

Evaluación del Comportamiento Estructural de una Base Granular con Sustitución Parcial del Agregado Fino por Calamina de Laminación

Evaluation of the structural behavior of a granular base with partial substitution of the fine aggregate by lamination calamine

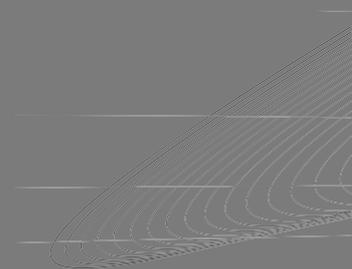
Avaliação do comportamento estrutural de uma base granular com substituição parcial do agregado miúdo por laminação de calamina

David Ricardo Pérez Moreno

Ingeniero Civil. Especialización en Geotecnia Vial y Pavimentos.
Universidad Santo Tomás – Seccional Tunja.
davidricardo.1212@gmail.com. Tunja, Colombia

Hernán Gustavo Mayorga Cáceres

Ingeniero Civil. Especialización en Geotecnia Vial y Pavimentos.
Universidad Santo Tomás – Seccional Tunja.
hernan.mayorga@usantoto.edu.co. Tunja, Colombia



Resumen

La calamina o cascarilla de óxido es un residuo importante de las siderúrgicas, principalmente de las laminadoras de acero; este residuo representa un problema ambiental y económico para las distintas empresas, teniendo en cuenta que se puede aprovechar este material reincorporándolo en un proceso productivo. El presente trabajo tiene como objeto investigar y evaluar la incidencia estructural que presenta la sustitución parcial del agregado fino de una base granular (BG- 38) por calamina. Se realizaron dos ensayos con material de base granular suministrado por el consorcio Solarte-Solarte; un ensayo testigo con tres probetas (sin calamina) fabricadas con diferente nivel de compactación tal como lo estipula la norma para la realización del ensayo de CBR (5 capas de compactación con 10, 25 y 56 golpes); y el segundo con tres probetas reemplazando el 35.53% del material fino por calamina; igualmente con diferentes energías de compactación, éstos moldes fueron sometidos a inmersión y finalmente fallados con el ensayo de California Bearing Ratio (C.B.R.); obteniendo los siguientes resultados: el ensayo testigo arrojó al 95% del CBR un peso unitario de 20.804 kN/m³ mientras que el ensayo con calamina arrojó un valor de 19.859 kN/m³.

Palabras clave: Agregate, lamination, calamine, índices, petreo, esfuerzo.

Para citar este artículo: Pérez-Moreno D.R. & Mayorga-Cáceres H.G, "Evaluación del comportamiento estructural de una base granular con sustitución parcial del agregado fino por calamina de laminación" In *L'Esprit Ingenieur*. Vol. 9, p.p. 29-44

Abstract

Calamine or rust scale is an important residue of steelmakers, mainly steel mills; This waste represents an environmental and economic problem for the different companies, taking into account that this material can be used by reincorporating it in a productive process. The purpose of this paper is to investigate and evaluate the structural incidence of partial substitution of the fine aggregate of a granular base (BG-38) with calamine. Two tests were carried out with granular base material supplied by the Solarte-Solarte consortium; a control test with three specimens (without calamine) manufactured with a different level of compaction as stipulated in the standard for conducting the CBR test (5 layers of compaction with 10, 25 and 56 strokes); and the second with three specimens replacing 35.53% of the fine material with calamine; also with different compaction energies, these molds were submerged and finally failed with the California Bearing Ratio (C.B.R.) test; obtaining the following results: the control test yielded a unit weight of 20,804 kN / m³ at 95% of the CBR while the calamine test gave a value of 19,859 kN / m³.

Keywords: Aggregate, lamination, calamine, indexes, stone, effort.

Resumo

A escala de calamina ou ferrugem é um resíduo importante das siderúrgicas, principalmente as siderúrgicas; esse resíduo representa um problema ambiental e econômico para as diferentes empresas, tendo em vista que esse material pode ser utilizado reincorporando-o em um processo produtivo. O objetivo deste artigo é investigar e avaliar a incidência estrutural de substituição parcial do agregado fino de uma base granular (BG-38) por calamina. Dois testes foram realizados com material de base granular fornecido pelo consórcio Solarte-Solarte; um teste de controle com três amostras (sem calamina) fabricadas com um nível diferente de compactação, conforme estipulado na norma para a realização do teste CBR (5 camadas de compactação com 10, 25 e 56 movimentos); e o segundo, com três amostras substituindo 35,53% do material fino por calamina; também com diferentes energias de compactação, esses moldes foram submersos e, finalmente, falharam com o teste California Bearing Ratio (C.B.R.); obtendo os seguintes resultados: o teste de controle produziu um peso unitário de 20.804 kN / m³ a 95% da RBC, enquanto o teste de calamina deu um valor de 19.859 kN / m³.

Palavras-chave: agregado, laminação, calamina, índices, pedra, esforço.

INTRODUCCIÓN

El resultado de la generación de residuos industriales aparte de ser una complicación medioambiental es un inconveniente para las empresas ya que se constituyen en gastos y pérdidas significativas de materias primas en los procesos de producción. [1]; y en consecuencia tal como lo explica: [2], “la naturaleza no puede mantener una tasa de crecimiento de residuos mayor al 5 %, sin que repercuta gravemente a largo plazo”.

De acuerdo con [3]: “en una economía mundial como la actual, caracterizada por una fuerte industrialización, el desarrollo sostenible ha generado un creciente interés por la reutilización de residuos generados por las distintas industrias”; por tal razón se hace necesario generar ideas que permitan dar soluciones a este tipo de problema, [4].

La industria del acero es gran generadora de residuos. Es inherente a la producción del acero el que se originen diversos tipos de residuos o subproductos. Así, una buena gestión de los mismos colaborará en la reducción de los impactos ambientales asociados a la producción del acero [5].

La calamina es un residuo proveniente del proceso de trefilado de materiales metalmecánicos, se presenta como polvo de acero de bajo carbono, óxido de hierro y alambres de acero. [6]; se producen entre 20 y 30 Kg de calamina por tonelada laminada de acero [7].

Según información suministrada por la empresa GERDAU DIACO S.A, empresa líder en el sector siderúrgico en Colombia, la cascarilla de laminación generada en sus principales instalaciones es de 800 toneladas mensuales esto fue citado por [8].

No hay Información en cuanto a la utilización de cascarilla de laminación de origen industrial como agregado fino para la elaboración de base granular en Colombia. Sin embargo, existen algunos estudios, informes y patentes desarrollados alrededor del mundo con el fin de reciclar este residuo:

- Evaluación del uso de la cascarilla de laminación en concreto hidráulico como sustituto de agregados finos naturales. Los morteros de cemento fueron preparados variando el contenido del agregado de 0 % a 100 % para determinar la resistencia a la compresión y tracción. Como resultado se obtuvo una resistencia máxima para una sustitución de arena por cascarilla de laminación del 40 % a los 28 días del curado. Por otro lado, el concreto con la cascarilla demandó mayor cantidad de agua para mantener la docilidad del material [9].

- El residuo de calamina obtenido en Tenaris Tubocaribe S.A. es un aditivo que resulta muy útil en los bloques debido a que es una fuente de hierro que les proporciona gran resistencia, reforzando la calidad de los bloques de mortero sin modificar su aspecto físico como la textura, la forma y consistencia visual de la mezcla, sin embargo, al adicionar porcentajes mayores del 7 % esta se verá afectada debido a la gran cantidad; el uso de cilindros permitió establecer el intervalo de porcentaje de calamina óptimo en la mezcla que varía entre 4 % y 5 % [10].

- El concreto de referencia con 0 % de reemplazo de cascarilla tuvo la mayor resistencia a los 28 días con un resultado promedio de 27.03 Mpa, mientras que con el 30 % de reemplazo de cascarilla por arena se logró un valor de resistencia de 26.96 Mpa. La cascarilla puede reemplazar la arena en el concreto en una proporción entre el 15 y 30 % logrando buenos resultados de resistencia a la compresión. A partir del 30 % de reemplazo la resistencia comienza a decrecer progresivamente [11].

- De los resultados obtenidos en el ensayo Marshall se puede observar, que para una mezcla asfáltica con 6 % de Calamina, existe un incremento notable en la estabilidad en comparación con la mezcla asfáltica de control (sin Calamina). Este incremento oscila entre 2,55 kN y 6,82 kN. Cuando se sustituye la fracción fina por Calamina en un 6 % (solamente el pasa 200), la

estabilidad es superior en comparación con la mezcla de referencia para cualquier contenido de asfalto. Lo anterior es un indicador de que la mezcla modificada con 6 % de calamina podrá tener una resistencia mayor a la deformación y desplazamiento bajo las cargas del tránsito en climas de alta temperatura. También, puede tener una probabilidad más baja a desarrollar ahuellamientos, ondulaciones o señales que indiquen cambios en la mezcla [12].

“Se denomina base granular a la capa granular localizada entre la subbase granular y las capas asfálticas en los pavimentos asfálticos, sin perjuicio de que los documentos del proyecto le señalen otra utilización” [13].

La función fundamental de la base granular de un pavimento consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase y a la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada [14]. Los esfuerzos que se aplican en la superficie se disipan a través del espesor de cada una de las capas de la calzada, cuyas dimensiones se definirán en la medida que eviten el punzonamiento y cizallamiento del suelo que yace en la profundidad (subrasante) [15].

El ensayo de relación de soporte de California fue desarrollado por parte de la División de Carreteras de California en 1929 y desde entonces sirve para clasificar la capacidad de un suelo y por ende para ser utilizado como subrasante o material de base en construcción de carreteras [16].

La capacidad portante CBR se determina en función de las condiciones de densidad y del contenido de agua, por lo que se recomienda tomar el CBR cuando las condiciones críticas del terreno (en época de lluvia) son iguales a las del laboratorio [17]; esto se logra cuando la probeta se encuentra en estado de saturación, es decir, cuando se han curado tres días al aire y cuatro días inmersas en agua para obtener así un valor de CBR que corresponda al del 95 % de la densidad del óptimo proctor modificado (OPM) [18].

En el presente artículo se contempla una breve investigación para desarrollar una base granular con calamina como agregado fino, con características de sostenibilidad medioambiental y con resistencia bajo carga monotónica igual o mayor a una base granular convencional, mediante la sustitución del agregado fino por este material de residuo.

Con base a estos factores que influyen directamente en la capacidad de soporte CBR (densidad y contenido de agua) se da un fundamento teórico a que el uso de la calamina permita aumentar esta capacidad de soporte CBR ya que este residuo posee propiedades impermeables y una gran densidad ya que está compuesta mayor al 90 % de magnetita (Fe_3O_4).

El mejoramiento de las propiedades y características de los materiales como base granular conlleva a la minimización del gasto de los mismos disminuyendo la explotación de los recursos naturales, de ríos y canteras, de donde se saca este, repercutiendo en la reducción de gastos económicos en la construcción y desarrollo de la infraestructura vial, dicho mejoramiento se puede ejecutar con la implementación de residuos industriales, minimizando los impactos.

METODOLOGÍA

Caracterización del agregado pétreo

La caracterización del agregado pétreo se realizó mediante el uso de la normativa colombiana del instituto nacional de vías y transportes (INVIAS). A continuación, se muestran algunos de los laboratorios provistos por la empresa CSS Constructores S. A, los demás laboratorios se dejan como anexos a la investigación

Tabla 1. Determinación de los índices de alargamiento y aplanamiento.

DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO									
Proyecto: CONCESIÓN BRICEÑO-TUNJA-SOGAMOSO							Frente: TUNJA		
Material: BASE GRANULAR BG-1							Fecha: 12 de mayo de 2016		
Procedencia: TRITURADORA CSS NOBSA							Muestra N°: N/A		
Doc. aplicable(s): INV-E-230							Consecutivo N°: BG-13-10		
TAMICES		1	2	3	4	5	6	7	8
PASA	RETIENE	Total Frac. en gramos	Partic. Largas en gramos	Partic. Planas en gramos	(2/1) x 100	(3/1) x 100	% gradación original	Pond Total Partic. Alarg. (4 x 6)	Pond Total Partic. Aplan. (5 x 6)
2 1/2"	2"								
2"	1 1/2"								
1 1/2"	1"	913.5	266.9	310.2	29.1	34.0	18.8	488.1	599.5
1"	3/4"	462.9	147.0	150.4	31.8	32.5	7.4	234.7	240.1
3/4"	1/2"	452.3	147.4	133.7	32.6	29.6	11.3	368.5	334.3
1/2"	3/8"	456.1	139.7	150.1	30.6	32.9	5.6	171.6	184.3
3/8"	1/4"	446.3	161.3	142.7	34.0	32.0	6.7	227.6	214.7
TOTAL		2730.1	851.3	887.1	158.1	161.0	47.8	1490.6	1542.9
ESPECIFICACIÓN: Máximo: 35 %							CUMPLE (SI/NO)		
ÍNDICE DE ALARGAMIENTO % = Total Columna 7 / Total Columna 6 =							31.2 %		SI
ÍNDICE DE APLANAMIENTO % = Total Columna 8 / Total Columna 6 =							32.3 %		SI

Fuente: Empresa CSS Constructores S.A

Tabla 2. Determinación del porcentaje de Caras fracturadas.

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS						
Proyecto: BRICEÑO TUNJA SOGAMOSO					Frente: TUNJA	
Material: BASE GRANULAR BG-1					Fecha: 24 de julio de 2016	
Procedencia: TRITURADORA CSS NOBSA					Muestra N°: N/A	
Doc. aplicable(s): INV-E-227					Consecutivo N°: BG-33-16	
TAMAÑO DEL AGREGADO		1	2	3	4	5
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ	gramos	gramos	3 = 2 / 1 x 100 %	%	5 = 3 x 4
1 1/2"	1"	2001.2	1701.7	89.0	14.4	1201
1"	3/4"	1500.9	1409.7	93.9	12.9	1211
3/4"	1/2"	1202.5	1121.8	93.3	10.9	1020
1/2"	3/8"	326.3	301.6	91.9	5.4	499
TOTALES					43.6	4011
PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS: Total Columna 5 / Total Columna 4 =					91.9 %	
ESPECIFICACIÓN: Mínimo: 50 %					CUMPLE (SI/NO): SI	

Fuente: Empresa CSS Constructores S. A

Figura 1. Acopio empresa Csa constructores S.A (Base granular).



Fuente: Autoría propia

Clasificación de la base granular con base a su granulometría

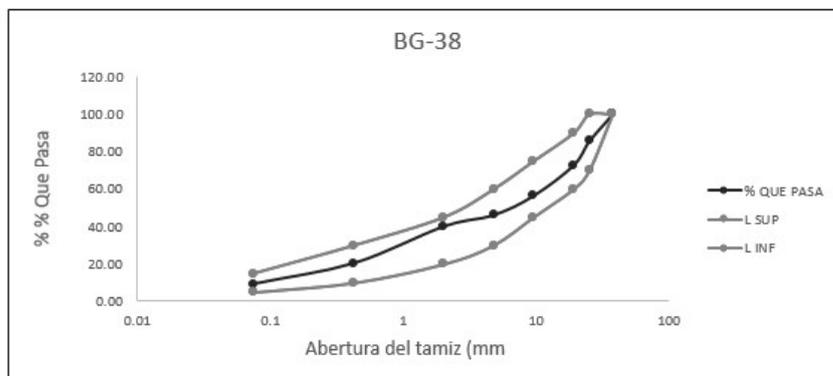
Con el material provisto por la empresa solarte se procedió a hacer el análisis granulométrico en los laboratorios de la Universidad Santo Tomás, con el fin de establecer su clasificación y conocer los limites o franjas de trabajo del material, con base a los resultados presentes en la tabla 3 y la figura 1 se establece que su clasificación es una Bg -38.

Tabla 3 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL			GRANULOMETRIA BASE GRANULAR INV - 123		
Material :	Base Granular	Procedencia	TRITURADORA CSS NOBSA		
Clasificación AASHTO	A-1(a)-0	Plasticidad	NP		
Peso inicial de la muestra seca	3297	Peso de la muestra seca despues del lavado	3001.1 grs		
Tamiz N °	Diametro (mm)	Peso Retenido (grs)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
3	75	0	0.00	0.00	100.00
2	50	0	0.00	0.00	100.00
1 1/2	37.5	0	0.00	0.00	100.00
1	25	474.4	14.39	14.39	85.61
3/4	19	425	12.89	27.28	72.72
3/8	9.5	539.4	16.36	43.64	56.36
N4	4.75	339.6	10.30	53.94	46.06
N10	2	199.8	6.06	60.00	40.00
N40	0.425	644.6	19.55	79.55	20.45
N200	0.075	365.3	11.08	90.63	9.37
Fondo		308.9	9.37	100.00	0.00

Fuente: Autoría propia

Figura 2. Franjas granulométricas del material de base granular.

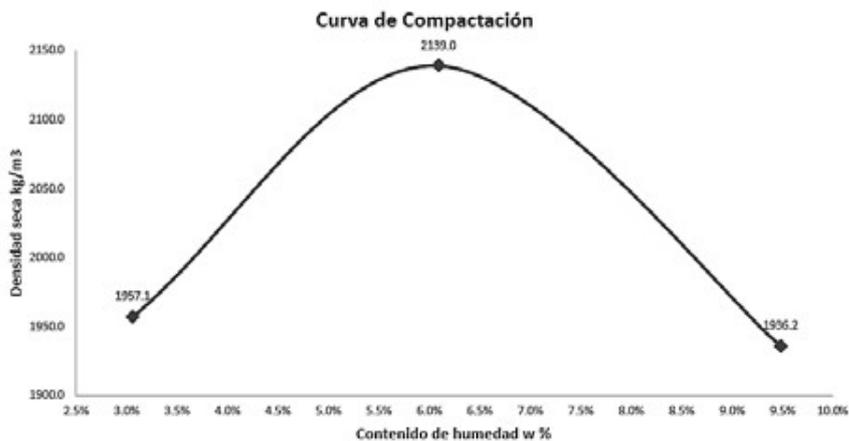


Fuente: Autor

Caracterización Humedad optima

Para conocer y caracterizar la humedad optima y la densidad seca máxima del material, se realizó el ensayo de Proctor modificado y con base a los resultados de la tabla 4 y la figura 2 se observa que su densidad máxima es de 2139 kg/m³ (133.5 lbs/pie³) y esta se logra con una humedad optima del 6.1 %.

Tabla 4. Relaciones de humedad –Peso unitario seco en los suelos. (ensayo modificado de compactación)



 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCINAL TUNJA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL	PROCTOR MODIFICADO	
	INV-142	
Localizacion Tunja Boyaca	Material	Base Granular
Lab Santo Tomas sede campus	Procedencia	TRITURADORA CSS NOBSA

Fuente: autores

Figura 3. Curva de compactación humedad óptima vs densidad seca máxima.

Prueba N°	1	2	3
Número de golpes	56	56	56
N Capas	5	5	5
Humedad supuesta, %	3.0%	7.0%	10.0%
Humedad Natural de la muestra, %	0.0%	0.0%	0.0%
Humedad adicional, %	5.0%	7.0%	9.0%
Peso de la muestra húmeda, grs	5500.0	5500.0	5500.0
Peso de la muestra seca, grs	5500.0	5500.0	5500.0
Agua adicional, c.c.	275	385	495
Molde N°.	9	28	29
Peso del molde, grs	3860.0	4404.0	4554.0
Peso muestra húmeda + molde, grs	7567.0	9362.0	9199.0
Peso de la muestra húmeda, grs	3707.0	4958.0	4645.0
% de humedad, (horno)	3.1%	6.1%	9.5%
Peso de la muestra seca, grs	3596.8	4673.3	4242.6
Peso de la muestra seca, lbs	7.9	10.3	9.4
Volumen del molde, cm ³	1837.83	2184.76	2191.26
Volumen del molde, pie ³	0.065	0.077	0.077
Densidad de la muestra húmeda, Kg/m ³	2017.1	2269.4	2119.8
Densidad de la muestra seca, Kg/m ³	1957.1	2139.0	1936.2
Peso unitario de la muestra seca, KN/m ³	19.2	21.0	19.0
Densidad de la muestra seca, lbs/pie ³	122.2	133.5	120.9

CONTENIDO DE AGUA

Recipiente No.	311	2	43
Peso recipiente + suelo húmedo, grs	286.9	277.6	284.6
Peso recipiente + suelo seco, grs	279.3	263.6	263.0
Peso del agua, grs	7.6	14.0	21.6
Peso del recipiente, grs	32.6	34.5	35.6
Peso del suelo seco, grs	246.7	229.1	227.4
Contenido de agua, %	3.1%	6.1%	9.5%

OBSERBACIONES :

2139 Kg/m³ Densidad max

6.1% Humedad Opt

Fuente: Autoría propia

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA CALAMINA

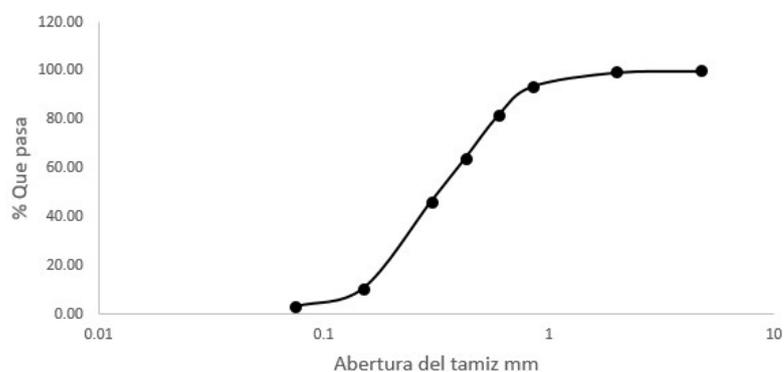
Análisis granulométrico de la calamina

A través de la ejecución del análisis granulométrico se pudo conocer la distribución de las partículas del residuo industrial (calamina) y con ello se pudo generar y diseñar una mezcla de trabajo que no alterara ni afectara la curva granulométrica BG- 38 en la tabla 5 y la figura 3 se muestra dicho análisis.

Tabla 5. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos Invías E- 123-2013

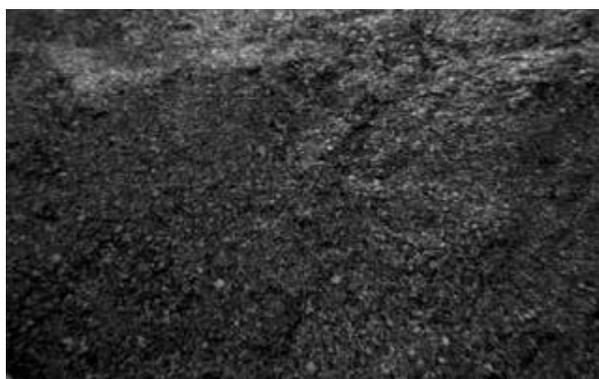
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL			GRANULOMETRIA CALAMINA		
Material:	Residuo Industrial	Procedencia	Empresa Sidoc Cali		
Peso inicial de la muestra seca	3501.6 grs				
Tamiz N °	Diametro (mm)	Peso Retenido (grs)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
N4	4.75	0	0	0	100.00
N10	2	22.2	0.62	0.62	99.38
N40	0.425	1267.6	35.39	36.01	63.99
N200	0.075	2184.6	61.00	97.01	2.99
Fondo		107.2	2.99	100.00	0.00

Fuente: Autoría propia

Figura 4. Curva granulométrica calamina. Fuente: Autoría propia
Granulometria Calamina

Fuente: Autoría propia

Figura 5. Residuo industrial (Calamina).



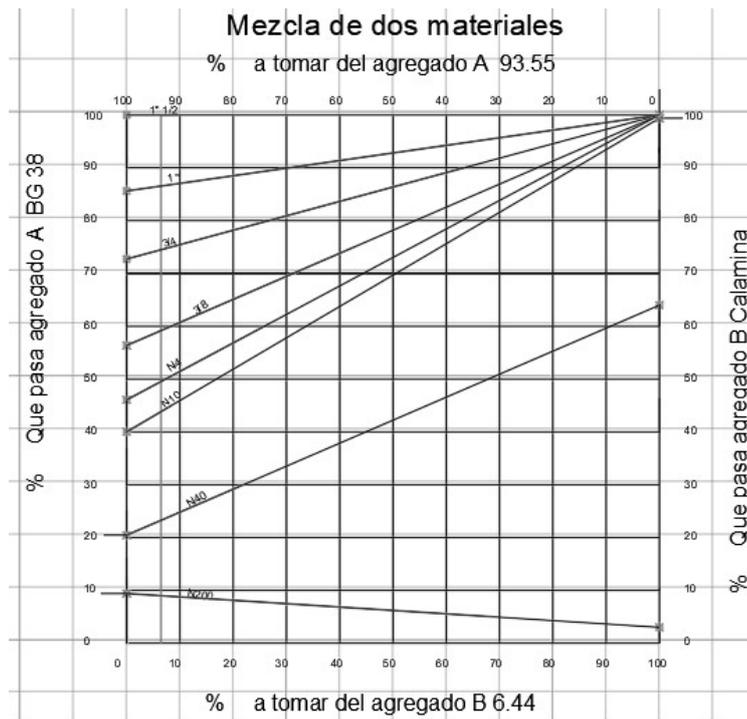
Fuente: Autoría propia

Análisis químico y microscópico de la calamina
Caracterización $(Fe_3O_4) \geq 90\%$ Magnetita

Inclusión de la calamina en la BG 38

Con el objeto de conocer la incidencia estructural de la calamina en la base granular BG 38, se ejecutó un diseño de mezcla entre estos dos materiales, mediante el uso gráfico del método de Fuller, con el cual se estableció que el porcentaje en peso que se debería reemplazar de la base granular por calamina es del 6.44 %, a continuación, se evidencia en la figura 6, el uso del gráfico de Fuller.

Figura 6. Curva de Fuller para mezcla de dos materiales.



Fuente: Autoría propia

De acuerdo con investigaciones recientes (concreto convencional, bloques de mortero) ajenas a la temática de este artículo, se ha estipulado que los porcentajes representativos donde se evidencia una incidencia (mejoría) utilizando dicho residuo son alrededor del 30 al 40 % del remplazo parcial del agregado fino.

Por tal motivo en la presente investigación se reemplazó el 35.53 % del agregado fino de la base granular correspondiendo al 16.36 % del total de la base. Como especifica la normativa a continuación "Para prevenir segregaciones y garantizar los niveles de compactación y resistencia exigidos por la presente especificación, el material que produzca el constructor deberá dar lugar a una curva granulométrica uniforme y sensiblemente paralela a los límites de la franja sin saltos bruscos de la parte superior de un tamiz a la inferior de un tamiz adyacente y viceversa" (Invías, 2013).

Para evitar dichos saltos bruscos y/o vacíos que debiliten la mezcla se procedió de la siguiente manera para realizar el remplazo, en la tabla 6 se especifica la cantidad en peso requerida por tamiz de cada uno de los materiales para conservar la curva granulométrica exacta y que dicha comparación sea representativa en la verificación de la incidencia estructural, la tabla 7 permite observar los porcentajes mezclados que garantizan dicha curva.

Tabla 6. Determinación del porcentaje en peso necesario para realizar la mezcla

Cantidad necesaria de calamina por tamiz			Cantidad necesaria de BG 38 por tamiz		
Masa	900.0	grs	Masa	4600.0	grs
Tamiz N "	% Retenido	Masa Retenida	Tamiz N "	% Retenido	Masa Retenida
3			3		
2			2		
1 1/2			1 1/2	0.0	0.0
1			1	14.4	791.4
3/4			3/4	12.9	709.0
3/8			3/8	16.4	899.8
N4	0.00	0.0	N4	10.3	566.5
N10	0.62	5.6	N10	6.1	327.7
N40	35.39	318.5	N40	19.6	756.8
N200	61.00	549.0	N200	11.1	60.4
Fondo	2.99	26.9	Fondo	9.4	488.4

Tabla 7. Mezcla BG- 38 con calamina

BG-38 Mezcla			
Masa probeta	5500.0	grs	
Tamiz N "	% Retenido	Masa Retenida	% Pasa
3			
2			
1 1/2	0.0	0.0	100.0
1	14.4	791.4	85.6
3/4	12.9	709.0	72.7
3/8	16.4	899.8	56.4
N4	10.3	566.5	46.1
N10	6.1	333.3	40.0
N40	19.6	1075.3	20.4
N200	11.1	609.4	9.4
Fondo	9.4	515.3	0.0
Suma Fraccion gruesa		2966.7	
Suma Fraccion Fina		2533.3	
% remplazado de la mezcla en total		16.36	
% remplazado de la fraccion Fina		35.53	

Finalmente, con los resultados obtenidos de granulometría, humedad óptima y el porcentaje correspondiente a remplazar del residuo industrial (calamina), se procedió a la fabricación de los moldes u/o probetas y estas se dejaron 3 días al aire y 4 días en inmersión para simular las condiciones más extremas como especifica la norma y se ejecutó el ensayo de California Bearing Ratio (C.B.R.).

RESULTADOS

A. Moldes Testigo (Sin calamina)



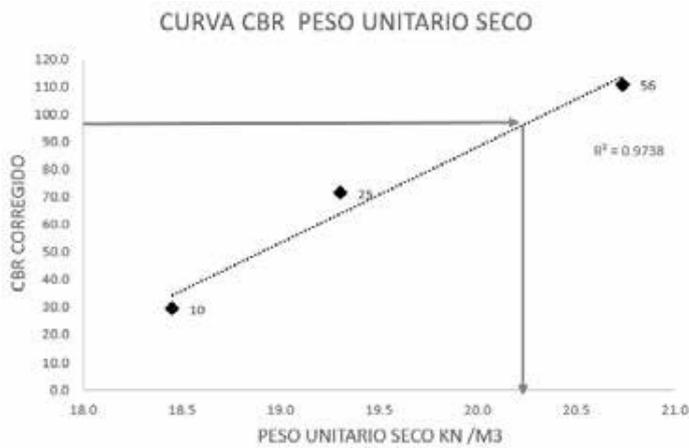
Figura 7. Curva esfuerzo vs penetración sin calamina. Fuente: Autoría propia

Tabla 8. Esfuerzo vs penetración

Molde Nº	26			27			30		
	Nº Golpes /								
Días Inmersión	10	25	56	10	25	56	10	25	56
Penetración	Lec. (kN)	Est. Lb/pig 2	Est. MPA Lec.	(kN)Est. Lb/pig 2	Est. MPA Lec.	(kN)Est. Lb/pig 2	Est. MPA Lec.	(kN)Est. Lb/pig 2	Est. MPA Lec.
0.05	0.710	53.2	0.37	0.99	74.2	0.51	1.68	125.85	0.87
0.10	1.130	84.7	0.58	2.85	213.8	1.47	4.00	300.12	2.07
0.15	1.890	140.9	0.97	5.18	388.1	2.68	7.02	520.18	3.63
0.20	2.580	193.4	1.33	7.39	553.6	3.817	10.12	753.54	5.23
0.25	3.540	265.3	1.83	9.52	713.2	4.92	12.83	961.82	6.63
0.30	4.274	320.4	2.21	11.01	825.3	5.69	15.87	1189.38	8.20
0.35	5.476	410.6	2.83	14.20	1064.4	7.34	21.10	1581.55	10.90
0.40	7.190	538.9	3.72	18.65	1352.9	9.33	27.13	2033.53	14.02
0.45	9.006	675.0	4.65	21.02	1575.7	10.96	31.04	2326.30	16.04
0.50	10.480	785.5	5.42	23.83	1786.4	12.32	34.13	2558.51	17.84
G.R.R a 0.1"	19.34	19.32		55.30	55.32		75.83	75.80	
G.R.R a 0.2"	27.37	27.49		70.90	71.25		105.44	105.37	
G.R.R	25.67	25.05		55.30	55.32		92.40	89.57	
G.R.R	29.20	29.32		70.90	71.25		110.23	110.08	

Fuente: Autoría propia

Figura 8. Curva CBR Corregido vs Peso unitario seco sin calamina.



Fuente: Autoría propia

$$[1] Y = 33.739x - 606.93$$

$$[2] 95\% = 33.739x - 606.93$$

$$[3] x = (95 + 606.93) / (33.739)$$

$$[4] x = 20.804 \text{ KN/m}^3$$

Figura 9. Probeta (Testigo).



Fuente: Autoría propia

- B. Moldes Con Calamina (35.53%)
- C.



Figura 10. Curva esfuerzo vs penetración con calamina. Fuente: autoría propia

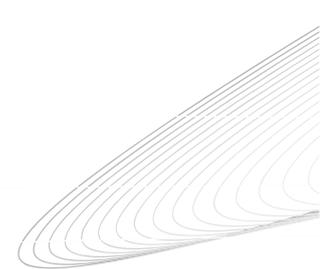
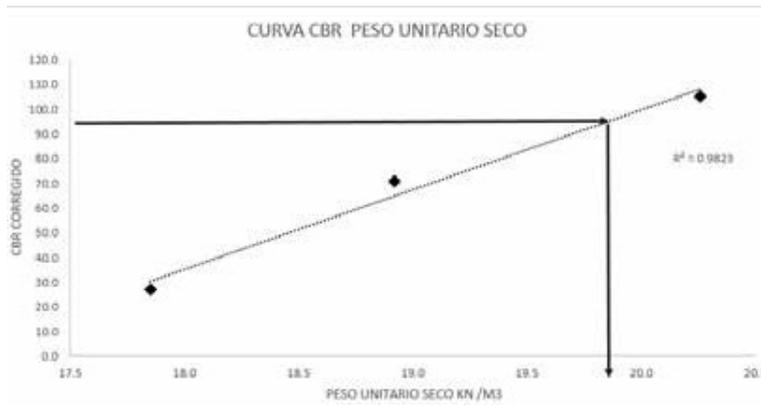


Tabla 9. Esfuerzo vs penetración con calamina

Molde N°	9			28			29			
	N° Golpes / Capas	10		25		55				
Días Inmersión	4		4		4		4			
Penetración	Lec. (KN)	Esf. Lb/pig/2	Esf. MPA	Lec. (KN)	Esf. Lb/pig/2	Esf. MPA	Lec. (KN)	Esf. Lb/pig/2	Esf. MPA	
mm	pg									
0.6400	0.025	0.38	28.48	0.20	0.90	67.46	0.47	1.30	97.44	0.67
1.27	0.05	1.02	78.30	0.53	2.76	207.10	1.43	3.87	290.36	2.00
1.91	0.075	1.81	135.67	0.94	5.09	381.37	2.63	6.89	516.44	3.56
2.54	0.1	2.56	191.68	1.32	7.30	546.87	3.77	9.99	748.80	5.10
3.18	0.125	3.45	258.59	1.78	9.43	706.45	4.87	12.70	952.06	6.56
3.81	0.15	4.18	313.61	2.16	11.07	829.75	5.72	15.74	1179.64	8.13
5.08	0.2	5.39	403.86	2.78	14.11	1057.62	7.29	20.97	1571.81	10.84
7.62	0.3	7.10	532.18	3.67	17.96	1346.19	9.28	27.00	2023.79	13.95
10.16	0.4	8.92	668.22	4.61	20.93	1568.96	10.62	30.91	2316.56	15.97
12.7	0.5	10.39	778.78	5.37	23.74	1779.66	12.27	33.56	2515.49	17.34
C.B.R a 0.1"			19.19	19.17		54.09	54.65		74.88	74.82
C.B.R a 0.2"			26.92	27.03		70.51	70.60		104.79	105.22
C.B.R Corregido a			19.19	19.17		54.09	54.65		74.88	74.82
C.B.R Corregido a			26.92	27.03		70.51	70.60		104.79	105.22

Fuente: Autoría propia

Figura 11. Curva CBR Corregido vs Peso unitario seco con calamina.



Fuente: autoría propia

$$[5] y = 32.181x - 544.11$$

$$[6] 95\% = 32.181x - 544.11$$

$$[7] x = (95 + 544.11) / (32.181)$$

$$[8] x = 19.859 \text{ KN/M}^3$$

Figura 12. Probeta con Calamina.



Fuente: Autoría propia

Figura 13. Probeta con Calamina.



Fuente: Autoría propia

DISCUSIÓN

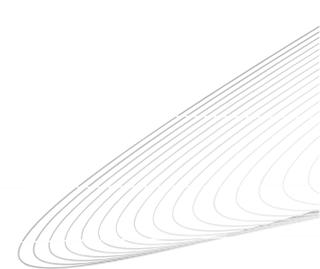
El análisis de comparación se realizó al 95 % de compactación del CBR para una penetración de 5.08 mm (0.2 in), los resultados de este análisis indican que la calamina no generó ninguna mejoría en la capacidad de soporte de la base granular, puesto que las probetas testigos arrojaron un peso unitario de 20.804 kN/m³, mientras que para las probetas con calamina arrojaron un valor de 19.859 kN/m³ como se observa en la figura 8 y 11 el valor tiende a ser neutro, sin embargo se puede afirmar que a pesar que el residuo industrial (calamina) no proporcionó una mejoría estructural como se esperaba, tampoco generó una disminución representativa en su capacidad.

Se deja abierta esta investigación para realizar ensayos con diferentes porcentajes de este trefilado de hierro, en donde además se tenga en cuenta la génesis del grano de la arena (agregado fino) con el fin de evidenciar si llegase a soportar en algún caso en mayor medida un grano de hierro proveniente de la producción de las varillas de acero que un grano de arena este dependiendo de su génesis.

CONCLUSIONES

Mediante la presente investigación se descubre la posibilidad de utilizar gran parte de este residuo industrial para la producción de material de base granular, de tal forma que se ayude a minimizar los impactos ambientales generados tanto por la producción de residuos dándole un valor agregado a éste, así como la disminución en la explotación de recursos naturales.

Con base a que no se presenta una disminución de la capacidad de soporte de la base granular, se abre la opción del remplazo del agregado fino por calamina, obteniendo un ahorro en volumen de material fino y permitiendo dar una disposición final a este residuo.



REFERENCIAS

1. MEJIA, K.J.O., Elaboración de bloques de mortero tipo estructural mediante secado natural empleando la calamina de tenaris tubocaribe S.A. como aditivo, in Universidad de San Buenaventura 2012: Cartagena de Indias.
2. Meadows, D.H., Beyond the limits: Global collapse or a sustainable future., 1995: Londres.
3. MARTINERA, F. and P. SEIJO, Waste to Energy Technologies Targeting the Poor. The Cuba Case Study: World Renewable Energy Congreso., 2002.
4. MINAS, M.D., Explotación de materiales de construcción 2013, Bogotá Colombia.
5. DAR, B., S. PRAKASHS, and P. REDDY, An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. Resources, conservation and recycling, 2007. p. 40 - 57.
6. LIZARAZO, E.L.A., Propuesta para la elaboración de baldosas artesanales tipo cerámica acondicionando calamina, en la empresa alambre y mallas SA., in Universidad Distrital Francisco José de Caldas 2017: Bogotá.
7. ESGUERRA, A., O. VANEGAS, and M. FAJARDO, Evaluación de la reducibilidad de la calamina proveniente de una siderúrgica de la región, por reducción con monóxido de carbono, 2009: Cartagena - Colombia.
8. HENAO, R. Gerdau Diaco. 2016; Available from: <https://www.gerdau.com.co>.
9. ANUPAM, S., B. DIPENDU, and P. BARTIK, Effect of sand replacement by mill sacle in the properties of concrete 2015.
10. Ordoñez Mejia, K.J. and V.L. Liliana, Elaboración de bloques de mortero tipo estructural mediante secado natural, empleando como aditivo la calamina procedente de tenaris tubocaribe sa., 2012: Barranquilla.
11. ROJAS HENAO, L.M. and S. SIERRA RESTREPO, Evaluación del uso de cascarilla de laminación como agregado fino en la elaboración de concreto convencional, 2016.
12. RINCON VILLAMIL, S. and Y. SANABRIA REINA, Modificación del concreto asfáltico MDC 19 con la sustitución de la llenante mineral por calamina., 2017.
13. INVIAS, INVIAS art 330 BASE GRANULAR, 2013.
14. FONSECA, A., Ingeniería de Pavimentos. Universidad Católica de Colombia, ed. U.C.d. Colombia 2002, Bogotá.
15. Quintana, H.A.R., Comportamiento resiliente de los materiales, in Revista Ingeniería Universidad de Medellín 2007: Medellín.
16. E-148, I., Relación de soporte del suelo (CBR de laboratorio), 2013.
17. RIVAS SALGADO, L.G., Aproximación a la zonificación del CBR en la localidad de chapinero, in UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA 2013: BOGOTA COLOMBIA.
18. LIZACANO, F.A.R., Diseño Racional de Pavimentos. Escuela Colombiana de Ingeniería 2003, Bogotá.