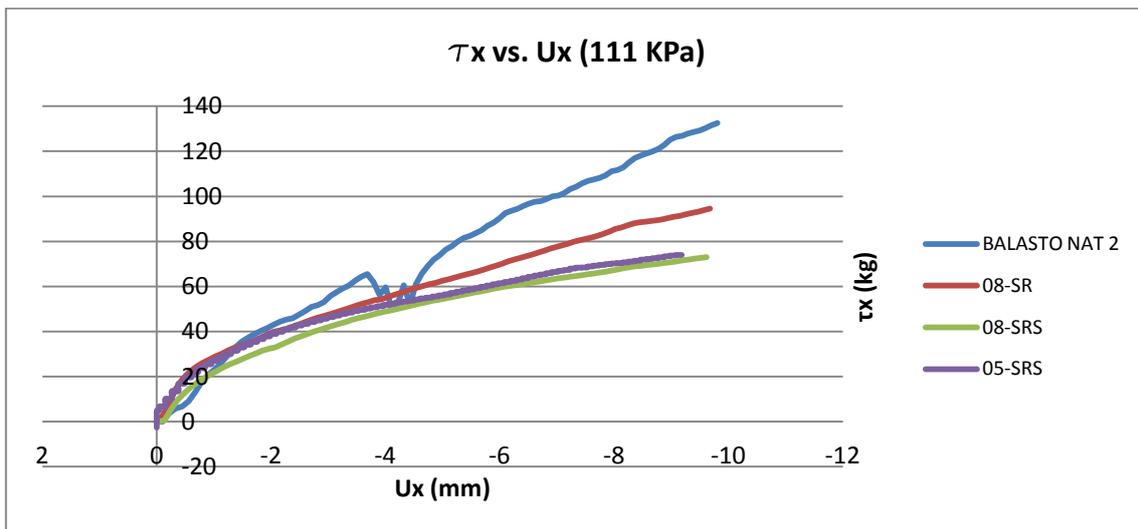
Gráfica 5.4. Coeficiente K_t versus desplazamiento horizontal (Corte Directo Convencional)

Los datos obtenidos nos permiten pensar en que la granulometría más pequeña será la más apropiada al momento de realizar el recubrimiento sobre los áridos.

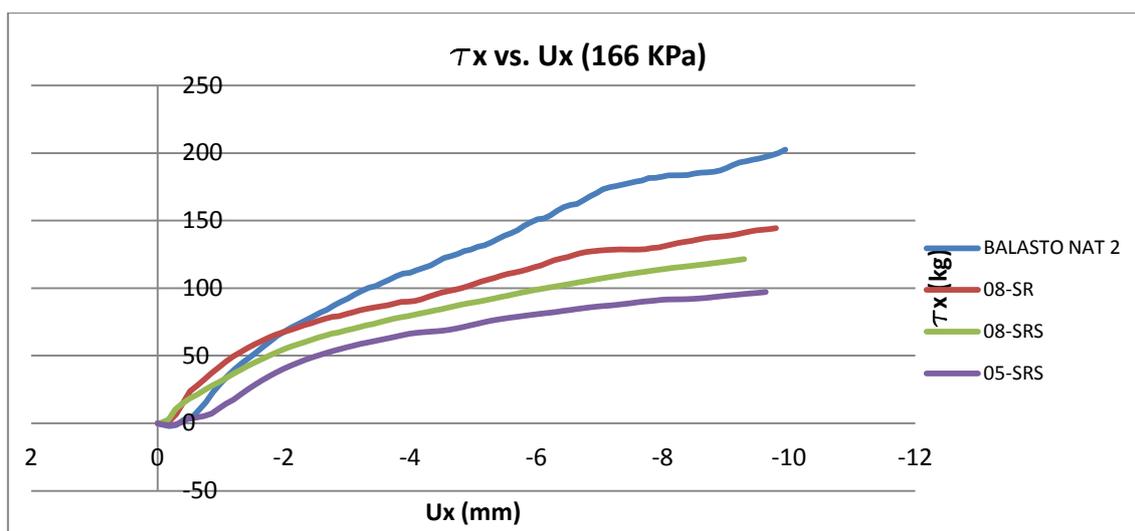
5.2. COMPORTAMIENTO DEL BALASTO Y NEOBALLAST EN LOS PRIMEROS 10 mm

Dado que las deformaciones experimentadas por el balasto bajo el paso de material rodante no suele superar el centímetro, nos hemos centrado en este rango de desplazamientos para realizar el siguiente análisis.

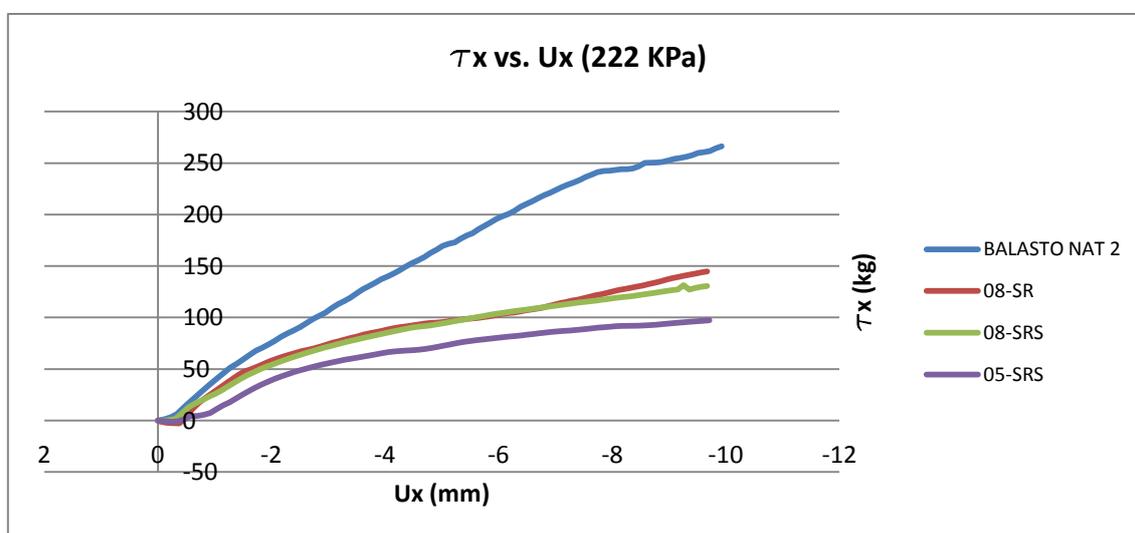
De la gráfica 5.5 a la 5.7 se detallan las tensiones de corte obtenidas en los primeros diez milímetros de desplazamiento horizontal para los tres escalones de carga vertical aplicados: 111 KPa, 166 KPa y 222 KPa.



Gráfica 5.5. Tensión de corte respecto al desplazamiento horizontal bajo 111 KPa de carga vertical (CDGT)



Gráfica 5.6. Tensión de corte respecto al desplazamiento horizontal bajo 166 KPa de carga vertical (CDGT)



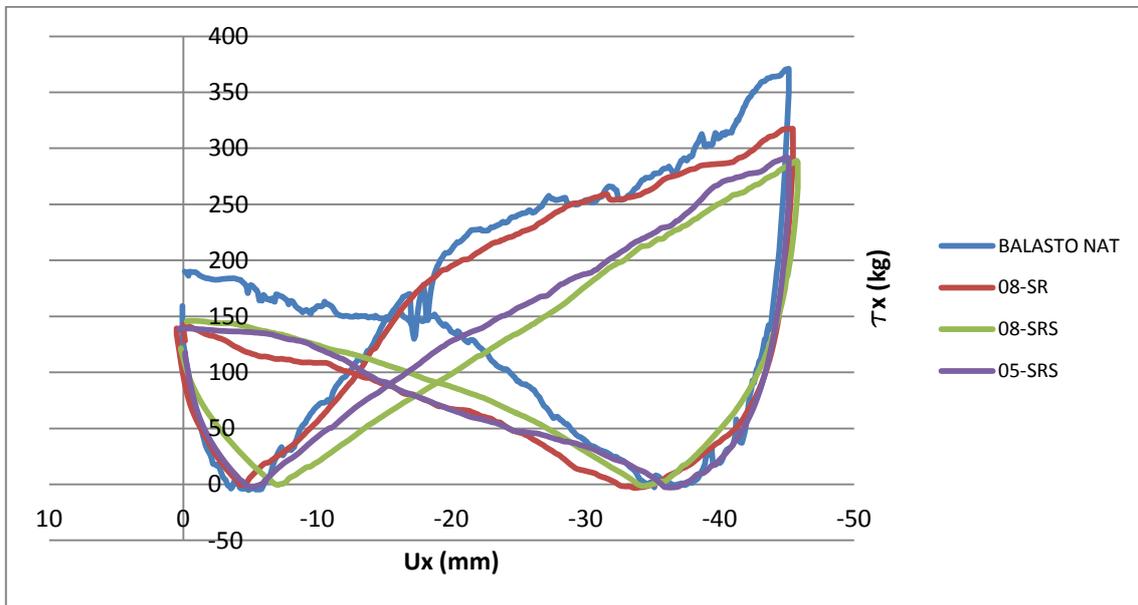
Gráfica 5.7. Tensión de corte respecto al desplazamiento horizontal bajo 222 KPa de carga vertical (CDGT)

En los tres escalones de carga se pueden distinguir dos comportamientos dentro de los diez milímetros de desplazamiento. Uno inicial con mayores valores del coeficiente K_{τ} por debajo de los 2 milímetros y a continuación otro con menores valores de K_{τ} y que se mantienen constante prácticamente hasta alcanzados los 10 milímetros.

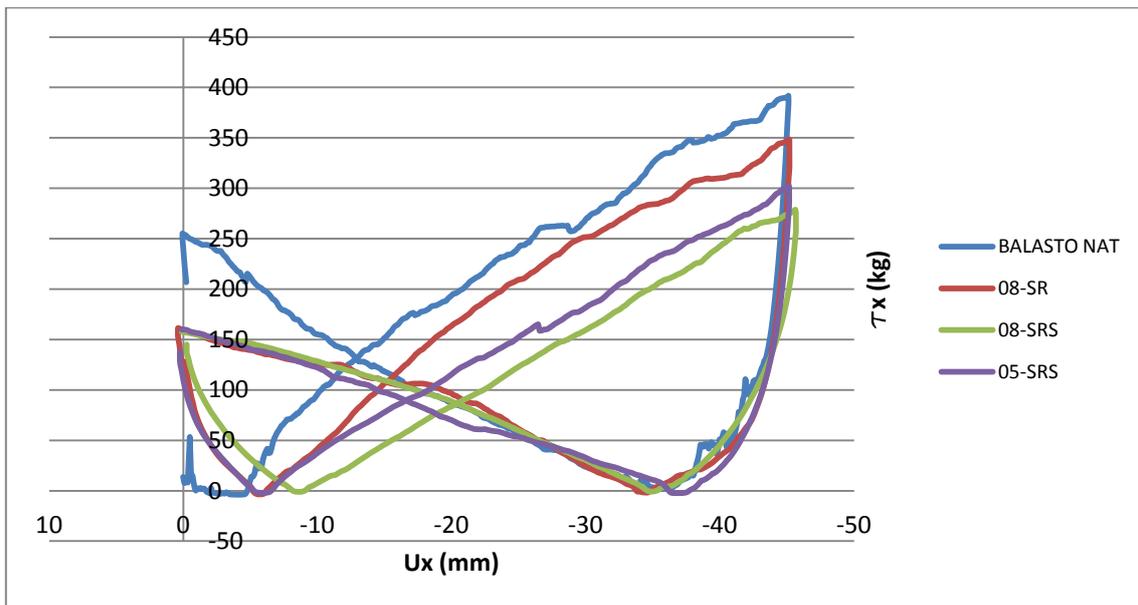
Se puede apreciar que cuanto mayor es la carga vertical aplicada, mayor es la diferencia entre el balasto natural y el balasto recubierto. Dado que el presente ensayo difiere del comportamiento del balasto bajo cargas cíclicas en una vía, sería un error sacar conclusiones significativas de los resultados obtenidos, aunque de todos modos los resultados obtenidos pueden ser indicativos de lo que sucederá con el balasto en la vía.

5.3. COMPORTAMIENTO DEL BALASTO Y NEOBALLAST BAJO CICLOS EN EL CDGT.

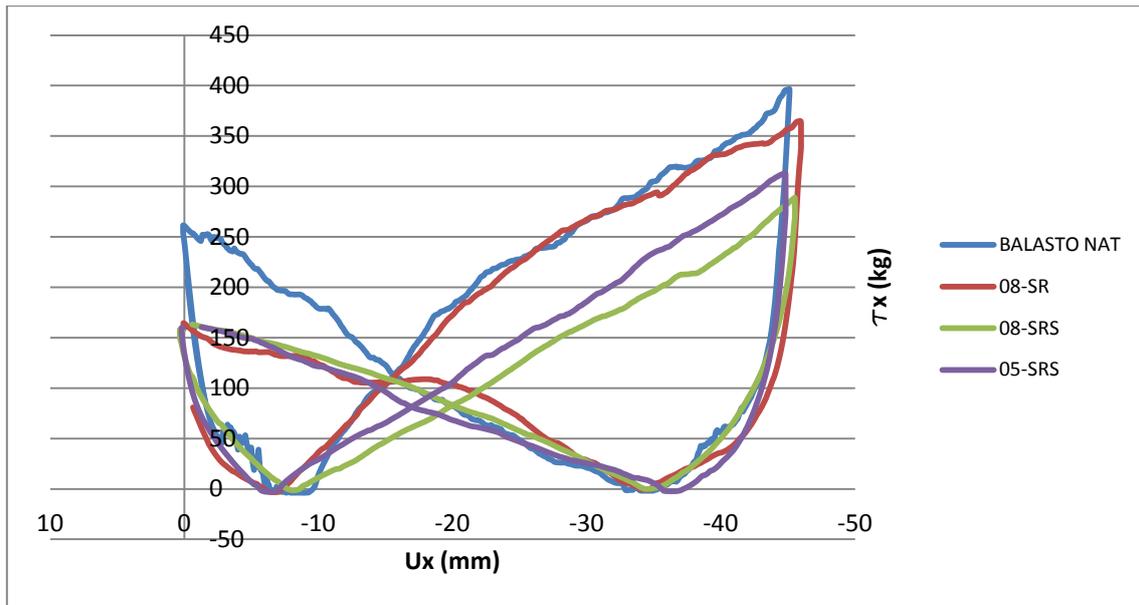
Se realiza la comparativa del comportamiento de las diversas muestras bajo ciclos. De la gráfica 5.8 a la 5.10 se detalla el comportamiento de los materiales del segundo al cuarto ciclo aplicado.



Gráfica 5.8. Segundo ciclo de corte con 222 KPa de carga vertical (CDGT)



Gráfica 5.9. Tercer ciclo de corte con 222 KPa de carga vertical (CDGT)



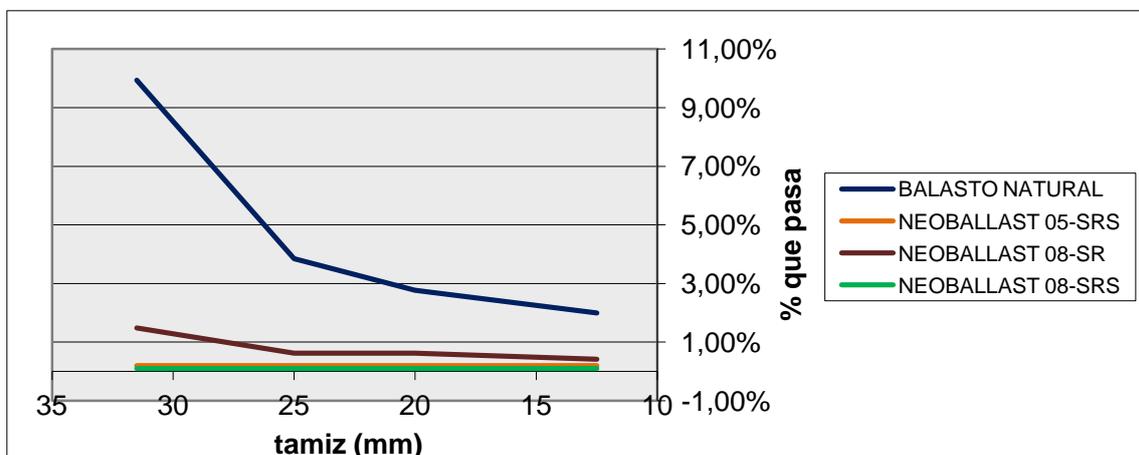
Gráfica 5.10. Cuarto ciclo de corte con 222 KPa de carga vertical (CDGT)

De las tres gráficas presentadas podemos observar que a medida que pasan los ciclos el comportamiento del balasto natural y el del NEOBALLAST 08-SR se asemejan, así como el NEOBALLAST 08-SRS y el -SRS tienen un comportamiento similar desde el inicio.

Como se ha manifestado a lo largo del apartado 4.3, uno de los puntos más interesantes a destacar del comportamiento de las muestras de NEOBALLAST frente a la muestra de balasto natural bajo cargas cíclicas es que los primeros mantienen prácticamente el mismo comportamiento ciclo tras ciclo, mientras que el balasto natural a medida que se va triturando va variando su comportamiento frente a los desplazamientos impuestos.

5.4. GRANULOMETRIA DE LAS MUESTRAS LUEGO DE LOS ENSAYOS.

De cara al comportamiento del balasto en la infraestructura ferroviaria, los resultados obtenidos que refieren al grado de trituración de las muestras una vez finalizados las cargas cíclicas son muy positivos. Como se puede apreciar en la gráfica 5.11, en el caso de la muestra de balasto natural se ha triturado un 10% de la muestra inicial por debajo del tamiz 31,5 mm lo mientras que para las muestras de NEOBALLAST estos porcentajes no exceden el 2%.



Gráfica 5.11. Granulometría fina de las muestras luego de aplicados los ciclos a 222 KPa en el CDGT.

6. CONCLUSIONES.

Como se ha ido reflejando a lo largo del presente documento, los ensayos realizados aportan información muy importante de cara al proyecto. Por un lado nos ha permitido evaluar y comparar el comportamiento de los diferentes recubrimientos y granulometrías de caucho empleadas en los mismos. De esta forma se han podido descartar tipologías de recubrimiento y continuar la investigación sólo con las que son de interés.

Por otra parte ha despertado inquietudes respecto a los ángulos de fricción de la superficie de corte de las muestras de NEOBALLAST ya que son inferiores a los del balasto natural. De todos modos en la infraestructura ferroviaria el balasto no experimenta desplazamientos de tales magnitudes por lo que más allá de los resultados obtenidos, éstos no son determinantes para arribar a conclusiones precipitadas. En el caso del árido recubierto debe considerarse que al ampliar la superficie de contacto entre partículas, las tensiones transmitidas serán inferiores que las que experimenta el balasto natural

Cabe destacar como punto más relevante en lo que respecta a los ensayos realizados, el grado de trituración final de las muestras ensayadas. Según se ha puesto de manifiesto en el apartado dos del presente documento, la generación de finos en la capa de balasto es el principal motivo por el cual ésta ha de ser mantenida y reemplazada. Los resultados obtenidos de los ensayos en el CDGT bajo cargas cíclicas se correlacionan con los ensayos de Los Ángeles realizados previamente en el Laboratorio de Caminos de la UPC, en los cuales se han obtenido resistencias a la fragmentación por parte del NEOBALLAST del orden de 10 a 20 veces mayores que las que posee el balasto natural.

Por último resaltar la importancia que tiene la presente batería de ensayos de cara a los próximos ensayos dinámicos que se realizarán en el Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales de la Universidad de Cantabria y que nos permitirá realizar una comparativa entre ambos ensayos una vez finalizados éstos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Ubalde Claver, L., "La auscultación y los trabajos de vía en la línea del Ave Madrid – Sevilla: Análisis de la experiencia y deducción de nuevos criterios de mantenimiento" Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2005.
- [2] CENIT, "Estudio del comportamiento a medio y largo plazo de las estructuras ferroviarios de balasto y placa" Barcelona, España, 2006.
- [3] Woodward, P.K., Kennedy J. and Medero G., "Three-Dimensional Track Reinforcement using Polymer Geocomposites" Heriot-Watt University, Riccarton, Edinburgh, UK, 2009.
- [4] Fischer, Sz. and Horvat, F., "Superstructure Stabilization of Ballast Bedded Railway Tracks with Geogrids" Szechenyi Istvan University, Hungary, 2011.
- [5] Indraratna, B., Khabbaz, H., Salim, W. and Christie, D., "Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilisation" University of Wollongong, Australia, 2006.
- [6] Johnson, K.L., "Contact mechanics", Cambridge University Press, UK, 1987.
- [7] Persson N. J., "Sliding friction: physical principles and applications", Springer, Berlin, 2000.
- [8] Indraratna, B., Ionescu, D., Christie, D. and Chowdhury, R., "Compression and Degradation of Railway Ballast Under One-Dimensional Loading" University of Wollongong, Australia, 1997.
- [9] Indraratna, B., Nimbalkar, S. and Christie, D., "The performance of rail track incorporating the effects of ballast breakage, confining pressure and geosynthetic reinforcement" University of Wollongong, Australia, 2009.
- [10] Lopez Pita, A., "Infraestructuras Ferroviarias", Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2006.
- [11] Fonseca Teixeira, P., "Contribución a la reducción de los costes de mantenimiento de vías de alta velocidad mediante la optimización de su rigidez vertical" Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2005.
- [12] Paderno, C., "Comportement du ballast sous l'action du bourrage et du trafic ferroviaire" These N°4697, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Suisse, 2010.
- [13] Tutumluer, E., Huang, H., Hashash, Y. and Ghaboussi J., "Aggregate Shape Effects on Ballast Tamping and Railroad Track Lateral Stability", University of Illinois at Urbana Champaign , Illinois, 2006.
- [14] Oldecop, L. A. and Alonso E. E., "Suction effects on rockfill compressibility", Géotechnique Vol 53, No. 2, 289–292, 2003.
- [15] Oldecop, L. A. and Alonso E. E., "Testing rockfill under relative humidity control", Géotechnique 27, No. 3, 2004
- [16] Sadeghi, J. and Askarinejad, H., "Influences of track structure, geometry and traffic parameters on Railway Deterioration" Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, 2007.