UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

TESIS DOCTORAL

"ESTUDIO, ANÁLISIS Y DISEÑO DE APLICACIONES DE ÁRIDOS PROCEDENTES DE LA VALORIZACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES: FIRMES DE CARRETERAS Y HORMIGONES"

Autor

JOKIN RICO ARENAL

Directores

D. FRANCISCO BALLESTER MUÑOZ

D. DANIEL CASTRO FRESNO

Santander, 2016

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Joaquín y Blanca Nieves, porque he sido una prioridad en sus vidas.

A mis abuelos, Ángel y Carmen, porque me han transmitido valores profundos basados en el trabajo y la bondad.

A mi hermana y a mi ahijada, Sara y Artia, porque como decía mi abuelo, son mi ojito más derecho.

A mi otro padre, Francisco, del que he aprendido mucho desde el punto de vista profesional y mucho más desde el punto de vista vital. Caballero y amigo.

A mis compañeros de trabajo, César, Marina, Ana, Silvia, Alfonso, Jesús, Javier y Kiko, por su talento, por su ingenio, por su genio, por su empuje, por las risas y porque hacemos un gran equipo.

A Dani por todo su apoyo a lo largo de toda mi carrera profesional.

A

Gracias a todos.

Jk

RESUMEN

En la presente Tesis Doctoral se estudian residuos provenientes de industrias de diferentes sectores con el objetivo de determinar su óptima aplicación como áridos reciclados en la construcción de obras civiles.

Se estudian las propiedades intrínsecas de los residuos, así como sus características como áridos y como elementos constitutivos de capas del firme de carreteras, mezclas bituminosas y hormigones.

Se han desarrollado mezclas bituminosas y hormigones, demostrando que las aplicaciones de los áridos industriales aquí estudiados son viables técnica y económicamente, así como seguras y duraderas, siendo unos claros sustitutos de materiales fabricados con áridos naturales provenientes de la explotación de canteras.

Los residuos industriales estudiados son las escorias negras siderúrgicas de horno de arco eléctrico, las escorias de ferrosilicomanganeso obtenidas en la fabricación de ferroaleaciones y el residuo de calcinación de la caliza en el proceso de Solvay.

Se ha analizado el marco legislativo actual que regula la posible aplicación de estos residuos y se realizan los ensayos de caracterización de acuerdo a la normativa técnica que corresponde.

Escorias negras: Áridos siderúrgicos

De los resultados obtenidos se deduce que los áridos provenientes de las escorias negras estudiadas sometidas a un proceso de valorización adecuado poseen un potencial expansivo prácticamente nulo y unas buenas propiedades mecánicas. Los ensayos de lixiviación demuestran el cumplimiento de las restricciones medioambientales prescritas en la normativa.

Por otra parte, la viabilidad técnica en la fabricación de mezclas bituminosas con este tipo de áridos siderúrgicos ha quedado probada por las altas prestaciones mecánicas que presentan las mezclas diseñadas.

Aún con el inconveniente de una mayor densidad, y por tanto un mayor coste de transporte, se ha demostrado su viabilidad económica comparada con áridos naturales.

Se han diseñado y construido obras experimentales donde se han estudiado su durabilidad y seguridad como mezclas bituminosas en capa de rodadura, siendo la construcción de la Carreteras C-136 y C-137 (Cantabria) las más importantes de las realizadas.

Se ha realizado un estudio de las condiciones de seguridad y durabilidad de estas obras experimentales a través de ensayos de seguimiento del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento (CRD), el Coeficiente de Resistencia

Transversal (CRT) y la textura superficial de las capas de rodadura.

Los resultados, que han sido comparados con tramos construidos en el mismo espacio temporal con áridos naturales de sílice, proporcionan a las mezclas fabricadas con árido siderúrgico claras ventajas respecto a las mezclas bituminosas fabricadas con sílice en lo que al CRT se refiere.

Finalmente, en lo que a las escorias negras se refiere se han recopilado y analizado estadísticamente los resultados de los numerosos ensayos realizados durante los 4 años de trabajo, constituyendo esta tesis un documento de consulta para la profundización en el conocimiento del comportamiento de este tipo de materiales.

En lo que a la fabricación de hormigón con escorias negras se refiere, los resultados obtenidos demuestran su viabilidad técnica siendo una opción a considerar cuando la alta densidad del hormigón no suponga un problema.

Escorias de ferrosilicomanganeso

Por su parte, las escorias de ferrosilicomanganeso presentan unas buenas características físicas, químicas y mecánicas que las aconsejan como zahorra artificial. Sin embargo, deben ser sometidas a un proceso de trituración y cribado para poder ser empleadas como una zahorra artificial, ya que su granulometría no se ajusta a las especificaciones de la Norma.

Residuos de calcinación de la caliza

Los residuos de calcinación de la caliza presentan una variedad de componentes; entre ellos gravas de naturaleza caliza, fragmentos de carbón y pequeños nódulos blancos compuestos por cal libre. En los ensayos realizados sobre las purgas, las propiedades mecánicas obtenidas son inferiores a las obtenidas en un árido natural calizo. La fabricación de hormigones con este tipo de residuo presentó en un primer momento unas propiedades mecánicas superiores a los hormigones de control. A pesar de esto, debe descartarse su empleo debido a que procesos de hidratación de la cal libre presente en las purgas provoca la expansión del hormigón y por consiguiente su destrucción.

ABSTRACT

In this Doctoral Thesis waste from industries in different sectors is studied in order to determine optimum application as recycled aggregates in the construction of civil works.

The intrinsic properties of the waste are studied, as well as its characteristics as aggregates and as constituent elements of road pavement layers, bituminous mixtures and concretes.

Bituminous mixtures and concretes have been developed, showing that the applications of industrial aggregate studied are technically and economically feasible, as well as safe and durable, being a clear substitute materials for natural aggregates made from quarrying.

The industrial wastes studied are black slag from electric arc furnace (EAF) steel industry, Ferro Silico Manganese slag generated in the Ferroalloy manufacturing and the residue from calcination of limestone in the Solvay process.

We analyzed the current legislative framework regulating the possible application of this waste and characterization tests are made according to the corresponding technical regulations.

Black slag: steel aggregate

From the results, it is inferred that the aggregates from the black slag studied subjected to a suitable recovery process have a practically zero expansive potential and appropriate mechanical properties. Leaching tests demonstrate compliance with environmental restrictions prescribed in the regulations.

Moreover, the technical feasibility of bituminous mixtures manufactured with steel aggregates has been proven by the high mechanical performances of the designed mixtures.

Even with the drawback of a higher density, and therefore a higher cost of transport, it has demonstrated economic viability compared to natural aggregates.

Experimental works have been designed and built and the durability and safety of the surface course have been studied, being the construction of the roads C-136 and C-137 (Cantabria) the most important of those made.

A study of the safety and durability of these experimental works has been performed by monitoring the Braking Force Coefficient (BFC), the Sideway Force Coefficient (SFC) and the surface texture of the surface courses.

The results, which have been compared with sections built in the same temporary space with silica natural aggregates, show clear advantages of the steel aggregate manufactured mixtures over the bituminous mixes made with

silica in reference to SFC.

Finally, as far as the black slag concerns, the results of numerous tests conducted during the 4 years of work have been collected and statistically analyzed, constituting this thesis a consultation document for deepening the understanding of the behavior of this type of materials.

As for the manufacture of black slag concrete, the results obtained demonstrate the technical feasibility, proving it as an option to consider when the high density of concrete is not an issue.

Ferro-silico-manganese slag

Meanwhile, ferro-silico-manganese slags have good physical, chemical and mechanical characteristics that recommend their use as artificial gravel. However, they must be subjected to a crushing and screening process to be used as an artificial gravel as its particle size does not fit the specifications of the standard.

Waste from calcination of limestone

Residues from calcination of limestone have a variety of components; including natural limestone gravel, coal fragments and small white nodules compounds by free lime. In the tests performed on the purges, the mechanical properties obtained are lower than those obtained in a limestone natural aggregate. The manufacture of concrete with this type of waste presented at first superior mechanical properties to control concretes. Despite this, their use should be discarded because processes of hydration of free lime present in the purges causes expansion of the concrete and thus its destruction.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS ____ *II*

RESUMEN ____ *III*

ÍNDICE DE TABLAS ____ *XII*

ÍNDICE DE FIGURAS ____ *XVII*

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN ____ *24*

1.1 PROBLEMÁTICA ____ **25**

1.2 OBJETIVO ____ **26**

1.3 METODOLOGÍA DE TESIS ____ **27**

1.4 CONTENIDOS ____ **29**

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE ____ *31*

2.1 INTRODUCCIÓN ____ **32**

2.2 MARCO LEGISLATIVO ____ **33**

2.2.1 LEGISLACIÓN ACTUAL SOBRE RESIDUOS INDUSTRIALES ____ 34

2.2.1.1 Normativa europea. *Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008* ____ 34

2.2.1.2 Normativa española. *Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y Suelos Contaminados* 36

2.2.2 LEGISLACIÓN ACTUAL SOBRE EL USO DE ESCORIAS DE HORNO ELÉCTRICO ____ 37

2.2.2.1 Legislación autonómica: Cantabria, Cataluña y País Vasco. ____ 37

2.2.3 NORMATIVA DE SUELOS EN CARRETERAS ____ 51

2.2.3.1 Clasificación de suelos ____ 51

2.2.3.2 Clasificación de explanadas ____ 52

2.2.3.3 Requerimientos según usos ____ 53

2.2.4 NORMATIVA DE FIRMES DE CARRETERA ____ 56

2.2.5 NORMATIVA DE HORMIGONES ____ 61

2.2.5.1 Hormigón de uso Estructural ____ 61

2.2.5.2 Hormigón de uso No Estructural ____ 62

2.3 TIPOLOGÍA DE RESIDUOS INDUSTRIALES ANALIZADOS ____ **63**

2.3.1 INTRODUCCIÓN ____ 63

2.3.2 ESCORIA NEGRA ____ 64

2.3.2.1 Introducción ____ 64

2.3.2.2 Fabricación ____ 65

2.3.2.3 Valorización ____ 68

2.3.2.4 Producción ____ 69

2.3.2.5 Caracterización física ____ 70

2.3.2.6 Caracterización química ____ 72

2.3.2.7 Posibles empleos ____ 72

2.3.3 ESCORIA DE FERROFERROSILICOMANGANESO ____ 78

2.3.3.1 Introducción ____ 78

2.3.3.2 Fabricación 78
2.3.3.3 Producción 80
2.3.3.4 Caracterización física 80
2.3.3.5 Caracterización química 81
2.3.3.6 Posibles empleos 82
2.3.4 PURGA DE CALCINACIÓN DE LA CALIZA 84
2.3.4.1 Introducción 84
2.3.4.2 Fabricación 84
2.3.4.3 Producción 85
2.3.4.4 Caracterización física 85
2.3.4.5 Caracterización química 85
2.3.4.6 Posibles empleos 86

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE TRABAJO 87

3.1 INTRODUCCIÓN 88

3.2 ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y MECÁNICAS DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS INDUSTRIALES, DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS Y DE LOS HORMIGONES 89

3.2.1 ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y MECÁNICAS DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS INDUSTRIALES 89
3.2.1.1 Introducción 89
3.2.1.2 Caracterización Química y Mineralógica 89
3.2.1.3 Caracterización Física y Mecánica 90
3.2.2 ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS FABRICADAS CON ÁRIDOS RECICLADOS INDUSTRIALES 95
3.2.2.1 Introducción 95
3.2.2.2 Ensayos sobre mezclas bituminosas 102
3.2.3 ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE HORMIGONES FABRICADOS CON ÁRIDOS RECICLADOS INDUSTRIALES 117
3.2.3.1 Introducción 117
3.2.3.2 Ensayos sobre el hormigón 117

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE ESCORIAS NEGRAS: ÁRIDOS, MEZCLAS BITUMINOSAS Y HORMIGONES 120

4.1 INTRODUCCIÓN 121

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS NEGRAS 121

4.2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA 122
4.2.1.1 Identificación visual 122
4.2.1.2 Análisis granulométrico 123
4.2.1.3 Equivalente de arena 126
4.2.1.4 Índice de lajas 126
4.2.1.5 Densidad aparente y porosidad 127
4.2.1.6 Densidad de partículas aparente 127
4.2.1.7 Humedad natural 127
4.2.1.8 Absorción 128
4.2.1.9 Coeficiente de desgaste de Los Ángeles 128
4.2.1.10 Índice de machacabilidad 128
4.2.1.11 Ensayo de pulimento acelerado 130

4.2.1.12 Índice granulométrico de envejecimiento (I.G.E.) 131
4.2.1.13 Ensayo de expansividad 131
4.2.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA 135
4.2.2.1 Análisis químico por fluorescencia de rayos X 135
4.2.2.2 Análisis mineralógico mediante difracción de rayos X 136
4.2.2.3 Análisis por espectroscopía de infrarrojos 136
4.2.2.4 Contenido de azufre total (S_{total}) 136
4.2.2.5 Contenido de cal libre $(CaO)_{libre}$ 137
4.2.2.6 Contenido de óxido de magnesio (MgO) 137
4.2.2.7 Microscopio electrónico 137
4.2.2.8 Ensayo de lixiviación 138
4.2.3 ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS NEGRAS 140

4.3 DESARROLLO DE MEZCLAS BITUMINOSAS CON ÁRIDOS SIDERÚRGICOS 142
4.3.1 INTRODUCCIÓN 143
4.3.2 DESARROLLO DE LA FÓRMULA DE TRABAJO 145
4.3.2.1 Dosificaciones en laboratorio 145
4.3.2.2 Áreas de experimentación post-laboratorio 168
4.3.2.3 Tramos de prueba Gobierno Regional 180
4.3.3 ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES SUPERFICIALES DE LOS TRAMOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES 183
4.3.3.1 CRT y Textura 184
4.3.3.2 Resistencia al deslizamiento 187
4.3.4 ESTUDIO ESTADÍSTICO 190
4.3.4.1 Comparación de las propiedades superficiales de las mezclas bituminosas convencionales y de las mezclas bituminosas fabricadas con áridos siderúrgicos 190
4.3.4.2 Caracterización de las mezclas bituminosas fabricadas con áridos siderúrgicos 196
4.3.5 ESTUDIO ECONÓMICO 201
4.3.5.1 Evaluación de costes asociados al uso de maquinaria 201
4.3.5.2 Análisis de sensibilidad del coste de producción y transporte 205
4.3.5.3 Aplicación 214

4.4 DESARROLLO DE HORMIGONES CON ÁRIDOS SIDERÚRGICOS 221
4.4.1 DEFINICIÓN DE LAS DOSIFICACIONES 222
4.4.1.1 Hormigón patrón y dosificación preliminar 222
4.4.1.2 Consistencia 223
4.4.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES 225
4.4.2.1 Propiedades físicas del hormigón endurecido 225
4.4.2.2 Resistencia a compresión y a tracción 225
4.4.2.3 Permeabilidad al oxígeno y profundidad máxima de penetración de agua bajo presión 226
4.4.2.4 Velocidad de impulsos ultrasónicos 226
4.4.2.5 Abrasión por desgaste 226
4.4.2.6 Seguimiento de las probetas normalizadas 227

4.5 CONCLUSIONES 228
4.5.1 CONCLUSIONES SOBRE EL EMPLEO EN LA FABRICACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS 228
4.5.2 CONCLUSIONES SOBRE EL EMPLEO EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGONES 234

4.5.3 CONCLUSIONES ECONÓMICAS 235

CAPÍTULO 5. ESCORIAS DE FERROSILICOMANGANESO: ÁRIDOS 236

5.1 INTRODUCCIÓN 237

5.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS DE FERROSILICOMANGANESO 238

5.2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA 239

5.2.1.1 Análisis granulométrico 239

5.2.1.2 Coeficiente de forma 242

5.2.1.3 Densidad aparente y porosidad 242

5.2.1.4 Densidad relativa y absorción 243

5.2.1.5 Equivalente de arena 243

5.2.1.6 Índice de lajas 243

5.2.1.7 Coeficiente de desgaste de Los Ángeles 244

5.2.1.8 Proctor modificado 245

5.2.1.9 California Bearing Ratio (CBR) 245

5.3 ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS INDUSTRIALES PROVENIENTES DE ESCORIAS DE FERROSILICOMANGANESO EN CAPAS BASE Y SUBBASE 249

5.3.1 HUSOS GRANULOMÉTRICOS DE LAS ZAHORRAS ARTIFICIALES 249

5.3.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO COMPARATIVO 250

5.3.2.1 Uso como Zahorra ZA 25 250

5.3.2.2 Uso como Zahorra ZA 20 250

5.3.2.3 Uso como Zahorra ZAD 20 251

5.4 CONCLUSIONES 252

CAPÍTULO 6. PURGAS DE LA CALCINACIÓN DE LA CALIZA: ÁRIDOS Y HORMIGONES 253

6.1 INTRODUCCIÓN 254

6.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS PURGAS DE CALCINACIÓN DE LA CALIZA 255

6.2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA 255

6.2.1.1 Identificación visual 255

6.2.1.2 Análisis granulométrico 256

6.2.1.3 Humedad 257

6.2.1.4 Índice de machacabilidad 257

6.2.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA 257

6.2.2.1 Análisis químico elemental 257

6.2.2.2 Difracción de Rayos X 258

6.3 DESARROLLO DE HORMIGONES CON PURGAS DE CALCINACIÓN DE LA CALIZA 259

6.3.1 DEFINICIÓN DE LAS DOSIFICACIONES 260

6.3.2 FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN 261

6.3.2.1 Hormigón en estado fresco 261

6.3.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN UNIAXIAL 263

6.3.4 SEGUIMIENTO VISUAL DE LAS PROBETAS 264

6.4 CONCLUSIONES 267

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES GENERALES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN 269

7.1 CONCLUSIONES GENERALES 270

7.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN 273

REFERENCIAS 275

ANEXOS 1

ANEXO A. ENSAYOS 1

ANEXO A.1 ESCORIAS NEGRAS 1

CARACTERIZACIÓN 1

MEZCLAS BITUMINOSAS 24

ANEXO A.2 ESCORIAS DE FERROSILICOMANGANESO 61

CARACTERIZACIÓN 61

ANEXO A.3 PURGAS DE CALCINACIÓN DE LA CALIZA 67

CARACTERIZACIÓN 67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Residuos industriales valorizables como áridos reciclados (Elaboración propia) 25
Tabla 2: Tipos de escorias siderúrgicas diferenciadas por cada Decreto 38
Tabla 3: Comparativa de la composición química de las escorias valorizables para cada decreto..... 39
Tabla 4: Porcentajes de variación de la restricción de la composición química de los Decretos con respecto al Cántabro. 40
Tabla 5: Tabla resumen usos escorias en Decreto Cántabro..... 42
Tabla 6: Tabla resumen usos escorias en Decreto Catalán. 42
Tabla 7: Tabla resumen usos escorias en Decreto País Vasco..... 43
Tabla 8: Tabla resumen condiciones de usos de escorias en Decreto Cántabro. 45
Tabla 9: Tabla resumen condiciones de usos de escorias en Decreto Catalán. 45
Tabla 10: Tabla resumen condiciones de usos de escorias en Decreto de País Vasco. 46
Tabla 11: Tabla resumen conclusiones de las condiciones de uso..... 47
Tabla 12: Tabla resumen condiciones técnicas de las instalaciones de tratamiento y almacenamiento de escorias siderúrgicas. 49
Tabla 13: Clasificación de suelos del PG-3. 51
Tabla 14: Módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga..... 52
Tabla 15: Materiales para la formación de las explanadas. 53
Tabla 16: Equivalente de arena (SE_4). 54
Tabla 17: Tolerancias admisibles respecto a la fórmula de trabajo. 55
Tabla 18: Desgaste de los Ángeles máximo. 55
Tabla 19: Dotaciones mínimas de ligante. 57
Tabla 20: Relación filler / ligante. 57
Tabla 21: Valores del Coeficiente de Los Ángeles. 57
Tabla 22: Resistencia al pulimento para capas de rodadura. 58
Tabla 23: Contenido de huecos. 58
Tabla 24: Valores mínimos permitidos. 58
Tabla 25: Dotaciones mínimas de ligante. 59
Tabla 26: Relación filler / ligante. 60
Tabla 27: Valores del Coeficiente de Los Ángeles. 60
Tabla 28: Resistencia al pulimento para capas de rodadura. 60
Tabla 29: Contenido de huecos. 60
Tabla 30: Valores mínimos permitidos. 61
Tabla 31: Producción anual de escorias de acería. 70
Tabla 32: Propiedades físicas de los áridos procedentes de escorias negras. 70
Tabla 33: Composición química de la escoria negra de horno eléctrico. 72

Tabla 34: CRT mezclas tipo BBTM A. 75
Tabla 35: Características ferroaleaciones. 80
Tabla 36: Análisis químico de la escoria de ferrosilicomanganeso. 81
Tabla 37: Composición química de las purgas de Solvay. 85
Tabla 38: Equivalente de arena. 126
Tabla 39: Valor del Índice de Lajas para las partículas de escoria. 126
Tabla 40: Densidad aparente y porosidad. 127
Tabla 41: Densidad relativa en agua destilada para las distintas fracciones de escoria. 127
Tabla 42: Humedad natural de la escoria negra de GSW clasificada. 127
Tabla 43: Absorción tras inmersión en agua destilada durante 24 horas. 128
Tabla 44: Ensayo de Los Ángeles. 128
Tabla 45: Resultado del Índice de Machacabilidad. 129
Tabla 46: Evolución del CPA en función de su proceso de valorización. 130
Tabla 47: Resultado del ensayo I.G.E. para cada una de las muestras. 131
Tabla 48: Resultados de expansividad para la escoria negra GSW según la norma 1744-1 (realizado por Triax S.A.). 132
Tabla 49: Resultados del ensayo de fluorescencia. 135
Tabla 50: Resultados análisis químico elemental polvo blanquecino de las escorias negras. 135
Tabla 51: Resultados del ensayo de infrarrojos. 136
Tabla 52: Resultados del ensayo de azufre total. 137
Tabla 53: Resultados del ensayo de cal libre. 137
Tabla 54: Valores para el contenido de óxido de magnesio. 137
Tabla 55: Caracterización química por microscopio de las escorias de GSW y Sidenor. 138
Tabla 56: Resultado del ensayo de Lixiviación de las escorias negras de GSW y SIDENOR. 138
Tabla 57: Análisis de la caracterización de las escorias negras. 141
Tabla 58: Propiedades más representativas de una mezcla bituminosa. 144
Tabla 59: Óptimo de ligante y valores limitantes para las diferentes mezclas (% betún sobre mezcla). 153
Tabla 60: Relaciones iniciales filler/ligante. 154
Tabla 61: Dosificación granulométrica de la ofita de referencia (en peso). 154
Tabla 62: Dosificación granulométrica de la escoria (en peso). 155
Tabla 63: Dosificación granulométrica de la escoria (en volumen). 155
Tabla 64: Valores de rotura a tracción indirecta para probetas ensayadas a dos temperaturas diferentes. 157
Tabla 65: Valores del ITSR(%) según el proceso de amasado para la escoria en volumen. 157

Tabla 66: Valores de la resistencia conservada para las 3 mezclas estudiadas con un contenido de ligante correspondiente al 5% de huecos en mezcla..... 157
Tabla 67: Módulos de rigidez para las distintas mezclas contempladas en el estudio. 158
Tabla 68: Módulos de rigidez para las distintas mezclas contempladas en el estudio. 158
Tabla 69: Módulos de rigidez para las distintas mezclas contempladas en el estudio. 159
Tabla 70: Módulos de rigidez para las distintas mezclas contempladas en el estudio. 159
Tabla 71: Módulos dinámicos y ángulos de desfase para la ofita de referencia..... 161
Tabla 72: Módulos dinámicos y ángulos de desfase para la escoria en volumen... 161
Tabla 73: Valores del ensayo para la ofita de referencia (r^2=0,1197). 162
Tabla 74: Valores del ensayo para la escoria en volumen..... 163
Tabla 75: Valores de referencia en fatiga para la ofita y la escoria en volumen. ... 163
Tabla 76: Pendiente media de deformaciones en pista en el intervalo de 5.000 a 10.000 ciclos para capas de rodadura e intermedias (mm/1.000 ciclos de carga)..... 164
Tabla 77: Resultados medios variando la dotación de ligante para la ofita de referencia..... 164
Tabla 78: Resultados medios para la escoria en volumen..... 164
Tabla 79: Resultados medios para la escoria en peso. 165
Tabla 80: Resultados resumidos de los ensayos de las 3 mezclas estudiadas. 167
Tabla 81: Contenido de ligante de las mezclas. 167
Tabla 82: Ensayo Marshall 180
Tabla 83: Ensayo Inmersión-Compresión 180
Tabla 84: Dosificación Sílice del PK 0+000 al PK 3+880. 182
Tabla 85: Dosificación AC16 Surf Escoria. 183
Tabla 86: Resultados CRD en la CA-136 y CA-137 188
Tabla 89: Resultados análisis estadístico CA-136. 191
Tabla 90: Resultados análisis estadístico CA-137. 191
Tabla 91: Resultados análisis estadístico datos agrupados. 194
Tabla 92: Análisis de la caracterización de mezclas bituminosas con filler natural. 197
Tabla 93: Coste recursos humanos. (Colegio de arquitectos y aparejadores de Cantabria; 2011) 204
Tabla 94: Coste detallado dumper..... 207
Tabla 95: Coste detallado retroexcavadora..... 207
Tabla 96: Coste detallado sistema alimentador/cinta/overband..... 208
Tabla 97: Coste detallado Pala Cargadora. 208
Tabla 98: Coste detallado Criba. 209
Tabla 99: Coste estimado de producción de árido siderúrgico clasificado 209
Tabla 100: Relación entre densidades de áridos 209

Tabla 101: Coste del árido siderúrgico 209
Tabla 102: Coste de producción analizado de áridos naturales 210
Tabla 103: Coste detallado transporte hasta 20 km 211
Tabla 104: Coste detallado transporte para distancias mayores a 20 km. 212
Tabla 105: Coste estimado de producción estimado de sílice 214
Tabla 106: Coste estimado de sílice en planta de aglomerado 214
Tabla 107: Coste estimado del betún 50/70 215
Tabla 108: Coste estimado de mezcla bituminosa AC16 Surf con sílice 215
Tabla 109: Coste estimado de producción estimado de la ofita 215
Tabla 110: Coste estimado de sílice en planta de aglomerado 215
Tabla 111: Coste estimado de mezcla bituminosa AC16 Surf con ofita 216
Tabla 112: Coste estimado de producción estimado de caliza. 216
Tabla 113: Coste estimado de la caliza en planta de aglomerado. 217
Tabla 114: Coste estimado de producción estimado de sílice. 217
Tabla 115: Coste estimado del árido siderúrgico en la planta de aglomerado. 217
Tabla 116: Coste estimado de mezcla bituminosa AC16 Surf con árido siderúrgico. 217
Tabla 117: Relación costes mezcla AC16 Surf árido silíceo frente árido siderúrgico. 218
Tabla 118: Relación coste producción mezcla AC16 Surf árido ofítico frente árido siderúrgico. 218
Tabla 119: Dimensiones según 6.1. I.C. 219
Tabla 120: Volumen AC16Surf por km de carretera convencional. 219
Tabla 121: Costes de producción de mezcla AC16Surf 219
Tabla 122: Longitud de tramo realizado con Mezclas bituminosas con áridos siderúrgicos 220
Tabla 123: Dosificación seca para un hormigón 100% de incorporación de escorias como árido grueso. 222
Tabla 124: Cantidades de agua y aditivos en la primera prueba de consistencia 223
Tabla 125: Cantidades de agua y aditivos en la segunda prueba de consistencia. 223
Tabla 126: Cantidades de agua y aditivos en la tercera prueba de consistencia. 224
Tabla 127: Dosificación final seca para un hormigón con 100% de incorporación de escorias como árido grueso. 224
Tabla 128: Características físicas de los hormigones con escorias y de control. 225
Tabla 129: Características mecánicas de los hormigones con escorias y de control. 225
Tabla 130: Permeabilidad al oxígeno y profundidad máxima de penetración de agua bajo presión de los hormigones con escorias y de control. 226
Tabla 131: Ensayos de velocidad de impulsos ultrasónicos. 226
Tabla 132: Abrasión por desgaste. 227
Tabla 133: Coeficiente de forma escoria de SiMn. 242

Tabla 134: Densidad aparente y porosidad escoria de SiMn. 243
Tabla 135: Densidad relativa y absorción escoria de SiMn. 243
Tabla 136: Equivalente de arena escoria de SiMn. 243
Tabla 137: Índice de lajas escoria de SiMn. 243
Tabla 138: Coeficiente de Los Ángeles escoria de SiMn. 244
Tabla 139: Resultados ensayo P.M y Humedad. 245
Tabla 140: Lectura CBR para una compactación de 15 golpes. 246
Tabla 141: Lectura CBR para una compactación de 30 golpes. 246
Tabla 142: Lectura CBR para una compactación de 60 golpes. 247
Tabla 143: Valores Densidad seca - CBR. 248
Tabla 144: CBR de proyecto. 248
Tabla 145: Husos granulométricos de las zahorras artificiales. 249
Tabla 146: Granulometría de las purgas. 256
Tabla 147: Humedad de los áridos. 257
Tabla 148: Resultado del ensayo de machacabilidad para las dos fracciones analizadas. 257
Tabla 149: Análisis químico elemental de las purgas. 257
Tabla 150: Dosificación del hormigón de control para una amasada de 20 l. 260
Tabla 151: Dosificación del hormigón 100% de purgas para una amasada de 20 l. 260
Tabla 152: Dosificación del hormigón con purgas y arena de sílice para una amasada de 20 l. 260
Tabla 153: Dosificación del hormigón con purgas y arena caliza para una amasada de 20 l. 260
Tabla 154: Caracterización fresco fabricado con purgas. 261
Tabla 155: Resultados del ensayo de compresión uniaxial en hormigón patrón. ... 263
Tabla 156: Resultados del ensayo de compresión uniaxial en hormigón con arena silícea. 263
Tabla 157: Resultados del ensayo de compresión uniaxial en hormigón con arena caliza. 263

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de flujo de valorización 41
Figura 2: Diagrama de flujo de valorización, usos y condiciones de uso de las escorias 50
Figura 3: Formación de la explanada. 52
Figura 4: Esquema horno de arco eléctrico. (Fuente: www.mailxmail.com) 66
Figura 5: Pala cargadora con cadenas de protección. 68
Figura 6: Vertido de la escoria incandescente en el interior de la nave de enfriamiento. 68
Figura 7: Piscina de enfriamiento. 69
Figura 8: Enfriamiento mediante aspersión. 69
Figura 9: Precriba. 69
Figura 10: Overband. (www.magnetcity.net) 69
Figura 11: Ubicación acerías en España. (Fuente: www.cedexmateriales.es) 70
Figura 12: Escoria negra. (Fuente: www.efeverde.com) 71
Figura 13: Mezcla bituminosa con escorias negras. 73
Figura 14: Probetas de hormigón con escorias negras ensayadas a compresión. 75
Figura 15: Escoria enfriada por aspersión de agua. (Fuente: www.escorias.com) 77
Figura 16: Escoria negra enriada a velocidad natural. (Fuente: www.foro-minerales.com) 77
Figura 17: Ferromanganeso. (Fuente: www.proyectosinergia.com) 78
Figura 18: Escoria de ferrosilicomanganeso. 79
Figura 19: Escoria de ferrosilicomanganeso sin tratar. 80
Figura 20: Escoria de ferrosilicomanganeso machacada. 81
Figura 21: Escoria de ferrosilicomanganeso machacada y cribada. 81
Figura 22: Escoria de ferrosilicomanganeso de Ferroatlántica. 82
Figura 23: Método Solvay. 85
Figura 24: Purgas de calcinación de la caliza. 86
Figura 25: Muestras de escoria molida(LADICIM). 90
Figura 26: Cilindro de acero inoxidable para el cálculo de la densidad aparente (LADICIM). 92
Figura 27: Cilindro con muestra y equipo de carga/medición 94
Figura 28: Golden Quarter Car. (Fuente: blog.bomainpasa.com) 96
Figura 29: Croquis identificativo de la microtextura y la macrotextura. (Fuente: www.lanamme.ucr.ac.cr) 97
Figura 30: Evacuación de agua para evitar el aquaplaning. (Fuente: www.fierrosclasicos.com) 99
Figura 31: Pavimento con roderas. (Fuente: www.osusa.com.uy) 100
Figura 32: Pavimento con los áridos pulidos. (Fuente: www.tolcan.com) 101

Figura 33: Adición de la escoria a en la cazuela de mezclado (180º C). 103
Figura 34: Pesado e incorporación del betún (150º C). 103
Figura 35: Mezcla íntima betún-escoria. 103
Figura 36: Adición de la arena y el filler calizo (ambos a 180º C). 103
Figura 37: Medición de la huella de desgaste con el calibre. 103
Figura 38: Péndulo TRRL. (Fuente: www.highwaymaintenance.com) 104
Figura 39: Principio de funcionamiento del equipo Scrim. (Fuente: www.iso.org) 105
Figura 40: Equipo Scrim. 106
Figura 41: Ensayo del círculo de arena. (Fuente: www.4shared.com y www.ityac.com.ar) 106
Figura 42: Principio de funcionamiento de un texturómetro. (Fuente: www.iso.org) 107
Figura 43: Equipo láser para la medida de la textura y la regularidad. 107
Figura 44: Profundidad de medida del perfil. (Fuente: www.iso.org) 108
Figura 45: Configuración de la carga y rotura del ensayo a tracción indirecta. 108
Figura 46: Curva Carga-Deformación resultante del ensayo de tracción indirecta. 109
Figura 47: Diagrama de deformaciones para cargas repetidas. (Fuente: www.iso.org) 110
Figura 48: Máquina del ensayo de rigidez. 111
Figura 49: Aparato LVDT para medir deformaciones diametrales. 111
Figura 50: Amplitud de deformación correspondiente a los ciclos del 11 al 15 para una misma probeta 112
Figura 51: Espaciado de los pulsos de carga en función del tiempo. 112
Figura 52: Máquina para el ensayo de flexión en 4 puntos. (Fuente: proetisa.com) 113
Figura 53: Máquina de ensayo de pista de laboratorio. 115
Figura 54: Máquina de ensayo Marshall 115
Figura 55: Tercio de probeta cilíndrica para el ensayo de tracción indirecta. 118
Figura 56: Tercio de probeta cilíndrica tras ensayo de penetración de agua. 118
Figura 57: Detalle de la submuestra obtenida 119
Figura 58: Uso de una lupa de dos aumentos para la definición de los límites del desgaste. 119
Figura 59: Medición de la huella de desgaste con el calibre. 119
Figura 60: Aspecto visual de los tres tamaños de escoria. 123
Figura 61: Granulometría escoria negra con fragmentación térmica. 124
Figura 62: Análisis granulométrico GSW. 124
Figura 63: Granulometrías de las fracciones de escoria que se emplearán para fabricar las mezclas bituminosas. 125
Figura 64: Granulometría del árido calizo empleado para la fabricación las mezclas bituminosas. 126
Figura 65: Fracción 10/14 de la escoria en el interior del molde rígido. 129

Figura 66: Aspecto de la fracción 10/14 de escoria tras la realización del ensayo. 129
Figura 67: Curvas de aplicación de la carga exterior para la escoria y para un árido natural. 129
Figura 68: Muestra de GSW del ensayo CPA. 130
Figura 69: Escoria negra con polvo blanco en la superficie. 135
Figura 70: Imagen del análisis químico por fluorescencia de rayos X. 135
Figura 71: Difractograma de la escoria molida. 136
Figura 72: Defectos más característicos de una granulometría. 145
Figura 73: Granulometría de la mezcla número 1 en peso. 146
Figura 74: Mezcla en volumen número 1. 146
Figura 75: Mezcla en volumen número 2. 147
Figura 76: Mezcla en volumen número 3. 147
Figura 77: Mezcla en volumen número 4. 148
Figura 78: Granulometría para la ofita de referencia. 148
Figura 79: Curva de densidad de la escoria en peso. 149
Figura 80: Intervalo de huecos en mezcla para la escoria en peso. 149
Figura 81: Variación de los huecos en áridos en función del betún. 150
Figura 82: Huecos rellenos para la escoria en peso. 150
Figura 83: Curva de densidad de la escoria en volumen. 150
Figura 84: Valores limitantes en cuanto a vacíos en mezcla. 151
Figura 85: Curva cóncava característica de huecos en áridos para la escoria en volumen. 151
Figura 86: Evolución de los huecos rellenos con el contenido de ligante. 151
Figura 87: Curva de densidad de la ofita. 152
Figura 88: Valor del 5% de huecos en mezcla. 152
Figura 89: Curva de huecos en áridos. 152
Figura 90: Huecos rellenos para la ofita. 153
Figura 91: Curva de rotura a tracción indirecta a 20ºC para la escoria dosificada en peso. 156
Figura 92: Resistencia a la tracción indirecta para la escoria dosificada en volumen. 156
Figura 93: Plantilla, pletinas y escuadra de preparación de las probetas cilíndricas. 159
Figura 94: Probetas serradas y ensayadas (escoria en volumen y ofita de referencia). 160
Figura 95: Utensilio empleado en el ensayo de fatiga a flexión en 4 puntos. 162
Figura 96: Aspecto de la rodera resultante en una probeta de escoria dosificada en volumen y con un 3,60% de betún sobre mezcla. 165
Figura 97: Profundidad de rodera tras ser ensayada en una probeta tipo de escoria en peso con un 3,65% de betún s/m. 165

Figura 98: Pendiente media de deformación en pista. Para la ofita de referencia solo se representa el punto que corresponde al 5%. 166
Figura 99: Curvas de evolución de la profundidad de rodera en función del betún. 166
Figura 100: Granulometría del árido recuperado en la Zona de prueba 1..... 167
Figura 101: Granulometría del árido recuperado en la Zona de prueba 2A. 168
Figura 102: Granulometría del árido recuperado en la Zona de prueba 3..... 168
Figura 103: Zona de prueba 1 en las instalaciones de Emilio Bolado..... 169
Figura 104: Mezcla AC16-S empleada en la Zona de prueba 1. 170
Figura 105: Asfaltado con extendedora..... 171
Figura 106: Asfaltado finalizado. 171
Figura 107: Zona de prueba 2A y 2B en las instalaciones de Emilio Bolado. 172
Figura 108: Mezcla AC16-S empleada en la Zona de prueba 2A. 173
Figura 109: Mezcla AC16-S empleada en la Zona de prueba 2B. 174
Figura 110: Comienzo de extensión en zona experimental 2. 175
Figura 111: Compactación de la zona. 175
Figura 112: Zona de prueba 3 en las instalaciones de Emilio Bolado..... 176
Figura 113: Mezcla AC16-S empleada en la Zona de prueba 3. 177
Figura 114: Área experimental 4 en las instalaciones de Emilio Bolado. 178
Figura 115: Mezcla AC16-S empleada en la Zona de prueba 4. 179
Figura 116: Plano de situación de los tramos de estudio. 181
Figura 117: CA-136 - Variante de Santillana. 181
Figura 118: CA-137 - Variante de Suances. 182
Figura 119: Puesta en obra de la mezcla con árido siderúrgico. 183
Figura 137: Péndulo TRRL. 183
Figura 120: Inicio tramo CA-136, vía creciente..... 184
Figura 121: Fin tramo CA-136, vía creciente 184
Figura 122: CRT CA-136 vía creciente 184
Figura 123: Textura CA-136 vía creciente. 185
Figura 124: Inicio tramo CA-136, vía decreciente..... 185
Figura 125: Fin tramo CA-136, vía decreciente. 185
Figura 126: CRT CA-136 vía decreciente. 185
Figura 127: Textura CA-136 vía decreciente. 185
Figura 128: Inicio tramo CA-137, vía creciente..... 186
Figura 129: Fin tramo CA-137, vía creciente. 186
Figura 130: CRT CA-137 vía creciente. 186
Figura 131: Textura CA-137 vía creciente. 186
Figura 132: Inicio tramo CA-137, vía decreciente..... 187
Figura 133: Fin tramo CA-137, vía decreciente. 187
Figura 134: CRT CA-137 vía decreciente 187
Figura 135: Textura CA-137 vía decreciente 187

Figura 136: Resultados CRD en las oficinas de Emilio Bolado 188
Figura 138: Ensayo de resistencia al deslizamiento con el péndulo TRRL..... 188
Figura 139: Diagrama de cajas del CRT. 192
Figura 140: Diagrama de cajas de la Textura. 192
Figura 141: Histograma CRT (CA-136 Creciente - Escoria). 192
Figura 142: Histograma Textura (CA-136 Creciente - Escoria). 192
Figura 143: Histograma CRT (CA-136 Creciente - Sílice). 193
Figura 144: Histograma Textura (CA-136 Creciente - Sílice)..... 193
Figura 145: Histograma CRT (CA-136 Decreciente - Escoria). 193
Figura 146: Histograma CRT (CA-136 Decreciente - Escoria). 193
Figura 147: Histograma CRT (CA-136 Decreciente - Sílice)..... 193
Figura 148: Histograma Textura (CA-136 Decreciente - Sílice). 193
Figura 149: Histograma CRT (CA-137 Creciente - Escoria). 193
Figura 150: Histograma Textura (CA-137 Creciente - Escoria). 193
Figura 151: Histograma CRT (CA-137 Decreciente - Escoria). 194
Figura 152: Histograma Textura (CA-137 Decreciente - Escoria). 194
Figura 153: Histograma y línea de tendencia del CRT. 195
Figura 154: Función densidad de la Textura. 195
Figura 155: Diagrama de cajas de los valores del CRT agrupados. 196
Figura 156: Diagrama de cajas de los valores la Textura agrupados. 196
Figura 157: Densidad - % Betún s/m..... 197
Figura 158: % Betún s/a - % Betún s/m. 198
Figura 159: % Huecos rellenos - % Betún s/m. 198
Figura 160: CRD - Densidad. 198
Figura 161: % Huecos s/a - % Betún s/m. 199
Figura 162: % Huecos s/m - % Betún s/m. 199
Figura 163: Estabilidad - % Betún s/m. 199
Figura 164: Deformación - % Betún s/m..... 200
Figura 165: % Huecos s/a - Densidad..... 200
Figura 166: Estabilidad - Densidad. 200
Figura 167: Flujograma del proceso de valorización. 206
Figura 168: Coste del árido natural y siderúrgico según coste de transporte a planta 212
Figura 169: Coste del árido natural y siderúrgico según coste de producción y transporte 213
Figura 170: Huso granulométrico para mezcla tipo AC16 Surf..... 216
Figura 171: Influencia de la distancia en el transporte de Mezclas Bituminosas AC16 Surf..... 218
Figura 172: Influencia de la distancia en el transporte de Mezclas Bituminosas AC16 Surf..... 219
Figura 173: Coste desglosado de Mezcla Bituminosa en la obra. 220

Figura 174: Asiento del cono de Abrams de la primera de las dosificaciones de prueba. 223
Figura 175: Asiento del cono de Abrams de la segunda de las dosificaciones de prueba..... 223
Figura 176: Asiento del cono de Abrams de la tercera de las dosificaciones de prueba. 224
Figura 177: Aspecto del hormigón con 100% de incorporación y 26 días de edad. 227
Figura 178: Aspecto del hormigón con 100% de incorporación y 25 días de edad. 227
Figura 179: Aspecto del hormigón con 100% de incorporación y 15 días de edad. 227
Figura 180: Granulometría escoria SiMn molido sin cribar. 239
Figura 181: Granulometría escoria SiMn rechazo de molienda. 239
Figura 182: Granulometría escoria SiMn rechazo de molienda cribado. 240
Figura 183: Granulometría escoria SiMn molida y cribada 0-6. 240
Figura 184: Granulometría escoria SiMn molida y cribada 6-12. 240
Figura 185: Granulometría escoria SiMn molida y cribada 12-18. 241
Figura 186: Granulometría escoria SiMn cribada 0-6. 241
Figura 187: Granulometría escoria SiMn cribada 6-12. 241
Figura 188: Granulometría escoria SiMn cribada 12-18. 242
Figura 189: Material 6-12 molido y cribado para ser ensayado en Los Ángeles. 244
Figura 190: Material 12-18 molido y cribado ya ensayado en Los Ángeles. 244
Figura 191: Material 12-18 molido y cribado ya ensayado en Los Ángeles. 244
Figura 192: Material 12-18 molido y cribado mate para ser ensayado en Los Ángeles. 244
Figura 193: Curva Densidad seca - Humedad. 245
Figura 194: Curva Carga - Penetración. 247
Figura 195: Curva Densidad seca - CBR. 248
Figura 196: Comparativa ZA 25 y escorias de SiMn. 250
Figura 197: Comparativa ZA 20 y escorias de SiMn. 251
Figura 198: Comparativa ZAD 20 y escorias de SiMn. 251
Figura 199: Distintos componentes encontrados tras el examen visual. 256
Figura 200: Granulometría de las purgas. 256
Figura 201: Composición mineralógica de la fracción fina. L-Cal: CaO. 258
Figura 202: Composición mineralógica de la fracción gruesa. C.Calcita: $CaCO_3$; L-Cal: CaO y G-Carbono: C. 258
Figura 203: Aspecto del hormigón reciclado fresco, *Dosificación I*. 261
Figura 204: Asiento del hormigón reciclado, *Dosificación I*. 262
Figura 205: Probeta normalizada en prensa. 263
Figura 206: Hormigón endurecido tras 5 días de curado. 264
Figura 207: Detalle del hormigón endurecido tras 5 días de curado en humedad. 264
Figura 208: Detalle de uno de los descascarillamientos. 265

Figura 209: Detalle de un proceso de expansión tras 5 días de curado en humedad. 265
Figura 210: Probeta tras10 días de curado. 265
Figura 211: Descascarillamiento tras10 días de curado. 266
Figura 212: Estado del hormigón tras10 días de curado. 266
Figura 213: Los Ángeles escorias negras GSW. 21
Figura 214: Densidad aparente y porosidad escoria de ferrosilicomanganeso. 62

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 PROBLEMÁTICA

La fabricación de materiales elementales en la construcción de obras civiles implica la utilización de grandes cantidades árido natural. Esto supone que este recurso sea cada vez más escaso, dificultando así su obtención y de forma inherente encareciendo el material y las obras ejecutadas. Otra consecuencia negativa es la necesidad de apertura de nuevas canteras, afectando sobre el paisaje y dando la posibilidad de provocar un impacto ambiental negativo.

Por otra parte, la reglamentación ambiental actual implica tratamientos de los residuos industriales generados en los diferentes procesos de fabricación que suponen un coste muy elevado encareciendo el proceso productivo y repercutiendo finalmente en el precio del producto.

La convergencia de estos dos factores nos lleva a que aquellas acciones encaminadas a una mejora medioambiental lleven asociado también un beneficio económico. Por lo tanto, el estudio de la valorización de residuos en otros procesos productivos es una línea de investigación con elevado interés, tanto económico como medioambiental.

Esta Tesis Doctoral se desarrolla en esta línea, estudiando el empleo de residuos no peligrosos generados en industrias de diferentes sectores, siderúrgico y químico, como complemento o sustitución de los áridos naturales en la fabricación de materiales necesarios en la construcción de obras civiles.

A modo de ejemplo, en Cantabria los residuos industriales susceptibles de ser valorizados como áridos reciclados son aproximadamente medio millón de toneladas anuales, lo que representa un 17% frente a los 3 millones de toneladas anuales de árido natural consumidas en la región.

PROCEDENCIA	**RESIDUO INDUSTRIAL**	**Toneladas anuales**
Global Steel Wire	Escorias Negras	110.000
	Escorias Blancas	20.000
Sidenor Gerdau	Escorias Negras	60.000
	Escorias Blancas	10.000
Ferroatlantica	Escorias ferroferrosilicomanganeso	75.000
Solvay	Purgas calcinación caliza	70.000
Saint Gobain	Escoria fundición	12.000
Nissan Motor ibérica y otras	Arenas de moldeo	30.000
Industria de la construcción	Residuos de Construcción y demolición	90.000
	Total	**477.000**

Tabla 1: Residuos industriales valorizables como áridos reciclados (Elaboración propia)

1.2 OBJETIVO

El principal objetivo que persigue esta Tesis Doctoral es estudiar el posible empleo de residuos procedente de diferentes procesos industriales en la construcción de obras civiles.

Se analizan los residuos desde los puntos de vista legislativo, técnico y económico.

Desde el punto de vista legislativo medioambiental se consideran las limitaciones de uso de los diferentes residuos encaminadas a la protección del medioambiente y se plantean aplicaciones que salvaguarden el cumplimiento de las mismas.

Desde el punto de vista técnico se analiza la viabilidad de los áridos reciclados producidos a partir de estos residuos considerando el cumplimiento de la diferente reglamentación técnica de ámbito nacional.

Desde el punto de vista económico se analizan residuos que atendiendo a criterios de disponibilidad y viabilidad de valorización sean competitivos frente a los áridos naturales.

Conjugando criterios relativos a los puntos de vista anteriores se pretenden estudiar los residuos de diferentes industrias para su aplicación en firmes de carreteras, base, subbases, explanadas, mezclas bituminosas y en hormigones.

Se plantean los siguientes objetivos parciales:

1. Estudio de las escorias negras de arco eléctrico para la producción de áridos siderúrgicos para fabricación de mezclas bituminosas y hormigones.
2. Estudio de escorias de ferrosilicomanganeso para la producción de zahorras artificiales.
3. Estudio de residuos de calcinación de la caliza (“Purgas”) en la fabricación de hormigones.
4. Análisis del seguimiento de los resultados de las obras experimentales realizadas con los mezclas asfálticas y hormigones. Estudio estadístico del coeficiente de rozamiento transversal (CRT), de la textura y del coeficiente de resistencia al deslizamiento (CRD) en pavimentos ejecutados con mezclas bituminosas fabricadas con escorias negras.

1.3 METODOLOGÍA DE TESIS

Análisis de las industrias productoras de residuos susceptibles de ser empleadas como áridos reciclados.

Se analizarán las industrias de diferentes sectores para determinar el potencial de sus residuos como sustitutos de los áridos naturales en mezclas bituminosas, en hormigones, en base, sub-bases o explanadas.

En primera instancia se recaba información sobre el tipo de residuo en cuanto a características físicas básicas “at visu”, problemática que pudiera tener su valorización desde el punto de vista técnico, cantidad anual de toneladas que se producen.

Recopilación de información disponible en las empresas productoras.

Se han realizado visitas a las diferentes industrias con el objetivo de recabar cuanta información tengan disponible. Ensayos, caracterizaciones, procesos de valorización que estén empleando, destino del residuo.

Análisis normativo.

Se ha realizado un estudio normativo con el objetivo de determinar las limitaciones en relación al empleo de los diferentes residuos.

Se ha partido de la legislación europea, nacional y por último autonómica.

Estado del arte.

Se ha hecho una búsqueda sobre el estado del arte de cuantos residuos se consideren de interés.

Se pretende disponer de la información de las experiencias sobre el empleo de estos residuos de forma que se optimice el estudio objeto de tesis, orientado al trabajo conforme las experiencias previas y priorizando el estudio de incertidumbres no resueltas plenamente.

Priorización.

De los residuos analizados se ha realizado una priorización, con el objetivo de estudiar los que tengan mayores probabilidades de éxito desde el punto de vista económico. Los parámetros fundamentales han sido: toneladas disponibles, experiencia previa, estado del arte, limitaciones normativas y facilidad de valorización.

Caracterización física, química y mecánica de los residuos.

Con el objetivo de determinar las propiedades intrínsecas de los diferentes residuos y evaluar el potencial de valorización en los diferentes productos a fabricar/construir (mezclas bituminosas, hormigones, bases y explanadas), se procederá a la caracterización física, química y mecánica de los residuos. Para ello en alguno de los casos se realizará una transformación previa a áridos clasificados mediante molienda y cribado.

Toma de decisión y segunda priorización.

En vista de los resultados obtenidos de las caracterizaciones, se ha determinado el posible uso de cada uno de los áridos procedentes de cada uno de los residuos. En función de las características a base, sub-bases o explanadas los de peor calidad y a mezclas bituminosas o/y hormigones los áridos más competentes.

Se ha realizado una nueva priorización de los residuos estudiados atendiendo a los de mayores probabilidades de éxito.

Pruebas piloto de valorización de residuos.

Se ha procedido a realizar pruebas piloto de producción de áridos reciclados con el objetivo de evaluar la problemática de su valorización.

Se han realizado pruebas de molienda y clasificación con el objetivo de evaluar si los rendimientos son adecuados y en el caso de la molienda, ensayar las propiedades de los áridos resultantes.

Caracterización físico-mecánica.

Se han realizado una nueva caracterización de los áridos resultantes orientada al posterior desarrollo de las formulaciones de mezclas bituminosas y hormigones.

Desarrollo de mezclas bituminosas y hormigones.

Se han desarrollado, en laboratorio, las diferentes mezclas bituminosas y hormigones con los áridos valorizados provenientes de los residuos priorizados.

Pruebas piloto.

Se han ejecutado obras piloto donde podrán ponerse en práctica las fórmulas desarrolladas, tanto en mezclas bituminosas como en hormigones. Se estudiará la problemática de su empleo y se procederá al reajuste de las fórmulas mediante las lecciones aprendidas.

Seguimiento de obras piloto y validación de resultados.

Se ha hecho un seguimiento de las obras piloto ejecutadas con el objetivo de validar las fórmulas desarrolladas.

1.4 CONTENIDOS

Basándose en los objetivos parciales planteados en el apartado anterior, esta Tesis Doctoral se plantea de la siguiente forma:

Capítulo 1. Introducción

Este capítulo incluye la problemática que trata de resolver esta Tesis Doctoral y los objetivos que se plantean.

Capítulo 2. Estado del arte

En este apartado se analiza el marco legislativo actual, se describen brevemente los residuos que se van a estudiar en esta Tesis Doctoral y, finalmente, se recopila información sobre los estudios realizados hasta la fecha que analizan el empleo de estos residuos.

Capítulo 3. Metodología de trabajo

En este capítulo se define la metodología seguida para la caracterización de los áridos, hormigones y mezclas bituminosas estudiadas en esta Tesis Doctoral. Se identifican y explican los ensayos necesarios para una correcta caracterización de las materias primas y de los materiales obtenidos.

Capítulo 4. Empleo de escorias negras

En este capítulo se caracterizan las escorias negras siderúrgicas, estudiando después su aplicabilidad en mezclas bituminosas y hormigones. Se muestra su viabilidad mediante los ensayos de caracterización.

Por otra parte, se realizan dos estudios estadísticos de los valores obtenidos en la caracterización de las escorias negras y de las mezclas bituminosas con ellas fabricadas. En el primero, se analiza y compara el CRT y la textura de pavimentos fabricados con mezclas convencionales y con mezclas fabricadas con áridos siderúrgicos. En el segundo se analizan de forma general todos los datos recogidos a lo largo del capítulo.

Finalmente, en este capítulo se realiza un estudio de la viabilidad económica de una mezcla no convencional AC16 Surf estudiando todo el proceso, desde la producción de las escorias negras en la acería hasta la puesta en obra de la mezcla bituminosa.

Capítulo 5. Empleo de escorias de ferrosilicomanganeso

En este capítulo se caracterizan las escorias de ferrosilicomanganeso y se estudia la posibilidad de utilizarlas como material sustitutivo del árido natural en capas base y subbase. Se realizan los ensayos granulométricos pertinentes para la caracterización de este subproducto y su comparación con las zahorras naturales.

Capítulo 6. Empleo de purgas de calcinación de la caliza

El objetivo de este capítulo es caracterizar el residuo procedente de la calcinación de la caliza y estudiar la aplicabilidad de estas purgas. Se estudia la aplicabilidad de este material en hormigones, sustituyendo el árido natural por este subproducto industrial.

Capítulo 7. Conclusiones generales y futuras líneas de investigación

En este capítulo se presentan en primer lugar las conclusiones de esta Tesis Doctoral para finalmente analizar las posibles futuras líneas de investigación.

Referencias

Se enumeran las diferentes referencias bibliográficas utilizadas a lo largo de la Tesis Doctoral.

Anexos

Incluye el marco legislativo analizado y toda la normativa técnica seguida a la hora de realizar los ensayos. Finalmente se recoge una recopilación de ensayos.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se expone el estado del arte del empleo de diversos residuos industriales en la construcción de obras civiles.

En la primera parte se muestra el marco legislativo que regula el uso de los distintos materiales que van a ser objeto de estudio a lo largo de la Tesis Doctoral. Esta normativa hace referencia a la utilización de residuos industriales, escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, escorias de ferroferrosilicomanganeso y caracterización de los suelos empleados en la construcción de carreteras y hormigones.

En la segunda parte del capítulo, se describen los diferentes tipos de residuos que serán analizados en capítulos posteriores, explicando su proceso de producción y sus características generales.

Como parte final del estudio del estado del arte, se repasa la bibliografía existente donde se estudia la caracterización de los diferentes materiales, así como sus posibles empleos. Se menciona tanto la metodología seguida por los autores, como los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas de sus ensayos.

2.2 MARCO LEGISLATIVO

En los últimos años se ha desarrollado un incremento en la conciencia social en lo que a materia medioambiental se refiere. Esto ha implicado el desarrollo de la legislación existente hasta el momento, así como la redacción de nuevas regulaciones que coincidan con la corriente actual de pensamiento.

Estas regulaciones normativas tratan de definir todos los individuos, organismos, procesos y mecanismo involucrados a lo largo de la vida de un residuo, desde su generación hasta su reutilización, reciclado, valorización o eliminación.

A continuación, se presenta un resumen de la normativa que ha sido tenida en cuenta en los diferentes estudios presentados en esta Tesis Doctoral. Se resumen la legislación en función del tipo de residuo, clasificándola después según el ámbito de aplicación, ya sea europeo, estatal o regional.

La principal normativa técnica de referencia en la que se ha basado esta Tesis es la siguiente:

- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (PG-3)
- Norma 6.1 IC: Secciones de firmes
- Instrucción de hormigón estructural EHE-08

2.2.1 LEGISLACIÓN ACTUAL SOBRE RESIDUOS INDUSTRIALES

En este apartado se muestra un resumen de la normativa vigente en materia de residuos industriales.

2.2.1.1 Normativa europea. *Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008*

Esta Directiva establece medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos, la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y la mejora de la eficacia de dicho uso.

2.2.1.1.1 Definiciones

En primer lugar hace una serie de definiciones que ayuda a clarificar los términos y procesos que intervienen a lo largo del documento:

Residuo. Cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse.

Gestión de residuos. La recogida, el transporte, la valorización y la eliminación de los residuos, incluida la vigilancia de estas operaciones, así como el mantenimiento posterior al cierre de los vertederos, incluidas las actuaciones realizadas en calidad de negociante o agente.

Tratamiento. Las operaciones de valorización o eliminación, incluida la preparación anterior a la valorización o eliminación.

Valorización. Cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función, en la instalación o en la economía en general.

Subproducto. Una sustancia u objeto, resultante de un proceso de producción, cuya finalidad primaria no sea la producción de esa sustancia u objeto, puede ser considerada como subproducto y no como residuo, únicamente si se cumplen las siguientes condiciones:

a) es seguro que la sustancia u objeto va a ser utilizado ulteriormente;

b) la sustancia u objeto puede utilizarse directamente sin tener que someterse a una transformación distinta de la práctica industrial normal;

c) la sustancia u objeto se produce como parte integrante de un proceso de producción; y

d) el uso ulterior es legal, es decir la sustancia u objeto cumple todos los requisitos pertinentes para la aplicación específica relativos a los productos y a la protección del medio ambiente y de la salud, y no producirá impactos generales adversos para el medio ambiente o la salud humana.

2.2.1.1.2 Jerarquía de residuos

La normativa estable la siguiente jerarquía de residuos que debe servir de orden de prioridad en la legislación y la política sobre la prevención y la gestión de los residuos:

a) prevención;

b) preparación para la reutilización;

c) reciclado;

d) otro tipo de valorización, por ejemplo, la valorización energética; y

e) eliminación.

2.2.1.1.3 Valorización

En lo que a valorización se refiere, la ley establece que los Estados miembros adoptarán las medidas necesarias para garantizar que todos los residuos se sometan a operaciones de valorización, adoptando las medidas necesarias para asegurar que la gestión de los residuos se realizará sin poner en peligro la salud humana y sin dañar al medio ambiente.

También enumera una serie de operaciones de valorización, de las cuales los siguientes procesos son de interés de cara al desarrollo de esta Tesis Doctoral.

- Reciclado o recuperación de metales y de compuestos metálicos (R 4).
- Valorización de componentes utilizados para reducir la contaminación (R 7).
- Almacenamiento de residuos en espera de cualquiera de las operaciones numeradas de R 1 a R 12 (excluido el almacenamiento temporal, en espera de recogida, en el lugar donde se produjo el residuo) (R 13).

2.2.1.1.4 Condición de residuo

La Comisión Europea con la Decisión 2000/532/CE estableció el Catálogo Europeo de Residuos (CER), en el cual se enumeran los materiales que deben ser considerados como residuos y de los cuales las siguientes sustancias son de interés:

- Residuo de la industria del hierro y del acero:
  - Residuos del tratamiento de escorias (10 02 01).
  - Escorias no tratadas (10 02 02).
- Residuos de la fundición de piezas férreas:
  - Escorias de horno (10 09 03).
- Residuos de la construcción y demolición (17).

2.2.1.1.5 Fin de la condición de residuo

Esta Norma Europea estable que determinados residuos dejarán de ser residuos cuando hayan sido sometidos a una operación, incluido el reciclado, y/o la valorización y cumplan los criterios específicos que se elaboren, con arreglo a las condiciones siguientes:

- la sustancia u objeto es usada normalmente para finalidades específicas;
- existe un mercado o una demanda para dicha sustancia u objeto;
- la sustancia u objeto satisface los requisitos técnicos para las finalidades específicas, y cumple la legislación existente y las normas aplicables a los productos; y
- el uso de la sustancia u objeto no generará impactos adversos globales para el medio ambiente o la salud.

2.2.1.2 Normativa española. *Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y Suelos Contaminados*

La normativa estatal repite en su mayor parte a la europea, desarrollando el apartado en el que se definen las competencias de los distintos organismos estatales. Al respecto establece que el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino en colaboración con las Comunidades Autónomas, y si fuera necesario con otros Estados miembros, tomarán las medidas adecuadas, sin perjuicio de la aplicación de la jerarquía de residuos en su gestión, para establecer una red integrada de instalaciones de eliminación de residuos y de instalaciones para la valorización de residuos domésticos mezclados, incluso cuando la recogida también abarque residuos similares procedentes de otros productores, teniendo en cuenta las mejores técnicas disponibles.

2.2.2 LEGISLACIÓN ACTUAL SOBRE EL USO DE ESCORIAS DE HORNO ELÉCTRICO

En este apartado se recoge un resumen de la normativa vigente en materia de valorización de escorias siderúrgicas. Al tratarse de una materia muy específica no existe normativa europea al respecto.

A nivel estatal tampoco existe una legislación específica aplicable, sin embargo, existen fichas técnicas realizadas por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y por los Ministerios de Fomento y de Medioambiente.

En estas fichas técnicas se muestra en primer lugar la situación actual del sector metalúrgico español, indicando los puntos de generación de escorias y los volúmenes producidos anualmente. A continuación se expone un resumen con las principales características físicas, químicas y mecánicas de estos materiales. Finalmente se explican las posibles aplicaciones de estos materiales y las experiencias realizadas hasta la fecha en diferentes puntos del Estado.

En España, la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados establece en su artículo 6 que la determinación de si un residuo ha de considerarse como residuo peligroso o no peligroso, se hará de conformidad con la Lista Europea de Residuos (LER) establecida en la decisión 2000/532/CE de la Comisión, de 3 de mayo de 2000.

En el caso de las escorias de acería de horno de arco eléctrico vienen incluidas en el Capítulo 10, de la Lista Europea de Residuos, correspondiente a “Residuos de procesos térmicos”, con los siguientes códigos:

- 10 02 01 Residuos de tratamiento de escorias.
- 10 02 02 Escorias *no tratadas.*

A continuación se muestra la normativa existente en las diferentes comunidades autónomas donde el empleo de las escorias de horno eléctrico es más habitual, mostrando las diferencias entre unas y otras.

2.2.2.1 Legislación autonómica: Cantabria, Cataluña y País Vasco.

2.2.2.1.1 Introducción

Las Comunidades Autónomas de Cantabria, Cataluña y País Vasco, bajo los Decretos 104/2006 del 19 de octubre, 34/2003 de 18 de febrero y 32/2009 de 24 de febrero respectivamente establecen el régimen jurídico aplicable a la gestión de las escorias, instaurando los requisitos medioambientales y procedimientos administrativos para la valoración de las mismas.

En este documento se analizará detalladamente cada uno de los Decretos en cuanto a los procedimientos técnicos ya que los procedimientos legales, obligaciones, etc. son bastante similares en los tres Decretos.

Los tres Decretos como se ha comentado presentan un trasfondo similar, si bien presentan ciertas diferencias en su utilización y clasificación que serán expuestas en las siguientes líneas.

2.2.2.1.2 Tipos de escorias

El primer aspecto a destacar radica en los artículos de las definiciones donde tanto el Decreto de Cantabria como el de País Vasco clasifican, en un comienzo, los distintos tipos de escoria siderúrgica, siendo el Decreto de Cantabria algo más específico ya que las clasifica en: escorias negras de acería, escorias de ferroaleaciones de ferrosi-licomanganeso y escoria blanca de acería, mientras que País Vasco, las clasifica en escorias blancas y negras únicamente. Por otro lado, el Decreto de Cataluña no realiza distinción alguna entre los distintos tipos de escorias.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las tipologías de escorias siderúrgicas que distingue cada Decreto:

	Decreto 104/2006 C.A. Cantabria	**Decreto 32/2009 C.A. País Vasco**	**Decreto 34/2003 C.A. Cataluña**
Tipos de escorias distinguidas	Escoria negra de acería	Escoria negra	Escoria siderúrgica
	Escoria blanca de acería	Escoria blanca	
	Escoria de ferroaleaciones de ferrosi-licomanganeso		

Tabla 2: Tipos de escorias siderúrgicas diferenciadas por cada Decreto

A continuación, debido a su mayor especificad, se incluyen las definiciones indicadas en el decreto de la Comunidad Autónoma de Cantabria para cada tipo de escoria siderúrgica clasificada:

Escoria negra de acería: capa sobrenadante que se combina con las impurezas del metal fundido en el proceso de fusión de la chatarra y que se separa de la carga líquida por diferencia de densidades.

Escoria de ferroaleaciones de ferroferrosilicomanganeso: material de origen industrial de naturaleza inorgánica que se genera en la fabricación de ferroaleaciones de ferroferrosilicomanganeso de las que se separa por diferencia de densidad. Estas escorias también son conocidas como escorias de ferrosilicomanganeso.

Escoria blanca de acería: capa sobrenadante que se produce durante la operación de afino del acero fundido y que se separa de la carga líquida por diferencia de densidades.

Valorización de escorias: todo procedimiento aplicado, bien por el productor de la escoria, bien por un tercero, que permita el aprovechamiento de los recursos contenidos en las escorias y específicamente la obtención, a partir de las mismas, de materiales inorgánicos sustitutivos de los áridos naturales, y todo ello sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar procedimientos ni métodos que puedan causar perjuicios al medio ambiente.

Escoria valorizada: aquella escoria que ha sido sometida a un proceso de valorización. En relación con el fin de la condición de residuo de la escoria

valorizada se estará a lo dispuesto en el artículo 5 de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

2.2.2.1.3 Valorización de escorias

Pasando al procedimiento de valorización de escorias, los tres Decretos indican la necesidad de hacer un test de lixiviado para poder determinar si las escorias son valorizables o no valorizables. Para ello lo que se realiza es una comparación de los distintos tipos de componentes químicos que aparecen en los análisis con los valores aceptados por el Decreto en cuestión.

A continuación se muestra una tabla que combina las restricciones de las tres Comunidades Autónomas.

Determinación	Decreto 104/2006	Decreto 32/2009		Decreto 34/2003
	C.A. Cantabria	C.A. País Vasco		C.A. Cataluña
Uso		En base, sub-base y explanada mejorada en carreteras y vías privadas de tráfico rodado y en proyectos de urbanización de áreas industriales	En capa de rodadura con mezclas bituminosas	
(UNE-EN 12457-4)	Elementos (mg/kg)			
Bario	< 20	<17		<20
Arsénico	< 0,5	<0,5		<0,5
Cadmio	< 0,04	<0,009	0,6	<0,04
Cobre	< 2			<2
Cromo total	< 0,5	<2,6		<0,5
Mercurio	< 0,01			<0,01
Níquel	< 0,4	<0,8		<0,4
Plomo	< 0,5	<0,8		<0,5
Zinc	< 4	<1,2		<4
Molibdeno	< 0,5	<01,3		<0,5
Selenio	< 0,1	<0,007	0,2	<0,1
Antimonio	< 0,06			<0,06
Estaño				
Vanadio		1,3		
Cloruro	< 800			<800
Fluoruro	< 10	<18		<18
Sulfato	< 1000	<377		<1000
Magnesio				
Calcio				
Índice de fenol	< 1			
COD (Carbono Orgánico Disuelto)	< 500			
STD (Sólidos Totales Disueltos)	< 4000			
Parámetros				
pH				
Cond (µs/cm)				
Redox (mV)				

Tabla 3: Comparativa de la composición química de las escorias valorizables para cada decreto.

La tabla anterior presenta ciertas diferencias entre las distintas Comunidades Autónomas que se estudian a continuación.

El Decreto de Cantabria es más específico ya que presenta un mayor número de datos restrictivos que el resto de los Decretos. Exceptuando las variables no rellenadas en la tabla de Cataluña (Índice de fenol, COD, STD), solo existe una diferencia con la Cántabra, la cantidad de Fluoruro admisible, siendo para Cataluña un 80% más permisiva.

Por otro lado, la Comunidad de País Vasco presenta valores completamente distintos a las otras dos Comunidades y a su vez propone distintas restricciones químicas para el análisis de lixiviados en función del uso de las escorias, concretamente, separa por un lado las mezclas bituminosas para la capa de rodadura del resto de los usos.

A continuación se presenta una tabla con los porcentajes de variación de las restricciones de las tablas de las Comunidades Autónomas de País Vasco y de Cataluña respecto de la tabla de restricciones de Cantabria. Se considera el signo negativo si el valor es más restrictivo que el de la Comunidad Autónoma de Cantabria.

	Decreto 32/2009		Decreto 34/2003
	C.A. País Vasco		C.A. Cataluña
	En base, sub-base y explanada mejorada en carreteras y vías privadas de tráfico rodado y en proyectos de urbanización de áreas industriales	En capa de rodadura con mezclas bituminosas	
Bario	-15%		0%
Arsénico	0%		0%
Cadmio	-78%	1400%	0%
Cobre	-100%		0%
Cromo total	420%		0%
Mercurio	-100%		0%
Níquel	100%		0%
Plomo	60%		0%
Zinc	-70%		0%
Molibdeno	160%		0%
Selenio	-93%	100%	0%
Antimonio	-100%		0%
Cloruro			0%
Fluoruro	80%		80%
Sulfato	-62%		0%

Tabla 4: Porcentajes de variación de la restricción de la composición química de los Decretos con respecto al Cántabro.

Se puede apreciar que en general la tabla de País Vasco, para *En base, sub-base y explanada mejorada en carreteras y vías privadas de tráfico rodado y en proyectos de urbanización de áreas industriales,* presenta valores más restrictivos; sin embargo, para *capa de rodadura con mezclas bituminosas* presenta valores muchísimo más permisivos llegando en el caso de concentraciones de cadmio que presenta una permisividad superior de un 1400%.

Una vez se ha realizado el test de lixiviación, descrito anteriormente, y el cual tiene una periodicidad distinta para cada Comunidad Autónoma pero con rangos temporales similares, si el análisis químico se encuentra dentro de los valores permitidos, indicados en la *tabla 8*, las escorias analizadas pasan a ser **valorizables**.

En caso contrario:

- El Decreto de la Comunidad de Cantabria indica que dichas escorias no son valorizables.
- En cambio el Decreto de la Comunidad de Cataluña indica que si los resultados de los análisis realizados superan los valores de la tabla de restricciones químicas, se permite el almacenamiento bajo unas condiciones específicas, durante un plazo no superior a doce meses a contar desde la fecha de su producción. Transcurrido este plazo se debe realizar un nuevo análisis.

  Si de los resultados se desprende que se cumplen los límites establecidos, se considerarán escorias siderúrgicas valorizables. En caso contrario se considerarán escorias siderúrgicas no valorizables.
- El Decreto de País Vasco no hace referencia a ninguna excepción al respecto por lo que se sobreentiende que presenta los mismos procedimientos que el Decreto de Cantabria. Si bien podría considerarse como excepción el caso de que los resultados para el análisis de escorias para bases, sub-bases y explanadas mejoradas diesen negativos ya que podría realizarse el análisis posteriormente para su utilización en mezclas bituminosas en capa de rodadura que resulta ser mucho menos restrictivo.

A continuación se presenta un diagrama de flujo que aclara el procedimiento de cada Comunidad Autónoma a la hora de analizar si son o no valorizables las escorias testeadas.

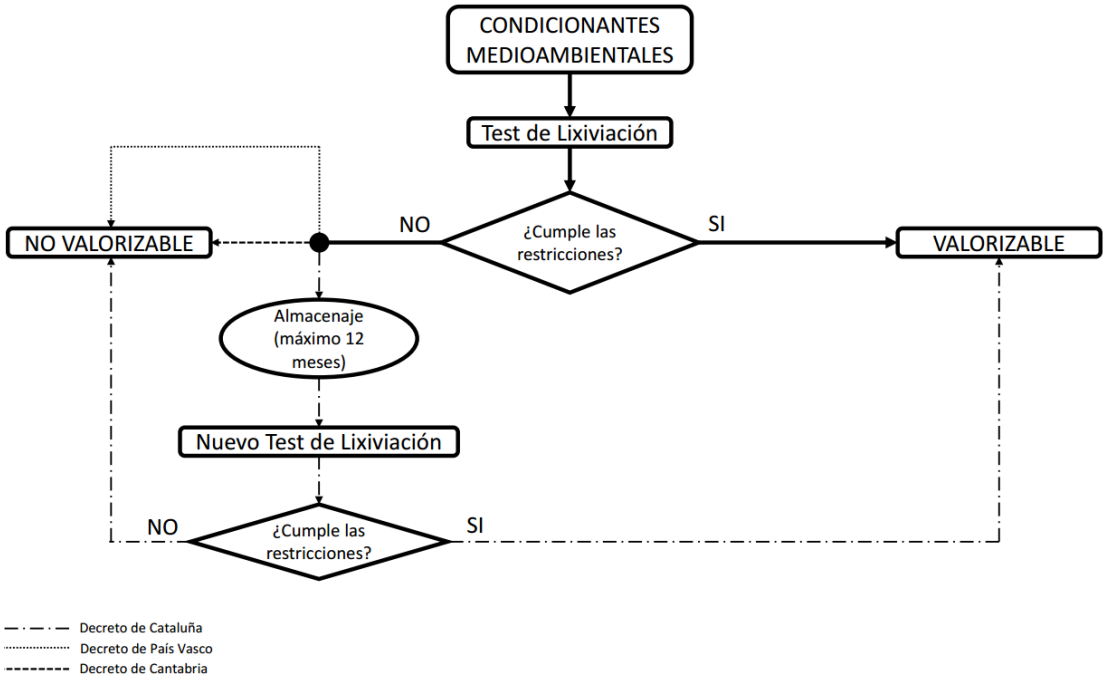


Figura 1: Diagrama de flujo de valorización

2.2.2.1.4 Usos admisibles de las escorias

Una vez se ha determinado si las escorias son o no valorizables, se indica que las no valorizables deberán ser gestionadas a través de su depósito en vertedero debidamente autorizado de acuerdo con su clasificación según la normativa vigente. En cuanto a las valorizables, se debe analizar ahora los usos admisibles en cada Decreto.

Usos admisibles de escorias negras

Usos de las escorias según el Decreto 104/2006 del 19 de octubre Cantabria

Este Decreto realiza distinciones en cuanto al tipo de escorias. A continuación se indican los usos admisibles para las escorias negras.

	Decreto 104/2006		
	C.A. Cantabria		
	COMO PRODUCTO FINAL		**COMO MATERIA PRIMA**
Usos Admisibles	En capas estructurales de firme de carreteras, vías públicas o privadas de tráfico rodado	Capa de pavimento (Mezcla bituminosa)	Cemento
		Base	Hormigón
		Explanada de apoyo	Otros usos autorizados por la Dirección General de Medio Ambiente
	Urbanización de áreas industriales y comerciales		
	Otros usos autorizados por la Dirección General de Medio Ambiente		

Tabla 5: Tabla resumen usos escorias en Decreto Cántabro.

Usos de las escorias según el Decreto 34/2003 de 18 de febrero Cataluña

	Decreto 34/2003		
	C.A. Cataluña		
	COMO PRODUCTO FINAL		**COMO MATERIA PRIMA** (Ver artículo 29 del Decreto 93/1999)
Usos Admisibles	Carreteras, vías públicas o privadas de tráfico rodado	Base	Cemento
		Sub-base	Hormigón
		Explanada mejorada	
	Urbanización de áreas industriales		
	Estabilización física de suelos		
	Nivelación de terrenos y terraplenes		
	Relleno y restauración de áreas degradadas por actividades extractivas sobre suelos arcillosos o en restauración de arcillas		
	Subbalasto de vías férreas		
	Relleno del interior de cajones de hormigón cerrados en diques de obras portuarias		
	Capa de asentamiento en el sellado de depósitos controlados		
	Cubrimiento de pistas del interior del vaso de deposición		

Tabla 6: Tabla resumen usos escorias en Decreto Catalán.

Usos de las escorias según el Decreto 32/2009 de 24 de febrero País Vasco

Este Decreto realiza distinciones en cuanto al tipo de escorias. A continuación se indican los usos admisibles para las escorias negras.

	Decreto 32/2009		
	C.A. País Vasco		
	COMO PRODUCTO FINAL		COMO MATERIA PRIMA
Usos Admisibles	En capas estructurales de firme de carreteras, vías públicas o privadas de tráfico rodado	capa de rodadura (mezclas Bituminosas)	Cemento
		Base	Hormigón
		Sub-base	
		Explanada Mejorada	
	Urbanización de áreas industriales		
	Material de cubrición de vertederos y pistas provisionales en su interior		

Tabla 7: Tabla resumen usos escorias en Decreto País Vasco.

Usos admisibles de las escorias blancas

Los usos admisibles para las escorias blancas solo se indican en el Decreto de la Comunidad Autónoma de Cantabria y la del País Vasco, indicando en ambos Decretos la utilización exclusiva como materia prima para la fabricación de cemento. Por otro lado el Decreto de la Comunidad Autónoma de Cantabria indica la posibilidad de emplearse en otros usos bajo autorización previa de la Dirección General de Medio Ambiente.

Conclusiones usos admisibles escorias negras

Como se puede apreciar los Decretos de País Vasco y Cantabria realizan una doble clasificación, por un lado se centran en el tipo de escorias, en este caso las escorias negras, y por otro lado se centran en si se utilizan como producto final o como objeto de una transformación posterior.

El Decreto de Cataluña en este aspecto no realiza la clasificación del tipo de escorias y, en cuanto al aspecto de utilización de las escorias como materia prima, menciona el cemento y el hormigón pero regulando las condiciones de su uso según el artículo 29 del Decreto 93/1999.

La utilización de las escorias como materia prima para hormigón y cemento es considerado en los tres Decretos, pero solo el Decreto de la Comunidad Autónoma de Cantabria incluye específicamente la posibilidad de utilización, para otros materiales, bajo la aprobación de la Dirección General de Medio Ambiente

Por otro el Decreto Catalán proporciona más usos admisibles incluyendo por ejemplo el subbalasto en vías férreas, rellenos de cajones de diques, etc. (*ver Tabla 10*), por lo tanto en este aspecto el Decreto de la Comunidad Autónoma de Cataluña es más específico y menos restrictivo. A esta Comunidad la sigue la Comunidad Autónoma de País Vasco que expone más usos admisibles que la Comunidad Autónoma de Cantabria que es la más restrictiva en este aspecto,

aunque indica que podrían incluirse nuevos usos admisibles bajo la aprobación de la Dirección General de Medio Ambiente.

Finalmente, una vez se han determinado los usos admisibles para cada Comunidad Autónoma hay que analizar las condiciones restrictivas para cada uso. Posteriormente si se ha cumplido con todos los aspectos anteriores, las escorias podrán utilizarse.

2.2.2.1.5 Condiciones de uso de escorias

Condiciones de Uso de las escorias según el Decreto 104/2006 del 19 de octubre Cantabria

	Condiciones de uso	
	Decreto 104/2006	
	C.A. Cantabria	
	Condición	Excepción
Utilización para capas de firme	< 70cm de espesor en escorias +Capa de rodadura	En mezclas, el espesor es corregible al alza en función del porcentaje de escorias
Utilización para estabilización de suelos		
Utilización en la urbanización de áreas industriales	Todas las condiciones y además con capa superior impermeable	
Utilización en la urbanización de áreas comerciales		
Utilización para nivelación terrenos-terraplenes		
Utilización en zonas inundables	NO se pueden utilizar	Autorización de la Dirección General de Medio Ambiente + Análisis de Riesgos
Utilización en zonas de acuíferos protegidos o con alta vulnerabilidad		
Utilización en espacios naturales protegidos	NO se pueden utilizar	
Utilización en proximidad a nivel freático		
Utilización en proximidad a pozos		
Utilización para relleno y restauración de áreas degradadas sobre suelos arcillosos		
Utilización para subbalasto de vías férreas		
Utilización para cemento u hormigón		

Tabla 8: Tabla resumen condiciones de usos de escorias en Decreto Cántabro.

Condiciones de uso de las escorias según el Decreto 34/2003 de 18 de febrero Cataluña

	Condiciones de uso	
	Decreto 34/2003	
	C.A. Cataluña	
	Condición	Excepción
Utilización para capas de firme	< 70cm de espesor en escorias +Capa de rodamiento asfáltico, hormigón o capa impermeable superficial	En mezclas, el espesor es corregible al alza en función del porcentaje de escorias
Utilización para estabilización de suelos		
Utilización en la urbanización de áreas industriales		
Utilización en la urbanización de áreas comerciales		
Utilización para nivelación terrenos-terraplenes	grueso máximo de escorias de 1 m por término medio cada 1.000 m² de extensión, sin sobrepasar los 2 m de altura y siempre que la superficie sea recubierta después con una capa impermeable	En mezclas, el grueso de 2 m de altura se puede corregir al alza en función del porcentaje de escorias
Utilización en zonas inundables	No se utilizan si nos encontramos en la zona inundable bajo periodos de retornos de 100 años	Autorización de la Agencia de Residuos de Cataluña + Informe favorable de la Agencia Catalana de Agua
Utilización en zonas de acuíferos protegidos o con alta vulnerabilidad		
Utilización en espacios naturales protegidos		
Utilización en proximidad a nivel freático	No utilizables si NF < 2,5 m	Autorización de la Agencia de Residuos de Cataluña + Informe favorable de la Agencia Catalana de Agua
Utilización en proximidad a pozos	No utilizables si la distancia al pozo <100m	Autorización de la Agencia de Residuos de Cataluña + Informe favorable de la Agencia Catalana de Agua
Utilización para relleno y restauración de áreas degradadas sobre suelos arcillosos	Obligatoria sellado adecuado de la superficie y un drenaje de las aguas pluviales	
Utilización para subbalasto de vías férreas	Espesor escoria <50 cm, confinada, + Cubrimiento superficial impermeable + recubrimiento superior de balasto	
Utilización para cemento u hormigón	regulado en el artículo 29 del Decreto 93/1999, de 6 de abril	

Tabla 9: Tabla resumen condiciones de usos de escorias en Decreto Catalán.

Condiciones de uso de las escorias según el Decreto 32/2009 de 24 de febrero País Vasco

	Condiciones de uso	
	Decreto 32/2009	
	C.A. País Vasco	
	Condición	Excepción
Utilización para capas de firme	< 70cm de espesor en escorias +Capa de rodadura	En mezclas, el espesor es corregible al alza en función del porcentaje de escorias
Utilización para estabilización de suelos		
Utilización en la urbanización de áreas industriales	Todas las condiciones y además con capa superior impermeable	
Utilización en la urbanización de áreas comerciales		
Utilización para nivelación terrenos-terraplenes		
Utilización en zonas inundables	No se utilizan si nos encontramos en la zona inundable bajo periodos de retornos de 100 años Plan Integral de Prevención de Inundaciones del País Vasco	
Utilización en zonas de acuíferos protegidos o con alta vulnerabilidad	En conformidad con lo previsto en los Planes Territoriales Sectoriales de Protección de Cauces y Arroyos de la Comunidad Autónoma del País Vasco	Autorización bajo la presentación de un estudio hidrogeológico y de un análisis de riesgos
Utilización en espacios naturales protegidos	Regulado por la Ley 16/1994, de 30 de junio, sobre Conservación de la Naturaleza del País Vasco y por la Ley 5/1989, de 6 de julio, de Protección y Ordenación de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai.	
Utilización en proximidad a nivel freático		
Utilización en proximidad a pozos		
Utilización para relleno y restauración de áreas degradadas sobre suelos arcillosos		
Utilización para subbalasto de vías férreas		
Utilización para cemento u hormigón		

Tabla 10: Tabla resumen condiciones de usos de escorias en Decreto de País Vasco.

Conclusiones condiciones de uso de las Escorias

Tal y como ya se indicó en el apartado de usos admisibles, el Decreto de la Comunidad Autónoma de Cataluña presenta un mayor número de usos por lo tanto también se ven reflejados en las tablas anteriores.

A continuación se realizará una comparación de las condiciones de uso de las escorias, comunes para los tres Decretos.

	Condiciones de uso Decreto 104/2006 C.A. Cantabria		Condiciones de uso Decreto 32/2009 C.A. País Vasco		Condiciones de uso Decreto 34/2003 C.A. Cataluña	
	Condición	Excepción	Condición	Excepción	Condición	Excepción
Utilización para capas de firme	< 70cm de espesor en escorias +Capa de rodadura	En mezclas, el espesor es corregible al alza en función del porcentaje de escorias	< 70cm de espesor en escorias +Capa de rodadura	En mezclas, el espesor es corregible al alza en función del porcentaje de escorias	< 70cm de espesor en escorias +Capa de rodamiento asfáltico, hormigón o capa impermeable superficial	En mezclas, el espesor es corregible al alza en función del porcentaje de escorias
Utilización en la urbanización de áreas industriales	Todas las condiciones y además con capa superior impermeable		Todas las condiciones y además con capa superior impermeable			
Utilización en zonas inundables	NO se pueden utilizar	Autorización de la Dirección General de Medio Ambiente + Análisis de Riesgos	No se utilizan si nos encontramos en la zona inundable bajo periodos de retornos de 100 años.		No se utilizan si nos encontramos en la zona inundable bajo periodos de retornos de 100 años.	Autorización de la Agencia de Residuos de Cataluña + Informe favorable de la Agencia Catalana de Agua
Utilización en zonas de acuíferos protegidos o con alta vulnerabilidad			En conformidad con lo previsto en los Planes Territoriales Sectoriales de Protección de Cauces y Arroyos de la Comunidad Autónoma del País Vasco	Autorización bajo la presentación de un estudio hidrogeológico y de un análisis de riesgos		
Utilización en espacios naturales protegidos	NO se pueden utilizar		Regulado por la Ley 16/1994, de 30 de junio, y por la Ley 5/1989,de 6 de julio,			

Tabla 11: Tabla resumen conclusiones de las condiciones de uso.

Por un lado, en cuanto a la utilización de las escorias para las distintas capas de firme todas las normativas coinciden pero, la Catalana, especifica con más detalle la tipología de la capa que se debe colocar sobre las escorias (*Capa de rodamiento asfáltico, hormigón o capa impermeable superficial*), mientras que los otros dos Decretos indican que se deberá disponer de una capa de rodadura superior.

Siguiendo en orden descendente los usos de las tablas anteriores, para la utilización en urbanización de áreas industriales el Decreto Catalán asume que se deben utilizar las mismas condiciones que para las capas de firme, en cambio, el Decreto Cántabro y de País Vasco añade a las condiciones utilizadas para las capas de firme, la necesidad de incluir una capa superior impermeable.

En el caso de encontrarnos en zonas inundables, para Cantabria no se podrán emplear salvo la autorización de la Dirección General de Medio Ambiente que deberá pedir un análisis de riesgos previo. En este aspecto los Decretos de País Vasco y Cataluña son algo más específicos indicando el periodo de retorno considerado para el conocimiento del área de inundación y ambos coinciden en 100 años. Por otro lado la Comunidad Autónoma de Cataluña admite la excepción si se emite un Informe favorable de la Agencia Catalana de Agua que permita una Autorización por parte de la Agencia de Residuos de Cataluña. La Comunidad Autónoma de País Vasco no indica ninguna excepción.

Al igual que para las zonas inundables Cantabria establece las mismas condiciones para zonas de acuíferos protegidos o de alta y muy alta vulnerabilidad. La Comunidad Autónoma de País Vasco indica que se rige según lo previsto en los Planes Territoriales Sectoriales de Protección de Cauces y Arroyos de la Comunidad Autónoma del País Vasco. La Comunidad Autónoma de Cataluña no indica nada al respecto.

Finalmente para los espacios naturales protegidos, salvo Cataluña que no menciona nada al respecto en el Decreto, la Comunidad Autónoma de Cantabria indica que no se pueden utilizar escorias y el Decreto del País Vasco se rige por las Leyes 16/1994, de 30 de junio, y Ley 5/1989, de 6 de julio.

2.2.2.1.6 Condiciones técnicas de las instalaciones de tratamiento y almacenamiento de escorias siderúrgicas

En cuanto a las condiciones técnicas de las instalaciones, se debe destacar que el Decreto Catalán es el más específico ya que presenta unas condiciones más definidas que el resto de Decretos. El Decreto de Cantabria también presenta una alta definición en este aspecto aunque algo menor que el Decreto de Cataluña. Por último, hay que destacar que el Decreto de País Vasco es el menos específico en cuanto a las condiciones técnicas de las instalaciones de tratamiento y almacenamiento de escorias siderúrgicas.

A continuación se presenta, a modo de comparación, una tabla que resume las condiciones especificadas de cada Decreto.

	C.A. Cantabria	C.A. Cataluña	C.A. País Vasco
Condiciones de diseño	X	X	X
Vías de circulación pavimentadas y dimensionadas por número y carga de los vehículos	X	X	X
Zonas de almacenaje con resistencia para circulación de vehículos(pavimentado)	X	X	
Diseño adecuado de zonas de maniobras y parking	X		X
Diseño adecuado para conducción de aguas pluviales	X		X
Balsa de decantación de almacenaje de agua durante 20 min con periodo de retorno de 10 años	X	X	X
Condiciones de atenuación de ruidos y emisiones de polvo	X	X	X
Limpieza de ruedas de camiones a su salida	X	X	X
Entorno limpio y acondicionado	X	X	
Vallado perimetral opaco		X	
Prohibición al depósito de escorias en el aparcamientos o zonas de circulación. (siempre limpio)	X	X	
Cubrir la carga de los camiones a su salida		X	
Almacenaje de materiales polvorientos en silos, naves cerradas o zonas orientadas a sotavento		X	
Muros de contención para materiales susceptibles de emitir polvo situados al aire libre		X	
Rociado de agua si procede para materiales susceptibles de emitir polvo		X	
Los equipos mecánicos susceptibles de emitir polvo deberán disponer de una estanqueidad máxima y si procede situarse en recinto cerrado con sistema de depuración		X	

Tabla 12: Tabla resumen condiciones técnicas de las instalaciones de tratamiento y almacenamiento de escorias siderúrgicas.

Aunque se presentan algunas diferencias en la forma de indicar las condiciones en cuanto al diseño, se puede apreciar que son similares en los tres decretos. Por otro lado Las condiciones de atenuación de ruidos si presentan mayor diferencia ya que el Decreto de País Vasco indica de forma genérica las medidas que se deben tomar para este factor, mientras que los dos Decretos restantes (Cantabria y Cataluña) son más detallados indicando las medidas concretas de atenuación condicionantes.

2.2.2.1.7 Diagrama de flujo del proceso completo

A continuación se presenta el diagrama de flujo del proceso completo partiendo del análisis de las escorias según el test de lixiviación.

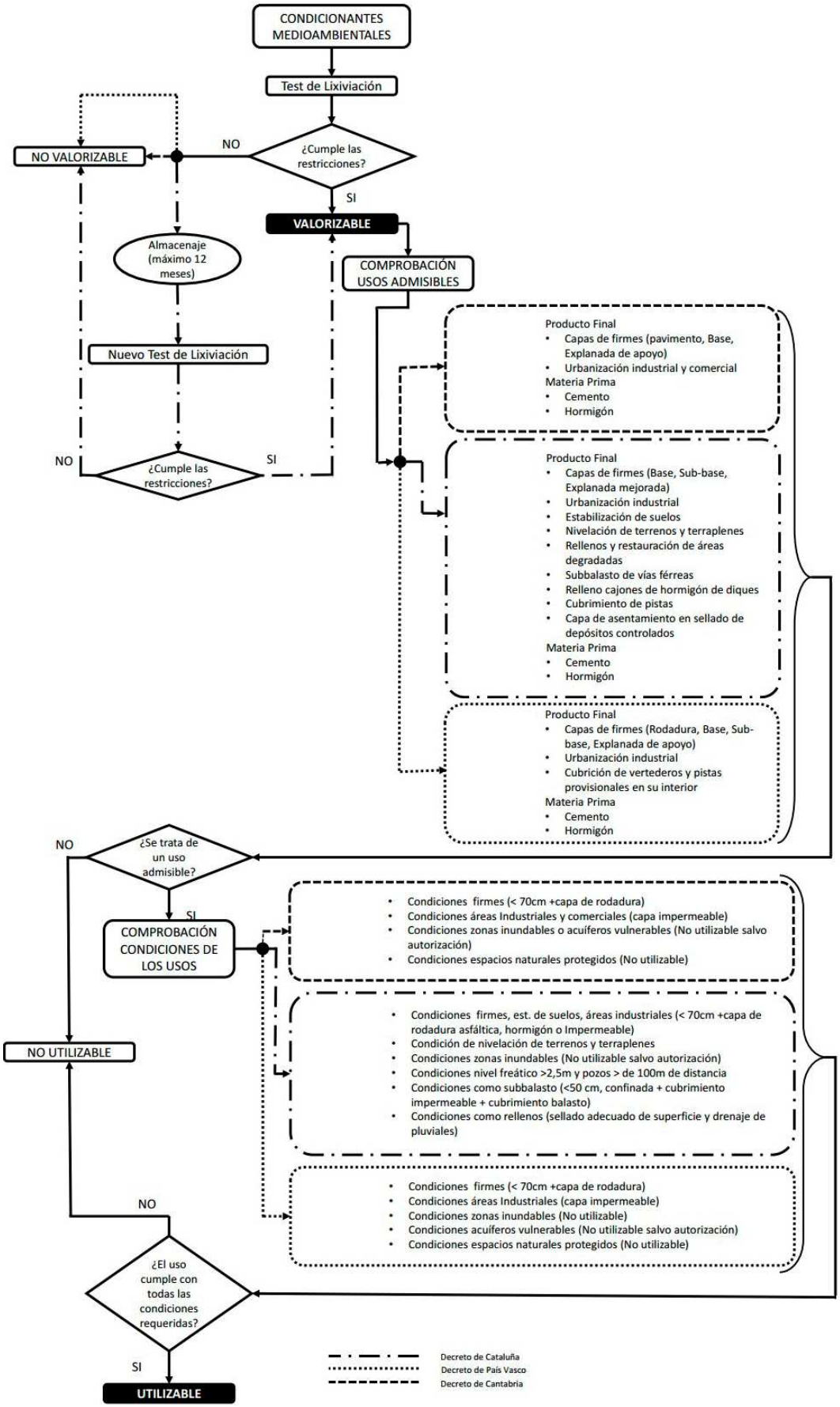


Figura 2: Diagrama de flujo de valorización, usos y condiciones de uso de las escorias

2.2.3 NORMATIVA DE SUELOS EN CARRETERAS

A continuación se recogen las especificaciones recogidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (PG-3) para la clasificación de suelos y de explanadas, así como la normativa ASTM y la AASHTO por ser unos métodos de clasificación de suelos ampliamente utilizados.

2.2.3.1 Clasificación de suelos

La clasificación de suelos se basa principalmente en determinar la granulometría y plasticidad de los materiales a utilizar. También existen otros parámetros importantes a considerar como son las propiedades mecánicas y químicas de los suelos.

Las clasificaciones antes mencionadas para la clasificación de suelos son las siguientes:

2.2.3.1.1 Clasificación española: PG-3

El Pliego de Prescripciones Técnicas Generales clasifica los materiales desde el punto de vista de sus características intrínsecas. Esta normativa clasifica los suelos que vayan a ser empleados en terraplenes en cinco grupos distintos en función de su granulometría, plasticidad, hinchamiento, colapso y cantidad de materia orgánica entre otros. Una vez clasificado el material mediante esta técnica, la norma indica en qué zonas pueden ser utilizados los suelos: coronación, núcleo, espaldón, cimiento, etc.

Los cinco grupos en los que el PG-3 clasifica los suelos y algunas de sus características que los definen son los siguientes:

<table>
<tr><th></th><th>D_{max}</th><th colspan="3">Granulometría</th><th>LL</th><th>IP</th><th>Colapso</th><th>Hinchamiento libre</th></tr>
<tr><td rowspan="3">Seleccionado</td><td rowspan="3">≤ 100</td><td colspan="3">#0,40 < 15%</td><td>-</td><td>-</td><td rowspan="3">-</td><td rowspan="3">-</td></tr>
<tr><td colspan="5">o</td></tr>
<tr><td>#2 < 80%</td><td>#0,40 <75%</td><td>#0,08 < 25%</td><td>< 30</td><td>< 10</td></tr>
<tr><td>Adecuado</td><td>≤ 100</td><td>#2 < 80%</td><td>#0,08 < 35%</td><td></td><td>< 40</td><td>> 4 (si LL > 30)</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Tolerable</td><td>-</td><td colspan="3">-</td><td>< 65</td><td>> 0,73·(LL-20) (Si LL> 40)</td><td>< 1%</td><td>< 3%</td></tr>
<tr><td>Marginal</td><td>-</td><td colspan="3">-</td><td>-</td><td>> 0,73·(LL-20) (Si LL> 90)</td><td>-</td><td>< 5%</td></tr>
<tr><td>Inadecuado</td><td colspan="8">- Los que no se puedan incluir en las categorías anteriores.
- Las turbas y otros suelos que contengan materiales perecederos u orgánicos.
- Los que puedan resultar insalubres para las actividades que sobre los mismos se desarrollen.</td></tr>
</table>

Tabla 13: Clasificación de suelos del PG-3.

2.2.3.1.2 Clasificación ASTM

Se trata de un sistema unificado de clasificación, basada en la granulometría para los suelos tipo grava o arena y la plasticidad para los finos. Con este método los suelos se clasifican en tres grandes grupos:

- Suelos de grano grueso.
- Suelos de grano fino.
- Suelos de estructura orgánica.

2.2.3.1.3 Clasificación AASHTO

Esta clasificación está basada en la granulometría y plasticidad de los materiales. La clasificación AASHTO diferencia de manera muy general entre materiales granulares y materiales limo-arcillosos. Establece grupos y subgrupos obteniendo una clasificación final del suelo entre excelente y malo.

2.2.3.2 Clasificación de explanadas

Según la "Norma 6.1 IC: Secciones de firmes", a la hora de definir la estructura del firme en cada caso, se establecen tres categorías de explanada, denominadas E1, E2 y E3. Estas categorías se determinan según el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (Ev2), obtenido de acuerdo con la NLT-357 "Ensayo de carga con placa ", cuyos valores se recogen en la siguiente tabla.

Categoría de la Explanada	E1	E2	E3
E_{V2} (MPa)	≥ 60	≥ 120	≥ 300

Tabla 14: Módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga.

Según la categoría de explanada que queramos conseguir, la formación de ésta se ejecutará como se muestra en la siguiente figura. Los distintos modos de ejecución serán función del suelo de la explanación o de la obra de tierra subyacente, y de las características y espesores de los materiales disponibles.

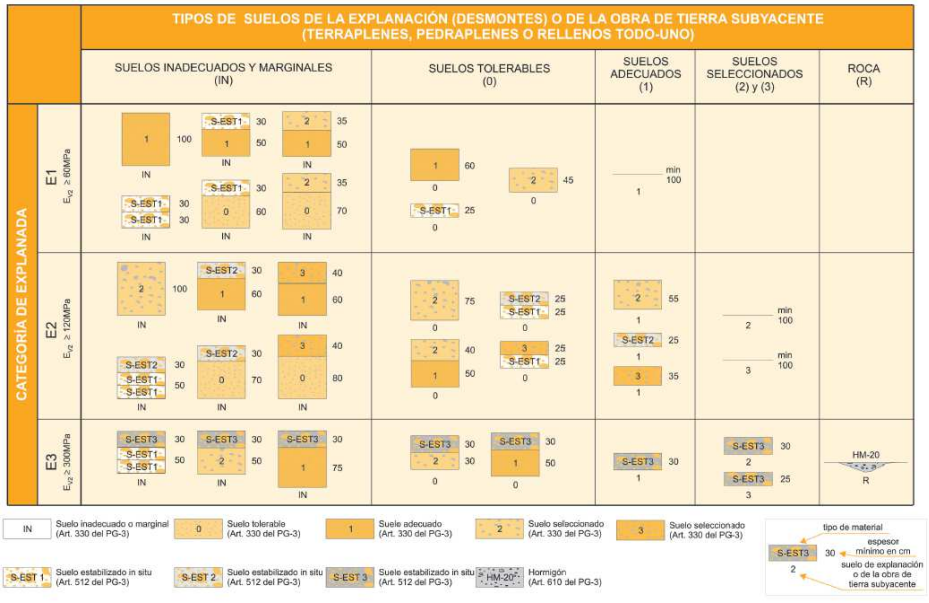


Figura 3: Formación de la explanada.

En la siguiente tabla se relacionan los materiales utilizables en la formación de la explanada, para los que el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares deberá incluir las prescripciones complementarias que se indican. Las explanadas construidas con materiales diferentes de los considerados (residuos, subproductos, etc.) serán clasificadas, cuando sea posible, por analogía y, en otro caso, mediante un estudio específico.

Símbolo	Definición del material	Artículo del PG-3	Prescripciones complementarias
IN	Suelo inadecuado o Marginal	330	- Su empleo sólo será posible si se estabiliza con cal o con cemento para conseguir S-EST1 o S-EST2
0	Suelo tolerable	330	- CBR ≥ 3. - Contenido en materia orgánica < 1%. - Contenido en sulfatos solubles (SO_3) < 1%. - Hinchamiento libre < 1%.
1	Suelo adecuado	330	- CBR ≥ 3.
2	Suelo seleccionado	330	- CBR ≥ 3.
3	Suelo seleccionado	330	- CBR ≥ 3.
S-EST1 S-EST2 S-EST3	Suelo estabilizado *in situ* con cemento o cal	512	- Espesor mínimo: 25 cm. - Espesor mínimo: 30 cm.

Tabla 15: Materiales para la formación de las explanadas.

2.2.3.3 Requerimientos según usos

2.2.3.3.1 Terraplenes

Según el Artículo 330 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) (Orden FOM/1382/2002), se definen los requerimientos a cumplir por los productos procedentes de procesos industriales para su uso como Terraplenes.

Se establece que se pueden utilizar productos procedentes de procesos industriales siempre que se cumplan las especificaciones que se definen en dicho artículo y además, garanticen la estabilidad presente y futura de las características físico-químicas.

Los materiales de los rellenos tipo terraplén cumplirán alguna de las siguientes condiciones granulométricas:

- Porcentaje de material # 20 > 70% UNE-EN 103101
- Porcentaje de material # 0,080 ≥ 35% UNE-EN 103101

2.2.3.3.2 Rellenos localizados de material drenante

En el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (Orden FOM/1382/2002), en el Artículo 421 se definen los requerimientos a cumplir para su uso en rellenos localizados de material drenante por los productos procedentes de procesos industriales para su uso como.

Para su empleo en obras de hormigón, los materiales que provienen de escorias deberán ser aptos. Para materiales de otra naturaleza se seguirán los criterios establecidos en el Proyecto y en el PG-3.

2.2.3.3.3 Clasificación como Zahorra

El Artículo 510 Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) (Orden FOM/2523/2014), se definen los requerimientos a cumplir por el árido siderúrgico para su uso como Zahorra. Especificando en el apartado 510.2.2.1 Características generales, los materiales granulares reciclados, áridos siderúrgicos, subproductos y productos inertes de desecho, cumplirán las prescripciones técnicas de este artículo, se declarará el origen de los materiales de acuerdo con la legislación comunitaria.

Para su uso, las condiciones de tratamiento y aplicación deberán expresarse en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

Los áridos siderúrgicos se han de envejecer durante un mínimo de 3 meses mediante riego de agua y tras proceso de machaqueo, cribado y eliminación de elementos no deseados como metálicos y otros contaminantes.

El árido siderúrgico procedente de horno alto no tendrá desintegración por el silicato bicálcico ni el hierro (UNE-EN 1744-1), tendrá una expansividad inferior al 5% y además, el índice granulométrico de envejecimiento será menor al 1% (NLT-361) y el contenido de cal libre menor al 5‰. El contenido de óxido magnesio será inferior al 5% (UNE-EN 196-2).

En el artículo 510 apartado 510.2.2.3.4 Resistencia a la fragmentación Características generales se recoge que el coeficiente de Los Ángeles podrá superar en 5 unidades los valores que se establecen en la siguiente tabla siempre que su granulometría corresponda a ZAD20.

T00 a T1	**T2 a T4 y ARCENES de T00 a T2**	**ARCENES de T3 y T4**
> 40	> 35	> 30

Tabla 16: Equivalente de arena (SE_4).

CARACTERÍSTICAS		UNIDAD	CATEGORÍA TRÁFICO PESADO	
			T00 a T1	- T2 a T4 y ARCENES
CERNIDOR POR LOS TAMICES UNE-EN 933-2	> 4 mm	% sobre la masa total	- ± 6	- ± 8
	≤ 4 mm		- ± 4	- ± 6
	0,063 mm		- ± 1,5	- ± 2
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN		% respecto de la óptima	- ± 1	- - 1,5/ + 1

Tabla 17: Tolerancias admisibles respecto a la fórmula de trabajo.

Material	Desgaste de Los Ángeles máximo	
	Zahorra artificial	Zahorra natural
Áridos convencionales	30 / 35	35 / 40
Áridos siderúrgicos	35 / 40	40 / 45

Tabla 18: Desgaste de los Ángeles máximo.

Observando la regulación que se utiliza en País Vasco, en el Anejo 4. Áridos siderúrgicos de horno eléctrico para zahorras de la Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco, se definen los requerimientos a cumplir por el árido siderúrgico para su uso como Zahorra, estableciéndose que el suministrador certificará que árido siderúrgico de horno eléctrico proviene de un depósito controlado y que no se ha mezclado con escorias blancas ni otros contaminantes. Incluyendo las condiciones de envejecimiento seguidas por la escoria y los contenidos de CaO libre y MgO total.

El contenido ponderal de sulfatos solubles en agua (UNE-EN 1744-1) para materiales están en contacto con capas tratadas con cemento será inferior al 0,2%, e inferior al 0,7% en los demás casos.

Además indica que árido siderúrgico de horno eléctrico tendrá una expansividad inferior al 5%, con un contenido de cal libre menor al 0,5% (ASTM D 4792) y el resultado del índice granulométrico de envejecimiento será inferior al 1%.

En la composición de la mezcla, cuando se utiliza el árido siderúrgico de horno eléctrico se deberán modificar las siguientes prescripciones que recoge el PG-3:

- La combinación de áridos para zahorra tendrá una expansión inferior al 0,5% con el ensayo ASTM D 4792.
- Se considerara en volumen, teniendo en cuenta que las tablas específicas están en peso.

2.2.4 NORMATIVA DE FIRMES DE CARRETERA

2.2.4.1.1 Pavimentos de hormigón

Los requerimientos a cumplir por el árido siderúrgico para su uso como Pavimentos de hormigón se definen en el artículo 550 Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (Orden FOM/2523/2014). Haciendo referencia a la Instrucción de Hormigón Estructural en el apartado 550.2.2.4. Características generales, indicándose que se cumplirán todas las prescripciones recogidas en ella.

Para pavimentos bicapa se podrán utilizar materiales granulares reciclados, áridos siderúrgicos, subproductos y productos inertes de desecho en la capa inferior si se cumplen las prescripciones del artículo, y declarándose el origen de los materiales.

Se ha de considerar que los áridos no sufran meteorización o alteración físico química apreciable, bajo las condiciones de uso, garantizando la durabilidad a largo plazo ni la aparición de disoluciones que pudieran causar daños en la estructuras del firme ni contaminar corrientes de agua.

En el artículo 550 apartado 550.2.4.2. Árido grueso, se hace referencia la Instrucción de Hormigón Estructural indicándose que se cumplirán todas las prescripciones recogidas en ella.

Si se utiliza árido siderúrgico en la capa de hormigón inferior de los pavimentos bicapa se admitirá un valor del coeficiente de Los Ángeles inferior a 40 (UNE-EN 1097-2).

2.2.4.1.2 Hormigón magro vibrado

Según el artículo 551 Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) (Orden FOM/2523/2014), se definen los requerimientos a cumplir por el árido siderúrgico para su uso como hormigón magro vibrado, estableciéndose lo mismo que lo indicado anteriormente de manera que la correspondencia sería:

550.2.2.4. Características generales **<>** 551.2.4.1 Características generales

550.2.4.2. Árido grueso **<>** 551.2.4.2 Árido grueso

2.2.4.1.3 Mezclas Bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso

El artículo 542 Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) (Orden FOM/2523/2014), se definen los requerimientos a cumplir por el árido siderúrgico para su uso como Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso.

En el apartado 542.2.3.1. Características generales, se indica que no se producirá ningún tipo de meteorización o alteración físico-química apreciable, bajo las condiciones de uso, garantizando la durabilidad a largo plazo ni la aparición de disoluciones que pudieran causar daños en la estructuras del firme

ni contaminar corrientes de agua.

En el apartado 542.3. Tipo y composición de la mezcla, se indica que la cantidad de ligante mínima puede variar en función de la densidad del árido, por lo que si ésta difiere de 2,65 g/cm^3 el contenido de la tabla será corregido multiplicando por el siguiente factor:

$$\alpha = {}^{2,65}/_{\rho_d}$$

TIPO DE CAPA	TIPO DE MEZCLA	DOTACIÓN MÍNIMA (%)
RODADURA	densa y semidensa	4,50
INTERMEDIA	densa y semidensa	4,00
	alto módulo	4,50
BASE	semidensa y gruesa	4,00
	Alto módulo	4,75

Tabla 19: Dotaciones mínimas de ligante.

TIPO DE CAPA	ZONA TÉRMICA ESTIVAL	
	CÁLIDA Y MEDIA	TEMPLADA
RODADURA	1,2	1,1
INTERMEDIA	1,1	1,0
BASE	1,0	0,9

Tabla 20: Relación filler / ligante.

Según el apartado 542.2.3.2.5. se recoge el Coeficiente de Los Ángeles (UNE-EN 1097-2) del árido grueso, debiéndose cumplir los valores que se presentan en la siguiente tabla:

TIPO DE CAPA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
	T00	T1	T2	T3 y ARCENES	T4
RODADURA	≤ 20			≤ 25	
INTERMEDIA	≤ 25				≤ 25*
BASE	≤ 25		≤ 30		

* En vías de servicio.

Tabla 21: Valores del Coeficiente de Los Ángeles.

Los valores de resistencia al pulimento acelerado para capas de rodadura se recogen en el apartado 542.2.3.2.6, estableciéndose:

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
T00 y T0	**T1 a T31**	**T32, T4 y ARCENES**
≥ 56	≥ 50	≥ 44

Tabla 22: Resistencia al pulimento para capas de rodadura.

Otro parámetro que se ha de considerar es el contenido de huecos tal y como se indica en el apartado 542.2.3.2.6. Resistencia al pulimento para capas de rodadura (UNE-EN 1097-8), donde han de cumplirse los valores:

CARACTERÍSTICAS		**CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO**			
		T00 y T0	**T1 y T2**	**T3 y ARCENES**	**T4**
HUECOS DE MEZCLA (%)	**CAPA DE RODADURA**	4-6		3-6	
	CAPA INTERMEDIA	4-6	4-7*	4-7	4-7**
	CAPA BASE	4-7*	4-8*	4-8	

* En las mezclas bituminosas de alto módulo: 4-6 %

** En vías de servicio.

Tabla 23: Contenido de huecos.

El apartado 542.7.4. Macrotextura y resistencia al deslizamiento Resistencia, expresa los siguientes mínimos permitidos:

CARACTERÍSTICAS	**VALOR**
MACROTEXTURA SUPERFICIAL (UNE-EN 13036-1)* (mm)	0,7
RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO (UNE 41201 IN)** (%)	65

* Medida inmediatamente después de la puesta en obra.

** Medida una vez transcurrido un mes de la puesta en servicio de la capa.

Tabla 24: Valores mínimos permitidos.

Analizando la regulación que se utiliza en País Vasco, en el Anejo 3. Áridos siderúrgicos de horno eléctrico para mezclas bituminosas de la Norma para el Dimensionamiento de Firmes de la Red de Carreteras del País Vasco, se definen los requerimientos a cumplir por el árido siderúrgico para su uso como Zahorra, estableciéndose que: de agua.

El árido siderúrgico de horno eléctrico tendrá una expansividad menor al 3,5% (UNE-EN 1744-1), con un contenido de cal libre inferior al 0,5%. Además, el índice granulométrico de envejecimiento será inferior al 1%.

El contenido ponderal de sulfatos solubles en agua (UNE-EN 1744-1)para materiales están en contacto con capas tratadas con cemento será inferior al 0,2%, e inferior al 0,7% en los demás casos.

Las dotaciones mínimas de betún se han de considerar en volumen teniendo en cuenta que las tablas se encuentran referidas a un árido de peso específico de 2,65 g/cm^3.

2.2.4.1.4 Mezclas Bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas

El artículo 543 Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) (Orden FOM/2523/2014), se definen los requerimientos a cumplir por el árido siderúrgico para su uso como Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso, estableciéndose que en el apartado 543.2.3.1. Características generales se indica que no se producirá ningún tipo de meteorización o alteración físico-química apreciable, bajo las condiciones de uso, garantizando la durabilidad a largo plazo ni la aparición de disoluciones que pudieran causar daños en la estructuras del firme ni contaminar corrientes de agua.

En el artículo 543 apartado 543.3. Tipo y composición de la mezcla" se indica que la cantidad de ligante mínima puede variar en función de la densidad del árido (UNE-EN 1097-6), por lo que si ésta difiere de 2,65 g/cm^3 el contenido de la tabla será corregido multiplicando por el siguiente factor:

$$\alpha = {}^{2,65}/_{\rho_d}$$

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">CARACTERÍSTICAS</th><th colspan="6">TIPO DE MEZCLA</th></tr>
<tr><th>PA 11</th><th>PA 16</th><th>BBTM8B</th><th>BBTM11B</th><th>BBTM8A</th><th>BBTM11A</th></tr>
<tr><td colspan="2">DOTACIÓN MEDIA MEZCLA (kg/m^2)</td><td>75*90</td><td>95-110</td><td>35-50</td><td>55-70</td><td>40-55</td><td>65-80</td></tr>
<tr><td colspan="2">DOTACIÓN MÍNIMA* DE LIGANTE (% en masa sobre el total de la mezcla)</td><td colspan="2">4,30</td><td colspan="2">4,75</td><td colspan="2">5,20</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Ligante residual en riego de adherencia (kg/m^2)</td><td>FIRME NUEVO</td><td colspan="4">> 0,30</td><td colspan="2">> 0,25</td></tr>
<tr><td>FIRME ANTIGUO</td><td colspan="4">> 0,40</td><td colspan="2">> 0,35</td></tr>
</table>

Tabla 25: Dotaciones mínimas de ligante.

TIPO DE MEZCLA	MÁXIMO	MÍNIMO
BBTM A	1,6	1,2
BBTM B	1,2	1,0
MEZCLAS TIPO	0,9	1,1

Tabla 26: Relación filler / ligante.

El apartado 543.2.3.2.5. Resistencia a la fragmentación recoge el Coeficiente de Los Ángeles (UNE-EN 1097-2) del árido grueso, debiéndose cumplir los valores que se presentan en la siguiente tabla:

TIPO DE MEZCLA		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
		T00 y T0	T1 y T1	T3 y ARCENES	T4
DISCONTINUA	BBTM A	≤ 15	≤ 20	≤ 25	
	BBTM A	≤ 15			
DRENANTE	PA	≤ 15	≤ 20	≤ 20	

Tabla 27: Valores del Coeficiente de Los Ángeles.

Los valores de resistencia al pulimento acelerado para capas de rodadura se recogen en el apartado 543.2.3.2.6. Resistencia al pulimento para capas de rodadura, estableciéndose:

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
T00 y T0	T1 a T31	T32, T4 y ARCENES
≥ 56	≥ 50	≥ 44

Tabla 28: Resistencia al pulimento para capas de rodadura.

Otro parámetro que se ha de considerar es el contenido de huecos tal y como se indica en el apartado 543.5.1.2. Contenido de huecos (UNE-EN 12697-8), donde han de cumplirse los valores:

TIPO DE MEZCLA	% DE HUECOS (Norma UNE-EN 12697-8)
BBTM A	≥ 4
BBTM B	≥ 12 y ≤ 18
DRENANTE	≥ 20

Tabla 29: Contenido de huecos.

La Macrotextura y resistencia al deslizamiento, está en el apartado 543.7.4. donde se expresan los mínimos permitidos:

CARACTERÍSTICAS	TIPO DE MEZCLA	
	BBTM B y PA	BBTM A
MACROTEXTURA SUPERFICIAL (UNE-EN 13036-1)* (mm)	1,5	1,1
RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO (UNE 41201 IN)** (%)	60	65

* Medida inmediatamente después de la puesta en obra.

** Medida una vez transcurrido un mes de la puesta en servicio de la capa.

Tabla 30: Valores mínimos permitidos.

2.2.5 NORMATIVA DE HORMIGONES

La instrucción de hormigón estructural EHE-08 establece las propiedades que deben cumplir los áridos de las mezcla en función de la responsabilidad del hormigón que se desee fabricar.

2.2.5.1 Hormigón de uso Estructural

En lo que se refiere al hormigón de uso estructural, la Instrucción establece que las características de los áridos deberán permitir alcanzar la adecuada resistencia y durabilidad del hormigón que con ellos se fabrica, así como cualquier otra exigencia que se requieran a éste en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto.

Por otra parte, dice que como áridos para la fabricación de hormigones pueden emplearse áridos gruesos (gravas) y áridos finos (arenas), según UNE-EN 12620, rodados o procedentes de rocas machacadas, así como escorias siderúrgicas enfriadas por aire según UNE-EN 12620 y, en general, cualquier otro tipo de árido cuya evidencia de buen comportamiento haya sido sancionado por la práctica y se justifique debidamente.

En el caso de áridos reciclados, se seguirá lo establecido en el Anejo n° 15. En el caso de áridos ligeros, se deberá cumplir lo indicado en el Anejo n° 16 de la Instrucción, y en particular, lo establecido en UNE-EN 13055-1.

En el caso de utilizar áridos siderúrgicos (como, por ejemplo, escorias siderúrgicas granuladas de alto horno), se comprobará previamente que son estables, es decir, que no contienen silicatos inestables ni compuestos ferrosos inestables.

Dada su peligrosidad, sólo se permite el empleo de áridos con una proporción muy baja de sulfuros oxidables.

El contenido en sulfatos solubles en ácido, expresados en SO_3 de los áridos grueso y fino, determinado de conformidad con el artículo 12 de la Norma UNE-EN 1744-1 no superará 0,8% en masa del árido. Sin embargo, las escorias de alto horno enfriadas por aire el valor anterior será del 1%.

Los compuestos totales de azufre de los áridos grueso y fino, determinados de conformidad con el artículo 11 de la norma UNE-EN 1744-1, no podrá exceder del 1% en masa del peso total de la muestra. Para el caso de escorias de alto horno enfriadas por aire el valor anterior será del 2%.

En el caso de que se detecte la presencia de sulfuros de hierro oxidables en forma de pirrotina, el contenido de azufre aportado por estos, expresado en S, será inferior al 0,1%.

En el Anejo 4. Recomendaciones para la selección del tipo de cemento a emplear en hormigones estructurales, en cementos para presas se recomienda Presas de hormigón compactado se recomienda cementos de escorias de horno alto de baja resistencia inicial L, entre otros.

En el Anejo 13. Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad, se establece: En general, una estructura tiene mayor valor a efectos de sostenibilidad cuando compatibiliza las exigencias definidas en el Artículo 5º de esta Instrucción con el empleo de aceros que demuestren un aprovechamiento de sus residuos como, por ejemplo, de sus escorias.

2.2.5.2 Hormigón de uso No Estructural

Para la fabricación del hormigón de uso no estructural, la Instrucción establece que podrán emplearse arenas y gravas rodadas o procedentes de rocas machacadas, o escorias siderúrgicas apropiadas.

Además, para la fabricación del hormigón no estructural, podrá emplearse hasta un 100% de árido grueso reciclado, siempre que éste cumpla las especificaciones definidas para el mismo en el Anejo 15 de la EHE-08.

En el caso de que haya evidencia de su buen comportamiento, de acuerdo con el Artículo 28° de esta Instrucción, podrán emplearse escorias granuladas procedentes de la combustión en centrales térmicas como áridos, siempre que cumplan las mismas especificaciones que contempla el articulado para los áridos siderúrgicos.

De forma resumida, la instrucción permite el empleo de áridos reciclados aunque siempre bajo ciertas condiciones más restrictivas que los áridos naturales, debiendo hacerse estudios particulares que puedan mostrar la idoneidad o no de este tipo de áridos.

2.3 TIPOLOGÍA DE RESIDUOS INDUSTRIALES ANALIZADOS

2.3.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este apartado es explicar la procedencia de los distintos residuos a estudiar.

En primer lugar se hace una descripción del proceso de fabricación por el cual se obtienen los residuos objeto de análisis. A continuación, se indica de manera aproximada las cantidades totales de residuos obtenidas anualmente. Finalmente se hace una descripción del residuo, indicando sus principales características físicas y químicas.

En capítulos posteriores se estudiaran de manera detallada cada uno de los residuos, describiendo posteriormente sus posibles aplicaciones en la construcción de obras civiles. Los residuos industriales que son objeto de estudio son los siguientes:

- Escoria siderúrgica.
  - Escoria negra.
  - Escoria de ferroferrosilicomanganeso.
- Purga de calcinación de la caliza.

De este modo la Tesis Doctoral pretende contribuir a la resolución del problema del aprovechamiento de los diferentes residuos industriales antes mencionados mediante su aplicación en la ingeniería civil.

2.3.2 ESCORIA NEGRA

2.3.2.1 Introducción

Las técnicas y procesos de fabricación de los distintos productos siderometalúrgicos han cambiado y evolucionado a lo largo de la historia, existiendo en la actualidad una gran variedad de métodos de producción. Los más utilizados en la actualidad son los siguientes:

- Escoria de Horno Alto, BF.
- Escoria de Convertidor de Oxígeno, BOF.
- Escoria de Horno Eléctrico de Arco, EAF.
- Escoria de Horno Cuchara, LF.
- Escoria de Convertidor AOD, VOD.
- Escoria de Cubilote.

Por otro lado, los diferentes productos fabricados en la industria metalúrgica como hierro, acero al carbono, aceros de baja aleación, aceros de alta aleación, fundiciones y otras aleaciones férricas, requieren distintas técnicas de producción. Como resultado de esta diversidad se obtienen escorias siderúrgicas con diferente composición y características, incluso cuando han sido producidas en un mismo tipo de horno.

Por lo tanto, las escorias de acería son el resultado subyacente de determinados procesos de producción en los que se utilizan como materias primas una serie de materiales, de tal modo que para la obtención del producto final deseado ha sido necesaria su transformación, generando así una serie de subproductos que deben ser analizados individualmente.

Las materias primas utilizadas en la industria siderometalúrgica son por lo general minerales naturales de hierro y chatarra de elementos recuperados o reciclados. Estos productos generan residuos durante los procesos de fabricación del hierro o del acero, o bien durante las fases de conformado y acabado. Los principales residuos generados son los siguientes:

- Escorias siderúrgicas.
- Polvos de acería.
- Refractarios.
- Arenas de fundición.
- Cascarilla de laminación.

Entre estos residuos, son las escorias y los polvos de acería los que en mayor medida se generan a lo largo del proceso, mientras que los refractarios, arenas de fundición y la cascarilla de laminación son generados en menores cantidades.

Algunos productos, como por ejemplo la cascarilla de laminación, son aprovechados más tarde en otros procesos industriales, y su tasa de reciclaje es muy alta.

Esta Tesis Doctoral se centra en el estudio y aplicaciones de dos tipos de escorias negras:

1. Las procedentes de la fabricación de acero en las instalaciones de Global Steel Wire en Santander.
2. Las producidas por la empresa Sidenor en Reinosa (Cantabria).

2.3.2.2 Fabricación

Los métodos de producción de acero han evolucionado de manera muy importante durante la segunda mitad del siglo XX, de manera que las técnicas utilizadas hoy en día difieren considerablemente de las empleadas hace 50 años.

Uno de los primeros cambios fue la sustitución del horno Martin-Siemens por el Horno Eléctrico de Arco. En España este cambio ha sido importante ya que casi la totalidad de las plantas de producción de acero incorporan esta tecnología hoy en día. En Europa, al igual que a nivel nacional, la mayor parte de la industria metalúrgica también emplea el Horno Eléctrico de Arco, aunque todavía existen instalaciones que conservan procesos de fabricación de horno alto y posterior tratamiento con convertidor de oxígeno.

Esta evolución tecnológica ha sido motivada fundamentalmente por las siguientes dos razones:

1 El tiempo de producción de una colada se reduce considerablemente. El tiempo necesario para hornos de arco eléctrico está en torno a los 60 minutos, mientras que la duración del ciclo en el horno Martin-Siemens es de 8 horas.
2 Debido, entre otras razones, a la mayor duración del ciclo de producción antes comentado, el coste energético de explotación mediante el horno de Martin-Siemens es mucho mayor. De este modo, los costes de fabricación de aceros mediante las nuevas técnicas puede llegar a resultar tres veces más barato.

Aunque mediante las dos técnicas comentadas se pueden obtener aceros de alta calidad, el incremento del precio del combustible del horno de Martin-Siemens durante los últimos diez años ha propiciado que el horno de arco eléctrico sea la técnica más viable de fabricación de acero.

A continuación se describe el proceso de fabricación del acero, obteniendo de manera inherente las escorias como un subproducto del proceso productivo. El proceso descrito es el que tiene lugar en el Horno Eléctrico de Arco, por ser éste el utilizado en la obtención de las escorias que se estudian en esta Tesis Doctoral.

El proceso de fabricación del acero, tanto común como especial, en las acerías de horno de arco eléctrico se compone de dos etapas: una primera denominada metalurgia primaria o fusión, donde se produce la fusión de las materias primas; y la segunda, denominada metalurgia secundaria o afino del

baño fundido, que se inicia en el horno eléctrico y finaliza en el horno cuchara.

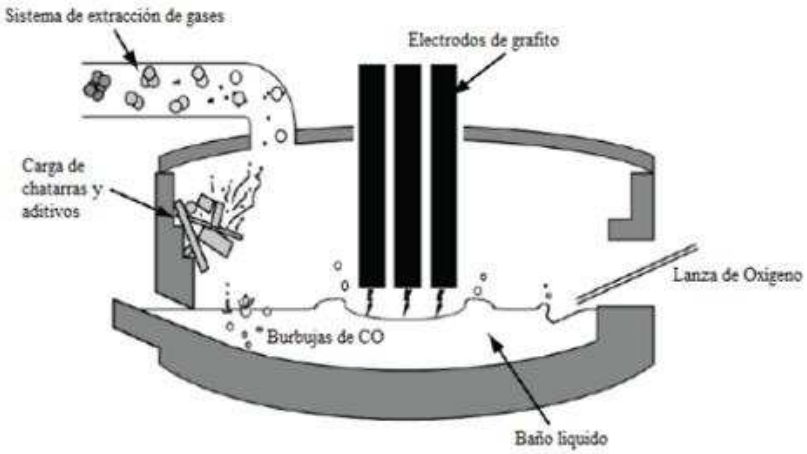


Figura 4: Esquema horno de arco eléctrico. (Fuente: www.mailxmail.com)

La principal materia prima empleada para la fabricación de acero en horno de arco eléctrico es la chatarra de hierro dulce o acero. Como elementos auxiliares se pueden utilizar también pequeñas cantidades de fundición, de mineral de hierro, prerreducidos, ferroaleaciones, cal, espatoflúor, coque y oxígeno. El prerreducido es la carga virgen que sirve para diluir los metales indeseables que pueda contener la chatarra utilizada para la fabricación de acero.

Etapa de fusión

Durante esta etapa tienen lugar una serie de fases cuya finalidad es la eliminación de impurezas y la formación de la escoria espumante en la que se acumulan todas las impurezas.

Esta etapa comienza cuando los electrodos entran en contacto con la chatarra y se hace saltar el arco eléctrico. En un primer momento se producen saltos de manera irregular entre los electrodos del horno y la chatarra, que empieza a fundirse. Una vez aparece el líquido y este está en contacto entre la chatarra y los electrodos el trabajo resulta más regular.

A continuación, se alimenta el horno con oxígeno puro, cal y cal dolomítica. La primera reacción en producirse es la oxidación del hierro debido a la cantidad de hierro presente en la chatarra. Después, el óxido de hierro oxida al manganeso y el silicio. Estas reacciones son altamente exotérmicas, por lo que producen un aumento brusco de la temperatura de fusión, reduciéndose así el consumo energético. Los óxidos de hierro, manganeso y silicio pasan a formar la escoria que cubre el líquido fundido. La escoria tiene el aspecto de una nata que sobrenada y cubre la superficie de la colada de metal fundido. Las funciones de la escoria siderúrgica en los procesos de fabricación de los materiales férricos y de sus derivados es la siguiente:

1 Su disposición en la superficie de los caldos propicia la formación de un intercalado entre el propio líquido y la atmósfera próxima de contacto, por lo que su protección frente a los gases de ésta está asegurada.

2 Como consecuencia de lo anterior, el caldo está aislado térmicamente del ambiente evitándose así gradientes de temperatura altos en el metal en estado líquido.
3 Participa en el proceso de purificación y afino del metal propiciando reacciones químicas que mejoran sus características.

Finalmente, cuando se ha oxidado prácticamente la totalidad del silicio y gran parte del manganeso, la escoria tiene suficiente porcentaje de FeO libre. La adición de carbón en polvo permite la reducción del FeO. Con ello se genera monóxido de carbono, gas que al desprenderse del líquido produce lo que se conoce como hervido del baño, que facilita la uniformización de la composición y temperatura del baño así como la eliminación de gases.

Por otra parte, el paso de monóxido de carbono a través de la escoria, que produce lo que se conoce como escoria espumante, facilita la penetración de los electrodos en la escoria lo que incrementa la eficiencia energética. En el momento que la ebullición del líquido fundido se reduce, se puede asegurar que la mayor parte del carbono se ha oxidado.

La escoria producida durante la etapa de fusión es la que se conoce como **escoria negra** u oxidante, es de un color muy oscuro, tiene aspecto poroso y morfología irregular.

Etapa de afino

A continuación comienza la fase de afino, que tiene como finalidad obtener un acero de bajo contenido en oxígeno a parte de eliminar la mayor parte del azufre presente en la colada.

Esta etapa comienza cuando el líquido fundido es trasladado al horno de afino (también llamado horno-cuchara) donde es cubierto inmediatamente con una escoria reductora, formada por tres partes de cal, una de espato-flúor y una de coque o grafito. Durante esta etapa se consigue la desoxidación del líquido fundido, por simple contacto del mismo con la escoria fuertemente reductora. El líquido tiende a oxidar la escoria y ésta a desoxidar el líquido fundido.

Más tarde se añaden ferroaleaciones de silicio y manganeso mediante las cuales se consigue la desoxidación definitiva. Generalmente se añade primero el manganeso y más tarde el silicio. De este modo se consigue formar en la colada partículas líquidas, primero de óxido de manganeso (MnO) y luego de sílice (SiO_2) que tienen tendencia a cohesionarse entre sí dando lugar a partículas que suben a la escoria.

Paralelamente a esta fase se produce la desulfuración. La finalidad es minimizar la presencia de azufre en el acero, ya que éste propicia la pérdida de cohesión de los cristales de hierro. La desulfuración se da en presencia de una cantidad suficiente de óxido de calcio y carbón.

Antes de colar de nuevo el líquido fundido se vuelve a desescoriar, eliminando

la **escoria blanca**.

En general, se calcula que aproximadamente por cada tonelada de acero se generan de 110 a 150 kg de escoria negra y de 20 a 30 kg de escoria blanca.

2.3.2.3 Valorización

Tras la fabricación del acero y la extracción de la escoria negra del horno es necesario someter a estas a un proceso de valorización para que sean transformadas en árido siderúrgico y así puedan ser utilizadas en la construcción de obras civiles.

Las instalaciones de valorización deben cumplir lo especificado en las normativas autonómicas que regulan el empleo de las escorias negras como áridos siderúrgicos. Estas especificaciones son:

1. Adecuado pavimento que garantice una permeabilidad.
2. Una balsa de decantación.
3. Las zonas de almacenaje y tratamiento de escorias debidamente pavimentadas.
4. Instalación limpia y acondicionada.
5. Empleo de las mejores técnicas disponibles aplicables a la instalación.
6. Adopción de medidas al objeto de atenuar el ruido y las emisiones de polvo.

Como ejemplo se describe a continuación el proceso empleado en GSW Santander. El proceso de valorización comienza realizando un enfriamiento rápido de las escorias negras. Para ello son transportadas desde el foso de desescoriado hasta una nave de enfriamiento mediante maquinaría especialmente preparada para aguantar las altas temperaturas a las que se encuentran las escorias incandescentes. Una vez estas han sido vertidas en la nave, son sometidas a un enfriamiento brusco bien mediante riego por aspersión o bien mediante cañones de agua a presión.

Figura 5: Pala cargadora con cadenas de protección.

Figura 6: Vertido de la escoria incandescente en el interior de la nave de enfriamiento.

Tras el riego se sumerge por medios mecánicos la escoria negra en una

piscina para continuar con su enfriamiento. Se consigue así realizar una fragmentación térmica que confiere al material una forma porosa de estructura vítrea. Es importante realiza el riego antes de sumergir el material puesto que de no hacerlo podría producirse una fuerte explosión por realizar un cambio de temperatura demasiado brusco.

Figura 7: Piscina de enfriamiento.

Figura 8: Enfriamiento mediante aspersión.

Tras un tiempo en el interior de la piscina, las escorias son precribadas, separando después el acero que se coló con la escoria a la hora de desescoriar el horno. Esta operación se realiza mediante un overband y en términos generales se recupera un 2% del peso total de la escoria negra en forma de chatarra. Con este proceso termina la valorización propiamente dicha de las escorias negras.

Figura 9: Precriba.

Figura 10: Overband. (www.magnetcity.net)

Finalmente, es habitual machacar y cribar el árido siderúrgico. Esto se hace con la intención de conseguir que todo el árido producido tenga un tamaño adecuado para su empelo en la fabricación de mezclas bituminosas y hormigones a la vez que se clasifica para poder conseguir las granulometrías deseadas.

2.3.2.4 Producción

En España funcionan actualmente 24 acerías de horno eléctrico de arco, de las cuales 14 de ellas se encuentran en el País Vasco, que produjeron en el año

2013 un total de 13,8 Mt de acero de las cuales:

- Acero común o especial ..... 12.420.000 t
- Acero inoxidable ..... 1.103.000 t

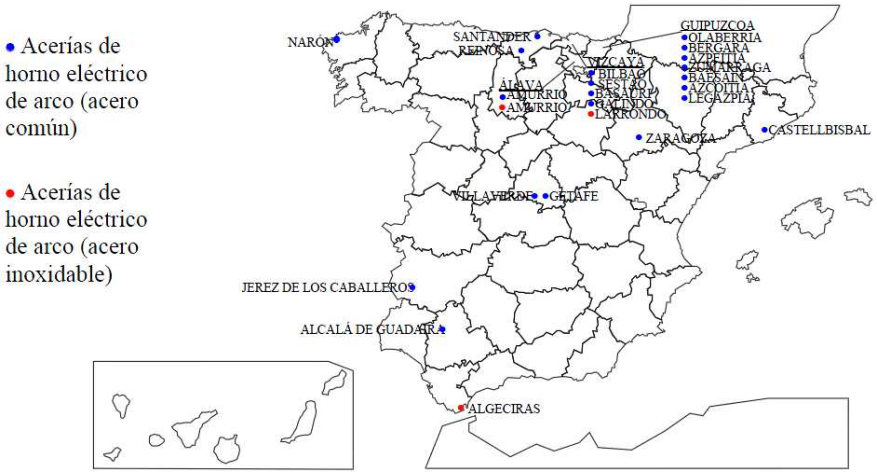


Figura 11: Ubicación acerías en España. (Fuente: www.cedexmateriales.es)

El reparto por comunidades en el año 2005 fue el siguiente:

- País Vasco 48%
- Cataluña – Aragón..... 15%
- Andalucía 11,3%
- Galicia-Castilla León-Extremadura 9%
- Cantabria..... 7,6%
- Madrid 6,7%

Considerando la producción de escorias que se producen por tonelada de acero indicada en el apartado anterior se obtienen las siguientes cantidades anuales de escorias de acerías de acero común o especial:

Producción de acero (10^3 t)	**Generación de escoria kg/t de acero**		**Producción de escorias (t)**
12.420	Escoria negra	110-150	1.614.600
	Escoria blanca	20-30	372.600

Tabla 31: Producción anual de escorias de acería.

2.3.2.5 Caracterización física

Las principales propiedades físico-mecánicas a evaluar para este subproducto industrial son las siguientes:

Propiedad	Árido grueso	Árido fino
Tamaño (mm)	4,76 – 25,0	0 – 4,76
Densidad aparente de partículas (t/m^3)	3,35	3,70
Absorción (%)	3,29	2,84
Porosidad (%)	10,5	-
Desgaste de Los Ángeles (%)	≈ 20	-

Tabla 32: Propiedades físicas de los áridos procedentes de escorias negras.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, de modo general, las escorias de acería presentan elevada masa específica, forma angular, textura superficial áspera, gran dureza y absorción de agua media. En relación a su uso como árido, presentan buena resistencia a la abrasión, fragmentación y compresión.

Figura 12: Escoria negra. (Fuente: www.efeverde.com)

Influencia del enfriamiento

Por otra parte, el método de enfriamiento tras la extracción de la escoria negra del horno puede hacerse de diferentes formas influyendo notablemente en el producto final, y dando lugar a escorias con diferencias físicas apreciables a simple vista. Los diferentes métodos de enfriamiento se basan principalmente en la rapidez en que baja la temperatura a la que se encuentran en el momento del desescoriado:

- La escoria se vierte directamente al suelo y se enfría con agua para que pueda ser recogida y transportada en camiones. La escoria presenta un aspecto muy poroso, de tamaño relativamente pequeño y en estado vítreo.
- Se puede verter en un cono de fundición que se coloca debajo de la piquera del horno eléctrico. La escoria comienza a enfriarse en el cono y se vierte en una fosa donde se enfría. La escoria obtenida presenta un aspecto menos poroso que la anterior y es más cristalina.
- Se vierte en un cono de fundición que se deja enfriar. En este caso el enfriamiento es el más lento, y una vez fría se saca del cono. La escoria obtenida es muy compacta, con pocos poros, dura y muy cristalina.

Por esta razón, considerando los diferentes usos que se le vaya a dar a la escoria será conveniente enfriarlas de una manera u otra:

- Si la escoria va a ser utilizada en sustitución de la ofita, interesa que su enfriamiento sea lento para obtener un material duro y poco poroso, por lo que el sistema de enfriamiento que se recomienda utilizar es el tercero, es decir, el enfriamiento en cono.
- Si la escoria se va a utilizar como sustituto de la caliza, puede ser enfriada por cualquiera de las tres formas antes mencionadas.
- El tipo de enfriamiento no es determinante si la escoria se va a utilizar como materia prima en la fabricación de cemento.

2.3.2.6 Caracterización química

La composición química de la escoria está condicionada por una serie de variables como el tipo de chatarra utilizada, el control de las variables de operación o el tipo de acero fabricado. Los valores recogidos en la siguiente tabla pueden considerarse como representativos:

Composición química	Porcentaje (%)
CaO	22 – 60
SiO_2	11 – 37
FeO	0,5 – 4
Fe_2O_3	38
MgO	4 – 12
Cr_2O_3	1 – 8
TiO_2	0,6 – 2
MnO	1 – 4
Al_2O_3	2 – 8
P_2O_6	0 – 0,02

Tabla 33: Composición química de la escoria negra de horno eléctrico.

2.3.2.7 Posibles empleos

El estudio de escorias procedentes de la fabricación de aceros se lleva realizando desde hace décadas a nivel mundial. Los principales empleos que se han buscado a este subproducto son como árido siderúrgico sustitutivo del árido natural en mezclas bituminosas y hormigones. La bibliografía al respecto es vasta por lo que a continuación se presenta aquella que representando al conjunto resulta de especial interés en el estudio que se desarrolla en capítulos posteriores de esta Tesis Doctoral.

Aplicación en Mezclas Bituminosas

Vázquez y Barra (2001) estudiaron la reactividad y expansión de las escorias de acería de horno de arco eléctrico en relación con sus aplicaciones en la construcción. Su estudió se centró en analizar la composición química de las escorias negras y su comportamiento expansivo. Mostraron que el MgO es el responsable de los fenómenos expansivos.

Por otro lado, Frías, Sánchez y Uría del Instituto Eduardo Torroja analizaron también dos tipos de escorias negras y determinaron que los efectos expansivos estaban provocados posiblemente por la cal libre, la magnesia libre, los cloruros y los sulfatos. Tras los ensayos, quedó probado que la presencia de estos compuestos en las escorias era muy pequeña, minimizando así los posibles efectos expansivos.

Ortega (1999) afirmó que la utilización de las escorias negras en capas base subbase está aconsejada debido a su elevada dureza y a la adecuada

granulometría.

Lancieri, Losa y Marradi (2004) estudiaron la resistencia al pulimento de diferentes áridos naturales susceptibles de ser utilizados en mezclas bituminosas para capas de rodadura. Obtuvieron para áridos calizos un coeficiente de pulimento acelerado (CPA) de 56 y para áridos ofíticos de 55.

Gascón (2009) evaluó el empleo de escorias de acería de capas granulares y mezclas bituminosas. Comprobó que las mezclas cumplen holgadamente el Equivalente de Arena y la Plasticidad requerido para su utilización y que poseían un elevado Coeficiente de Pulimento Acelerado (0,56). Por el contrario, quedó reflejada la escasez de finos que poseen las escorias negras al ser necesario fabricar las mezclas añadiendo áridos naturales. Además, la mayor porosidad del árido siderúrgico requiere elevar ligeramente el contenido de betún en las mezclas bituminosas y la humedad de compactación en capas granulares.

Figura 13: Mezcla bituminosa con escorias negras.

Baldo y Pasetto (2010) estudiaron el diseño de mezclas bituminosas. Para ello realizaron en primer lugar una caracterización química, toxicológica y físico-mecánica de las escorias. A continuación diseñaron cuatro tipos de mezclas en las que variaron progresivamente el contenido de escorias negras hasta un máximo de 90%. Finalmente, ensayaron probetas fabricadas con estas mezclas, caracterizando las deformaciones permanentes, el módulo de rigidez, la resistencia a fatiga y los daños producidos por humedad.

En otro estudio, Baldo y Pasetto (2011) compararon mezclas bituminosas fabricadas con áridos naturales y áridos siderúrgicos. Las mezclas fueron fabricadas con una sustitución del árido natural del 26% y del 59%. Realizaron ensayos de compactación, deformabilidad, estabilidad, fatiga y durabilidad; obteniendo resultados positivos en todos los ensayos realizados y siendo especialmente significativos aquellos referidos a la fatiga y la durabilidad.

Sorlini, Sanzeni y Rondi (2012) realizaron ensayos con la intención de caracterizar mezclas bituminosas fabricadas con áridos siderúrgicos controlando, además, la expansividad debida a la presencia de CaO libre y MgO presente en las escorias. Los resultados obtenidos tras los ensayos fueron positivos, mostrando el cumplimiento de la normativa italiana al respecto.

Arabani y Azarhoosh (2012) llevaron a cabo ensayos para determinar la dosificación óptima de ligante en mezclas bituminosas fabricadas con áridos reciclados (escorias y RCD), así como ensayos para evaluar las características mecánicas de las probetas fabricadas. De este estudio se obtuvieron varias

conclusiones, de las cuales las más significativas son las siguientes:

- Cuando se sustituye el árido natural en un 57% por RCD, el contenido óptimo de betún es del 5,6%. Además, el hecho de hacer esta sustitución afecta negativamente a las propiedades mecánicas de la mezcla, ya que en los procesos de mezclado y compactación se alteran las partículas de RCD y se separa el cemento del resto de áridos.
- En mezclas realizadas con un 37% de RCD y un 57% de escorias, el contenido óptimo de betún es del 5,9%. Sin embargo, al contrario que en el caso anterior, se mejoran las propiedades mecánicas de la mezcla, llegando a ser la deformación permanente hasta un 40% inferior que en las mezclas de control con un 100% de árido natural.

De forma experimental, en nuestro país se han construido varios tramos de prueba para analizar el comportamiento de las mezclas bituminosas fabricadas con escorias negras.

El primer caso lo tenemos en Guipúzcoa. En 1998 se realizó el refuerzo de un firme de longitud de 500 metros con una mezcla bituminosa fabricada con escorias negras. Los resultados obtenidos en este tramo experimental fueron positivos. Asimismo, en otras áreas del País Vasco, se han realizado en los últimos años una variedad de pruebas experimentales incluyendo la ejecución de capas de rodadura, capas intermedias y capas granulares. En el año 2006 se extendieron en la GI-2133 dos tipos de mezclas bituminosas con escoria negra en capa de rodadura. En 2008 en la carretera GI-631, con una categoría de tráfico T2 se extendió una mezcla tipo BBTM 11A en la cual la fracción gruesa estaba totalmente formada por árido siderúrgico y la fracción más fina con árido calizo. Más tarde, en el año 2008, se extendió un microaglomerado en frío tipo LB-2. En todos estos casos los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

Otra comunidad autónoma en la que se ha experimentado con este tipo de escorias es Cataluña. En el año 2004 se realizaron pruebas en las instalaciones del grupo CELSA, con una capa de rodadura de 8 cm de espesor. En el año 2006 se construyó un tramo de prueba con una mezcla de tipo D12 en la cual todos los tamaños mayores de 4 mm fueron sustituidos por escorias negras. También han sido utilizadas en carreteras de mayor importancia con categorías de tráfico T0, como la N-IIa o la A-2. La mayor prueba realizada fue en el Polígono Riu Sec de Sabadell pavimentándose una superficie de 25.000 m^2 escorias negras. En esta ocasión, fabricó una mezcla de tipo AC16 surf D en la que se incorporó el árido siderúrgico en diferentes proporciones hasta sustituir el árido natural al 100%.

También se han llevado a cabo pruebas experimentales con mezclas tipo BBTM A. Los tramos de prueba estaban situados en la N-1 y en la GI 627, ejecutados en los años 2011 y 2009 respectivamente. En todas las mezclas el tamaño máximo del árido era de 16 mm, pero la diferencia existente entre ellas era debida a la naturaleza de los áridos. En la N-1 se utilizó una ofita de tipo

Basalto, mientras que en la GI 627 se utilizaron dos tipos de árido distinto; una ofita de tipo Diabasa y un árido siderúrgico. Entre noviembre del 2011 y agosto del 2013 se realizaron medidas del CRT en estos tramos de prueba. Observaron grandes diferencias estacionales, tomando como referencia los valores los mínimos medidos en agosto los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Año	2012	2013
N-1 Diabasa (Ofita)	61	51
GI 627 Basalto (Ofita)	59	52
GI 627 Siderúrgico	58	54

Tabla 34: CRT mezclas tipo BBTM A.

Aplicación en Hormigones

Manso, González y Polanco (2004) estudiaron las propiedades mecánicas de hormigones fabricados con escorias negras. Hicieron sustituciones al 100% del árido fino y grueso, modificando ligeramente las dosificaciones entre distintas probetas. Los resultados obtenidos demostraron que las probetas fabricadas con hormigón siderúrgico poseían una resistencia a compresión menor a los 7 y 28 días respecto a las muestras de control. Sin embargo, la resistencia a los 90 días llegó prácticamente a igualarse en todos los hormigones fabricados con áridos siderúrgicos. Por otra parte, concluyeron que la cantidad de árido fino utilizado en la mezcla es de gran importancia, siendo necesario fabricar el hormigón con filler natural.

Figura 14: Probetas de hormigón con escorias negras ensayadas a compresión.

Berridi (2008) analizó la influencia de residuos metalúrgicos como áridos en las propiedades del hormigón. Realizó mezclas de hormigón con diferentes relaciones agua/cemento, sustituyendo los áridos naturales por áridos siderúrgicos. Las conclusiones a las que llegó fueron que para relaciones altas de a/c el comportamiento es peor que los de los hormigones convencionales,

mientras que para relaciones bajas de a/c, estos mejoran la resistencia a compresión frente a hormigones convencionales. Por otra parte, evaluó la resistencia a compresión tras la exposición a altas temperaturas, demostrándose que los hormigones convencionales eran los que peor se comportaban. Finalmente estudió la succión capilar, la cual disminuía con el paso del tiempo para todos los hormigones. Sin embargo, los hormigones fabricados con escorias de horno eléctrico fueron los que presentaron los valores más bajos de succión capilar.

Otras aplicaciones

Ortega López (2011) evaluó el aprovechamiento de las escorias blancas y negras de acería eléctrica en la estabilización de suelos. Los resultados obtenidos indicaron que se obtiene un comportamiento similar en las mezclas de suelo con escoria de horno cuchara y las mezclas de suelo con cal, llegándose a registrar una mejora de las propiedades del suelo modificado en cuanto a su expansividad y a su capacidad portante. Por otro lado, estudió las propiedades de la escoria negra de horno eléctrico de arco EAFS y comprobó que se trata de un subproducto con muchas semejanzas a la zahorra artificial.

En otro estudio, Baldo y Pasetto (2013) realizaron ensayos para analizar el comportamiento a fatiga de mezclas realizadas con escorias de horno eléctrico y betunes modificados con polvo de neumático o polímeros. Las mezclas asfálticas fueron fabricadas con una sustitución del árido natural del 90%, y los ensayos de fatiga realizados antes y después de un proceso de envejecimiento. Los resultados fueron positivos para las mezclas fabricadas con betunes modificados con polvo de neumático, puesto que alcanzaron rendimientos superiores.

Arm et al. (2009) analizaron el envejecimiento de mezclas fabricadas con escorias de horno eléctrico. Tomaron muestras de una acería con una edad de 1 día y de 7 meses. Por otra parte, tomaron una muestra de la subbase de una carretera con 10 años de antigüedad. Descubrieron que escorias del borde de la calzada mostraban signos de carbonatación y lixiviados, mientras que aquellas que se encontraban en el centro de la carretera apenas habían sufrido ningún tipo de envejecimiento. Esto se debía a que las muestras del centro de la calzada no habían estado en contacto con agentes atmosféricos, al contrario que las situadas en el borde de la calzada.

Uno de los aspectos importantes a controlar en la producción de las escorias es el proceso de enfriamiento puesto que este influye notablemente en las propiedades finales de la escoria. En este sentido, Morino e Iwatsuki (1999) analizaron escorias oxidantes (negras) de acería de horno de arco eléctrico sometidas a tres sistemas diferentes de enfriamiento: rápido (solidificación de la escoria a través de chorros de aire), semi-rápido (aspersión de agua sobre la escoria cuando ésta estaba a 800º C), y lento (vertido de escoria al aire y enfriamiento a velocidad natural). En todas las muestras analizadas, no se

observaron diferencias significativas entre los valores de CaO y MgO libre. A pesar de esto, hay ensayos de expansividad realizados con escorias de acería eléctrica sometida a diferentes sistemas de enfriamiento que verifican que a igual edad, las escorias de acería sometidas a un enfriamiento rápido (a través de la solidificación en agua) se muestran volumétricamente más estables que aquellas que se han dejado enfriar lentamente al aire.

Figura 15: Escoria enfriada por aspersión de agua. (Fuente: www.escorias.com)

Figura 16: Escoria negra enriada a velocidad natural. (Fuente: www.foro-minerales.com)

En España se han llevado a cabo alguna pruebas experimentales con hormigones fabricados con áridos siderúrgicos Gracias a la participación conjunta de varias empresas del sector, se construyó en el parque tecnológico de Vizcaya la nueva infraestructura de Labein-TECNALIA con varios elementos estructurales como losas de cimentación y muros de sótano.

Además, en el edificio del Centro de Investigación en Tecnologías Industriales de la Universidad de Burgos se emplearán para la ejecución de elementos estructurales y no estructurales hormigones fabricados con áridos siderúrgicos.

2.3.3 ESCORIA DE FERROFERROSILICOMANGANESO

2.3.3.1 Introducción

Las ferroaleaciones son materias primas básicas utilizadas en la fabricación de aceros ordinarios y especiales. Estos productos se emplean como desoxidantes, desulfurantes y portadores de manganeso para proporcionar dureza, ductilidad y resistencia a la abrasión de los aceros fabricados. Por esta razón se suelen definir como “las vitaminas del acero”.

Las ferroaleaciones se obtienen mediante la reducción de los óxidos de mineral de manganeso, en hornos eléctricos de arco-resistencia y a temperaturas elevadas que se consiguen por medio de la energía eléctrica que se aporta.

2.3.3.2 Fabricación

En la producción de ferromanganeso y ferrosilicomanganeso (también conocido como ferroferrosilicomanganeso), el proceso de reducción que tiene lugar dentro del horno se basa en la eliminación del oxígeno contenido en los minerales al combinarse con el carbono del reductor, se trata, por tanto, de una carbotermia. Sin embargo, en el caso del ferromanganeso afinado se produce una silicotermia, es decir, la reducción se realiza con silicio, que proviene de los finos de ferrosilicomanganeso.

El proceso de fabricación de las ferroaleaciones comienza con la producción de ferromanganeso. Para ello son necesarios minerales con porcentajes importantes de manganeso y bajos niveles de impurezas (fósforo, azufre). Los minerales más comúnmente utilizados son la pirolusita (MnO_2) y la rodocrosita ($MnCO_3$). Para la producción de ferroaleaciones en España estos minerales deben ser importados ya que no hay minerales de manganeso utilizables.

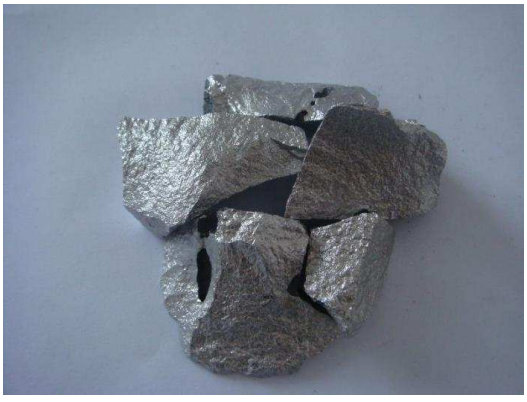


Figura 17: Ferromanganeso. (Fuente: www.proyectosinergia.com)

Otra de las materias primas necesaria en la producción de ferromanganeso y ferrosilicomanganeso son los reductores, como el coque metalúrgico, el coque de petróleo, la hulla o la antracita. En el caso del ferromanganeso afinado, se utiliza como reductor el silicio del ferrosilicomanganeso, al tratarse de una

aleación baja en carbono.

Una parte fundamental del proceso es la aportación de fundentes. Estos permiten la formación de una escoria que recoge las impurezas que acompañan a los minerales, haciendo que esta sobrenade encima del material fundido. Los fundentes que habitualmente se utilizan en la fabricación de ferromanganeso y ferrosilicomanganeso son la caliza y el espatoflúor.

El proceso de producción de ferromanganeso en horno eléctrico conlleva la obtención de unas escorias de alto contenido en manganeso, que son aprovechadas en el proceso de fabricación del ferrosilicomanganeso, sustituyendo al mineral Mn. Por ello actualmente se trabaja en un ciclo combinado de fabricación de ambas ferroaleaciones. De esta manera se consigue un mejor aprovechamiento del manganeso, un menor consumo de minerales y un menor consumo de energía.

Por su parte, la escoria de fabricación de ferrosilicomanganeso es un subproducto del proceso de fabricación con diversas aplicaciones, siendo esta escoria la analizada en capítulos posteriores.

Figura 18: Escoria de ferrosilicomanganeso.

La colada del horno se realiza a través de las bocas de los hornos. Cada horno tiene dos bocas que se van abriendo según cuál sea la necesidad en cada momento, para permitir la salida del metal o de la escoria. La apertura de las bocas en los hornos de producción de ferromanganeso y ferrosilicomanganeso se realiza utilizando un cañón perforador. En el caso del ferromanganeso afinado se realiza mediante un volcado del horno.

Desde las bocas, el metal y la escoria pasan a unas cucharas de la colada. Debido a la diferencia de densidad entre la ferroaleación y la escoria, la primera se deposita al fondo de la cuchara de colada, mientras que la segunda flota sobre la misma.

Cuando la cuchara de colada se desborda, el metal sigue desplazándose al fondo de la misma mientras que la escoria sobrenada por su parte superior,

siendo finalmente vertida en una era de escoria. El posterior desnate consiste en la eliminación de la escoria que queda en el interior de la cuchara. Por último, se vierte el contenido de ferroaleación en una era de metal, donde permanece hasta su solidificación.

2.3.3.3 Producción

Ferroatlántica produce anualmente 150.000 toneladas de ferroaleaciones, De forma inherente a la obtención de sus productos finales, Ferroatlántica genera anualmente 55.000 toneladas de escorias de ferromanganeso (de los procesos de producción de ferromanganeso estándar y afinado), que son utilizadas como materia prima en la propia fábrica para la fabricación de ferrosilicomanganeso, y 70.000 toneladas de escoria de ferrosilicomanganeso.

Mediante el proceso descrito se logra fabricar unas ferroaleaciones con las siguientes características:

Material	Mn (%)	Si (%)	C (%)	P (%)	Fe (%)	S (%)
Ferromanganeso	75 – 77	< 1	≈ 6,8	< 0,2	≈ 15	≈ 0,02
Ferrosilicomanganeso	65 – 68	15 - 19	1 – 2	< 0,15	≈ 13	0,03
Ferromanganeso Afinado	78 - 81	< 1,5	≈ 1,7	< 0,2	≈ 17	≈ 0,005

Tabla 35: Características ferroaleaciones.

2.3.3.4 Caracterización física

El aspecto físico de la escoria de ferrosilicomanganeso depende del tipo de tratamiento que haya recibido a la hora de ser enfriada. Este tratamiento es función del uso que se le quiera dar a la escoria.

En el caso de que se desee obtener un material para ser utilizado como Todo-Uno, la escoria es vertida en eras situadas al aire libre. Las eras deben estar debidamente preparadas para soportar las altas temperaturas que posee la escoria de ferrosilicomanganeso cuando se vierte a las mismas desde los canales de colada de los hornos. De esta manera se consigue un enfriamiento lento al aire libre, obteniendo así una escoria cristalizada. No se requiere ningún tratamiento adicional para poder ser utilizada como Todo-Uno.

Figura 19: Escoria de ferrosilicomanganeso sin tratar.

En el caso de desear obtener una escoria granulada el enfriamiento debe ser mucho más rápido. Para ello se aplica un chorro de agua a presión desde la parte posterior del punto de salida de la escoria a través del canal de colada a su zona de vertido.

A continuación es aconsejable su cribado y machaqueo de forma que puedan ser utilizadas para fines que requieran materiales con mayor homogeneidad.

Figura 20: Escoria de ferrosilicomanganeso machacada.

Figura 21: Escoria de ferrosilicomanganeso machacada y cribada.

2.3.3.5 Caracterización química

De forma inherente a la elaboración de sus ferroaleaciones de ferrosilicomanganeso, Ferroatlántica genera anualmente una cantidad de 70.000 toneladas de escoria de ferrosilicomanganeso. Un análisis químico de estos materiales aporta los siguientes resultados de forma genérica:

SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	K_2O	Fe_2O_3	Na_2O	TiO_2	S^{-2}	MnO	PPC
40 %	25 %	13 %	5 %	2 %	1 %	0,4 %	0,4 %	0,4 %	6 %	1 %

Tabla 36: Análisis químico de la escoria de ferrosilicomanganeso.

2.3.3.6 Posibles empleos

En este apartado se ha tratado de aportar los estudios realizados hasta el momento relacionados con las escorias de fabricación de ferroaleaciones, en concreto escorias de ferrosilicomanganeso. Cabe destacar que la bibliografía encontrada es mucho menos extensa que aquella relacionada con las escorias de fabricación de aceros.

Frías et al. (2005) llevaron a cabo una serie de ensayos para caracterizar las escorias procedentes de la fábrica de Ferroatlántica, España. Los resultados obtenidos fueron: (i) los cementos fabricados con escorias de ferrosilicomanganeso no presentaron problemas de inestabilidad volumétrica; (ii) las mezclas cumplían con las especificaciones químicas, físicas y mecánicas; y finalmente (iii) las escorias procedentes de este tipo de ferroaleaciones son adecuadas para mezclas con cemento.

Figura 22: Escoria de ferrosilicomanganeso de Ferroatlántica.

Más tarde, Frías et al. (2005) realizaron un estudio sobre las posibles aplicaciones de las escorias de ferrosilicomanganeso. En esta ocasión comprobaron la posible utilización como árido reciclado para la fabricación de hormigones. Realizaron sustituciones del 100% del árido natural por árido siderúrgico, caracterizando el material y clasificándolo para su utilización como árido fino y árido grueso. Finalmente realizaron un estudio teórico de la dosificación del hormigón a elaborar mediante la curva de Bolomey con una relación agua/cemento de 0,63. Con este estudio concluyeron principalmente que: (i) los contenidos de azufre total, sulfatos solubles, cloruros y sulfuros presentes en la escoria cumplen la normativa vigente; (ii) la resistencia a compresión del hormigón fabricado con árido siderúrgico era de 40,21 MPa, valor considerado muy superior a un hormigón realizado con áridos tradicionales.

Frías y Rodríguez (2007) estudiaron las características de dos subproductos procedentes de la fabricación de ferroaleaciones: la escoria de ferrosilicomanganeso y los filtros de óxido de manganeso. Consideraron la posibilidad de sustituirlos por cemento Portland al 5% y 15%. Del estudio concluyeron que los dos subproductos cumplen con la legislación Europea en lo que a caracterización química, física y mecánica se refiere. Sin embargo, en los

cementos fabricados con los filtros de óxido de manganeso detectaron una pérdida de resistencia a los 90 días de curado.

Frías, Sánchez de Rojas y Rodríguez (2008) analizaron la influencia de ambientes agresivos en morteros realizados con escorias de ferrosilicomanganeso. Se controló la naturaleza de la escoria, las características mecánicas, los diferentes ambientes a los que fueron expuestos las probetas o los cambios producidos en el mortero entre otros. Tras 56 días de curado en ambientes agresivos concluyeron que: (i) no se producían alteración superficial ni pérdida de peso significativa; (ii) todas las probetas eran resistentes a ambientes agresivos según el índice de Koch-Steinegger aunque las probetas con mayor contenido de escorias poseían índices más bajos; y (iii) la incorporación de escorias modificaba la estructura de los poros de los diferentes morteros.

Allahverdi y Ahmadnezhad (2013), al igual que Frías et al, estudiaron la viabilidad del empleo de escorias de ferrosilicomanganeso como sustitutivo del cemento, realizando ensayos con mezclas preparadas con diferentes proporciones Escoria-Cemento, de hasta un 35% de escoria. Tras los ensayos concluyeron que: (i) las escorias mostraban unas propiedades puzolánicas e hidráulicas relativamente bajas; (ii) sustituciones de hasta un 35% de cemento por escorias de ferrosilicomanganeso no influían considerablemente en los tiempos de curado; (iii) las mezclas no mostraban problemas de inestabilidad volumétrica; (iv) las pérdidas de resistencia a compresión para mezclas con proporciones superiores al 15% de escoria eran del entorno al 10% a los 3, 7 y 28 días de curado; y (v) la pérdida de resistencia a compresión puede ser compensada aumentando la finura del cemento.

2.3.4 PURGA DE CALCINACIÓN DE LA CALIZA

2.3.4.1 Introducción

El residuo de calcinación de la caliza se genera en la producción de sosa cáustica y cloruro cálcico por el método Solvay.

Las instalaciones necesarias para la producción de sosa por el método de Solvay constan principalmente de los siguientes elementos básicos:

- Tres torres: absorción, precipitación y desplazamiento.
- Horno para la descomposición del bicarbonato sódico.
- Horno de cal en el que descomponer la piedra caliza.
- Un filtro de tambor para separación del bicarbonato formado.
- Equipo para ablandamiento de agua y purificación de la salmuera.
- Equipo para la precipitación de la lechada de cal.

2.3.4.2 Fabricación

El proceso comienza en la torre de absorción introduciendo por su parte superior una disolución saturada de cloruro sódico y por la inferior una corriente de gas amoniaco. De esta torre por el fondo se separa la disolución saturada de cloruro sódico y amoniaco, denominada salmuera amoniacal. Esta disolución se lleva a la parte superior de la torre de precipitación, en la que se produce la reacción:

$$NaCl + NH_3 + H_2O + CO_2 \rightarrow NaHCO_3 + NH_4Cl$$

al inyectar por su parte inferior una corriente de dióxido de carbono. A continuación, la suspensión formada por el bicarbonato sódico precipitado y la disolución acuosa de cloruro amónico sale por la parte inferior de la torre de precipitación y es conducida a un filtro de tambor que permite la separación de ambas fases. La fase sólida constituida por el bicarbonato sódico, una vez lavada con agua y escurrida se alimenta a un horno donde se procede a su descomposición térmica.

$$2NaHCO_3 \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O + CO_2$$

Por un lado se separa directamente la sosa y por otro, se obtiene dióxido de carbono que se recicla a la torre de precipitación, junto con la aportación necesaria del mismo producto, y que procede del horno de cal.

En el horno de cal se descompone térmicamente la piedra caliza,

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

para obtener el dióxido de carbono que alimenta la instalación y la cal viva que se precisa para preparar lechada de cal,

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$$

producto que por reacción con el cloruro amónico formado en el proceso, permite

recuperar el amoniaco,

$$2NH_4Cl + Ca(OH)_2 \rightarrow 2NH_3 + CaCl_2 + 2H_2O$$

y da lugar a la aparición del subproducto del cloruro cálcico y a un residuo de calcinación de caliza, comúnmente conocido como purgas.

En la siguiente figura se muestra un flujograma donde se explica de manera resumida el proceso descrito anteriormente. En él, los elementos encuadrados en color rojo se refieren a las materias primas, y aquellos encuadrados en color verde se refieren a los productos finales obtenidos.

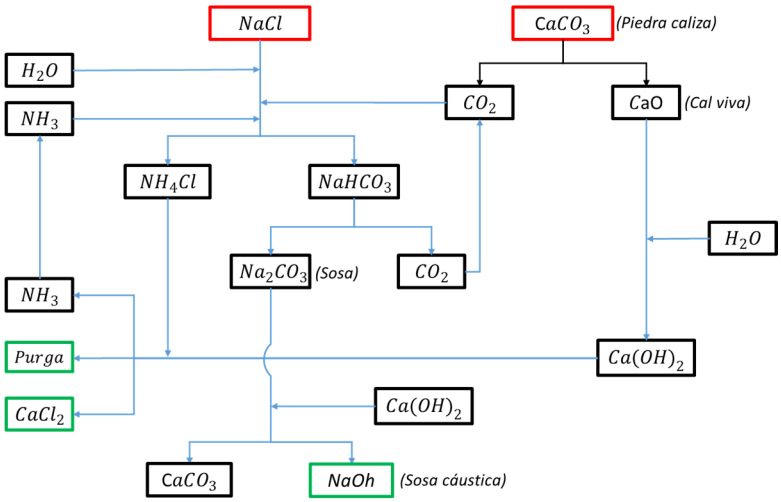


Figura 23: Método Solvay.

2.3.4.3 Producción

La planta química de Solvay en Cantabria tiene una producción anual aproximada de 80.000 toneladas de purgas.

2.3.4.4 Caracterización física

Las purgas de calcinación de la caliza están compuestas por varios materiales. El más numeroso lo constituyen las gravas de naturaleza caliza; en menor cantidad se encontraron fragmentos aislados de carbón mineral procedentes, presumiblemente, del combustible de calcinación y, finalmente, nódulos de cal.

2.3.4.5 Caracterización química

De forma genérica el análisis químico elemental de las purgas arroja unos valores como los de la siguiente tabla:

Elemento	Peso (%)
Si	0,74
Ca	65,74
O	33,52

Tabla 37: Composición química de las purgas de Solvay.

2.3.4.6 Posibles empleos

En lo que a las purgas de calcinación de la caliza se refiere, la bibliografía es muy escasa. A continuación se recogen los estudios más significativos realizados hasta el momento.

Qiao (2001) patentó un método para la utilización de las purgas procedentes de la producción de carbonato de sodio como material para las obras de movimiento de tierras. El método consiste en una vez las purgas se encuentran machacadas y secadas de forma natural, mezclarlas con limolita, cenizas volantes, cal, escorias de acería, agua y otros materiales en las proporciones adecuadas.

Vaisman et al. (2013) realizaron un estudio sobre la posibilidad de realizar la impermeabilización de un vertedero haciendo uso de las purgas procedentes de la producción de sosa. Para ello llevaron a cabo ensayo de lixiviados en las purgas, analizando la conveniencia de su empleo para estos fines. Los resultados arrojaron datos positivos puesto que de ensayos indicaron la posibilidad de empleo de las pugas como material aislante.

Figura 24: Purgas de calcinación de la caliza.

Kesim et al. (2013) estudiaron la posibilidad de fabricar cementos en los que la materia prima fueran principalmente purgas de calcinación del proceso de Solvay. Los materiales utilizados en la mezcla fueron purgas en un 74% y arcillas en 26%. Se fabricaron cementos con esta mezcla a distintas temperaturas y tiempos de cocido. Los cementos obtenidos se ensayaron química y mineralógicamente. Los resultados mostraron que aumentar la temperatura y el tiempo de cocido no causaba cambios significativos en las fases desarrolladas. Sin embargo, al realizar estos cambios durante el cocido sí que aumentaban los cristales producidos en las distintas fases. También realizaron ensayos para comprobar la resistencia de los cementos para fines estructurales.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se pretende definir la metodología seguida para el estudio de los residuos industriales objetivo, así como de los áridos reciclados, mezclas bituminosas y hormigones estudiados en esta Tesis Doctoral. Se identifican y explican los ensayos necesarios para una correcta caracterización con el objeto de asegurar la adecuación de los mismos a la normativa técnica y medioambiental. Estos ensayos permiten conocer las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales de forma que nos posibilitan el diseño óptimo de las aplicaciones pretendidas.

Con el seguimiento de los ensayos a lo largo de los cuatro años de duración de la Tesis Doctoral se alcanza un grado de conocimiento amplio sobre el comportamiento de estos materiales, posibilitando tener unas mayores garantías de que los materiales estudiados son seguros y duraderos. Para el análisis de los resultados de los ensayos realizados se definen y explican los parámetros estadísticos que serán utilizados en capítulos posteriores.

3.2 ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y MECÁNICAS DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS INDUSTRIALES, DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS Y DE LOS HORMIGONES

3.2.1 ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y MECÁNICAS DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS INDUSTRIALES

3.2.1.1 Introducción

En este apartado se describe la metodología seguida para caracterizar los áridos empleados en esta Tesis Doctoral.

3.2.1.2 Caracterización Química y Mineralógica

3.2.1.2.1 Análisis químico por fluorescencia de rayos X

La Norma de aplicación para llevar a cabo este ensayo es la UNE-EN 15309. La técnica de espectroscopia por fluorescencia de rayos X consiste en la excitación de una muestra mediante una fuente de rayos X. Esta fuente excita los electrones de cada elemento, de tal manera que algunos de ellos abandonan sus niveles orbitales originales.

Posteriormente, otros electrones ocuparán los lugares dejados por aquellos, emitiéndose un fotón con una energía característica para cada elemento. La concentración de cada elemento se detecta, finalmente, midiendo la intensidad de la energía asociada a cada transición electrónica, realizando una calibración previa con patrones conocidos.

3.2.1.2.2 Análisis mineralógico mediante difracción de rayos X

La difracción de rayos X es una técnica consistente en hacer pasar un haz de rayos X a través de la muestra sujeta a estudio.

Con el método de la difracción por rayos X lo que obtenemos son compuestos exactos. No es un método cuantitativo.

3.2.1.2.3 Análisis por espectroscopia de infrarrojos

La técnica de espectroscopia infrarroja se basa en la capacidad de absorción de la radiación infrarroja por parte de cualquier sustancia. Esta técnica es apropiada para el análisis e identificación tanto de sustancias orgánicas como de sustancias inorgánicas.

3.2.1.2.4 Contenido de azufre total (S_{total})

La norma de aplicación para este ensayo es la UNE-EN 1744-1. Ofrece dos opciones para determinar el contenido de azufre total: digestión ácida, y combustión a alta temperatura.

Figura 25: Muestras de escoria molida(LADICIM).

3.2.1.2.5 Contenido de cal libre $(CaO)_{libre}$

La normativa estatal no establece ningún límite a este parámetro. Sin embargo, y para que sirva de referencia, en el anejo 4 de la normativa vasca para el dimensionamiento de carreteras establece que el contenido de cal libre del árido siderúrgico de horno eléctrico debe ser inferior al 0,5% según la Norma UNE-EN 1744-1. Dicha norma propone varios métodos para su obtención, entre ellos la difracción de rayos X.

3.2.1.2.6 Contenido de óxido de magnesio (MgO)

La normativa no establece un valor límite al material como tal, sino que está referenciado al ensayo de expansividad. Dice que la duración del ensayo de expansión será de 24 horas cuando el contenido de óxido de magnesio, según UNE-EN 196-2, sea inferior al 5% y de 168 horas en los demás casos.

Según la norma UNE-EN 196-2 para calcular el contenido de óxido magnesio se debe emplear el método de la fluorescencia de rayos X (FRX).

3.2.1.2.7 Ensayo de lixiviación

La clasificación de las escorias en valorizables o no valorizables estará determinada por los análisis realizados sobre el lixiviado obtenido de acuerdo a la norma EN-12457-4. Es esencial, por tanto, conocer el resultado de este ensayo con el fin de saber si la escoria puede ser reutilizada o, si por el contrario, debe llevarse directamente a un vertedero de inertes.

3.2.1.3 Caracterización Física y Mecánica

3.2.1.3.1 Análisis granulométrico

Para realizar el análisis granulométrico de un árido se sigue la norma UNE-EN 933-1:1998, incluido el nuevo anexo del año 2006. Este análisis tiene por objeto determinar la distribución de los tamaños de las partículas de una cantidad de muestra seca de árido, por separación a través de una serie de tamices o cribas dispuestas sucesivamente de mayor a menor abertura de malla.

3.2.1.3.2 Ensayo de Los Ángeles

Para este ensayo se siguió la norma UNE-EN 1097-2:1999 además de su anexo del año 2007. Mediante este ensayo se determina la resistencia al desgaste del árido, que está relacionada directamente con la resistencia mecánica del esqueleto mineral.

3.2.1.3.3 Índice de machacabilidad

La norma de aplicación es la UNE 83112-89. Esta norma tiene por objeto establecer un método de ensayo para la determinación del índice de machacabilidad de los áridos, valor que es indicativo de la resistencia a compresión de los mismos.

3.2.1.3.4 Coeficiente de friabilidad

Se trata de un ensayo similar al de machacabilidad, pero en este caso se utiliza la Norma NLT-351: Coeficiente de friabilidad.

3.2.1.3.5 Equivalente de arena

El ensayo se lleva a cabo siguiendo las especificaciones de la norma UNE-EN 933-8. El propósito de este ensayo es detectar la posible materia orgánica y compuestos plásticos no apreciables mediante los límites de Atterberg con el fin de garantizar que en presencia de agua no existan problemas de adhesividad con los ligantes hidrocarbonados. Es una forma de determinar la limpieza del árido fino.

3.2.1.3.6 Azul de metileno

Se trata un ensayo alternativo o complementario al ensayo descrito en el apartado anterior. Se utiliza para caracterizar un árido determinando un índice que indica la proporción de finos en él. Se realiza según la Norma NLT-171.

3.2.1.3.7 Índice de lajas

En ensayo se realiza siguiendo la Norma UNE-EN 933-3, que consiste básicamente en una vez secada la muestra hasta peso constate se criba según la Norma 933-1.

La forma de las partículas del árido grueso afecta fundamentalmente a la resistencia del esqueleto mineral del árido. Así, podemos encontrar partículas redondeadas, cúbicas, lajas y agujas. Las lajas y las agujas pueden romperse con facilidad durante la compactación o bajo las cargas del tráfico, con lo que se modifica la granulometría del árido, además de aparecer una nueva cara de fractura no envuelta por el ligante.

3.2.1.3.8 Densidad aparente y porosidad

Tiene poca trascendencia como característica de la calidad del material, pero es un dato auxiliar de interés para hacer la conversión de volumen a peso y viceversa, además de para calcular los huecos en árido conocido su peso

específico aparente. Puede obtenerse con compactación o sin ella. El método que propone la norma UNE-EN 1097-3 es sin compactar.

Figura 26: Cilindro de acero inoxidable para el cálculo de la densidad aparente (LADICIM).

3.2.1.3.9 Densidad de partículas aparente

Para el cálculo de la densidad de partículas aparente se aplica la norma UNE-EN 1097-6.

3.2.1.3.10 Absorción

Este ensayo se realiza conforme a la norma UNE-EN 1097-6. Es un ensayo de importancia práctica para aquellos materiales pétreos que se han de ver sometidos a la acción de los agentes atmosféricos, porque cuando son porosos absorben y retienen el agua, la cual puede helarse y producir la desintegración del material. No obstante, cuando se trate de mezclas bituminosas el betún recubrirá a los áridos dificultando que el agua penetre en ellos.

Por lo tanto, cara a un aglomerado asfáltico, es importante determinar la absorción para tener una idea del ligante que es capaz de retener el árido en sus poros.

3.2.1.3.11 Coeficiente de forma

El ensayo para determinar el coeficiente de forma se lleva a cabo siguiendo las especificaciones de la norma UNE-EN 933-4.

3.2.1.3.12 Proctor Modificado

El procedimiento operatorio es el descrito en la Norma UNE 103501.

Con este ensayo se obtiene para una Humedad óptima una densidad máxima de compactación.

3.2.1.3.13 California Bearing Ratio (CBR)

El ensayo se realiza según la Norma UNE-EN 13286-47.

Con este ensayo se evalúa la capacidad portante del material.

3.2.1.3.14 Resistencia al pulimento acelerado

La resistencia al pulimento acelerado se evalúa mediante el coeficiente de pulimento acelerado (CPA). El ensayo de pulimento acelerado así como la metodología para la medición de la resistencia al deslizamiento con el péndulo de fricción TRRL se recoge en la norma UNE-EN 1097-10. Este ensayo evalúa la resistencia al pulimento de las partículas de un árido, o lo que es lo mismo, su resistencia a perder aspereza en su textura superficial. Permite caracterizar al árido, en comparación con el coeficiente de rozamiento de un árido de control mediante el coeficiente de pulido acelerado (CPA) o valor final del coeficiente de rozamiento medido con el péndulo. Este ensayo tiene gran importancia en áridos que van a ser utilizados en capas de rodadura de naturaleza bituminosa.

3.2.1.3.15 Índice granulométrico de envejecimiento (I.G.E.)

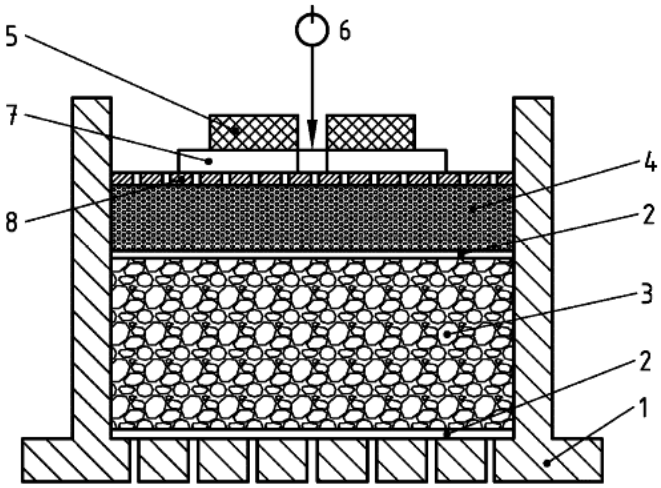
La norma NLT-361/91 describe el proceso que debe seguirse para determinar el grado de envejecimiento en las escorias de acería que vayan a utilizarse como árido en construcción de carreteras.

En el método, la muestra de escoria envejecida se somete a la acción del agua a presión para promover la hidratación acelerada del óxido de cal remanente en la escoria, determinándose luego la meteorización producida mediante un índice granulométrico que se correlaciona a su vez con el grado de envejecimiento alcanzado. La cuantía del proceso de hidratación es similar a la que se produciría en la misma muestra durante un año a la intemperie.

3.2.1.3.16 Ensayo de expansividad

El ensayo de expansividad debe realizarse de acuerdo a la norma UNE-EN 1744-1. Tal y como indica este documento, tras secar las escorias hasta peso constante deben mezclarse tamaños de entre 0 y 22 mm según la parábola de Fuller. Deben realizarse, al menos, dos mezclas de 4,5 kg para montar una probeta de cada una de ellas.

Después de compactar las probetas, ya sea por mesa vibratoria, martillo Proctor o cualquier otro martillo automático manual, se cubren las probetas con esferas de vidrio.



1. Cilindro con base perforada
2. Papel filtro
3. Probeta de escoria compactada
4. Esferas de vidrio
5. Masa de carga
6. Indicador del desplazamiento
7. Soporte de carga
8. Placa perforada

Figura 27: Cilindro con muestra y equipo de carga/medición

A continuación, se conecta la probeta al generador de vapor y, para evitar registrar valores de expansividad relacionados con el aumento de volumen producido por el calentamiento de las escorias, se empiezan a tomar medidas del aumento de volumen en el momento en el que el vapor ya ha atravesado la probeta. En función del contenido de MgO se deben dejar transcurrir 24 o 168 horas desde el comienzo del ensayo, y pasado este tiempo se calcula el aumento de volumen en % con relación al volumen original.

3.2.2 ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS FABRICADAS CON ÁRIDOS RECICLADOS INDUSTRIALES

3.2.2.1 Introducción

El firme es una de las partes más importantes de una carretera. Desde un punto de vista económico puede influir notablemente en el coste final de este tipo de obras. Desde el punto de vista de la seguridad vial el modo en que fue ejecutado y el estado de conservación son esenciales para cumplir una serie de requisitos mínimos exigidos por la normativa. Y finalmente, desde el punto de vista de los usuarios, puesto que serán ellos los que valorarán de forma general una carretera basándose principalmente en el estado del firme.

Generalmente se distinguen dos aspectos a la hora de evaluar la calidad de un firme:

1. La calidad estructural.
2. La calidad funcional.

La **calidad estructural** se refiere a la capacidad del firme de soportar las cargas generadas por el tráfico u otros efectos durante la vida útil de la carretera. Esta capacidad debe ser suficiente para que no sea necesario tomar medidas de rehabilitación estructural durante la vida útil del proyecto.

La **calidad funcional** es aquella que está relacionada con la capa superior del firme. El estado de esta superficie influye de manera muy importante en la comodidad y seguridad de los usuarios.

Para que una capa de rodadura se considere adecuada debe ser segura, duradera y cómoda. También son importantes otros parámetros como el nivel de ruido generado por el paso de los vehículos, la capacidad de evacuación del agua o el desgaste que la carretera produce en los neumáticos de aquellos.

Desde el punto de vista general la rodadura debe ser cómoda, segura, duradera, poco ruidosa, producir un desgaste mínimo en los vehículos y debe facilitar la evacuación del agua en la zona de contacto con el neumático. Las características superficiales que se consideran importantes son las siguientes:

- Regularidad superficial.
- Textura.
- Fricción o resistencia al deslizamiento.

3.2.2.1.1 Regularidad superficial

La calidad superficial de un pavimento se analiza determinando la diferencia entre las cotas teóricas y las cotas reales. A este parámetro se le denomina regularidad superficial. Generalmente esta diferencia se debe a la combinación de una mala ejecución y al efecto del tráfico sobre el pavimento. Sin embargo, se puede deber a una de las dos causas únicamente.

La regularidad superficial se define mediante un índice. Este índice se obtiene midiendo el perfil longitudinal y aplicando a continuación un modelo matemático y estadístico que permite obtener su valor.

Existen varios métodos de mediada de la regularidad superficial. Uno de los más sencillos y más utilizados tradicionalmente consiste en una regla, generalmente de 3 metros, que mide la diferencia de cotas entre el punto medio de la regla y el plano de comparación definido por los dos extremos de la regla.

Otro método que ha sido utilizado con gran profusión es el Diágrafo. Está basado en el mismo principio que la regla de tres metros, pero este, sin embargo, tiene una longitud de 9,31 metros y se apoya en 8 puntos.

Estos dos métodos, aunque entregan valores muy precisos y válidos, han caído en desuso por presentar ciertas limitaciones técnicas y por otros métodos que representan de manera más fiel la percepción de los usuarios.

En la actualidad se utiliza un método que permite evaluar la regularidad superficial de manera más rápida. Se utiliza un dispositivos llamado Golden Quarter Car, que instalado en un automóvil es capaz de circular la carretera que se quiera evaluar a una velocidad de 80 km/h. Este dispositivo mide el desplazamiento vertical de la masa superior respecto a la inferior entregando el valor del índice que evalúa la regularidad superficial, es el llamado IRI (International Roughness Index)

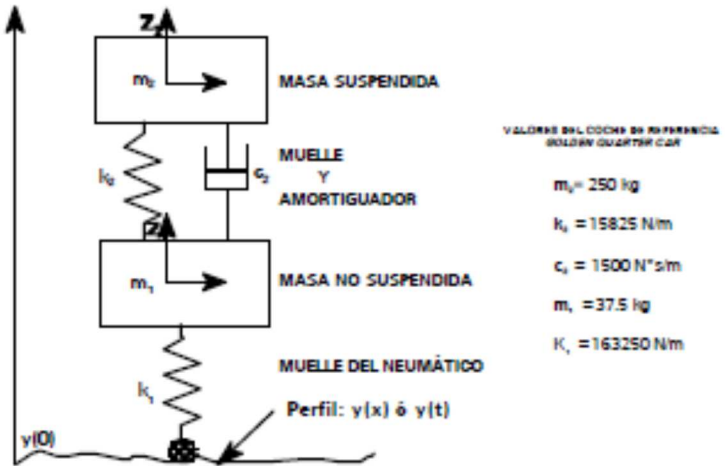


Figura 28: Golden Quarter Car. (Fuente: blog.bomainpasa.com)

3.2.2.1.2 <u>Textura</u>

La textura que presenta la superficie de un pavimento es otro parámetro crítico en la comodidad y seguridad de los usuarios. La textura influye directamente en la capacidad para evacuar el agua que queda entre el pavimento y el neumático y, de manera indirecta, en el coeficiente de rozamiento del pavimento.

Por otra parte, la textura es esencial en el nivel de ruido emitido por el tráfico al rodar sobre el pavimento. No solo influye en el ruido que perciben los usuarios en el interior del vehículo, sino que también lo hace sobre todo aquello que habita en el entorno de la carretera.

Desde un punto de vista económico, la textura influye tanto en el desgaste de los neumáticos como en el consumo de los vehículos.

Definiciones

A continuación se definen algunos términos que es necesario conocer para entender de manera global la textura de un pavimento.

Amplitud y longitud de la onda de textura. El perfil del pavimento se describe por el desplazamiento a lo largo de su superficie y por el desplazamiento en dirección normal a ella; siendo *distancia* el desplazamiento a lo largo de la superficie y *amplitud* el desplazamiento en dirección normal. La distancia puede medirse tanto en sentido longitudinal como transversal respecto a la dirección de la marcha. Se define *la longitud de onda de textura* como la distancia mínima existente entre puntos de la curva que se repiten periódicamente.

La microtextura de un pavimento es la desviación que presenta su superficie con respecto a una superficie plana de dimensiones características en sentido longitudinal inferiores a 0,5 mm. La amplitud entre picos suele variar entre 0,001 y 0,5 mm. Este tipo de textura es la que hace al pavimento más o menos áspero, pero normalmente es tan pequeña que no puede observarse a simple vista.

La macrotextura de un pavimento es la desviación que presenta su superficie con respecto a una superficie plana de dimensiones características en sentido longitudinal comprendidas entre 0,5 y 50 mm. La amplitud entre picos de la macrotextura varía normalmente entre 0,01 y 20 mm. Este tipo de textura es la que presenta longitudes de onda del mismo orden que los dibujos del neumático. La macrotextura es un factor que influye notablemente en la fricción entre neumático y pavimento, en la emisión de ruido y en la evacuación de agua. A este respecto, el PG-3 en el artículo 542.7.4 establece el valor mínimo de 0,7 que la superficie del pavimento debe cumplir antes de la puesta en servicio de la carretera.

La megatextura de un pavimento es la desviación que presenta su superficie con respecto a una superficie plana de dimensiones características en sentido longitudinal entre 50 y 500 mm. La amplitud entre picos suele variar entre 0,1 y 50 mm. Este tipo de textura es la que presenta longitudes de onda del mismo orden que el neumático.

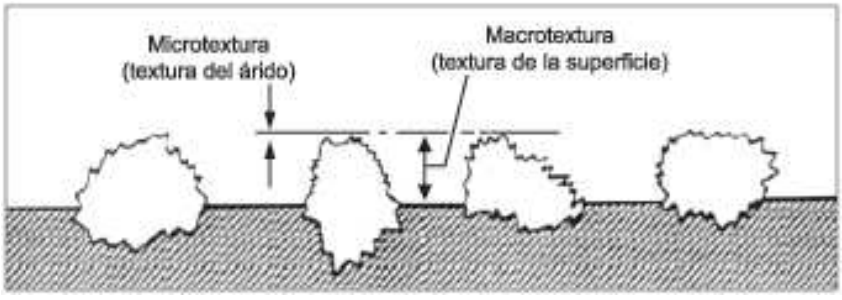


Figura 29: Croquis identificativo de la microtextura y la macrotextura. (Fuente: www.lanamme.ucr.ac.cr)

Medida de la textura

La forma más sencilla y experimentada de evaluar la textura de un pavimento es mediante el ensayo del círculo de arena o mancha de arena. Se trata de un ensayo de fácil realización e interpretación que determina, concretamente, la macrotextura.

Se trata de un ensayo que determina la textura valorada como el cociente entre el volumen conocido de una arena muy fina y homogénea, que se extiende en el pavimento en un área sensiblemente circular, y el área de dicho. A ese valor se le denomina altura de la mancha de arena (MTD) y define la profundidad de la textura del pavimento. El ensayo es útil para valores de textura superiores a 0.25 mm y se debe llevar a cabo con el pavimento seco y limpio, y en días sin viento.

Es un ensayo puntual y lento, que requiere cortar el tráfico y al menos la presencia de dos personas. Por tanto se trata de un ensayo costo. Por otro lado, es muy difícil garantizar la homogeneidad de la arena, lo que puede producir errores de apreciación y que la comparación de resultados no resulte fiable.

Otro inconveniente de este método es que la macrotextura de un pavimento es un parámetro que debe ser evaluado de forma global, por lo que interesa que sea determinada de manera continua, es decir, obteniendo una gran cantidad de datos. Existen otros métodos, como aquellos que utilizan dispositivos de auscultación de tipo perfilométrico, que resuelven este problema. La dificultad estriba en relacionar el dato arrojado por estos equipos con el MTD, que es el método más conocido y fácil de interpretar. En los ensayos con perfilómetros al arrojar gran cantidad de datos, se hace necesario analizarlos con criterios estadísticos obteniendo así un perfil muy preciso del pavimento.

La norma ISO 13473-1: *Characterization of pavement texture by use of surface profiles - Part 1: Determination of Mean Profile Depth* define la textura por medio de un índice denominado Profundidad Media del Perfil (MPD) que se obtiene mediante métodos perfilométricos. Además, presenta una formulación que relaciona el valor MPD y con el valor de mancha de arena MTD.

Características que debe reunir la textura

La textura de la superficie de rodadura debe reunir una serie de características para que el pavimento cumpla con las condiciones mínimas de seguridad y comodidad.

Desde un punto de vista global la textura debe reunir las siguientes características:

- Debe ser homogénea tanto en sentido longitudinal como en sentido transversal al sentido de avance de los vehículos.

- Una microtextura elevada otorgará una buena adherencia entre el neumático y la superficie, sin embargo aumentará el desgaste de los neumáticos.
- Una macrotextura elevada mejora la capacidad de evacuación del agua situada entre el neumático y el pavimento, pero sin embargo la generación de ruido será mayor. Aunque mezclas con granulometrías porosas tratan de resolver este problema, distan de ser una solución ideal debido a la duración y a las dificultades de mantenimiento que presentan.

Figura 30: Evacuación de agua para evitar el aquaplaning. (Fuente: www.fierrosclasicos.com)

- Por estas razones se hace necesario buscar un buen equilibrio en estos dos aspectos, de forma que se incrementen al máximo las prestaciones, en lo que a seguridad se refiere, del pavimento sin perjudicar en exceso a los usuarios.

Evolución de la macrotextura con el tiempo

Cada tipo de pavimento tiene un valor natural de textura que corresponde con el valor de la textura del pavimento recién ejecutado. Este valor es función del tipo de mezcla que se utilice, de los áridos empleados y del proceso de fabricación y compactación.

Con la utilización de la carretera y el desgaste del pavimento el valor de la textura se modifica de la siguiente manera.

Figura 31: Pavimento con roderas. (Fuente: www.osusa.com.uy)

En dirección perpendicular al sentido de avance, la textura en las zonas de rodada y en el centro del carril evoluciona de diferente forma. En las zonas de rodada el valor disminuye, mientras que en el centro del carril la textura permanece prácticamente constante. Esta diferencia suele ser indicativa del grado de envejecimiento de un pavimento y del comportamiento que se puede esperar de él.

En la dirección de avance, la evolución de la macrotextura depende de los valores naturales de esta. Valores altos suelen dar lugar a pérdidas rápidas de textura y, por el contrario, valores bajos dan lugar a pérdidas lentas. Una vez llegado a un mínimo el valor de la macrotextura aumenta, pero sin embargo, este crecimiento no implica una mejoría en las condiciones del pavimento. Una vez el valor de la textura alcanza un máximo ya no tiene sentido hablar de macrotextura, sino de megatextura.

3.2.2.1.3 Fricción o resistencia al deslizamiento

La fricción o resistencia al deslizamiento es un valor crítico en la seguridad de un pavimento. La resistencia al deslizamiento se evalúa de forma indirecta mediante un coeficiente de rozamiento entre un neumático especial y la superficie del pavimento mojada de manera artificial. De esta forma se mide la microtextura. El coeficiente de rozamiento se utiliza para evaluar el nivel de adherencia entre el neumático y el pavimento, dependiendo su valor de diferentes factores como pueden ser constructivos, climatológicos u otros responsabilidad de los usuarios como la velocidad de circulación o el estados de los neumáticos.

La fricción o resistencia al deslizamiento no es un parámetro constante de un pavimento, sino que al igual que la textura evoluciona con el tiempo. Los niveles de adherencia disminuyen con el paso de los vehículos como consecuencia del pulido de la superficie por la acción repetida de los neumáticos. Por esta razón se hace imprescindible medir periódicamente la fricción de un pavimento para comprobar que los valores se encuentran dentro de los límites de seguridad.

Figura 32: Pavimento con los áridos pulidos. (Fuente: www.tolcan.com)

Estos límites, generalmente, están establecidos en los Pliegos de Prescripciones de cada proyecto, definiéndose en función de la categoría de tráfico y de la carretera entre otras cosas. Se exigen, además, a los áridos que van a ser empleados en la capa de rodadura unas características determinadas sobre su resistencia a la pulimento. La resistencia al pulimento acelerado se evalúa mediante el Coeficiente de Pulimento Acelerado (CPA) que se obtiene realizando el ensayo *Pulimento acelerado de los áridos*.

Por otro lado, es necesario cumplir otros requisitos para garantizar un buen nivel de adherencia. Se trata de garantizar que la carretera, una vez construida, cumple con unos valores mínimos de seguridad. Para evaluar la adherencia de un pavimento ejecutado se utilizaba históricamente el ensayo de resistencia al deslizamiento, que como resultado entrega el Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento (CRD). El ensayo se realiza mediante el péndulo TRRL y viene recogido en la norma UNE-EN 1097-8:2010.

El estudio de la adherencia entre neumático y pavimento no es sencillo. Con pavimento seco la resistencia al deslizamiento, por lo general, no varía con el paso del tiempo. Sin embargo, cuando el pavimento se encuentra en estado húmedo sí que existe una disminución de la adherencia con el paso del tráfico. Además, también existe una diferencia estacional de la resistencia al deslizamiento de manera que los valores en invierno son algo más elevados que en verano.

A la hora de evaluar la resistencia al deslizamiento mediante el péndulo TRRL ocurre lo mismo que al evaluar la textura mediante el ensayo del círculo de arena. Es necesario obtener valores que representen de manera global la adherencia de un firme y, sin embargo, el ensayo de resistencia al deslizamiento se hace de forma puntal por lo que conlleva los mismos inconvenientes que los mencionados para el ensayo de la mancha de arena. Por ello, se han desarrollado equipos de auscultación de alto rendimiento capaces de realizar medidas de forma continua.

El equipo de auscultación de alto rendimiento que se utiliza con más asiduidad

es el SCRIM (Sideway Coefficient Routine Inventory Machine). Este quipo obtiene un valor de la adherencia de un pavimento denominado coeficiente de resistencia transversal (CRT).

Los valores del CRT de un pavimento nuevo suele situarse entre 0,70 y 0,80 aunque si es cierto que generalmente estos valores bajan una vez la carretera está abierta al tráfico. Por esta razón es usual hacer las mediad del CRT al cabo de uno o dos meses de la apertura al tráfico como exige el PG-3. El valor mínimo que establece el artículo 542.7.4 medido a los dos meses de la puesta en servicio de la capa es del 65%. Por lo general se establecen valores mínimos que obligan a labores de acondicionamiento en el caso de no cumplimiento.

La bajada del CRT se debe a que el paso del tráfico va puliendo los áridos, de forma que disminuye el nivel de adherencia. Los valores del CRT necesarios para un pavimento son función de diversos factores como: la zona climática, la pendiente del tramo, la velocidad de proyecto, posibles zonas de frenada, época del año, etc.

Por esta razón es habitual evaluar el CRT tres veces al año, pudiendo así comprobar la importancia de este factor estacional y detectar el valor más bajo registrado a lo largo del año.

A lo largo de este apartado se describe la metodología seguida en los ensayos realizados para la correcta fabricación y caracterización de las mezclas bituminosas estudiadas en esta Tesis Doctoral.

Los apartados estudiados son los siguientes:

- Fabricación de las mezclas.
- Péndulo TRRL.
- Círculo de arena.
- Texturómetro láser.
- Tracción indirecta.
- Resistencia conservada tras la inmersión.
- Módulo resiliente.
- Fatiga.
- Módulo de rigidez.
- Ensayo de pista.
- Ensayo Marshall.

3.2.2.2 Ensayos sobre mezclas bituminosas

3.2.2.2.1 Fabricación de las mezclas bituminosas

En caso de fabricación de mezclas bituminosas con escorias, se debe tener en cuenta su estructura vacuolar y su superficie mucho más rugosa e irregular que otros áridos naturales como pueden ser la caliza o la ofita. Debido a esto, en las etapas iniciales de dosificación se pueden tener problemas de envuelta al

fabricar las probetas cilíndricas Marshall de la forma tradicional. Con forma tradicional se entiende a la utilización de una cocina de gas y realizar el proceso de envuelta con una espátula, controlando la temperatura en todo momento dentro de las limitaciones propias de dicha metodología. En la página siguiente se puede ver la secuencia cronológica de dicho método:

Figura 33: Adición de la escoria a en la cazuela de mezclado (180º C).

Figura 34: Pesado e incorporación del betún (150º C).

Figura 35: Mezcla íntima betún-escoria.

Figura 36: Adición de la arena y el filler calizo (ambos a 180º C).

Figura 37: Medición de la huella de desgaste con el calibre.

Sin embargo, a pesar de aumentar el tiempo de mezclado y de modificar otras variables del proceso se seguían teniendo problemas con la envuelta de los gruesos de escoria. Es por ello por lo que se optó finalmente por fabricar las probetas en una amasadora calorifugada a 150º C, desapareciendo a partir de ese momento los problemas anteriormente citados. Además, esta nueva forma de fabricar las probetas guarda mayor similitud con la forma de proceder de las plantas de aglomerado, lo que hace más realista los resultados obtenidos en los ensayos.

3.2.2.2.2 Péndulo TRRL

La metodología seguida para determinar la resistencia al deslizamiento es la descrita en la norma UNE-EN 13036-4:2012. Se trata de medir mediante el péndulo TRRL la resistencia al deslizamiento por medio de un patín montado en el extremo del brazo pendular. Este ensayo evalúa la microtextura de un pavimento mediante el CRD.

El método es adecuado tanto para medias en campo sobre superficies pavimentadas como para ensayos de laboratorio. Se debe tener en cuenta que la superficie ha de ser homogénea, evitando resaltos o ranuras.

Figura 38: Péndulo TRRL. (Fuente: www.highwaymaintenance.com)

Cuando se realiza el ensayo en campo se coloca el dispositivo en una superficie ligeramente horizontal y firme, de forma que el péndulo se mueva en la dirección del tráfico. En el caso de que se desee realizar las medias en zonas con inclinaciones pronunciadas (> 10%), la dirección de oscilación del péndulo podrá ser diferente a la dirección del tráfico siempre que la pendiente sea menor al 10%.

Tras limpiar la superficie se mide la temperatura de la superficie de ensayo y del patín, así como del agua que se utilizará más adelanta mojar la superficie de ensayo y el patín.

Tras colocar y ajustar el péndulo correctamente a la superficie se lleva el brazo del péndulo a su posición horizontal, sujetándolo con el mecanismo de bloque. A continuación se mojan las superficies con abundante agua y se suelta el

péndulo y se toma nota del valor señalado por la aguja en la escala. Se debe realizar este ensayo 5 veces en un primer momento o hasta que tres lecturas consecutivas sean constantes si las 5 primeras medidas difieren en más de 3 puntos. De esta forma se obtiene el coeficiente de resistencia al deslizamiento o CRD.

3.2.2.2.3 CRT y Textura

El coeficiente de resistencia al deslizamiento se puede determinar mediante la metodología descrita en la norma NTL-336/92. El método se basa en la relación que existe entre la fuerza tangencial desarrollada cuando una rueda gira libremente con una desviación respecto al sentido de la marcha del vehículo y la reacción vertical del pavimento sobre el neumático. Este método permite realizar mediciones continuas del CRT a velocidades de hasta 70 km/h.

El dispositivo necesario para realizar el ensayo consiste en una rueda normalizada acoplada a un vehículo con una desviación de 20 grados. El vehículo además dispondrá de un tanque de agua con el que se mojará de forma continua la superficie sobre la que pasará la rueda de medida. El vehículo más utilizado con estas características se denomina SCRIM.

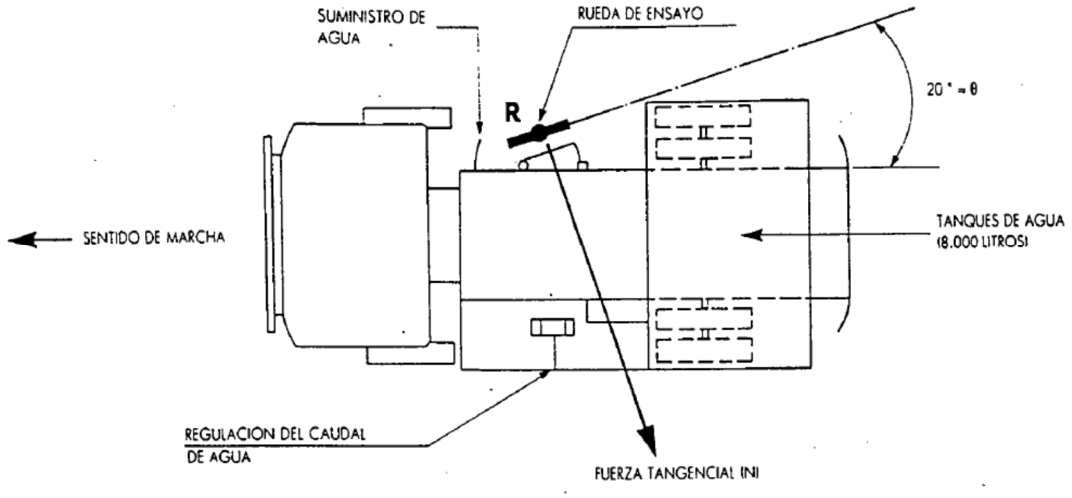


Figura 39: Principio de funcionamiento del equipo Scrim. (Fuente: www.iso.org)

El equipo de medida deberá poder registrar tanto las fuerzas tangenciales generadas en la rueda como la velocidad de desplazamiento del vehiculo. Tambien se registra la temperatura ambiente. Se toman 16 lecturas del CRT por metro de recorrido, anotando de forma manual las incidencias y referencias necesarias para una correcta interpretación de los datos posterior.

Figura 40: Equipo Scrim.

3.2.2.2.4 Circulo de arena

Este método, descrito en la norma UNE-EN 1036-1, es utilizado para conocer la textura, más concretamente, la macrotextura de superficies pavimentadas.

El método consiste en verter una determinada cantidad de arena o esferas de vidrio sobre la superficie a ensayar. La superficie debe ser limpiada con anterioridad para eliminar la presencia de residuos. Una vez vertido el material se esparce en forma de círculo con ayuda de un disco plano y duro cubierto por una cara con una placa de caucho. La arena se debe esparcir de manera que se rellenen los huecos de la superficie al ras con los picos de los áridos. Finalmente se mide el diámetro del círculo por al menos 4 puntos separados de manera regular y se registra el diámetro medio.

Una vez conocidos el volumen de material utilizado y el diámetro medio del círculo se puede calcular la profundidad media de la textura superficial (ETD).

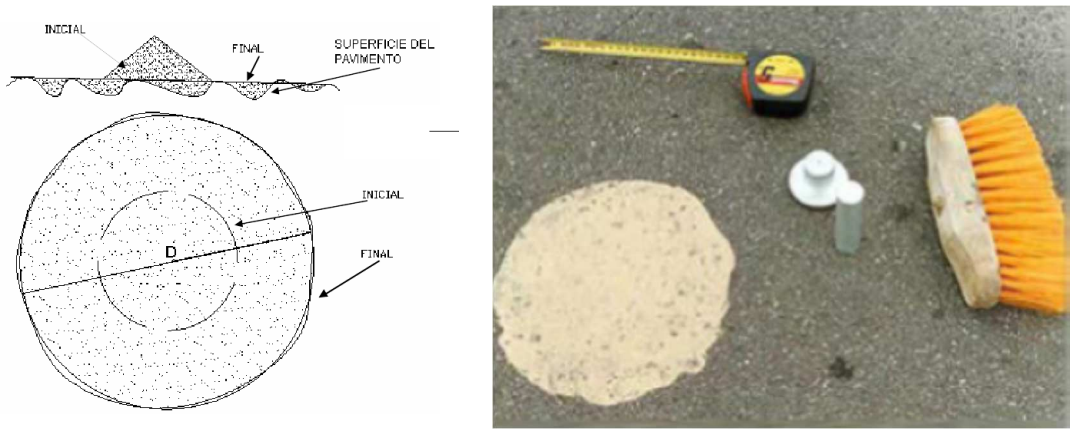


Figura 41: Ensayo del círculo de arena. (Fuente: www.4shared.com y www.ityac.com.ar)

Este método cuenta con múltiples desventajas. Se trata de un método discontinuo, haciendo necesario realizar gran cantidad de mediciones si se desea conocer la textura superficial a lo largo de un trazado. Por esta razón y por el tiempo necesario para realizar el ensayo una sola vez, lo convierten en un

método costoso. Por otra parte es conveniente que sea solamente utilizado en carreteras cerradas al tráfico por suponer un riesgo de atropello para las personas que lo llevan a cabo.

Por estas razones el método del círculo de arena ha sido desplazado por otros métodos más económicos que permiten la toma de medidas de forma continua.

3.2.2.2.5 Texturómetro laser

Este método, descrito en la norma UNE-EN 13473-1, es un método más sofisticado que el ensayo del círculo de arena consiguiendo mayores rendimientos. Se basa en la emisión de un rayo láser que al chocar con la superficie pavimentada se refleja en un potenciómetro óptico, pudiendo obtenerse la altura de reflexión en función de la zona de incidencia del rayo reflejado. El dispositivo suele montarse en el aparato SCRIM, de forma que se pueden conseguir de forma simultánea el valor de la macrotextura y del CRT de forma continua a lo largo de un tramo.

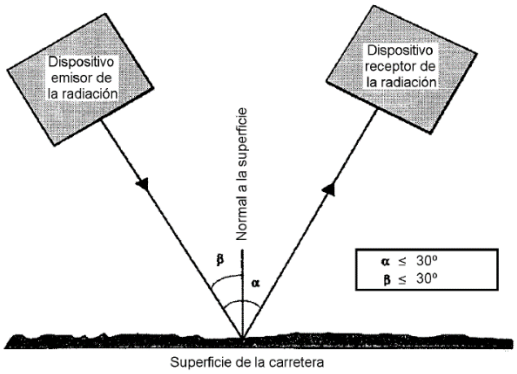


Figura 42: Principio de funcionamiento de un texturómetro. (Fuente: www.iso.org)

Figura 43: Equipo láser para la medida de la textura y la regularidad.

Debe tenerse en consideración el estado de la superficie del tramo ya que por norma general los texturómetros no son capaces de operar sobre pavimentos mojados.

Mediante este método se obtiene una profundidad media del perfil (MPD), que tras el empleo de las ecuaciones adecuadas se trasforma este valor en el obtenido a través del ensayo del circulo de arena (ETD).

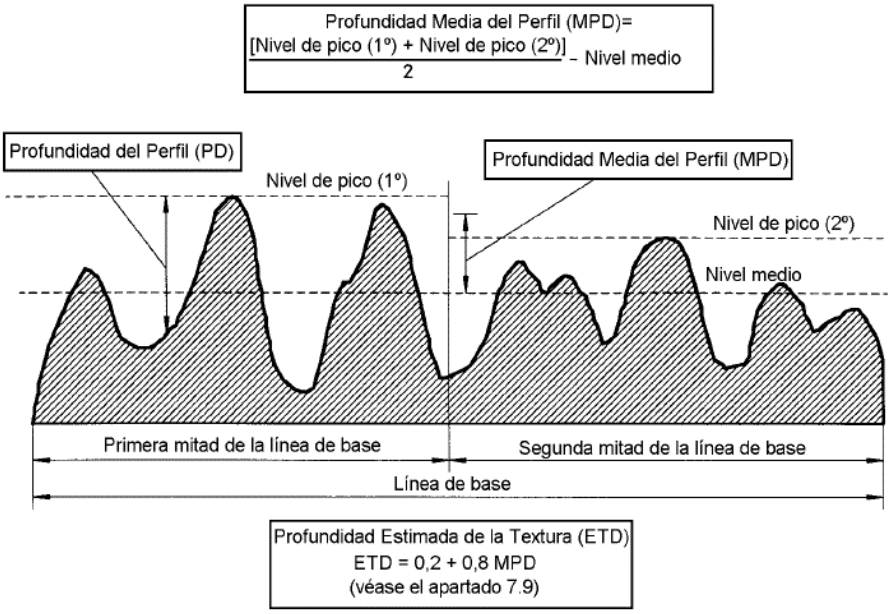


Figura 44: Profundidad de medida del perfil. (Fuente: www.iso.org)

3.2.2.2.6 Tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta es uno de los métodos más simples para evaluar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga de rotura de una mezcla bituminosa. Reproduce el estado tensional en el interior de la capa asfáltica o zona de tracción.

El ensayo consiste en cargar una probeta cilíndrica, igual a la definida para el ensayo Marshall, con una carga de compresión diametral a lo largo de dos generatrices opuestas. Esta configuración de carga, que puede ser sencilla o repetida, provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, siendo esta tracción la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral.

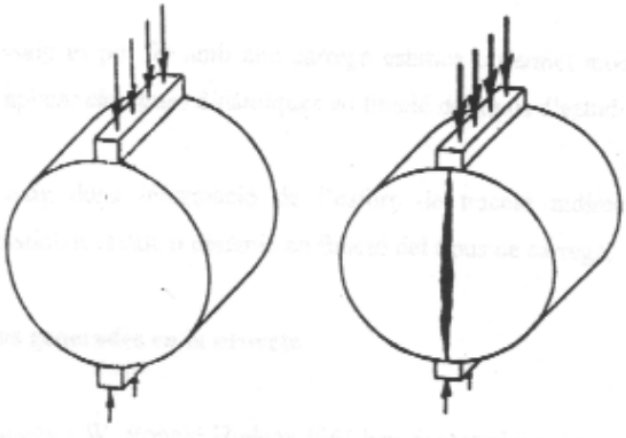


Figura 45: Configuración de la carga y rotura del ensayo a tracción indirecta.

El parámetro a medir es la carga de rotura de la probeta. También se puede determinar el desplazamiento vertical y la deformación horizontal del diámetro de la probeta durante la realización del ensayo si se dispone de los sistemas

necesarios para medirlos. El procedimiento se puede usar para probetas fabricadas en laboratorio y para probetas extraídas del pavimento.

La metodología del ensayo viene recogida en la Norma UNE-EN 12697-23. Esta Norma indica que para cada muestra que vaya a ser ensayada deben prepararse, al menos, tres probetas cilíndricas de 10, 15 o 16 cm de diámetro y una altura entre 3,5 y 7,5 cm. Estas deben estar a una temperatura controlada, siempre entre 5 y 25º C. Cuando las probetas se encuentren en las condiciones deseadas se coloca en el bastidor, alineándola sobre la banda de carga inferior, de forma que la carga se pueda aplicar diametralmente. A continuación, se inicia la compresión de la probeta con una carga diametral a una velocidad constante de deformación hasta que se alcance la carga máxima (P_{max}). Después se continúa aplicando carga hasta que se produzca la rotura de la probeta.

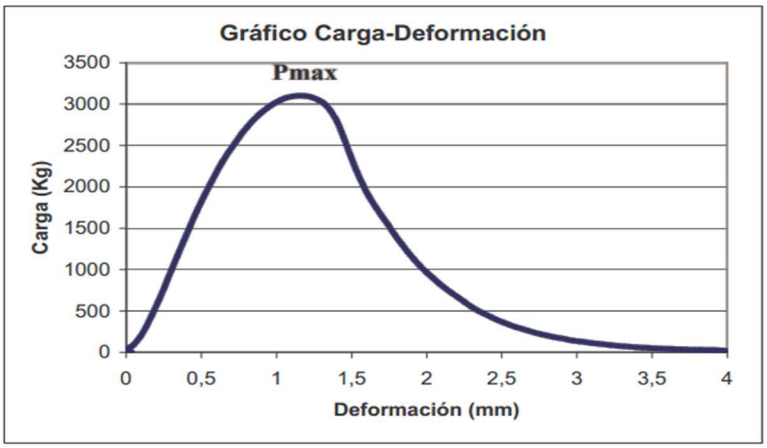


Figura 46: Curva Carga-Deformación resultante del ensayo de tracción indirecta.

3.2.2.2.7 Resistencia conservada tras la inmersión

Este ensayo sirve para determinar el efecto de la saturación y el acondicionamiento acelerado de agua. Puede usarse para evaluar el efecto de humedad, con o sin activantes de adhesividad, incluyendo líquidos, como aminas, y filleres como la cal hidratada o el cemento.

La Norma UNE-EN 12697-12 describe 3 métodos para evaluar las características antes citadas, y entre ellos, uno emplea la resistencia a tracción indirecta de probetas cilíndricas de mezclas bituminosas. El ensayo se realiza como se explica a continuación.

Se preparan al menos 6 probetas cilíndricas de cada muestra. Las probetas deben tener un diámetros de 8, 10, 12, 15 o 16 cm. Después, se dividen las probetas en dos subconjuntos:

- Probetas secas. Almacenadas a 20±5ºC.
- Probetas húmedas.
  - Se sumergen en agua destilada.
  - Se les aplica el vacío y más tarde se deja entrar el aire, desechando aquellas probetas que aumenten más de un 2% su

volumen.

A continuación se almacenan las probetas secas en cámara de aire y las probetas húmedas en un bañó de agua durante 2 o 4 horas en función del diámetro de las mismas. Se seca la humedad superficial de las probetas húmedas con una toalla. Y se realizan el ensayo de tracción indirecta de acuerdo a la Norma UNE-EN 12697-23. Este ensayo de resistencia a tracción indirecta debe realizarse dentro del minuto después de haber sacado las probetas del agua de acondicionamiento.

Para finalizar se calcula la relación de la resistencia a la tracción indirecta, ITSR, de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$ITSR = 100 \cdot \frac{ITS_W}{ITS_d}$$

donde:

- $ITSR$ es la relación de la resistencia a la tracción indirecta (%).
- ITS_W es la resistencia media a la tracción indirecta del grupo en agua.
- ITS_d es la resistencia media a la tracción indirecta del grupo seco.

3.2.2.2.8 Módulo resiliente

El módulo resiliente se define como el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial entre la deformación axial recuperable.

Por todos es conocido que los materiales bituminosos no son elásticos y que experimentan deformaciones permanentes después la aplicación de una carga. Sin embargo, si la carga es lo suficientemente pequeña y se repite durante un gran número de veces, la deformación tras cada ciclo de carga es casi totalmente recuperable y proporcional a la carga pudiendo ser considerada como elástica. Así, el módulo resiliente es el módulo elástico basado en la tensión elástica de recuperación.

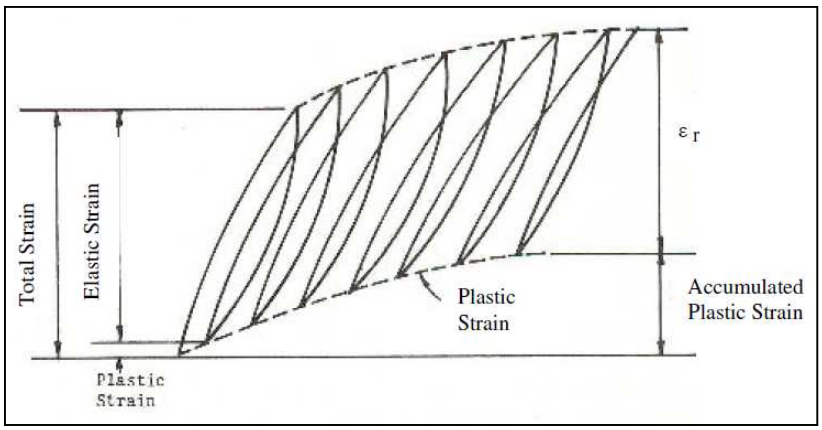


Figura 47: Diagrama de deformaciones para cargas repetidas. (Fuente: www.iso.org)

El módulo resiliente es un parámetro ampliamente obtenido en laboratorio por su simplicidad y aplicabilidad en muestras de ensayo procedentes de obra; asimismo, es el método más común para determinar el módulo de rigidez para

mezclas bituminosas en caliente.

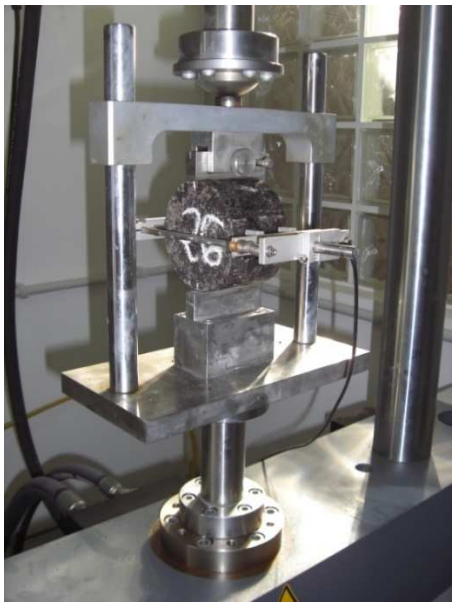


Figura 48: Máquina del ensayo de rigidez.

Figura 49: Aparato LVDT para medir deformaciones diametrales.

El cálculo del módulo resiliente se realiza según la norma UNE-EN 12697-12. Para ello se somete a cada probeta a 16 ciclos de carga. Se aplica una carga de 4,5 KN de fuerza durante 124 milisegundos (8 Hz) y después se descarga, teniendo así un ciclo completo. A cada probeta se la ejerce una presión vertical, midiéndose la amplitud de la deformación horizontal. Se hace una media de los datos entre los ciclos 11 y el 15 y se introducen en la fórmula de la norma obteniendo el módulo de rigidez (S'_m) buscado:

$$S_{m=}\frac{F \times (\nu + 0.27)}{(z \times h)}$$

donde,

- Sm: es el módulo de rigidez medido, expresado en megapascales (MPa);
- F: es el valor máximo de la carga vertical aplicada, expresado en Newtons (N);
- z: es la amplitud de la deformación horizontal durante el ciclo de carga expresada en milímetros (mm);
- h: es el espesor medio de la probeta expresado en milímetros (mm);
- v: es el coeficiente de Poisson (0.35 en nuestro caso).

El módulo de rigidez medido debe ser ajustado según el factor de superficie de carga (k):

$$S'_m = S_m \times \{1 - 0.322 \times [\log(S_m) - 1.82] \times [0.60 \times k]\}$$

donde,

- S'_m: es el módulo de rigidez, expresado en megapascales (MPa) para un factor de superficie de carga de 0.60;
- K: es el factor de superficie de carga medido;
- S_m: es el módulo de rigidez medido, expresado en megapascales (MPa), para un factor de carga k, expresado en grados Celsius (ºC).

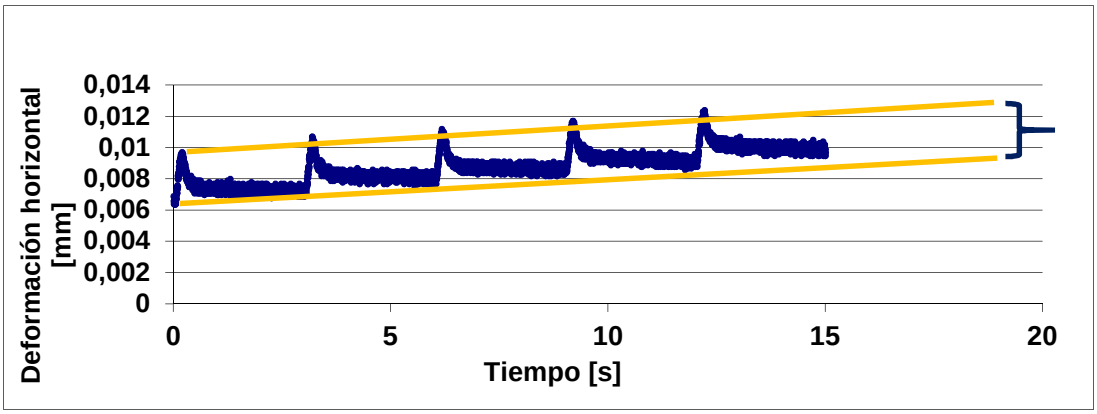


Figura 50: Amplitud de deformación correspondiente a los ciclos del 11 al 15 para una misma probeta.

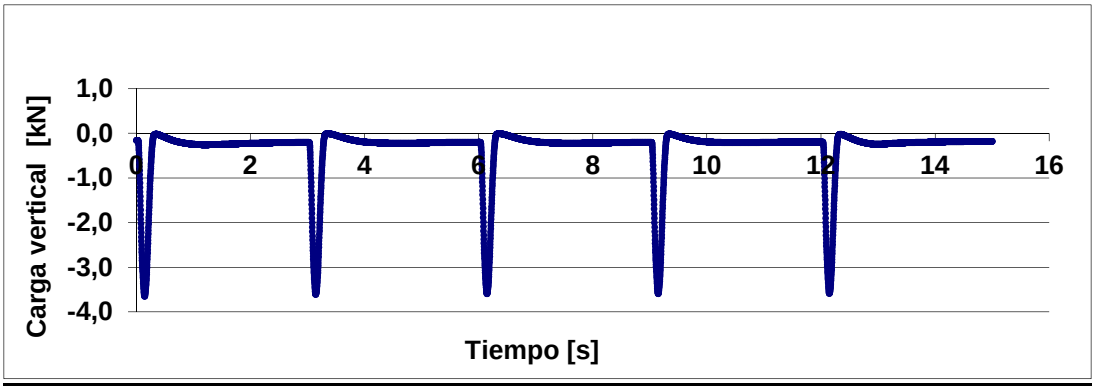


Figura 51: Espaciado de los pulsos de carga en función del tiempo.

3.2.2.2.9 Módulo de rigidez

Figura 52: Máquina para el ensayo de flexión en 4 puntos. (Fuente: proetisa.com)

Existen diversos métodos para el cálculo de la rigidez de mezclas bituminosas. El empleado en esta Tesis Doctoral es el ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas. El ensayo, que esta descrito en la Norma UNE-EN 12697-26, consiste en someter a una flexión periódica en cuatro puntos, con rotación y traslación libres en todos los puntos de carga y de reacción a la carga. La flexión se realiza por movimiento de los puntos centrales en dirección vertical, perpendicularmente al eje longitudinal de la probeta. Mientras, las posiciones verticales de los extremos permanecen fijas.

El desplazamiento periódico aplicado es simétrico respecto al cero y sinusoidal, y la amplitud del desplazamiento debe ser constante en el tiempo. Durante el ensayo se mide la fuerza necesaria para la deformación de la probeta en función del tiempo, así como del desfase entre la señal de fuerza y la señal de desplazamiento. Partiendo de esto, se calcula el módulo de rigidez del material utilizando.

3.2.2.2.10 Fatiga

Se define fatiga como la reducción de la resistencia de un material bajo la aplicación repetida de una carga, cuando se compara con la resistencia bajo la aplicación individual de una carga. Dentro de los ensayos de fatiga en laboratorio existen varios tipos. El método utilizado es el descrito en el Anexo D de la Norma UNE-EN 12697-24.

La resistencia a la fatiga es una de las propiedades que se exige que cumpla una mezcla bituminosa ya que está muy ligada a la vida del pavimento. Para altas velocidades de aplicación de carga y mezclas a bajas temperaturas existe un comportamiento casi elástico. Cuando la velocidad de deformación es elevada la resistencia que opone la mezcla a deformarse crece apreciablemente por encima del valor soporte, pues la resistencia por rozamiento interno viene a sumarse a la resistencia viscosa del ligante.

El paso repetido de cargas con un valor inferior al de rotura va produciendo el agotamiento progresivo del material por fatiga. Los ensayos a fatiga del laboratorio intentan reproducir este comportamiento. Para llevarlo a cabo se someten las diferentes probetas a una serie de deformaciones repetidas y se observa su comportamiento. En el laboratorio, la importante dispersión de las

duraciones de vida por causa de la naturaleza aleatoria de este fenómeno y la naturaleza heterogénea de los materiales compuestos hace que se necesite un elevado número de muestras a ensayar para cada tipo de mezcla bituminosa.

Los resultados que se obtienen con este ensayo son:

- Módulo de rigidez inicial.
- Deformación inicial (impuesta).
- Nº de ciclos hasta el fallo.

A partir de estos datos se calcula la ley de fatiga de las mezclas, trazada en un gráfico "número de ciclos hasta el fallo-deformación inicial" en escala vertical logarítmica. Ésta se traza como aproximación lineal de los resultados puntuales obtenidos.

La metodología descrita en el Anexo D de la citada norma es la siguiente. Tras preparar la probeta como indica la Norma se coloca sobre el equipo de ensayo con las dos mordazas exteriores y las dos interiores. Después la probeta se debe mover sinusoidalmente a la frecuencia *f* elegida para el desplazamiento inicial impuesto. La fuerza, el desplazamiento y el desfase entre fuerza y desplazamiento se deben registrar después de 100 ciclos y luego de forma regular. El valor inicial del módulo calculado S_{mix} se debe calcular a partir de los valores medidos de la fuerza, el desplazamiento y el desfase después del ciclo número 100. El ensayo de fatiga debe continuar hasta que el módulo calculado S_{mix} haya disminuido hasta la mitad de su valor inicial o hasta la rotura de la probeta.

3.2.2.2.11 Ensayo de pista

Las deformaciones plásticas que se producen en mezclas bituminosas debidas a la aplicación de una carga cíclica, como la del tránsito de vehículos, es un parámetro muy importante a determinar. Este parámetro se evalúa mediante el ensayo de pista o Wheel Tracking Test

La Norma UNE-EN 12697-22 describe el ensayo de pista de laboratorio que consiste en someter una placa de mezcla bituminosa al paso de una rueda con unas condiciones de presión de 6 kg/cm^2, una carga de 700 kN y una temperatura de 60º dentro de una cámara termostática. Durante el ensayo se miden las deformaciones que se producen en la probeta para unos intervalos de pasadas fijados.

Figura 53: Máquina de ensayo de pista de laboratorio.

La máquina de ensayo consiste en un eje a través del cual circula una rueda en ciclos constantes. La rueda ejerce una presión sobre la superficie de rodadura. El mecanismo que hace circular la rueda está diseñado para que en un minuto de tiempo se realicen un total de 26,5 ciclos (53 pasadas) con un recorrido en cada sentido de 230±0,5 mm.

3.2.2.2.12 Ensayo Marshall

Se trata de un ensayo para determinar la estabilidad y deformabilidad de pavimentos bituminosos. Consiste, a grandes rasgos, en la rotura de probetas cilíndricas de 101,6 mm de diámetro y 63,5 mm de altura mediante la utilización de una mordaza que impone una velocidad constate de deformación de 50,8 mm/min.

Para realizar este ensayo se utiliza una prensa accionada hidráulicamente por un motor de inyección de aceite y un aparato electrónico que permite controlar y medir las cargas y deformaciones que se aplican a las probetas.

Figura 54: Máquina de ensayo Marshall.

Previamente al ensayo se sumergen las probetas, apoyadas sobre la cara plana, en un baño de agua durante un periodo de tiempo de entre 40 y 60 min a

una temperatura que se debe mantener a 60±1º C.

Una vez transcurrido este tiempo y habiendo limpiado correctamente la mordaza de la máquina de ensayo, se seca la superficie de la probeta y se coloca en el centro de forma que su eje quede en dirección horizontal, comprobando que exista un buen contacto superficial entre probeta y mordaza de ensayo. Este conjunto se coloca en el centro en la máquina de ensayo para proceder a la aplicación de cargas.

Se inicia el ensayo aplicando una carga a la probeta hasta alcanzar una velocidad constante de deformación de 50±2 mm/min fuera del periodo transitorio. Después se continúa aplicando carga hasta que se obtenga la lectura máxima en el dispositivo de medición de la carga, registrando este valor. Es importante que esta parte del ensayo se realice antes de que transcurran 40 segundos después de sacar la probeta del baño de agua.

Se trata de un ensayo destructivo, con lo cual las probetas ensayadas deben desecharse y no utilizarse para otros ensayos posteriores.

3.2.3 ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE HORMIGONES FABRICADOS CON ÁRIDOS RECICLADOS INDUSTRIALES

3.2.3.1 Introducción

Este apartado describe la metodología seguida en los ensayos realizados para la correcta fabricación y caracterización de los hormigones estudiados en esta Tesis Doctoral.

3.2.3.2 Ensayos sobre el hormigón

3.2.3.2.1 Definición de las dosificaciones

Se utiliza el método Fuller basado en el contenido de cemento, apropiado para hormigones con baja densidad de armaduras y áridos redondeados con un tamaño máximo inferior a 70 mm y 300 kg/cm^3 de cemento.

3.2.3.2.2 Procedimiento de amasado

3.2.3.2.3 Consistencia del hormigón

La evaluación de la consistencia de un hormigón en estado fresco se ha realizado mediante el Cono de Abrams UNE 12350-2:2009.

3.2.3.2.4 Preparación de probetas normalizadas

Se sigue la norma UNE-EN 12390-2:2009 “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia”.

3.2.3.2.5 Densidad y porosidad del hormigón endurecido

Para el cálculo de la densidad y de la porosidad del hormigón endurecido se sigue la norma UNE-EN 12390-7:2009.

3.2.3.2.6 Resistencia a compresión

Para la determinar la resistencia a compresión uniaxial de las probetas normalizadas de hormigón se siguen las indicaciones establecidas en la norma UNE-EN 12390-3:2009.

3.2.3.2.7 Resistencia a tracción indirecta

Para la determinación de la resistencia a tracción indirecta o método brasileño de las probetas de hormigón se han seguido las indicaciones establecidas en la norma UNE-EN 12390-6:2001.

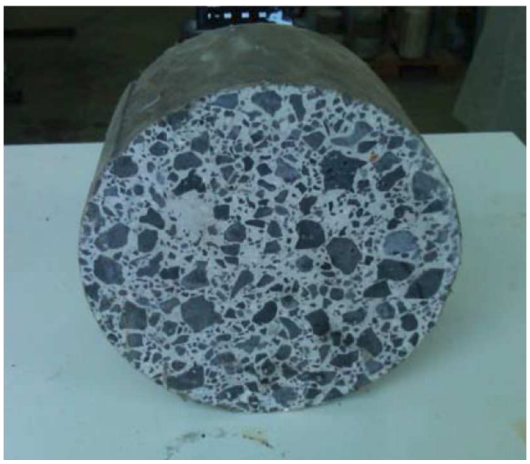


Figura 55: Tercio de probeta cilíndrica para el ensayo de tracción indirecta.

3.2.3.2.8 Permeabilidad al oxígeno

El ensayo de permeabilidad al oxigeno se ha realizado atendiendo a lo establecido en las normas UNE 83966:2008 y UNE 83981:2008.

3.2.3.2.9 Penetración de agua bajo presión

Para la realización de este ensayo se sigue la norma UNE-EN 12390-8:2009.

A lo largo del ensayo se debe observar el estado de las superficies de la probeta no expuestas al agua a presión para detectar la posible presencia de agua.

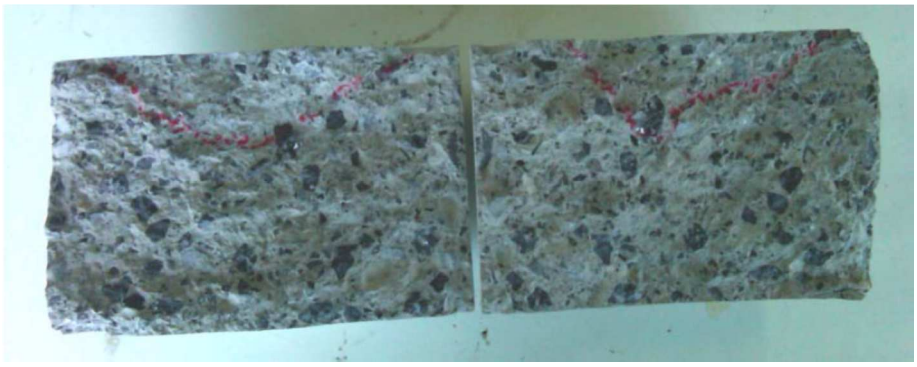


Figura 56: Tercio de probeta cilíndrica tras ensayo de penetración de agua.

3.2.3.2.10 Resistencia al desgaste por abrasión

Para la realización del ensayo se han seguido las indicaciones de la normativa UNE-EN 14157.

El método seleccionado ha sido el del “Disco de abrasión ancho”.

Figura 57: Detalle de la submuestra obtenida.

Figura 58: Uso de una lupa de dos aumentos para la definición de los límites del desgaste.

Figura 59: Medición de la huella de desgaste con el calibre.

CAPÍTULO 4.
CARACTERIZACIÓN DE ESCORIAS NEGRAS: ÁRIDOS, MEZCLAS BITUMINOSAS Y HORMIGONES

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se pretende caracterizar las escorias negras producidas por las empresas Global Steel Wire y Sidenor, así como la viabilidad técnica de su empleo en la fabricación mezclas bituminosas y hormigones.

El capítulo se ordena de la siguiente manera:

- Caracterización de las escorias negras.
- Estudio de viabilidad técnica para el empleo en la fabricación de mezclas bituminosas.
- Estudio de viabilidad técnica para el empleo en la fabricación hormigones.
- Conclusiones obtenidas.

Las escorias negras objeto de análisis en esta Tesis Doctoral son las producidas por la empresa Global Steel Wire (GSW) en Santander, Cantabria.

La planta de GSW tiene una producción anual aproximada de 110.000 toneladas de escoria negra. Este elevada cantidad las convierte las más interesantes para estudiar dado la mayor repercusión económica que pudiera conllevar su puesta en valor.

Asimismo, a modo de comparación en determinados parámetros con las de GSW, se han analizado escorias negras procedentes de la empresa Sidenor en el municipio de Reinosa, Cantabria.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS NEGRAS

A continuación se muestran los resultados de los ensayos de caracterización realizados a las escorias procedentes de la empresa Global Steel Wire. Los ensayos realizados son aquellos que se consideran necesarios de cara a definir áridos que van a ser empleados en mezclas bituminosas. También se incluye el análisis granulométrico del árido calizo que va a ser incluido en las mezclas bituminosas.

Con el fin de caracterizar las escorias negras de las empresas Global Steel Wire y Sidenor, se realizaron aquellos ensayos que se consideran necesarios para definir áridos que van a ser empleados en la fabricación de mezclas bituminosas y hormigones. Los ensayos desarrollados fueron los siguientes:

<u>Caracterización física y mecánica</u>

- Identificación visual
- Análisis granulométrico
- Coeficiente de desgaste de Los Ángeles
- Índice de machacabilidad
- Equivalente de arena
- Índice de lajas

- Densidad aparente y porosidad
- Densidad de partículas aparente
- Absorción
- Humedad natural

Caracterización química y mineralógica

- Análisis químico por fluorescencia de Rayos X
- Análisis mineralógico mediante difracción de Rayos X
- Análisis por espectrometría de infrarrojos
- Contenido en azufre total
- Contenido en cal libre
- Contenido de óxido de magnesio
- Microscopio electrónico

Ensayos de alterabilidad

- Índice granulométrico de envejecimiento
- Ensayo de lixiviación
- Ensayo de expansividad
- Ensayo de pulimento acelerado

En los siguientes apartados se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos.

4.2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA

4.2.1.1 Identificación visual

A fecha 1 de diciembre de 2009 se recibieron en el Laboratorio de Caminos y Aeropuertos de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander varios sacos de árido siderúrgico procedentes de la cantera de acopio que la empresa Emilio Bolado tiene en Revilla de Camargo (Cantabria).

Las fracciones granulométricas disponibles son:

- 0-6mm.
- 6-12mm.
- 12-18mm.

Figura 60: Aspecto visual de los tres tamaños de escoria.

La escoria ha sido previamente sometida a un proceso de machaqueo, cribado y maduración al aire libre, aparte del propio proceso de valorización en la fábrica.

Atendiendo al aspecto visual, se observa que en muchas de las partículas de la fracción 12/18 se distingue una especie de película blanquecina como resultado de la formación de fluorescencias en forma de óxido. La forma de las partículas es muy angulosa e irregular. La presencia de partículas de árido redondeadas es inexistente. El color predominante es un gris de tonalidades claras, si bien, se ha comprobado que cuando se machaca el árido y se generan nuevas caras de fractura aflora un color gris negruzco.

Se aprecia una buena textura superficial al tacto. Gran proporción de las partículas de la fracción 12/18 presentan oclusiones gaseosas interiores dando lugar a una moderada porosidad interior. Según disminuye el tamaño de partícula las oclusiones van despareciendo hasta el punto de ser casi inexistentes para la fracción 0/6. Se distingue una estructura alveolar (aspecto vacuolar) típica de las rocas ígneas o magmáticas.

Cabe añadir también, que aisladamente se encontraron partículas metálicas de gran densidad y de un tamaño medio con forma de laja y/o aguja.

4.2.1.2 Análisis granulométrico

La granulometría es una característica física fundamental de cualquier conjunto compactado de partículas influyendo de manera decisiva en su resistencia mecánica. La práctica ha sancionado como adecuados una serie de husos granulométricos dentro de los cuales se deberán encontrar nuestras fórmulas de trabajo. Para encajar una granulometría dentro del huso normalizado se mezclan en las proporciones que correspondan las distintas fracciones de árido disponibles.

El tamaño máximo de los áridos viene limitado por aspectos como la trabajabilidad, la segregación o el espesor de la capa a extender. Con el árido grueso se consigue generar rozamiento interno en el esqueleto mineral de la mezcla. En el árido fino es la plasticidad lo que deberemos intentar evitar a toda costa. Su misión es lograr una buena compacidad de conjunto. Por otro lado, la naturaleza y proporción del polvo mineral es determinante en las mezclas bituminosas, ya que muchas características de éstas dependen de la acción conjunta filler-ligante, como por ejemplo, la cohesión de la mezcla.

A continuación se recogen los resultados de las granulometrías de las escorias producidas en las instalaciones de GSW.

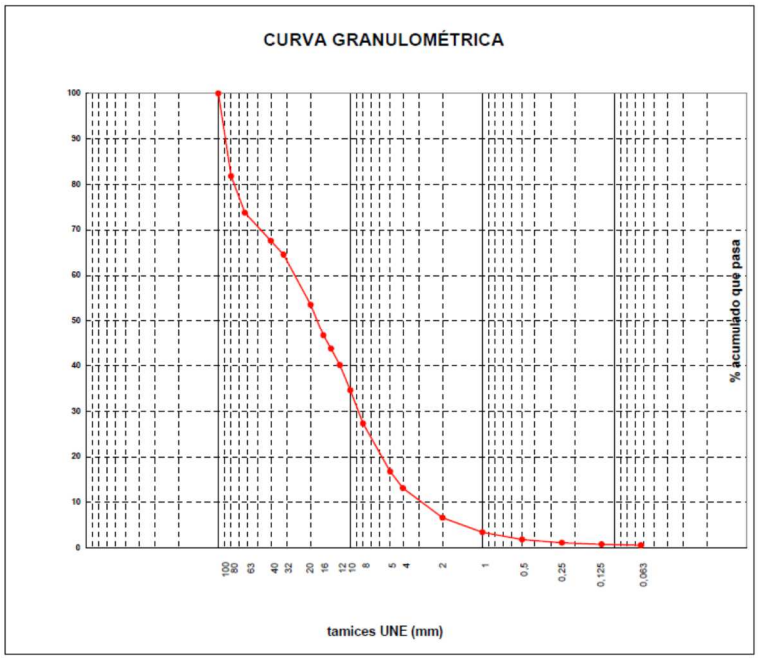


Figura 61: Granulometría escoria negra con fragmentación térmica.

Figura 62: Análisis granulométrico GSW.

Para la fabricación de mezclas asfálticas y hormigones se realiza una clasificación de las escorias en bruto mediante un cribado en las siguientes fracciones granulométricas:

- Fracción 0/6
- Fracción 6/12
- Fracción 12/18

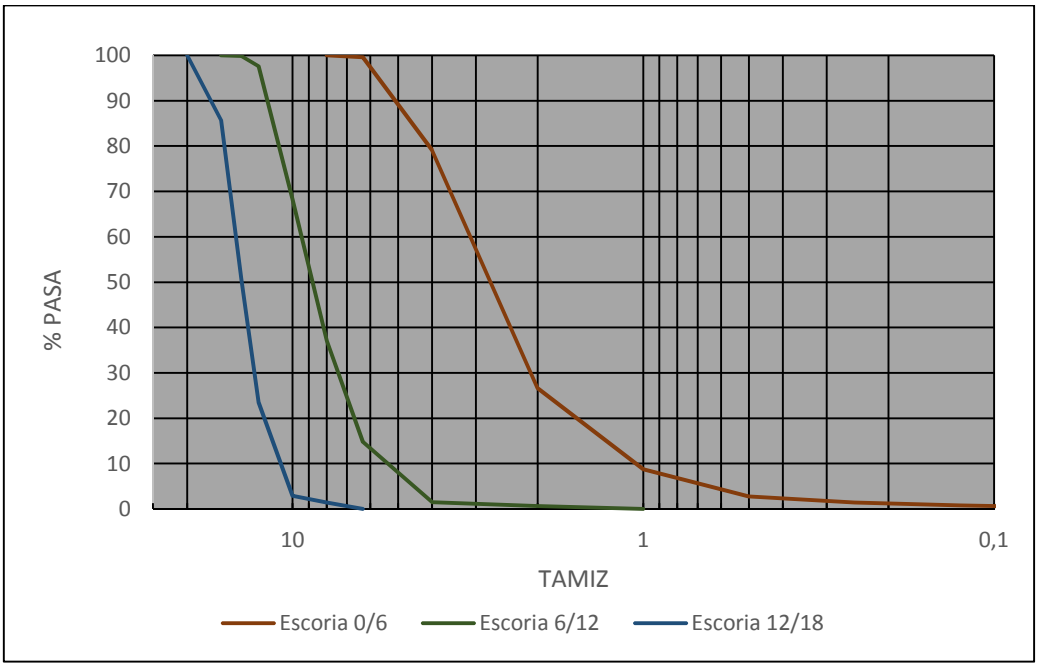


Figura 63: Granulometrías de las fracciones de escoria que se emplearán para fabricar las mezclas bituminosas.

El principal problema que se plantea en la fabricación de mezclas bituminosas con estos áridos es la falta de finos en la fracción más pequeña. Una dosificación de áridos adecuada, desde un punto de vista técnico, es la que combina árido grueso de escoria con árido fino calizo. Esta es una de las razones por la que se incluye a continuación la granulometría de un árido calizo. Otra razón es porque la caliza es un árido abundante y barato en Cantabria que además mejora la adhesividad árido ligante.

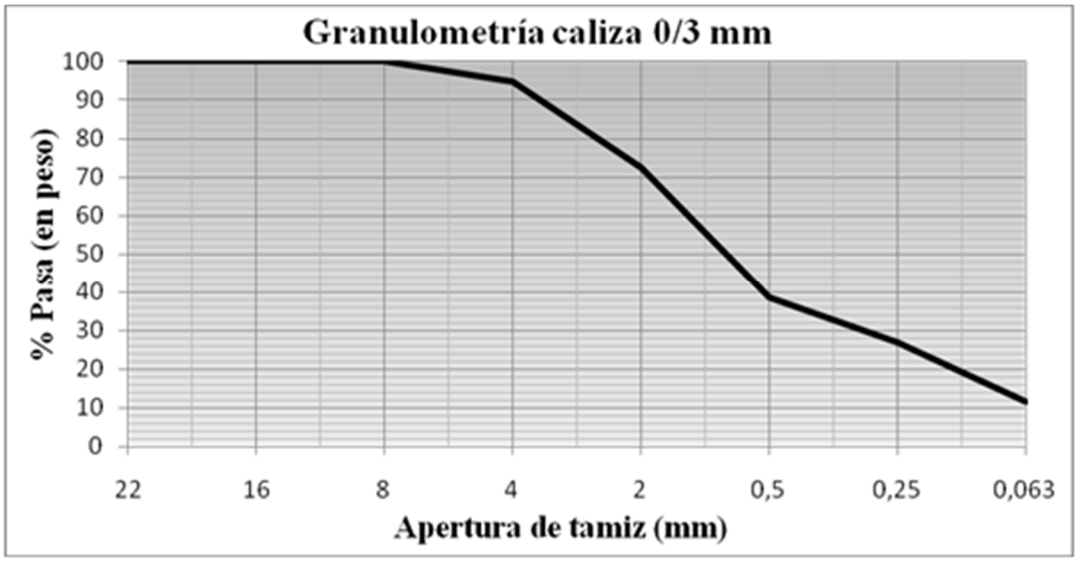


Figura 64: Granulometría del árido calizo empleado para la fabricación las mezclas bituminosas.

4.2.1.3 Equivalente de arena

Este ensayo es de gran importancia para conocer la interacción entre el árido y el ligante. El PG-3 especifica que resultado del ensayo realizado según la norma UNE-EN 933-9 debe ser mayor que 50.

En la siguiente tabla se muestran los resultados del ensayo:

	ENSAYOS			
	1	2	3	
EA	78,46	85,71	76,81	**80,33**

Tabla 38: Equivalente de arena.

A la vista de estos resultados se deduce son adecuados desde el punto de vista de este ensayo para ser empleadas en la fabricación de mezclas bituminosas y hormigones.

4.2.1.4 Índice de lajas

Los resultados del ensayo aplicando la norma UNE-EN 933-3 se muestran a continuación:

Muestra	**Escoria $(0/6)_1$**	**Escoria $(0/6)_2$**	**Escoria $(6/12)_1$**	**Escoria $(6/12)_2$**	**Escoria $(12/18)_1$**	**Escoria $(12/18)_2$**
Ind. lajas	3	3	2	2	1	1

Tabla 39: Valor del Índice de Lajas para las partículas de escoria.

4.2.1.5 Densidad aparente y porosidad

En la tabla que sigue se muestran los resultados de los ensayos para la densidad aparente y la porosidad:

Muestra	Escoria 0/6	Escoria 6/12	Escoria 12/18
Densidad Aparente	1,889	1,934	1,766
% Huecos	50,5	49,0	52,9

Tabla 40: Densidad aparente y porosidad.

Analizando los resultados se observa que la densidad de la escoria 6/12 es superior a la de la 0/6 debido a que con la escoria 6/12 se consigue una compacidad mayor a causa de una mejor graduación granulométrica (los gruesos y los finos encajan mejor unos con otros).

Por otro lado, se comprueba cómo la fracción 12/18 es la que tiene mayor índice de huecos, lo que es del todo lógico porque como el tamaño de las partículas es superior también lo deberían ser las oquedades del esqueleto mineral.

4.2.1.6 Densidad de partículas aparente

Para determinar la densidad de partículas aparente del material se siguió el método del picnómetro. Con este ensayo se puede determinar la densidad de partículas aparente, es decir, la "relación entre la masa de una muestra de árido secada en estufa y el volumen que ocupa en agua, con inclusión de los huecos interiores estancos y exclusión de los huecos accesibles al agua". Los resultados son los siguientes:

Muestra	Escoria 0/6	Escoria 6/12	Escoria 12/18
Peso específico (t/m^3)	3.820	3.792	3.747

Tabla 41: Densidad relativa en agua destilada para las distintas fracciones de escoria.

4.2.1.7 Humedad natural

Para cada una de las tres fracciones granulométricas de las escorias de GSW se calculó la humedad natural. Los valores obtenidos son los siguientes:

HUMEDAD NATURAL						
	ESCORIA 0/ 6 GSW		ESCORIA 6/ 12 GSW		ESCORIA 12/18 GSW	
Muestra	**2,1**	**2528**	**3,95**	**2406**	**2,81**	**2704**
Ref. Tara	**2,14**	**2475**	**4,11**	**2311**	**2,79**	**2628**
Agua		**53**		**95**		**76**

Tabla 42: Humedad natural de la escoria negra de GSW clasificada.

- Fracción 0/6 H_n= 2,1%.

- Fracción 6/12 H_n= 4,1%.
- Fracción 12/18 H_n= 2,8%.

4.2.1.8 Absorción

A continuación se muestran los resultados obtenidos para los ensayos de absorción:

Muestra	Escoria 0/6	Escoria 6/12	Escoria 12/18
Absorción (WA_{24}) %	1.93	1.26	1.04

Tabla 43: Absorción tras inmersión en agua destilada durante 24 horas.

Se distingue cómo la absorción (en peso) aumenta a medida que disminuye el tamaño de partícula. Esto obedece a que a igualdad de pesos la superficie específica de la fracción 0/6 es mucho más alta que la de la 12/18.

4.2.1.9 Coeficiente de desgaste de Los Ángeles

En general, se puede decir que coeficientes de Los Ángeles mayores a 40 son indicativos de áridos de mala calidad, no aptos en principio para su uso en firmes de carreteras. Por el contrario, coeficientes por debajo de 20 indican una resistencia mecánica elevada y suficiente para su uso en capas de rodadura que vayan a soportar un tráfico pesado a elevadas intensidades.

Con estas muestras se llevó a cabo el ensayo de Los Ángeles según la norma UNE-EN 1097-2:1999 para la determinar la resistencia a la fragmentación. El resultado obtenido fue el siguiente:

	GSW
Los Ángeles	17,4

Tabla 44: Ensayo de Los Ángeles.

4.2.1.10 Índice de machacabilidad

La metodología seguida para la realización de este ensayo es la establecida en la norma UNE 83112: “Áridos para hormigones. Determinación del índice de machacabilidad”. En las siguientes figuras se muestra el aspecto de la escoria antes y después del ensayo de machacabilidad:

Figura 65: Fracción 10/14 de la escoria en el interior del molde rígido.

Figura 66: Aspecto de la fracción 10/14 de escoria tras la realización del ensayo.

Los resultados obtenidos en el ensayo son los detallados en la siguiente tabla:

Muestra	Fracción	Masa inicial(gr)	Masa final(gr)	I.M.
Árido calizo	10-14	2704.2	1884.6	30.31
Árido calizo	14-20	2598.6	1765.6	32.06
Escoria	10-14	3644.3	2971.9	18.45

Tabla 45: Resultado del Índice de Machacabilidad.

En la siguiente figura se muestra la diferencia existente entre la respuesta dada, en términos de deformación, por las escorias de GSW y los áridos naturales frente a cargas de compresión.

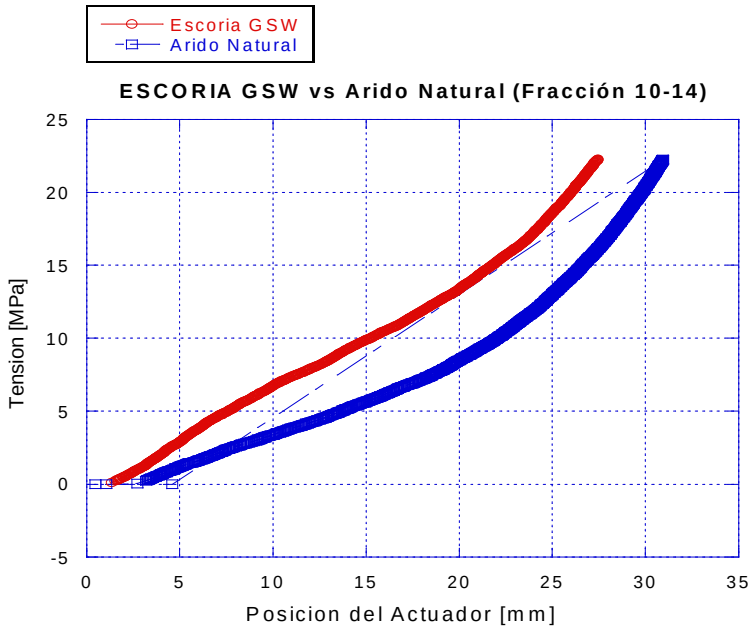


Figura 67: Curvas de aplicación de la carga exterior para la escoria y para un árido natural.

El resultado del ensayo confirma a la escoria de arco eléctrico como un árido de excelentes prestaciones, con mayor resistencia que la caliza. Su aplicabilidad en cualquier estrato del firme aportará menores deformaciones y mayor durabilidad bajo la carga del tráfico.

4.2.1.11 Ensayo de pulimento acelerado

Se llevaron a cabo ensayos para determinar el Coeficiente de Pulimento Acelerado (CPA) según la norma UNE–EN 1097-8 para las escorias de GSW en función del proceso de valorización.

La escoria bruta es una escoria sometida únicamente a un proceso de fragmentación térmica.

La escoria cribada es una escoria sometida a un proceso de fragmentación térmica y cribado posterior.

La escoria machacada y cribada es una escoria sometida a un proceso de fragmentación térmica, machaqueo y cribado.

Año	2009	2010	2011
Escoria bruta	0,53	0,51	0,52
Escoria Cribada	0,55	0,56	0,55
Escoria Machacada y Cribada	0,58	0,59	0,59

Tabla 46: Evolución del CPA en función de su proceso de valorización.

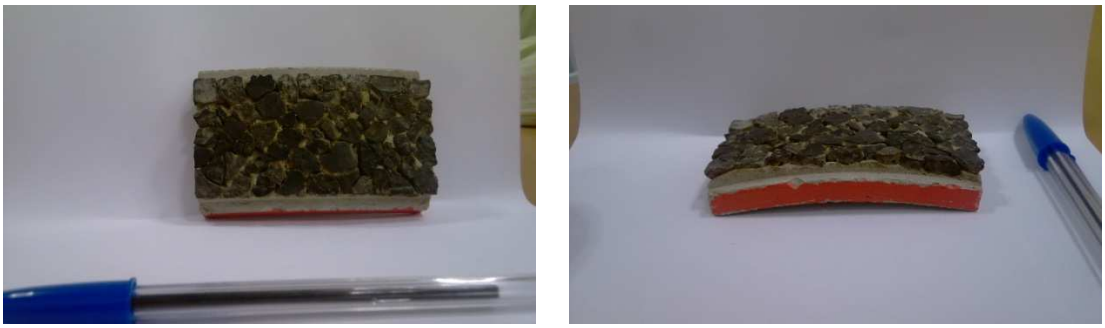


Figura 68: Muestra de GSW del ensayo CPA.

Se puede observar como en los procesos de valorización en los que los áridos siderúrgicos son sometidos a mayores energías los valores de CPA aumentan a causa de que las partes más frágiles del árido son eliminadas durante el proceso. Si bien con un tratamiento de cribado sería suficiente para cumplir con las mayores exigencias prescritas por el PG3 se puede observar como un tratamiento de machaqueo previo mejora sustancialmente los valores de CPA redundando en una mayor seguridad de la carretera en aplicaciones de mezclas bituminosas en capas de rodadura.

4.2.1.12 Índice granulométrico de envejecimiento (I.G.E.)

El I.G.E. nos aporta una medida indirecta del potencial expansivo de la escoria. Cuanto más bajo sea este valor indica que las reacciones de hidratación de la cal libre y de la magnesia están más cerca de completarse, y en consecuencia, que a la escoria le queda menos margen para poder expandirse.

De la experiencia adquirida se puede considerar que, en general, para que una escoria pueda utilizarse como material en carreteras su I.G.E. debe ser menor que el 1% (este es precisamente el límite que fija la normativa del País Vasco).

Para realizar este ensayo se tomaron dos muestras de escoria de la fracción 6/12 y otras dos de la escoria 12/18.

Muestra	Escoria $6/12_1$	Escoria $6/12_2$	Promedio	Escoria $12/18_1$	Escoria $12/18_2$	Promedio
I.G.E. (%)	0.043	0.042	0.04	0.043	0.034	0.04

Tabla 47: Resultado del ensayo I.G.E. para cada una de las muestras.

Se comprueba que esta escoria cumple con holgura el límite del 1%. Se deriva de este resultado, por tanto, que la escoria analizada tiene una alta resistencia a la meteorización en presencia de agua y que su "curado" ya ha concluido o, en su caso, se halla en una fase muy avanzada.

4.2.1.13 Ensayo de expansividad

Una de las preocupaciones en el empleo de las escorias siderúrgicas es su posible potencial expansivo.

La normativa del País Vasco indica que cuando se emplee escoria de horno eléctrico como árido en mezclas bituminosas, ésta deberá presentar una expansividad inferior al 5% según la norma UNE-EN 1744-1.

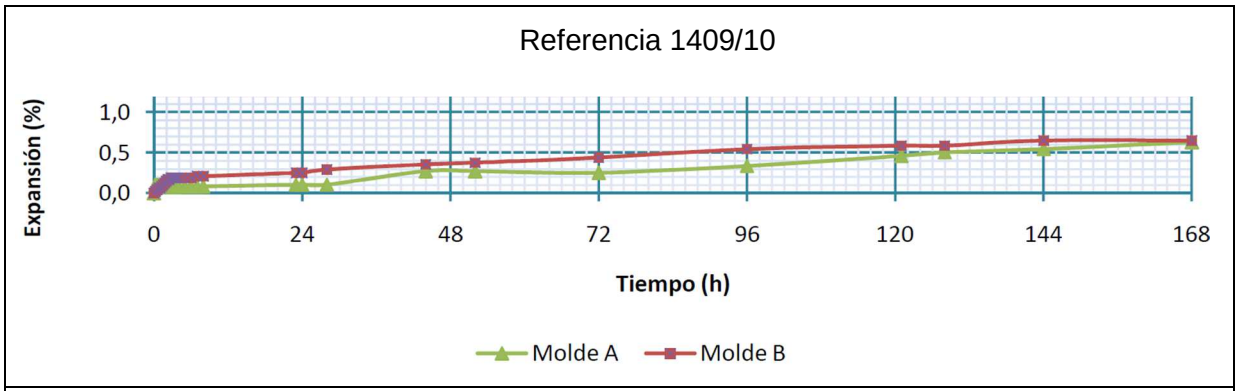
En la siguiente tabla se recogen los resultados de ensayos realizados para escorias negras de GSW con dos semanas de curado a la intemperie sin aportación de riego.

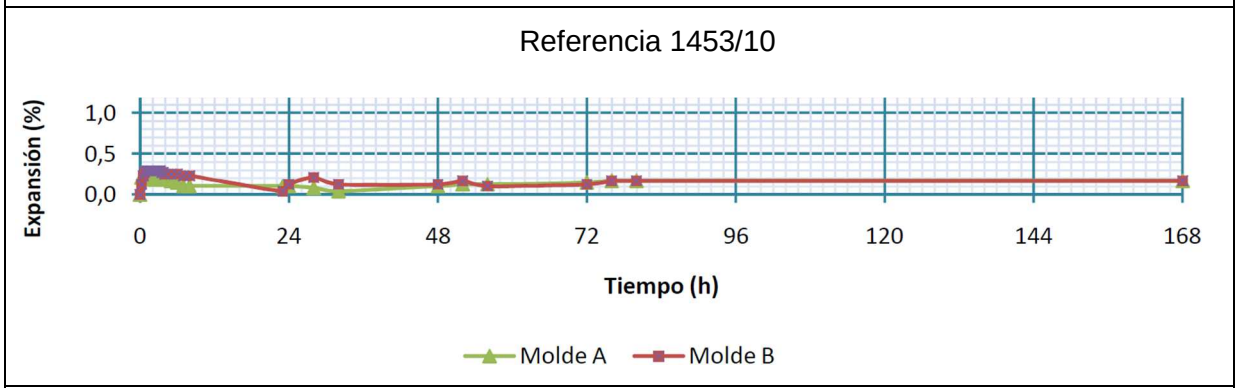
TIEMPO ENSAYO	MOLDE	RESULTADO %			
		1409/10	1453/10	1512/10	1578/10
24 horas	A	0,1	0,1	0,0	0,0
24 horas	B	0,3	0,1	0,0	0,0
VALOR MEDIO 24 horas		**0,2**	**0,1**	**0,0**	**0,0**
168 horas	A	0,6	0,2	0,0*	0,0*
168 horas	B	0,6	0,2	0,0**	0,0**
VALOR MEDIO 168 horas		**0,6**	**0,2**	**0,0**	**0,0**
		071/11	**155/11**	**248/11**	**289/11**
24 horas	A	0,1	0,4	0,2	0,2
24 horas	B	0,1	0,1	0,1	0,3
VALOR MEDIO 24 horas		**0,1**	**0,3**	**0,2**	**0,3**
168 horas	A	0,4	0,5	-	0,2
168 horas	B	0,9	0,2	-	0,5
VALOR MEDIO 168 horas		**0,6**	**0,3**	**-**	**0,4**

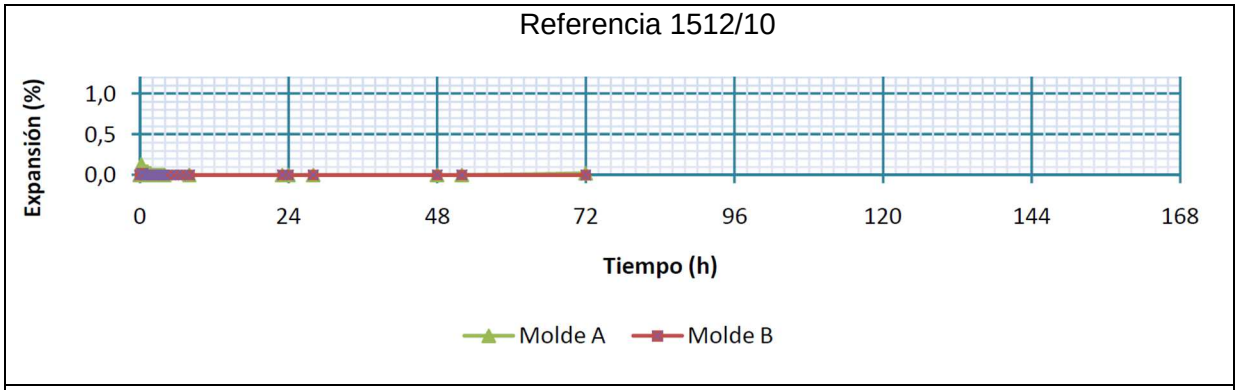
* Aunque el contenido en MgO < 5%, se mantuvo la corriente de vapor hasta las 72 horas a modo de comprobación
** Aunque el contenido en MgO < 5%, se mantuvo la corriente de vapor hasta las 96 horas a modo de comprobación

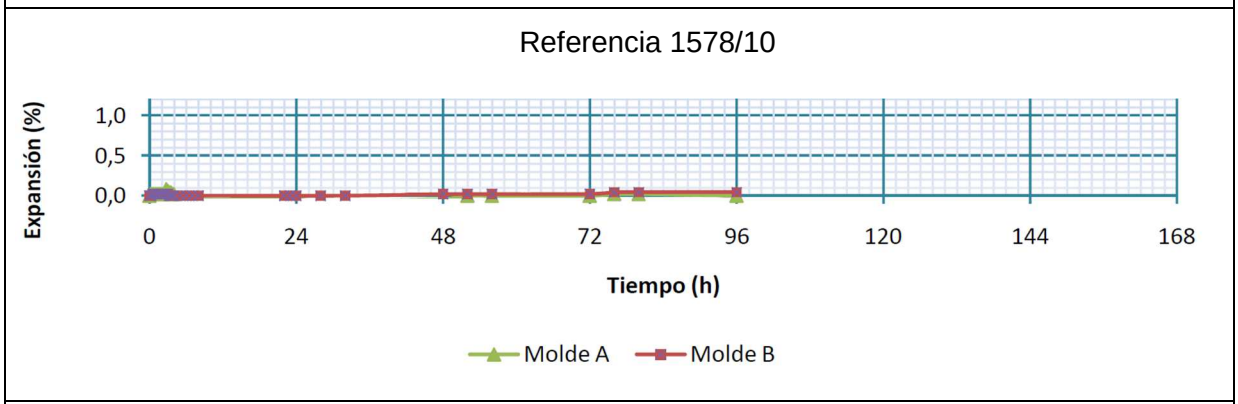
Tabla 48: Resultados de expansividad para la escoria negra GSW según la norma 1744-1 (realizado por Triax S.A.).

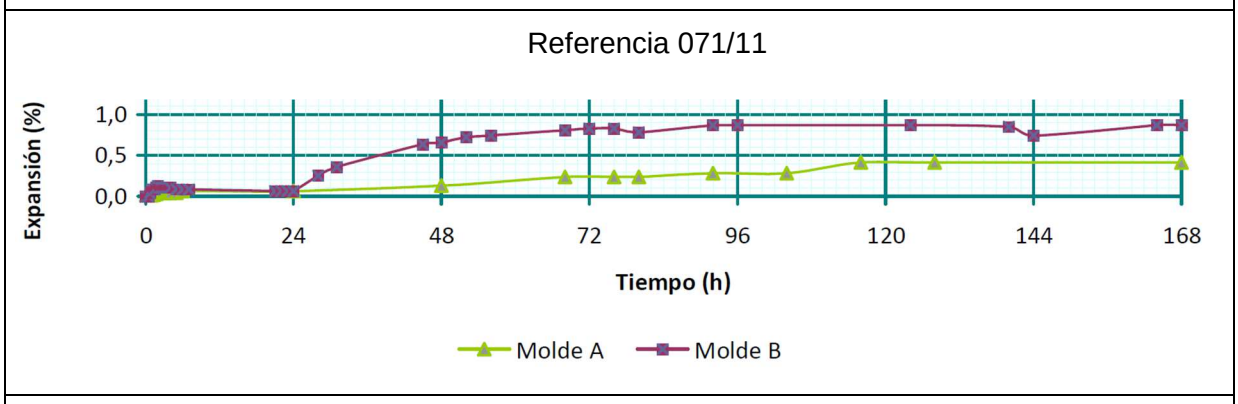
Resultando los siguientes gráficos obtenidos en cada ensayo anterior:

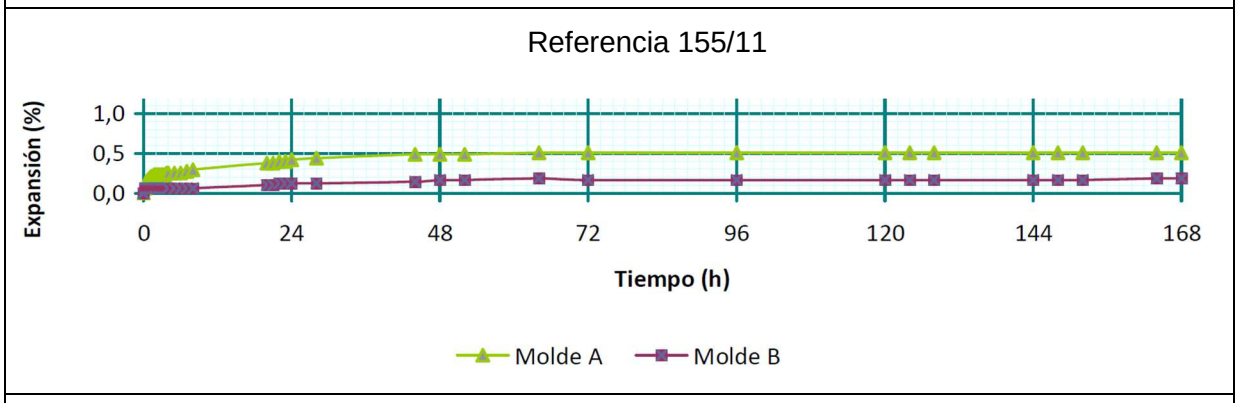


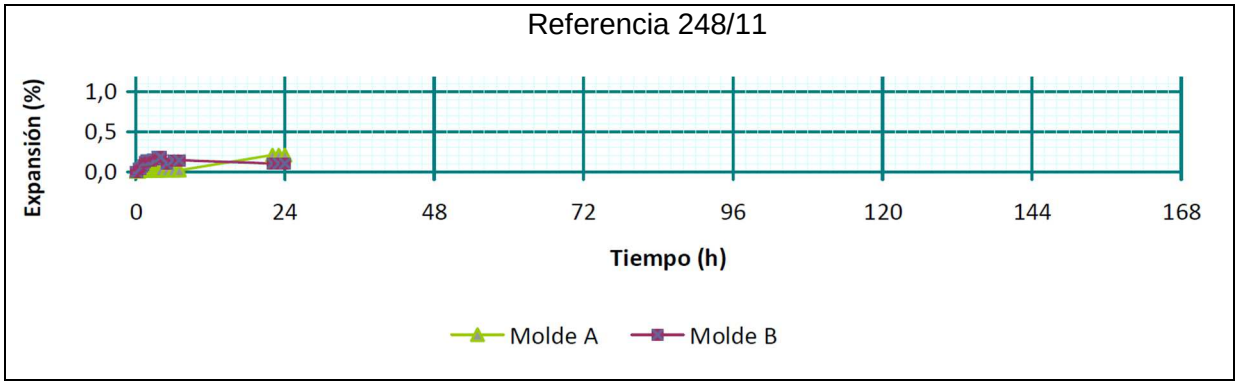


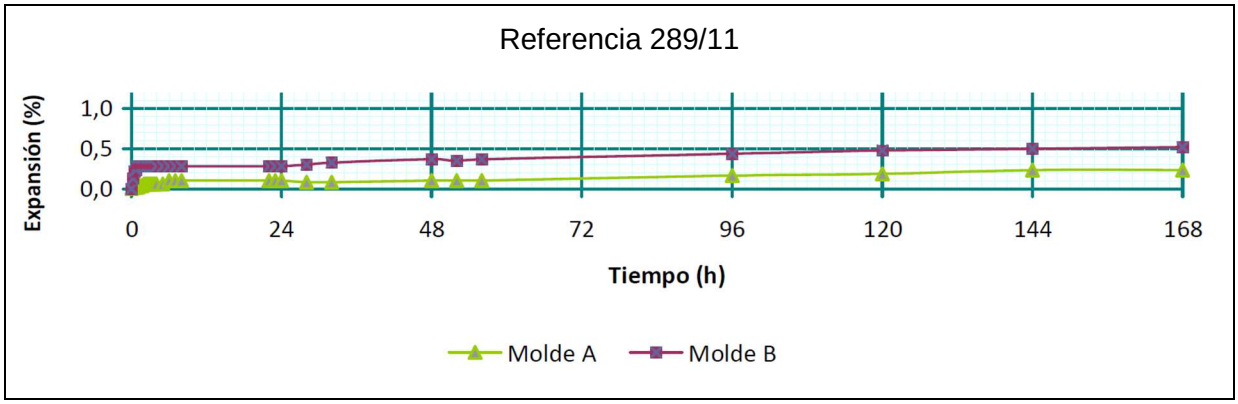

Referencia 1512/10
Expansión (%)
1,0
0,5
0,0
0
24
48
72
96
120
144
168
Tiempo (h)
Molde A
Molde B


Referencia 1578/10
Expansión (%)
1,0
0,5
0,0
0
24
48
72
96
120
144
168
Tiempo (h)
Molde A
Molde B


Referencia 071/11
Expansión (%)
1,0
0,5
0,0
0
24
48
72
96
120
144
168
Tiempo (h)
Molde A
Molde B


Referencia 155/11
Expansión (%)
1,0
0,5
0,0
0
24
48
72
96
120
144
168
Tiempo (h)
Molde A
Molde B


Referencia 248/11
Expansión (%)
1,0
0,5
0,0
0
24
48
72
96
120
144
168
Tiempo (h)
Molde A
Molde B


Referencia 289/11
Expansión (%)
1,0
0,5
0,0
0
24
48
72
96
120
144
168
Tiempo (h)
Molde A
Molde B

4.2.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA

4.2.2.1 Análisis químico por fluorescencia de rayos X

La muestra de escoria se analiza en forma de polvo utilizando un casete con una base de polipropileno de 6 micras de espesor. Las concentraciones finales son obtenidas mediante software utilizando una calibración global (análisis semicuantitativo).

Especie química	Fe_2O_3	CaO	SiO2	Al2O3	MnO	MgO	Cr2O3	TiO2	Resto
(%)	34.8	29.1	16.5	7.55	5.09	4.42	1.03	0.53	<0.50

Tabla 49: Resultados del ensayo de fluorescencia.

Cabe decir que el método de fluorescencia detecta el valor de la concentración de los distintos elementos y que mediante transformación estequiométrica transforma el resultado en concentración de compuestos cristalinos, no distinguiendo si estos están libres o combinados. Se hace necesario acudir al ensayo de difracción por rayos X para poder llegar a conclusiones prácticas.

Tras la exposición de la escoria negra valorizada a los agentes atmosféricos se observa la aparición de un polvo blanquecino en la superficie del árido siderúrgico. Con la intención de determinar las posibles causas de la aparición y efectos de este material blanquecino se procedió a recoger una muestra en las instalaciones de Global Steel Wire y realizar sobre ella un análisis químico elemental. Los valores obtenidos tras el ensayo son los siguientes:

Elemento	O	Ca	Resto
(%)	61,85	35,7	2,43

Tabla 50: Resultados análisis químico elemental polvo blanquecino de las escorias negras.

Figura 69: Escoria negra con polvo blanco en la superficie.

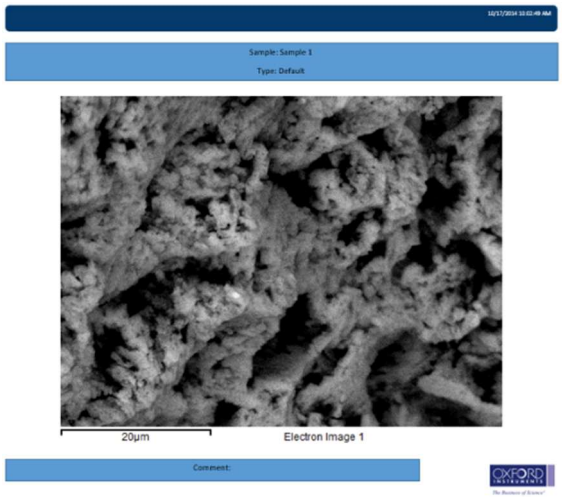


Figura 70: Imagen del análisis químico por fluorescencia de rayos X.

Los resultados muestran que el polvo blanquecino está compuesto principalmente por Calcio, que tras la exposición a la intemperie carbonata al

combinarse con el CO_2 atmosférico formando carbonato cálcico ($CaCO_3$). A pasar de la presencia Calcio, no se observan efectos expansivos.

4.2.2.2 Análisis mineralógico mediante difracción de rayos X

La presencia de diversos picos en el difractograma nos da idea de que la escoria presenta estructura cristalina interna, rasgo característico de un proceso de enfriamiento lento.

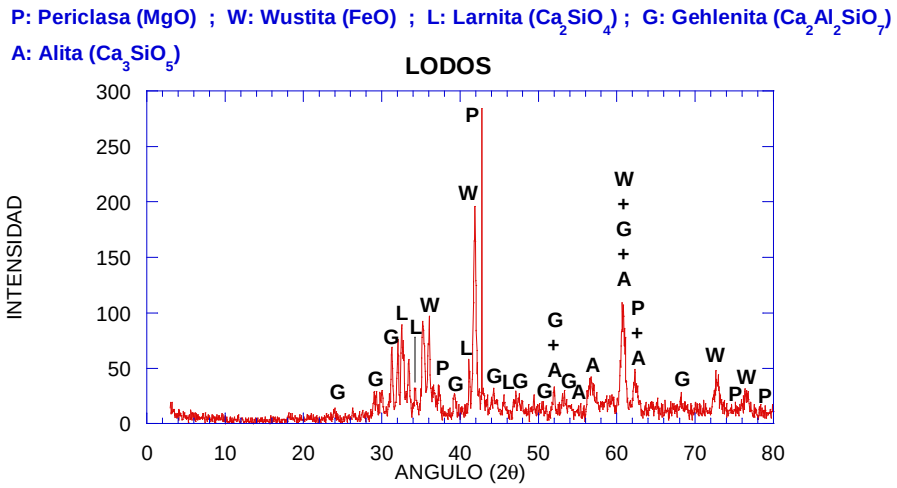


Figura 71: Difractograma de la escoria molida.

4.2.2.3 Análisis por espectroscopía de infrarrojos

Tras el ensayo se obtiene el espectro IR de la muestra de escoria. A partir de la comparación de dicho espectro con espectros IR de muestras puras se identifica la presencia de las siguientes familias de compuestos:

Familia	Banda
MgO	3424.56, 1643.84
$CaCO_3$	2931.51, 2838.36, 871.23, 854.79
FeO	2931.51, 2838.36, 706.85
CaO	1424.66, 526.03
MgO	1424.66
Aluminosilicatos	997.26, 909.59

Tabla 51: Resultados del ensayo de infrarrojos.

4.2.2.4 Contenido de azufre total (S_{total})

La norma de carreteras del País Vasco pide un contenido ponderal de compuestos de azufre totales (expresados en SO_3) inferior al 0,5% cuando los materiales estén en contacto con capas tratadas con cemento e inferior al 1% en los demás casos. Nosotros nos hallamos muy por debajo de esos valores.

Muestra	Escoria 12/18	Escoria 6/12	Escoria 0/6	Global
m_5	0.0005	0.0004	0.0004	
S_{total} (%)	0.007	0.005	0.005	<0.01

Tabla 52: Resultados del ensayo de azufre total.

4.2.2.5 Contenido de cal libre $(CaO)_{libre}$

La normativa nos dice que el contenido de cal libre del árido siderúrgico de horno eléctrico debe ser inferior al 0,5% según la Norma UNE-EN 1744-1.

La muestra de ensayo fue de 1 gramo para todos los casos (1 ensayo por fracción de escoria).

Muestra	Escoria 12/18	Escoria 6/12	Escoria 0/6	Global
V_{11}	0.10	0.05	0.05	
V_{12}	0.05	0.05	0.05	
CaO (%)	0.05	<0.05	<0.05	<0.1

Tabla 53: Resultados del ensayo de cal libre.

Por lo tanto, se verifica el cumplimiento de la normativa.

4.2.2.6 Contenido de óxido de magnesio (MgO)

Las muestras de escoria fueron ensayadas en el Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria.

La normativa no establece un valor límite al material como tal, sino que está referenciado al ensayo de expansividad. Dice que la duración del ensayo de expansión será de 24 horas cuando el contenido de óxido de magnesio, según UNE-EN 196-2, sea inferior al 5% y de 168 horas en los demás casos.

Muestra	Escoria 12/18	Escoria 6/12	Escoria 0/6	Global
V_{14}	0.05	0.05	0.05	
MgO(%)	0.0002	0.0002	0.0002	<0.001

Tabla 54: Valores para el contenido de óxido de magnesio.

Por lo tanto, se verifica el cumplimiento de la normativa.

4.2.2.7 Microscopio electrónico

La caracterización química mediante el microscopio electrónico fue llevada a cabo por el grupo de investigación LADICIM. De cada una las dos escorias se realizaron tres determinaciones, realizando los siguientes ensayos:

- Microscopia electrónica de Barrido (SEM)
- Microanálisis por energía dispersiva de rayos X (EDX)
- Difracción de rayos X (XRD)

Los resultados obtenidos en estos ensayos se muestran en la siguiente tabla:

	Muestra 1 (GSW)					Muestra 2 (Sidenor)			
	$Peso_1$ (%)	$Peso_2$ (%)	$Peso_3$ (%)	Media		$Peso_1$ (%)	$Peso_2$ (%)	$Peso_3$ (%)	Media
MgO	3,76	3,88	3,76	3,80		3,53	3,38	3,42	3,44
Al_2O_3	8,21	9	7,75	8,32		8,34	8,34	8,43	8,37
SiO_2	16,39	15,82	15,6	15,94		14,81	14,83	14,61	14,75
CaO	47,39	48,1	49,44	48,31		42,53	41,01	42,75	42,10
Cr_2O_3	2,41	2,57	3,16	2,71		1,41	1,35	0,71	1,16
MnO	5,17	5,57	5,03	5,26		6,29	5,78	5,98	6,02
FeO	16,78	15,07	15,26	15,70		23,08	25,31	24,09	24,16

Tabla 55: Caracterización química por microscopio de las escorias de GSW y Sidenor.

4.2.2.8 Ensayo de lixiviación

En la siguiente tabla se muestran los resultados medios de ensayos de lixiviación de GSW y de SIDENOR y se comparan los valores con los límites fijados en el Decreto de valorización de escorias de Cantabria.

Parámetro	Valor límite (mg/kg)	Lixiviación GSW (mg/kg)	Lixiviación SIDENOR (mg/kg)
Conductividad	–	740±9 (µS/cm)	-
pH	–	11.42±0.07	11.85±0.07
As	0.5	<0.10	<0.1
Cd	0.04	<0.04	<0.03
Cr_{total}	0.5	<0.10	<0.10
Cu	2	<0.50	<0.1
Hg	0.01	<0.005	<0.003
Mo	0.5	0.20	0.4
Ni	0.4	<0.10	<0.10
Pb	0.5	<0.10	0.2
Sb	0.06	<0.01	<0.02
Se	0.1	0.10	<0.06
Zn	4	<0.50	0.1
Ba	20	2.21	7
Fluoruro	10	5.8	11
Cloruro	800	68	29
Sulfato	1000	15	49
Índice de fenol	1	<0.10	<0.10
COD	500	23	18

Tabla 56: Resultado del ensayo de Lixiviación de las escorias negras de GSW y SIDENOR.

Para todos los ensayos se cumplen los valores límite aplicables en Cantabria. Se debe prestar especial atención a la utilización de la escoria en zonas inundables y dentro de las áreas de protección de acuíferos con alta vulnerabilidad.

De todos modos, el valor fijado por la OMS como límite de seguridad máximo por la contaminación de fluoruros en el agua es 15 mg/kg y estando estas escorias por debajo de este valor.

Especial precaución se debe tener en zonas donde tuberías de aluminio y acero sean susceptibles de problemas de corrosión al poseer la escoria un pH superior a 11.

4.2.3 ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS NEGRAS

Este apartado pretende mostrar un breve análisis estadístico de aquellos valores disponibles de la caracterización de las escorias negras siderúrgicas. Para ello, se utilizan tanto los datos empleados en los apartados anteriores como los obtenidos series de ensayos adicionales recogidos en los anexos.

En la siguiente tabla se muestra el recuento, la desviación típica y la media de todos los parámetros de caracterización de las escorias negras siderúrgicas analizadas en esta Tesis Doctoral. Además, en aquellos casos en los que procede, se muestra el límite que marca la correspondiente normativa para permitir su uso en la fabricación de mezclas bituminosas, hormigones o zahorras.

Parámetro	Observaciones	Recuento	Des. Típica	Media	Límite normativo(1)
Densidad (t/m^3)	D. seca Pr. mod.	10	0.185	**2.813**	No aplica
	Densidad partículas	9	0,138	**3,690**	
	Densidad partículas 0-6	2	0,332	**3,585**	
	Densidad partículas 6-12	2	0,206	**3,646**	
	Densidad partículas 12-18	2	0,139	**3,649**	
Absorción (%) (a las 24 h)	0-6	1	0,000	**1,930**	No aplica
	6-12	1	0,000	**1,260**	
	12-18	1	0,000	**1,040**	
Equivalente de arena (%)	0-6	3	5,672	**86,777**	> 50
Los Ángeles	11-16	2	0,283	**17,200**	15 – 25
	8-16	14	1,038	**18,000**	
	6-12	14	0,646	**17,571**	
	12-18	14	1,207	**17,071**	
Índice de Machacabilidad (%)	-	1	0,000	**18,450**	
Expansividad (%)	A las 24 h	8	0,089	**0,125**	< 5
	A las 168 h	9	0,357	**0,400**	
Índice de Envejecimiento (%)	6-12	10	0,045	**0,053**	No aplica
	12-18	4	0,065	**0,073**	
	5-10	1	0,000	**0,240**	
Análisis químico (%)	Fe2O3	1	0,000	**34,800**	No aplica
	CaO	1	0,000	**29,100**	
	SiO2	1	0,000	**16,500**	
	Al2O3	1	0,000	**7,550**	
	MnO	1	0,000	**5,090**	
	MgO	1	0,000	**4,420**	
	Cr2O3	1	0,000	**1,030**	

	TiO2	1	0,000	**0,530**	

Parámetro	Observaciones	Recuento	Des. Típica	Media	Límite normativo[(1)]
Espectrometría	Mg	6	0,125	**2,185**	No aplica
	Al	6	0,213	**4,415**	
	Si	6	0,312	**7,163**	
	Ca	6	2,513	**32,307**	
	Cr	6	0,630	**1,323**	
	Mn	6	0,372	**4,365**	
	Fe	6	3,673	**15,492**	
	O	6	0,520	**32,743**	
LIXIVIADO (mg/kg)	Conductividad (µS/cm)	3	794,103	**1039,667**	–
	pH	3	0,376	**11,457**	–
	As	5	0,219	**0,260**	0.5
	Cd	5	0,009	**0,034**	0.04
	Cr total	5	0,022	**0,110**	0.5
	Cu	5	0,186	**0,370**	2
	Hg	5	0,003	**0,006**	0.01
	Mo	5	0,121	**0,194**	0.5
	Ni	5	0,000	**0,100**	0.4
	Pb	5	0,198	**0,282**	0.5
	Sb	5	0,013	**0,018**	0.06
	Se	5	0,019	**0,086**	0.1
	Zn	5	0,202	**0,386**	4
	Ba	5	2,126	**3,422**	20
	Fluoruro	5	2,823	**8,720**	10
	Cloruro	5	21,178	**51,000**	800
	Sulfato	5	116,798	**117,800**	1000
	In. Fenol	5	0,493	**0,460**	1
	COD	5	30,361	**28,600**	500
Azufre Total (%)	0-6	1	0,000	**0,005**	0,5 (en contacto con cemento) 1 (demás casos)
	6-12	1	0,000	**0,005**	
	12-18	1	0,000	**0,007**	
Cal Libre (%)	CaO	7	0,285	**0,360**	No aplica
	CaO 0-6	1	0,000	**0,050**	
	CaO 6-12	1	0,000	**0,050**	
	CaO 12-18	1	0,000	**0,050**	
Magnesio Libre (%)	MgO	4	0,026	**0,035**	No aplica
	MgO 0-6	1	0,000	**0,0002**	
	MgO 6-12	1	0,000	**0,0002**	
	MgO 12-18	1	0,000	**0,0002**	

Tabla 57: Análisis de la caracterización de las escorias negras.

(1) La normativa de referencia es el Decreto 104/2006 de la Comunidad Autónoma de Cantabria para los valores de los lixiviados y el PG-3 para el resto de casos.

4.3 DESARROLLO DE MEZCLAS BITUMINOSAS CON ÁRIDOS SIDERÚRGICOS

La caracterización realizada en el apartado anterior muestra el potencial que presentan las escorias negras como sustituto del árido natural, por lo que en este apartado se pretende definir la idoneidad del empleo de estos materiales en la fabricación de mezclas bituminosas.

Para ello, en este apartado en primer lugar se definen aquellas propiedades importantes que deben cumplir las mezclas bituminosas.

A continuación, se definen las fórmulas de trabajo utilizadas, explicando el proceso seguido para su obtención.

Después se caracterizan las mezclas bituminosas fabricadas, diferenciando su uso para realizar ensayos de laboratorio, para llevar a cabo pruebas experimentales en las instalaciones del Grupo Emilio Bolado, Cantabria, y para ejecutar los tramos de prueba CA-136 y CA-137.

Finalmente, se realiza un estudio estadísticos de los valores obtenidos en la caracterización de las escorias negras y de las mezclas bituminosas con ellas fabricadas. Se analiza y compara el CRT y la textura de pavimentos fabricados con mezclas convencionales y con mezclas fabricadas con áridos siderúrgicos, y se analiza de forma general todos los datos recogidos a lo largo del capítulo.

4.3.1 INTRODUCCIÓN

El diseño de una mezcla asfáltica consiste, a grandes rasgos, en seleccionar el tipo de áridos y determinar su dosificación granulométrica, en escoger el tipo y el contenido de ligante más apropiado, y finalmente, en añadir adiciones o no de tal forma que se cumplan los requerimientos específicos del proyecto en cuanto a las propiedades mecánicas de la mezcla.

La proporción de cada árido requiere un conocimiento de las características físicas y químicas de cada uno de ellos, así como saber su efecto en el comportamiento global de la mezcla.

El tipo betún se escogerá en función de la zona térmica donde se ubique la carretera y su dotación deberá ser estudiada para alcanzar una fórmula de trabajo que consiga una envuelta total de los áridos, además de una adecuada relación filler-betún que le confiera al mastic la viscosidad deseada.

Cada tipo de mezcla bituminosa tiene unas propiedades intrínsecas diferentes. Esto hace que sus campos de aplicación sean también diferentes. En principio, no es posible proyectar una mezcla que satisfaga plenamente todas las propiedades, debido a que algunas de ellas son contrapuestas y porque la importancia de unas u otras depende de la funcionalidad y estructura del firme.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta que las mezclas bituminosas tanto en carreteras como en otras infraestructuras deben garantizar el funcionamiento estructural como también el funcional. Es decir, no se deberá llegar a la situación de fallo por rotura o por excesiva deformación en la vida útil al tiempo que se satisfacen propiedades que influyen en la comodidad y la seguridad de circulación de los vehículos.

En la tabla siguiente se ha resumido una relación de las propiedades más importantes que deben tenerse en cuenta en el diseño de una mezcla. Se añaden los factores que pueden influir en ellas.

Propiedad	Definición	Variables que pueden influir
Rigidez	Relación entre tensión y deformación para una determinada temperatura y tiempo de aplicación de carga	-Granulometría del árido -Rigidez del betún -Grado de compactación -Sensibilidad al agua -Contenido de betún
Resistencia a las deformaciones plásticas	Resistencia a la deformación permanente (generalmente a altas temperaturas y largos periodos de aplicación de carga)	-Textura superficial del árido -Granulometría del árido -Rigidez del betún -Contenido de betún -Grado de compactación -Sensibilidad al agua
Durabilidad	Resistencia a los efectos climáticos (aire y agua) y a la acción abrasivos del tráfico	-Contenido de betún -Naturaleza del betún -Granulometría del árido -Grado de compactación -Sensibilidad al agua

Resistencia a la fatiga	Capacidad de la mezcla para flexionarse repetidamente sin romper	-Granulometría del árido -Contenido de betún -Grado de compactación -Rigidez del betún -Sensibilidad al agua
Resistencia a la fisuración	Resistencia de la mezcla a la fisuración por tensiones de tracción	-Granulometría del árido -Tipo de árido -Contenido de betún -Grado de compactación -Rigidez del betún Sensibilidad al agua
Resistencia al deslizamiento	Capacidad de la mezcla para proveer un adecuado coeficiente de fricción entre el neumático y el pavimento en condiciones húmedas	-Textura y resistencia al pulimento del árido -Granulometría del árido -Contenido de betún
Permeabilidad	Capacidad del aire, agua o vapor de agua para moverse dentro y a través de la mezcla	-Granulometría del árido -Contenido de betún -Grado de compactación

Tabla 58: Propiedades más representativas de una mezcla bituminosa.

4.3.2 DESARROLLO DE LA FÓRMULA DE TRABAJO

La dosificación de los áridos, también llamada dosificación en frío, consiste en calcular las proporciones en que deberán mezclarse las diferentes fracciones de áridos para que la curva resultante se encuentre dentro de los límites marcados por el huso granulométrico del PG-3.

El procedimiento consiste en ir variando el porcentaje de cada material hasta encontrar una composición que resulte satisfactoria teniendo en cuenta las necesidades de la obra.

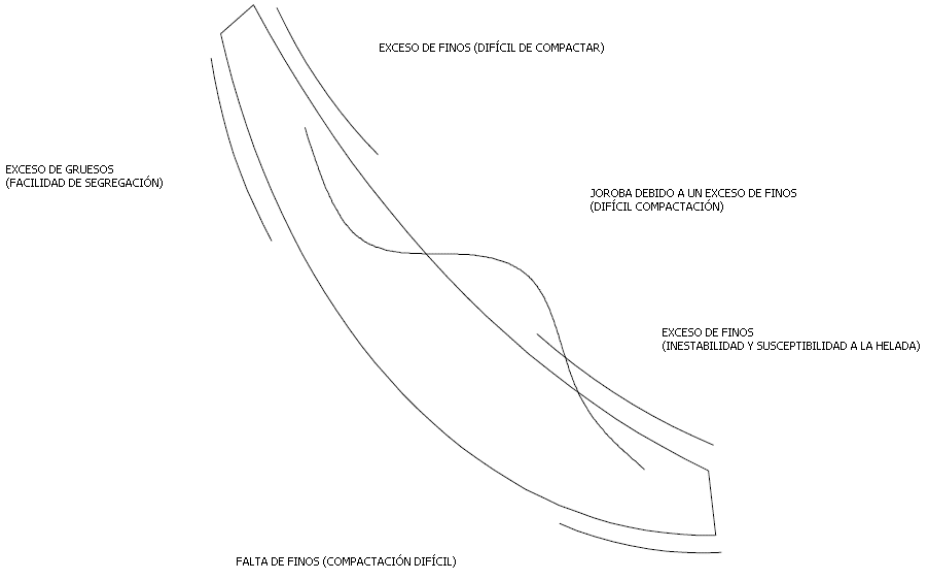


Figura 72: Defectos más característicos de una granulometría.

Cabe destacar la extrema importancia del filler dada su altísima superficie específica, y por tanto, su capacidad extraordinaria para absorber betún. La relación filler/betún será un parámetro de diseño a tener muy en cuenta.

Cuando se diseña una mezcla también se busca determinar el contenido apropiado de betún con el que se consigue recubrir cada una de las partículas del árido con un espesor de película dado. Por consiguiente, cuanto mayor sea la superficie específica de los áridos mayor será la dotación de betún requerida.

Como el comportamiento mecánico de una determinada granulometría es desconocido de antemano, se hace necesario ensayar y caracterizar distintas mezclas con el propósito de identificar cuál es el camino a seguir para obtener una capa de aglomerado lo más competente posible.

4.3.2.1 Dosificaciones en laboratorio

En el laboratorio del Grupo de Caminos de Santander y el Grupo de Investigación de la tecnología de la Construcción se realizaron en total 6 granulometrías: una de escoria dosificada en peso, otras cinco de escoria dosificada en volumen y una última de una ofita de referencia como patrón de comparación. Las granulometrías de escoria en volumen ocupan regiones

diferentes del huso granulométrico y se analizan las diferentes alternativas posibles. La escoria en peso y la ofita de referencia están dosificadas en peso al centro del huso propuesto en el PG-3 para una AC-16-S.

La necesidad de dosificar en volumen los áridos siderúrgicos se debe a la mayor densidad respecto a los áridos naturales, lo cual, sino se tiene en cuenta alteraría los resultados finales.

A continuación se representa la curva granulométrica de cada una de ellas. En todas las gráficas (excepto en la ofita de referencia) se dibuja la curva de áridos en volumen y la curva de áridos en peso con el fin de apreciar las diferencias que implica escoger un método u otro de dosificación de los áridos:

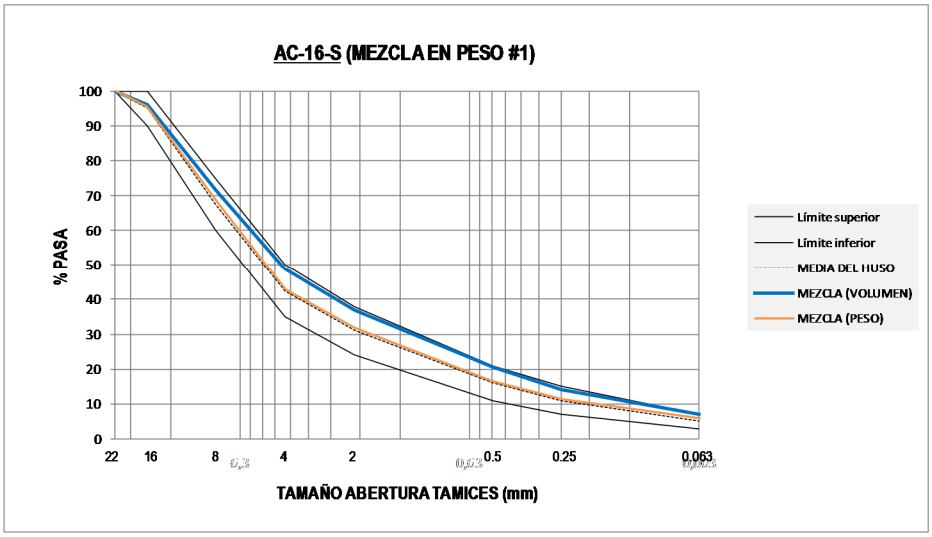


Figura 73: Granulometría de la mezcla número 1 en peso.

En la figura anterior se observa la granulometría de la mezcla número 1. Está dosificada en peso al centro del huso y observando la curva equivalente en volumen, se deduce que se trata de una mezcla con falta de gruesos en los tamaños superiores y exceso de finos en los tamaños intermedios e inferiores.

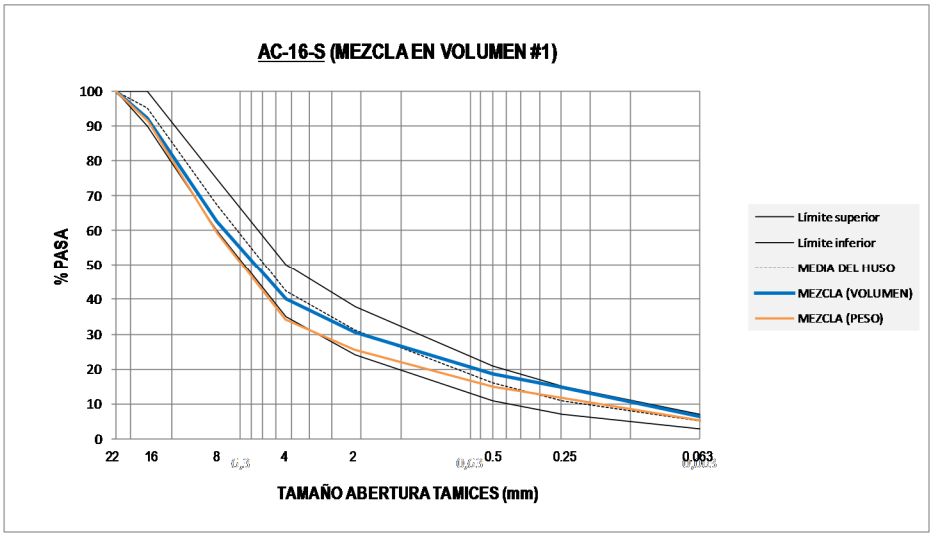


Figura 74: Mezcla en volumen número 1.

La anterior figura muestra las curvas de la granulometría número 1 en volumen. En esta mezcla lo que se pretendía era aumentar el esqueleto mineral en la zona de los gruesos haciendo una transición progresiva hacia el límite superior del huso en los tamaños inferiores. Se observa como la curva en peso se sale del huso en una determinada zona del gráfico. Este hecho confirma las grandes diferencias que puede haber entre una dosificación en peso y otra en volumen.

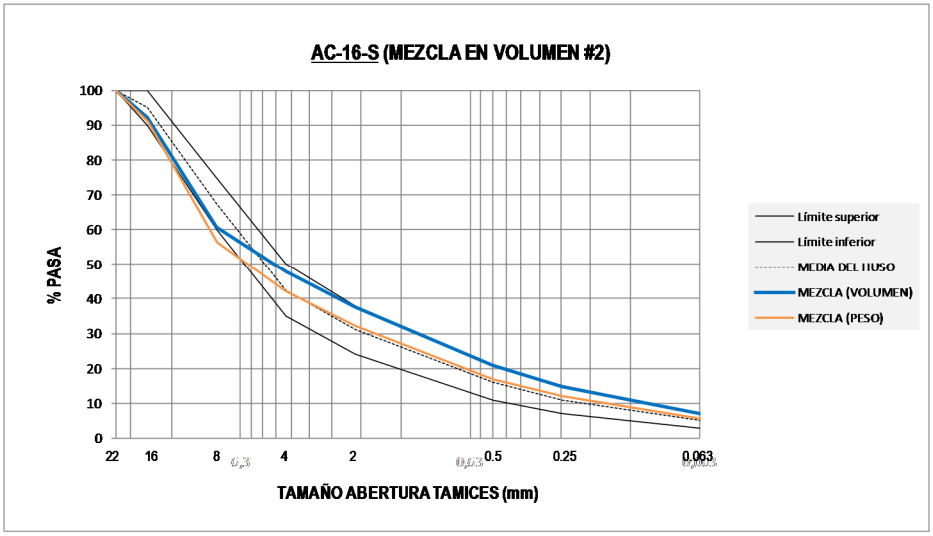


Figura 75: Mezcla en volumen número 2.

La mezcla en volumen 1 y 2 tienen en común su alta proporción de gruesos en la parte superior del huso. Se diferencian, por el contrario, en que la transición hacia el límite superior de la zona de finos del huso se produce en la número 3 de manera brusca.

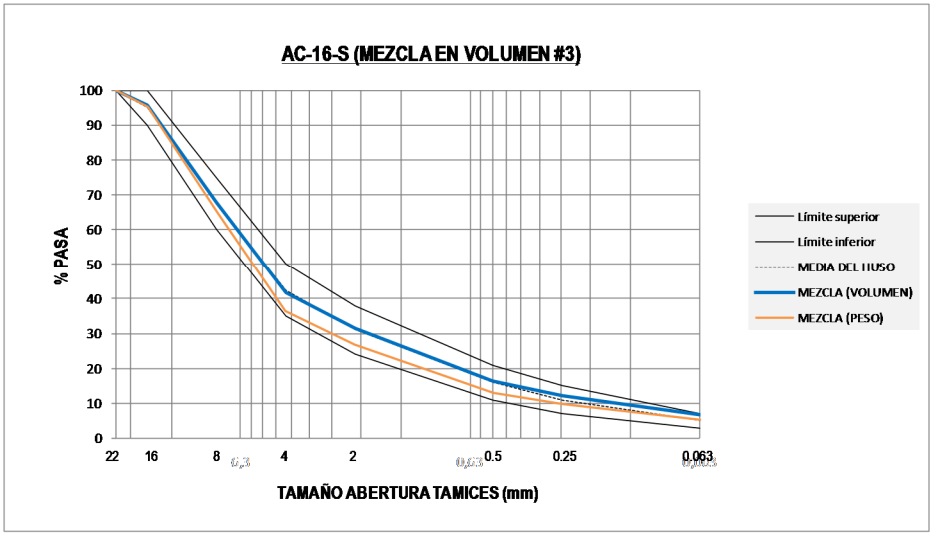


Figura 76: Mezcla en volumen número 3.

La dosificación para la granulometría en volumen 3 corresponde a dosificar en volumen al centro del huso

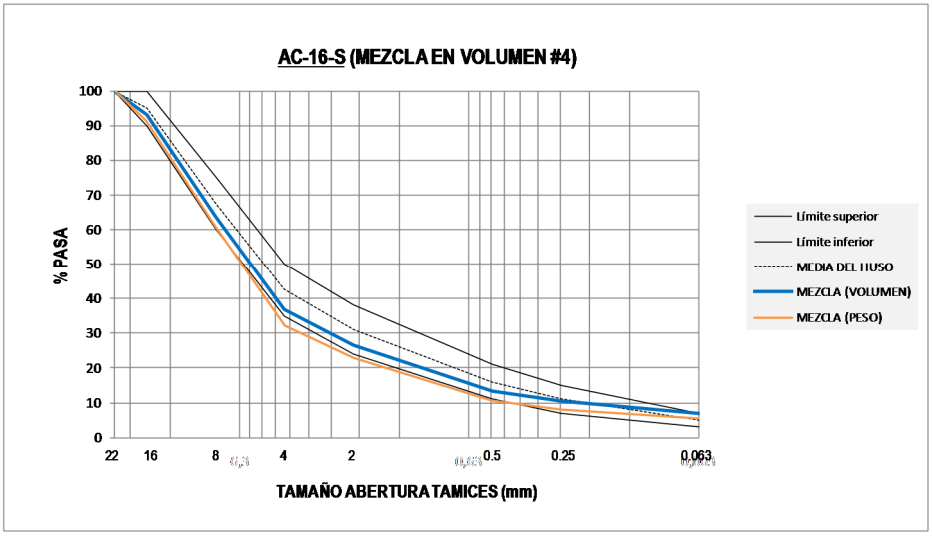


Figura 77: Mezcla en volumen número 4.

Finalmente, tenemos la mezcla en volumen número 4. En este caso lo que se pretende es estudiar el comportamiento de la mezcla al reducir la proporción global de finos.

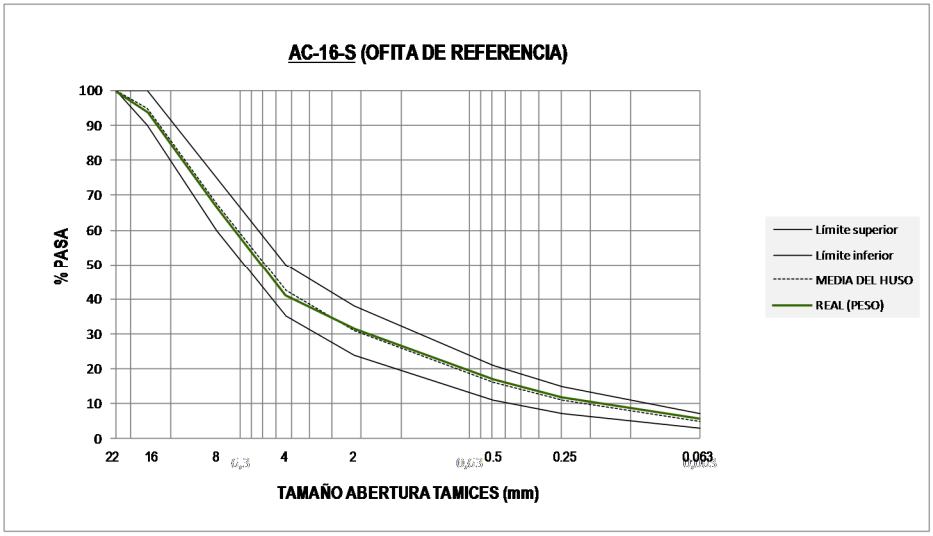


Figura 78: Granulometría para la ofita de referencia.

En esta figura se representa la granulometría utilizada para la mezcla de referencia.

Tras el estudio granulométrico realizado, por razones de eficiencia se decidió eliminar del estudio las dosificaciones correspondientes a las mezclas en volumen 2, 3 y 4 por ser la dosificación en volumen 1 la considerada como óptima del total de las cuatro. La dosificación en peso de la escoria también se analizó para comprobar qué criterio de dosificación, peso o volumen, es el más adecuado cuando se diseñan firmes que incorporan escoria de arco eléctrico como árido grueso. De igual modo, se hizo una comparativa paralela respecto a esas dos mezclas con la ofita de referencia.

Habitualmente, para determinar el contenido óptimo de ligante se suele

trabajar conjuntamente con las gráficas de *huecos en mezcla* y *huecos en árido*. El criterio de diseño se fundamenta en determinar el intervalo de betún para el que el contenido de *huecos en mezcla* está entre el 4% y el 6% (por defecto se suele escoger el valor correspondiente al 5% de *huecos en mezcla* como óptimo directamente). Una vez hecho esto, se comprueba que el porcentaje elegido como óptimo se sitúa en la rama descendente o rama seca de la curva de *huecos en árido*. Se pretende con ello evitar la fabricación de mezclas ricas en ligante que sean susceptibles de sufrir deformaciones plásticas.

Las propiedades volumétricas de las fórmulas de trabajo que finalmente serán utilizadas son las siguientes:

Mezcla en peso 1

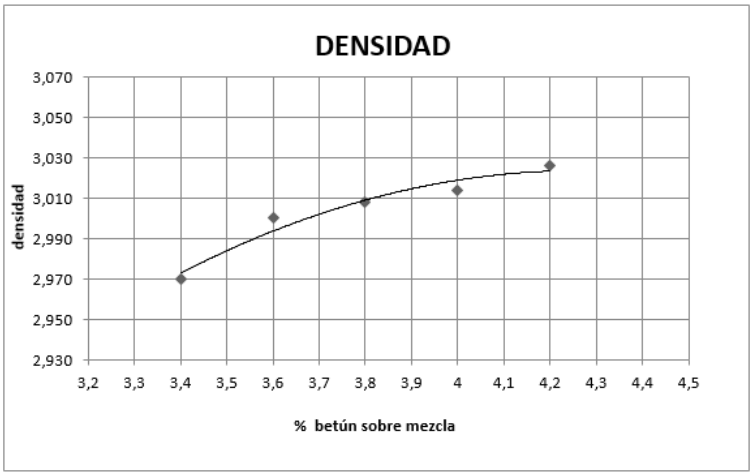


Figura 79: Curva de densidad de la escoria en peso.

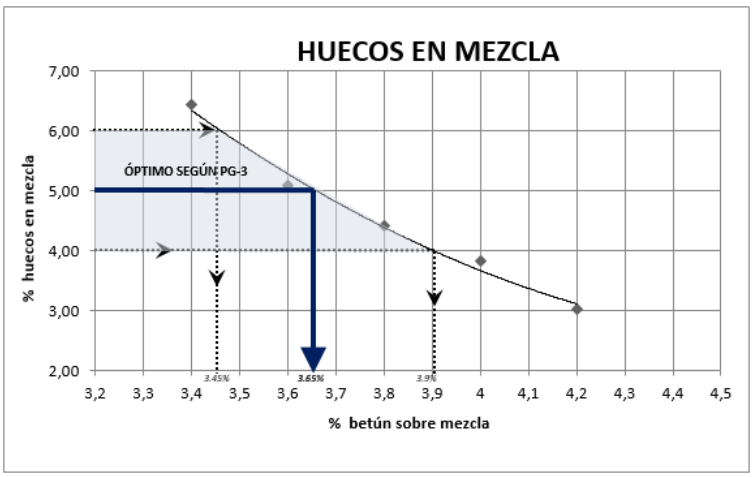


Figura 80: Intervalo de huecos en mezcla para la escoria en peso.

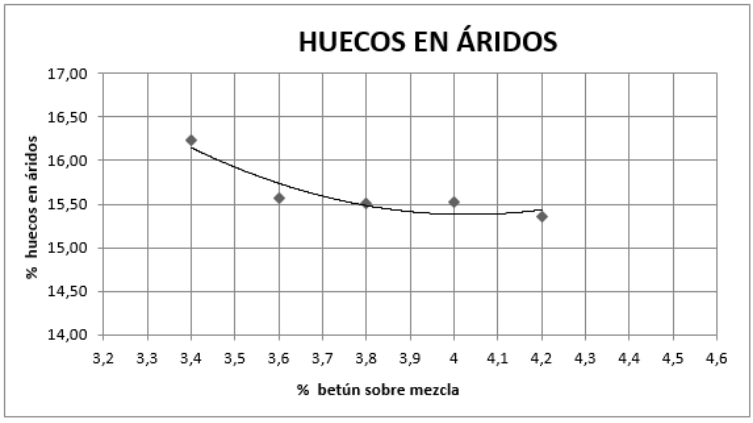


Figura 81: Variación de los huecos en áridos en función del betún.

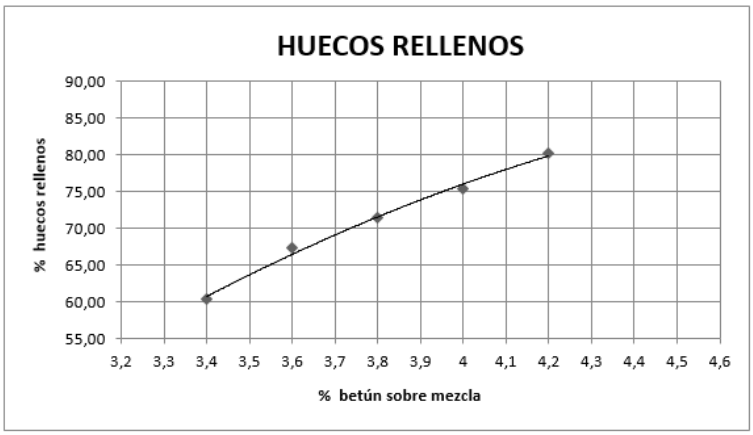


Figura 82: Huecos rellenos para la escoria en peso.

Mezcla en Volumen

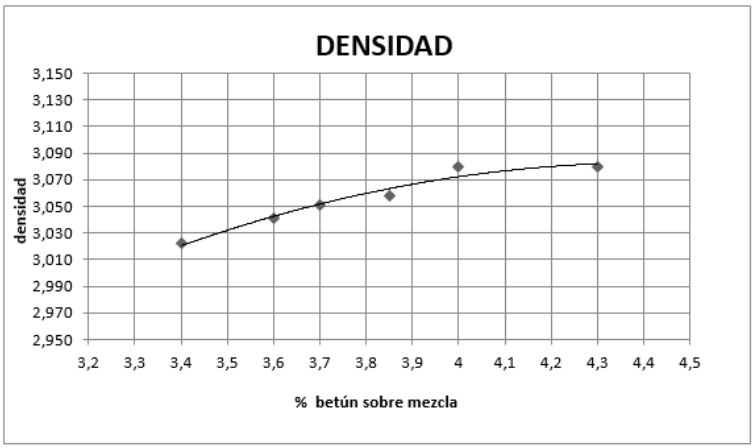


Figura 83: Curva de densidad de la escoria en volumen.

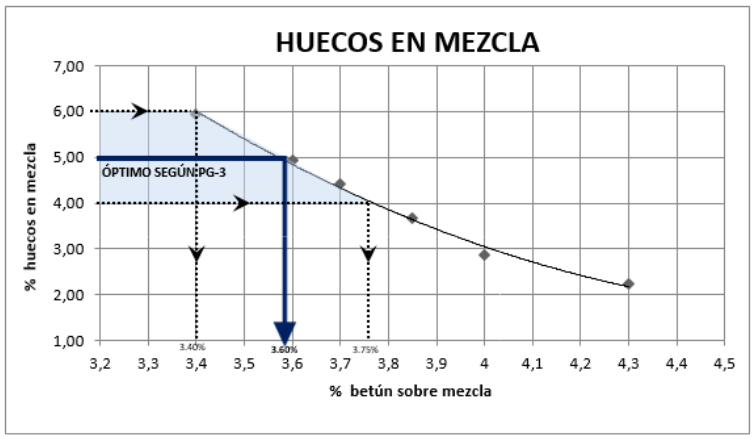


Figura 84: Valores limitantes en cuanto a vacíos en mezcla.

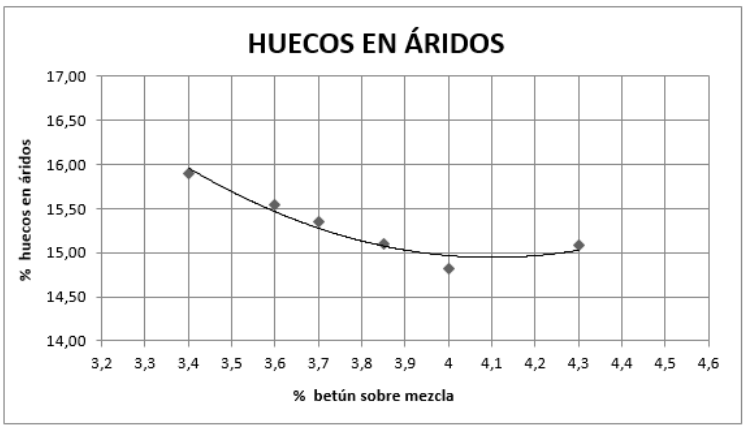


Figura 85: Curva cóncava característica de huecos en áridos para la escoria en volumen.

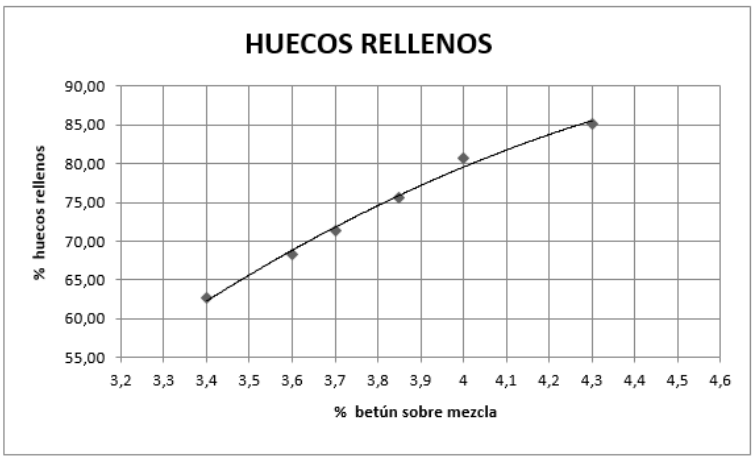


Figura 86: Evolución de los huecos rellenos con el contenido de ligante.

Ofita de referencia

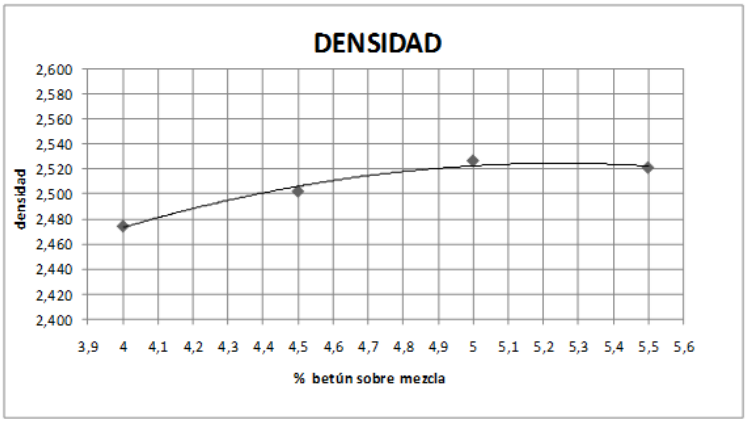


Figura 87: Curva de densidad de la ofita.

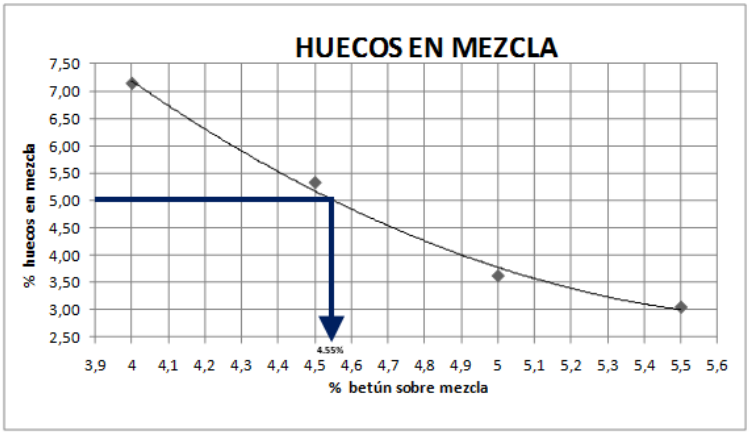


Figura 88: Valor del 5% de huecos en mezcla.

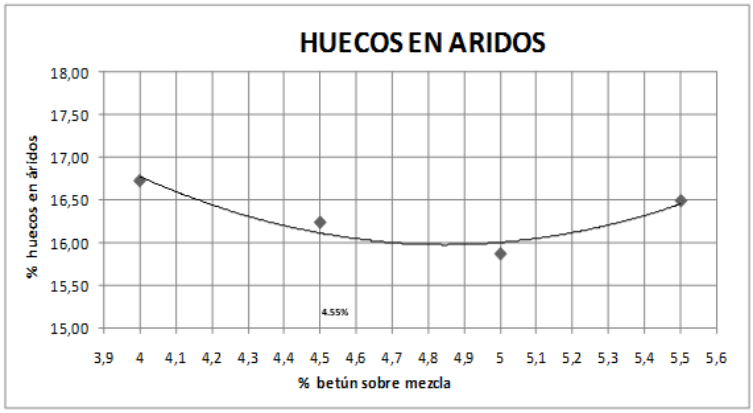


Figura 89: Curva de huecos en áridos.

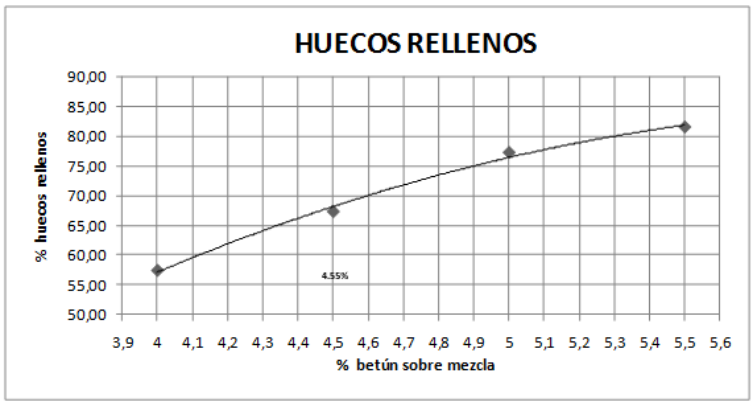


Figura 90: Huecos rellenos para la ofita.

Tras el estudio de las propiedades volumétricas, se consideró directamente el 5% de huecos en árido como óptimo tras comprobar que se estaba por encima del contenido de ligante mínimo por corrección de peso específico y que los huecos en árido eran superiores al 15%. Por lo tanto, los contenidos óptimos de betún son los mostrados en la siguiente tabla:

Denominación de la mezcla	Intervalo de valores para 4-6% de huecos en mezcla	Óptimo de betún según norma (5% de huecos en mezcla)	Valor limitante de la rama seca de huecos en áridos	Dotación mínima de ligante (4.50 x 2.65/ρ_d)
Escoria peso	3.46-3.90	**3.65**	–	3.48
Escoria volumen	3.40-3.77	**3.60**	≤ 3.94	3.44
Ofita referencia	4.27-4.90	**4.55**	–	4.50

Tabla 59: Óptimo de ligante y valores limitantes para las diferentes mezclas (% betún sobre mezcla).

En apartados posteriores, para verificar si el contenido de betún elegido es apto se seguirán los pasos siguientes:

1. Se determinará con ese contenido de betún la resistencia conservada, y en caso de no verificarse el valor mínimo del 85%, se volverá al paso inicial aumentando la dotación de betún.
2. Se comprobará que se cumple el ensayo de pista (deformación ≤0.07mm/10^3 ciclos). En caso de un mal comportamiento se reducirá el contenido de ligante, pero siempre en compromiso con lo dicho en el apartado 1.
3. Se realizarán ensayos de fatiga, módulos dinámicos y módulos resilientes y los resultados se compararán con los de una mezcla ofita de referencia que cumpla todos los requisitos exigidos en el PG-3.

Otro parámetro determinante en el diseño de mezclas bituminosas es la relación filler/betún. Un valor muy alto reporta un mástic filler-betún de gran rigidez, pero vulnerable a la fatiga. Un valor demasiado bajo implica una mayor

facilidad del betún para fluir y podremos tener problemas de deformaciones plásticas. El PG-3 recomienda que este valor sea de 1,20 en mezclas convencionales. Sin embargo, en las mezclas de escoria será mucho mayor por la gran diferencia de pesos específicos existente entre la escoria y la caliza. La naturaleza del filler de éstas muestras es cali. En el caso de emplear filler proveniente del árido siderúrgico se realizará un ajuste volumétrico en la proporción que corresponda.

Denominación de la mezcla	Óptimo de betún (5% huecos en mezcla)	Relación filler/betún
Escoria en peso	3.65% s/m	1.56*
Escoria en volumen #1	3.60% s/m	1.39*
Ofita de referencia	4.55% s/m	1.20

Tabla 60: Relaciones iniciales filler/ligante.

A continuación se incluyen las fórmulas de trabajo que finalmente fueron fabricadas y ensayadas:

OFITA DE REFERENCIA									
AC-16-S (DOSIFICACIÓN EN PESO AL CENTRO DEL HUSO)									
FRACCIONES UTILIZADAS	%	22	16	8	4	2	0,500	0,250	0,063
OFITA 22/16	5,80	100	0	0	0	0	0	0	0
OFITA 16/8	27,50	100	100	0	0	0	0	0	0
OFITA 8/4	25,00	100	100	100	0	0	0	0	0
CALIZA 4/2	11,00	100	100	100	100	0	0	0	0
CALIZA 2/0,5	15,00	100	100	100	100	100	0	0	0
CALIZA 0,5/0,25	4,00	100	100	100	100	100	100	0	0
CALIZA 0,25/0,063	6,00	100	100	100	100	100	100	100	0
FILLER CALIZO (γ=2,7)	5,70	100	100	100	100	100	100	100	100
TOTAL PASA	100,0	100,0	94,2	66,7	41,7	30,7	15,7	11,7	5,7
MEDIA DEL HUSO		100	95	67,5	42,5	31	16	11	5
Límite superior		100	100	75	50	38	21	15	7
Límite inferior		100	90	60	35	24	11	7	3
FÓRMULA DE TRABAJO (PESO)		**100**	**93,6**	**66,6**	**41,1**	**31,4**	**16,9**	**11,9**	**5,7**

Tabla 61: Dosificación granulométrica de la ofita de referencia (en peso).

ESCORIA EN PESO									
AC-16-S Surf (DOSIFICACIÓN EN PESO) 71% DE ESCORIA									
FRACCIONES UTILIZADAS	%	22	16	8	4	2	0,500	0,250	0,063
ESCORIA 22/16 (γ=3,756)	4,46	26,62	0	0	0	0	0	0	0
ESCORIA 16/8 (γ=3,766)	27,08	26,55	26,55	0	0	0	0	0	0
ESCORIA 8/4 (γ=3,798)	25,35	26,33	26,33	26,33	0	0	0	0	0
ESCORIA 4/2 (γ=3,820)	5,97	26,18	26,18	26,18	26,18	0	0	0	0
ESCORIA 2/0,5 (γ=3,820)	7,81	26,18	26,18	26,18	26,18	26,18	0	0	0
ESCORIA 0,5/0,25 (γ=3,820)	0,08	26,18	26,18	26,18	26,18	26,18	26,18	0	0
ESCORIA 0,25/0,063 (γ=3,820)	0,06	26,18	26,18	26,18	26,18	26,18	26,18	26,18	0
CALIZA 4/2 (γ=2,706)	5,35	36,95	36,95	36,95	36,95	0	0	0	0
CALIZA 2/0,5 (γ=2,706)	7,52	36,95	36,95	36,95	36,95	36,95	0	0	0
CALIZA 0,5/0,25 (γ=2,706)	4,91	36,95	36,95	36,95	36,95	36,95	36,95	0	0
CALIZA 0,25/0,063 (γ=2,706)	5,54	36,95	36,95	36,95	36,95	36,95	36,95	36,95	0
FILLER CALIZO (γ=2,753)	5,70	36,32	36,32	36,32	36,32	36,32	36,32	36,32	36,32
FILLER ESCORIA (γ=3,825)	0,17	26,14	26,14	26,14	26,14	26,14	26,14	26,14	26,14
FILLER CEMENTO	0,00	34,84	34,84	34,84	34,84	34,84	34,84	34,84	34,84
TOTAL PASA	100,0	29,4	28,2	21,1	14,4	10,8	6,0	4,2	2,1
MEZCLA (VOLUMEN)		100,0	96,0	71,5	48,9	36,8	20,4	14,2	7,2
MEDIA DEL HUSO		100	95	67,5	42,5	31	16	11	5
Límite superior		100	100	75	50	38	21	15	7
Límite inferior		100	90	60	35	24	11	7	3
FÓRMULA DE TRABAJO (PESO)		**100**	**95,5**	**68,5**	**43**	**31,8**	**16,5**	**11,5**	**5,9**

Tabla 62: Dosificación granulométrica de la escoria (en peso).

ESCORIA EN VOLUMEN									
AC-16-S (DOSIFICACIÓN EN VOLUMEN) 75% DE ESCORIA									
FRACCIONES UTILIZADAS	%	22	16	8	4	2	0,500	0,250	0,063
ESCORIA 22/16 (γ=3,756)	10	26,62	0	0	0	0	0	0	0
ESCORIA 16/8 (γ=3,766)	31,5	26,55	26,55	0	0	0	0	0	0
ESCORIA 8/4 (γ=3,798)	25	26,33	26,33	26,33	0	0	0	0	0
ESCORIA 4/2 (γ=3,820)	4	26,18	26,18	26,18	26,18	0	0	0	0
ESCORIA 2/0,5 (γ=3,820)	4,5	26,18	26,18	26,18	26,18	26,18	0	0	0
CALIZA 4/2 (γ=2,706)	5	36,95	36,95	36,95	36,95	0	0	0	0
CALIZA 2/0,5 (γ=2,706)	6	36,95	36,95	36,95	36,95	36,95	0	0	0
CALIZA 0,5/0,25 (γ=2,706)	3	36,95	36,95	36,95	36,95	36,95	36,95	0	0
CALIZA 0,25/0,063 (γ=2,706)	6,5	36,95	36,95	36,95	36,95	36,95	36,95	36,95	0
FILLER CALIZO (γ=2,753)	4,5	36,32	36,32	36,32	36,32	36,32	36,32	36,32	36,32
FILLER ESCORIA (γ=3,825)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FILLER CEMENTO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL PASA	100,0	29,0	26,4	18,0	11,4	8,5	5,1	4,0	1,6
MEZCLA (VOLUMEN)		100,0	90,8	62,0	39,4	29,4	17,7	13,9	5,6
MEDIA DEL HUSO		100	95	67,5	42,5	31	16	11	5
Límite superior		100	100	75	50	38	21	15	7
Límite inferior		100	90	60	35	24	11	7	3
FÓRMULA DE TRABAJO (PESO)		100	91,5	59,3	34,2	25,5	14,8	11,6	5,2
MEZCLA VOLUMEN REAL									

Tabla 63: Dosificación granulométrica de la escoria (en volumen).

4.3.2.1.1 Tracción indirecta

Con este ensayo, se buscaba comprobar si la dotación de ligante inicial adoptada para un 5% de huecos en mezcla para las mezclas de escoria era correcta cuantitativamente.

Se fabricaron para ello varias tandas de probetas cilíndricas Marshall que se compactaron 75 golpes por cara y con distintos porcentaje de betún. Posteriormente, se rompieron a tracción indirecta a 20ºC.

Mezcla en Peso

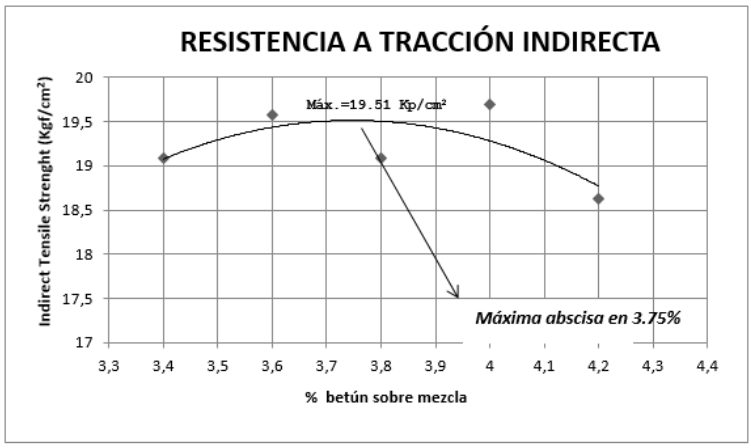


Figura 91: Curva de rotura a tracción indirecta a 20ºC para la escoria dosificada en peso.

Mezcla en Volumen

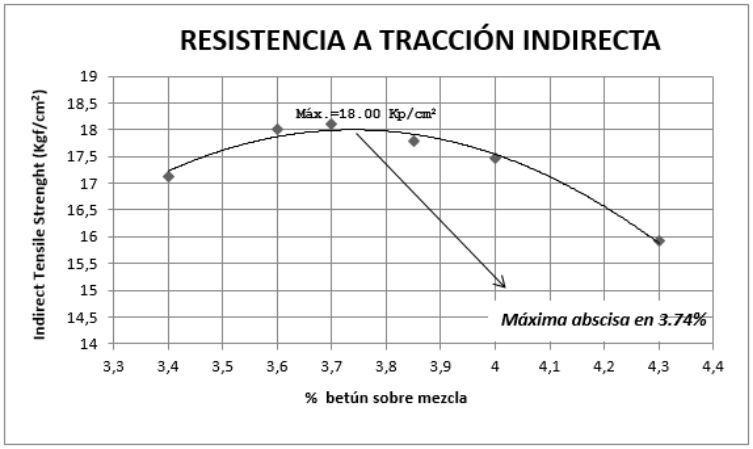


Figura 92: Resistencia a la tracción indirecta para la escoria dosificada en volumen.

Se aprecia que para ambas mezclas el máximo coincidía para el mismo contenido de ligante. Se comprobó basándose en ensayos que son la naturaleza y el porcentaje de cada tipo de árido los factores que básicamente influyen en la resistencia a tracción indirecta, y no tanto el porcentaje de cada tamaño dentro del huso granulométrico (al menos para las AC-16-S Surf).

El máximo de cada curva de rotura viene a representar el punto donde se alcanza el compromiso óptimo entre el rozamiento interno del árido y la cohesión del mástic. Para las dos mezclas de escoria (peso y volumen) el contenido de betún asociado a este punto está muy próximo al correspondiente al 5% de huecos en mezcla. Esto es indicativo de que el planteamiento de partida era correcto.

Influencia de la temperatura

Se rompieron probetas a tracción indirecta a 15ºC y 20ºC para determinar la resistencia de las mezclas y para evaluar su evolución con la temperatura. Se fabricaron con el betún correspondiente al 5% de huecos en mezcla:

Nombre del ensayo	Ofita referencia	Escoria volumen	Escoria peso
Tensión a tracción indirecta, 15ºC (MPa)	2,14	2,02	2,44
Tensión a tracción indirecta, 20ºC (MPa)	–	1,82	1,99

Tabla 64: Valores de rotura a tracción indirecta para probetas ensayadas a dos temperaturas diferentes.

4.3.2.1.2 Resistencia conservada tras la inmersión

El PG-3 en su artículo 542 prescribe que la resistencia conservada en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión, realizado a 15ºC según la UNE-EN 12697-12, tendrá un valor mínimo del 85% para capas de rodadura.

Este ensayo dio bastantes problemas para su cumplimiento desde un principio porque se demostró que en las probetas fabricadas a mano en el laboratorio no se conseguía una envuelta del árido grueso de escoria lo suficientemente efectiva. Este ensayo fue la causa del cambio de la metodología de trabajo pasando a fabricar las probetas en amasadora mecánica, lo que sorprendentemente reportó valores de la resistencia conservada por encima del 100%, valores que guardan mayor concordancia con la alta basicidad de la escoria (gran afinidad por el betún en condiciones de humedad) y con la bibliografía existente al respecto.

Dotación de ligante (% s/m)	Tipología de amasado		
	"Manualmente"	"Con amasadora"	"En planta"
4,2	≤79	101-107	93-96
3,9	–	105	–
3,6	–	87	–

Tabla 65: Valores del ITSR(%) según el proceso de amasado para la escoria en volumen.

Ensayo de sensibilidad al agua	Denominación de la mezcla		
	Ofita referencia	Escoria volumen	Escoria peso
ITSR (%)	93	87	103

Tabla 66: Valores de la resistencia conservada para las 3 mezclas estudiadas con un contenido de ligante correspondiente al 5% de huecos en mezcla.

El ensayo reporta resultados satisfactorios en todos los casos, si bien, se hace notar que la escoria en volumen está en el límite del 85%. Esto significa que para esta mezcla ya se tiene una cota mínima en cuanto al ligante a aportar.

Las muestras se sometieron a diferentes situaciones. unas probetas se les mantuvo a temperatura ambiente, otras se saturaron en agua a elevada temperatura. Después, tras la preparación de los aparatos de ensayo, se llevó a cabo la rotura de las probetas siguiendo la norma UNE-EN 12697-23. Finalmente se calculó la relación de la resistencia a tracción indirecta (ITSR%). Los resultados de los ensayos fueron los siguientes:

5,5% de betún s/m con un 5,8% de filler (relación filler/betún=1,00)

Nº probeta	1	2	3	4	5	6	7	8
Densidad	2,969	2,978	2,973	2,987	2,955	2,975	2,985	2,982
P (kp)	1959	1866	1793	2079	1635	1947	1870	1966
ITS_w (MPa)	-	1,79	1,72	-	1,58	-	1,80	-
ITS_d (MPa)	1,89	-	-	1,97	-	1,91	-	1,87

Tabla 67: Módulos de rigidez para las distintas mezclas contempladas en el estudio.

P: Carga máxima al romper la probeta a tracción indirecta.
ITS_w: Resistencia a tracción indirecta de las probetas húmedas.
ITS_d: Resistencia a tracción indirecta de las probetas secas.

$$ITSR(\%) = 100 * \frac{ITS_w}{ITS_d} \cong 90$$

5% de betún s/m con un 5,8% de filler (relación filler/betún=1,10)

Nº probeta	1	2	3	4	5	6	7	8
Densidad	2,966	2,971	2,967	2,958	2,968	2,953	2,974	2,958
P (kp)	1717	1787	1924	1919	1774	1868	1782	1817
ITS_w (MPa)	-	1,72	1,86	1,83	-	1,76	-	-
ITS_d (MPa)	1,66	-	-	-	1,70	-	1,71	1,71

Tabla 68: Módulos de rigidez para las distintas mezclas contempladas en el estudio.

P: Carga máxima al romper la probeta a tracción indirecta.
ITS_w: Resistencia a tracción indirecta de las probetas húmedas.
ITS_d: Resistencia a tracción indirecta de las probetas secas.

$$ITSR(\%) = 100 * \frac{ITS_w}{ITS_d} \cong 105$$

5% de betún s/m con un 7,2% de filler (relación filler/betún=1,37)

Nº probeta	1	2	3	4	5	6	7	8
Densidad	2,968	2,953	2,971	2,674	2,967	2,966	2,958	2,958
P (kp)	1801	1839	1818	1779	1884	1797	1617	1929
ITS_w (MPa)	-	1,78	1,75	-	1,81	-	-	1,86
ITS_d (MPa)	1,72	-	-	1,71	-	1,72	1,56	-

Tabla 69: Módulos de rigidez para las distintas mezclas contempladas en el estudio.

P: Carga máxima al romper la probeta a tracción indirecta.
ITS_w: Resistencia a tracción indirecta de las probetas húmedas.
ITS_d: Resistencia a tracción indirecta de las probetas secas.

$$ITSR(\%) = 100 * \frac{ITS_w}{ITS_d} \cong 107$$

4.3.2.1.3 Módulo resiliente

Dada la gran dispersión que presenta este ensayo se decidió fabricar un mayor número de probetas del recomendado por la Norma UNE-EN 12697-26, y por otro lado, a cada grupo de probetas se le practicó el ensayo 3 veces dejando al menos 24 horas entre pruebas sucesivas para facilitar la relajación de las tensiones remanentes residuales. Cada día de ensayo la generatriz de rotura de cada probeta se giró 60º abarcando de este modo tres planos distintos que nos darán un valor más representativo de la mezcla ensayada.

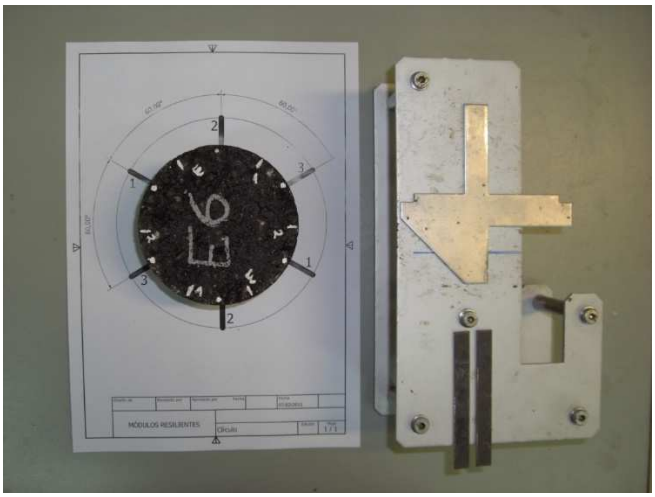


Figura 93: Plantilla, pletinas y escuadra de preparación de las probetas cilíndricas.

A continuación se muestra una tabla donde se exponen los módulos de rigidez a 20ºC (módulos resilientes) que se obtuvieron para las distintas mezclas:

Denominación de la mezcla	Densidad media (kg/m^3)	Módulo resiliente, S´$_m$ (Mpa)	Desviación estándar (Mpa)
Ofita de referencia	2.518	10.152	1.914
Escoria en volumen	2.997	11.656	2.682
Escoria en peso	2.946	14.905	2.509

Tabla 70: Módulos de rigidez para las distintas mezclas contempladas en el estudio.

4.3.2.1.4 Módulo de rigidez

Este ensayo reporta un valor del módulo de rigidez de la mezcla, pero para probetas con dimensiones geométricas prismáticas. El valor del módulo viene acompañado de un ángulo de desfase que da una medida de la viscosidad de la mezcla y que en la práctica representa la facilidad que ésta tiene para

recuperarse tras el paso de una carga.

En la realización de este ensayo se aplicó la Norma UNE-EN 12697-26:2006, y dentro de esta se ha seguido el Anexo B: *"Ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas (4PB-PR)".*

Se trata de un ensayo para medir la rigidez de mezclas bituminosas mediante parámetros de flexión. La flexión se realiza por movimiento vertical de la zona central y perpendicularmente al eje longitudinal de la probeta. Las posiciones verticales de los puntos extremos permanecen fijas. Se aplica un desplazamiento simétrico alrededor del cero sinusoidal y con una amplitud vertical constante de 0.02691 mm para conseguir que las fibras exteriores de la probeta prismática alcanzaran una deformación de 50±3 μm/m. Durante el ensayo se mide la fuerza necesaria para la deformación de la probeta en función del tiempo, así como el desfase entre la señal de fuerza y la señal de desplazamiento. Cuanto menor sea este desfase "ϕ" indica un patrón de comportamiento de la mezcla más elástico.

El aparato de ensayo es el mismo que se utiliza para el ensayo de fatiga, pero con las peculiaridades que en módulos dinámicos las probetas se deben girar 90º según su eje longitudinal respecto a la posición original de compactación y que en fatiga la deformación debe ser mayor a 100 μm/m frente a los 50 ±3 μm/m del ensayo de módulos dinámicos.

Figura 94: Probetas serradas y ensayadas (escoria en volumen y ofita de referencia).

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos en el ensayo:

Ofita de referencia

Resultados medios		Temperatura ensayo= 20ºC	
Frecuencia [Hz]	E [µm/m]	E* [MPa]	Ángulo de fase [°]
0,1	49,2	2128,3	32,7
0,2	48,9	2643,7	31,4
0,5	49,1	3518,4	29,7
1	48,4	4305,1	28,1
2	48,0	5223,4	26,4
5	47,5	6647,7	24,0
8	47,2	7463,1	22,6
10	47,0	7855,1	22,1
20	46,6	9252,5	20,3
30	46,4	10161,2	19,2
0,1	49,7	2046,4	32,8

Tabla 71: Módulos dinámicos y ángulos de desfase para la ofita de referencia.

Escoria en Volumen

Resultados medios		Temperatura ensayo= 20ºC	
Frecuencia [Hz]	E [µm/m]	E* [MPa]	Ángulo de fase [°]
0,1	48,4	3914,0	26,7
0,2	47,0	4633,5	25,7
0,5	47,4	5837,5	24,1
1	46,1	6838,7	22,8
2	45,9	7976,8	21,4
5	45,3	9664,7	19,4
8	44,8	10619,2	18,4
10	44,6	11065,9	18,0
20	44,2	12639,9	16,4
30	44,1	13480,5	16,0
0,1	47,5	3748,4	26,8

Tabla 72: Módulos dinámicos y ángulos de desfase para la escoria en volumen.

Los valores de los módulos dinámicos obtenidos sobre las muestras con escorias se considera que pueden ser debidos a los contenidos de cal de la escoria.

4.3.2.1.5 Fatiga

La metodología de ensayo fue la descrita en la norma UNE-EN 12697-24, titulada “Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 24: Resistencia a la fatiga”. Concretamente se aplicó el anexo D, titulado “Ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas”.

La temperatura de secado, almacenamiento y ensayo de las probetas fue de 20ºC. Se esperó un período entre 15 y 24 días entre el corte de las probetas y el ensayo, dependiendo de la probeta.

La frecuencia de ensayo elegida fue de 10 Hz, y el número de ciclos máximo aplicado en cada ensayo fue de $2 \cdot 10^6$, límite máximo establecido por la norma. En caso de que la rigidez de la probeta no hubiera llegado al 50 % de la rigidez del ciclo 100, que es el criterio de fallo establecido, se estimó por extrapolación el número de ciclos necesario para alcanzar dicho criterio de fallo, teniendo en cuenta la curva ε-N obtenida para la probeta ensayada y el grado de relajación alcanzado por la misma.

Para cada mezcla se ensayaron probetas en 3 niveles distintos de deformación con el fin de poder tener una curva que fuera representativa del comportamiento del material en función de cualquier número de ciclos de carga.

Figura 95: Utensilio empleado en el ensayo de fatiga a flexión en 4 puntos.

A continuación se muestra, para cada mezcla, la gráfica ln(ε)-ln(N) obtenida, donde ε es la deformación aplicada expresada como microdeformaciones y N es el número de ciclos de aplicación de la carga.

Ofita de referencia

Ley de fatiga:

$$ln(N) = 63.463 - 9.264 \cdot ln(\varepsilon)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{e^{63.463}}{N}\right)^{1/9.264} = 9.443 * 10^{-4} * N^{-0.1079}\ (m/m)$$

Puntos individuales obtenidos:

Número de probeta	Temperatura [°C]	Deformación [mm/m]	$E_{inicial}$ [MPa]	E_{final} [MPa]	Ciclos alcanzados
1	20	286,2	7179,1	3589,5	77880
2	20	237,9	7520,2	3760,1	257790
3	20	240,9	6681,8	3340,9	281831
4	20	198,8	6823,8	3411,9	2277001

Tabla 73: Valores del ensayo para la ofita de referencia (r^2=0,1197).

Escoria en volumen

Ley de fatiga:

$$ln(N) = 44.812 - 6.082 \cdot ln(\varepsilon)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{e^{44.812}}{N}\right)^{1/6.082} = 1.5844 * 10^{-3} * N^{-0.1644}(m/m)$$

Puntos individuales obtenidos:

Número de probeta	Temperatura [°C]	Deformación [mm/m]	$E_{inicial}$ [MPa]	E_{final} [MPa]	Ciclos alcanzados
1	20	228,8	8692,2	4346,1	124870
2	20	181,2	9205,2	4602,6	596540
3	20	160,7	10180,9	5090,5	1034940

Tabla 74: Valores del ensayo para la escoria en volumen.

Comparativa Deformación-Número de ciclos entre la ofita y la escoria

***Nota:** para que una mezcla sea considerada como apta a fatiga debe tener una deformación superior a 100 µm/m en el ciclo 10^6.

Denominación de la mezcla	Deformación en 10^6 ciclos (µm/m)	$E_{inicial}$ (Mpa)	Coeficiente de correlación R^2	Desviación típica $S_{x/y}$
Ofita de referencia	212,5	7.051	0,967	0,310
Escoria en volumen	163,5	9.359	0,992	0,135

Tabla 75: Valores de referencia en fatiga para la ofita y la escoria en volumen.

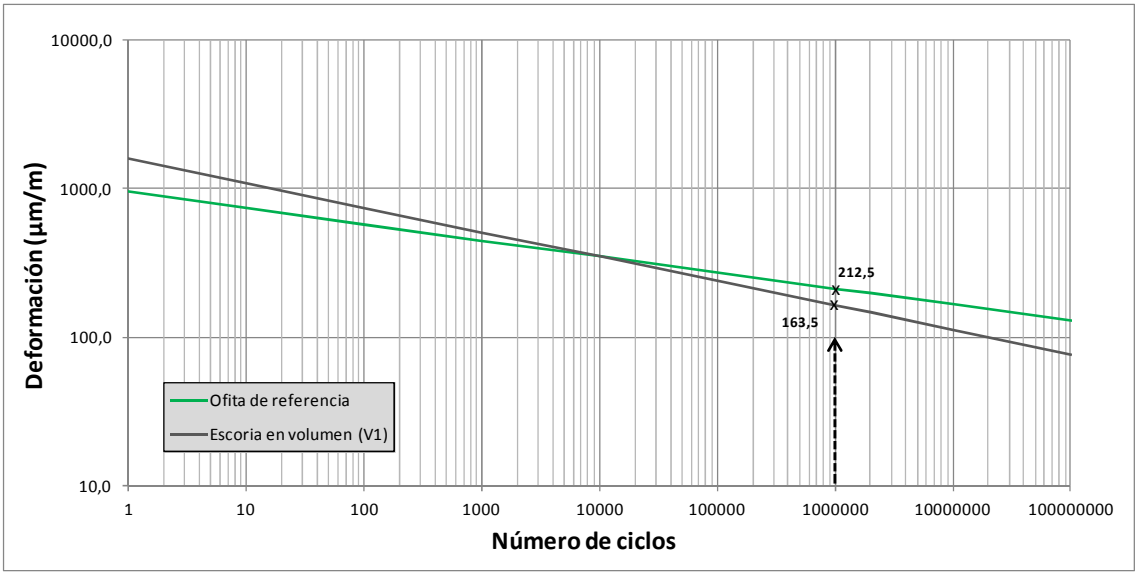


Figura 192: Curvas logarítmicas de fatiga para la ofita y la escoria en volumen.

4.3.2.1.6 Wheel Tracking Test

En este ensayo se evalúan las deformaciones plásticas de las mezclas asfálticas simulando el paso de un tráfico tipo. La resistencia a las deformaciones plásticas se determina mediante el ensayo de pista basado en la norma UNE-EN 12697-22. Los parámetros empleados en este caso fueron el dispositivo pequeño, el procedimiento B en aire, a una temperatura de 60ºC y con una duración de 10.000 ciclos. Las probetas se prepararán mediante compactador de placa con rodillo de acero según la norma UNE-EN 12697-33 de tal forma que

se alcanzó una densidad que sea superior al 98% de la obtenida en probetas Marshall preparadas de acuerdo a UNE-EN 12697-30 aplicando 75 golpes por cara (metodología aplicable a una capa AC-16-S Surf la cual es objeto de este trabajo).

En Cantabria, que es zona térmica estival templada, los valores contemplados en el PG-3 en cuanto a las deformaciones plásticas para capas de rodadura e intermedias son los siguientes:

Zona térmica estival	Categoría de tráfico pesado				
	TOO y TO	T1	T2	T3 y arcenes	T4
Media	0,07		0,10		–

Tabla 76: Pendiente media de deformaciones en pista en el intervalo de 5.000 a 10.000 ciclos para capas de rodadura e intermedias (mm/1.000 ciclos de carga).

No solamente se tuvo en cuenta el valor característico del ensayo aisladamente, sino que se hizo un seguimiento de la profundidad de la rodera para determinar que mezclas eran más o menos deformables después de los 10.000 ciclos de carga.

A continuación se exponen los resultados que se obtuvieron en el ensayo de pista para cada una de las mezclas. Los valores sombreados hacen referencia al contenido de ligante correspondiente al 5% de H_{mezcla} tomado como óptimo en todos los casos:

OFITA DE REFERENCIA		
Dotación de ligante sobre mezcla (%)	VALOR MEDIO	
	Deformación de pista (mm/10^3 ciclos)	Profundidad de rodera (mm)
3,95	0,06	2,2
4,25	0,05	2,6
4,55	**0,06**	**2,9**
4,85	0,06	3,3

Tabla 77: Resultados medios variando la dotación de ligante para la ofita de referencia.

ESCORIA DOSIFICACIÓN EN VOLUMEN		
Dotación de ligante sobre mezcla (%)	VALOR MEDIO	
	Deformación de pista (mm/10^3 ciclos)	Profundidad de rodera (mm)
3,4	0,05	2,1
3,6	**0,06**	**2,8**
3,8	0,07	3,3
4	0,09	3,9
4,2	0,08	4,3

Tabla 78: Resultados medios para la escoria en volumen.

ESCORIA DOSIFICACIÓN EN PESO		
Dotación de ligante sobre mezcla (%)	VALOR MEDIO	
	Deformación de pista (mm/10^3 ciclos)	Profundidad de rodera (mm)
3,45	0,04	1,7
3,65	**0,05**	**2,1**
3,85	0,07	2,7
4,05	0,07	2,9
4,25	0,08	3,3

Tabla 79: Resultados medios para la escoria en peso.

Figura 96: Aspecto de la rodera resultante en una probeta de escoria dosificada en volumen y con un 3,60% de betún sobre mezcla.

Figura 97: Profundidad de rodera tras ser ensayada en una probeta tipo de escoria en peso con un 3,65% de betún s/m.

Finalmente, y para tener una percepción global del comportamiento de las distintas mezclas, se adjuntan 2 gráficas. En ellas es fácil apreciar la tendencia de cada una de las mezclas a medida que se modifica el contenido de ligante por debajo o por encima del óptimo y para una misma granulometría:

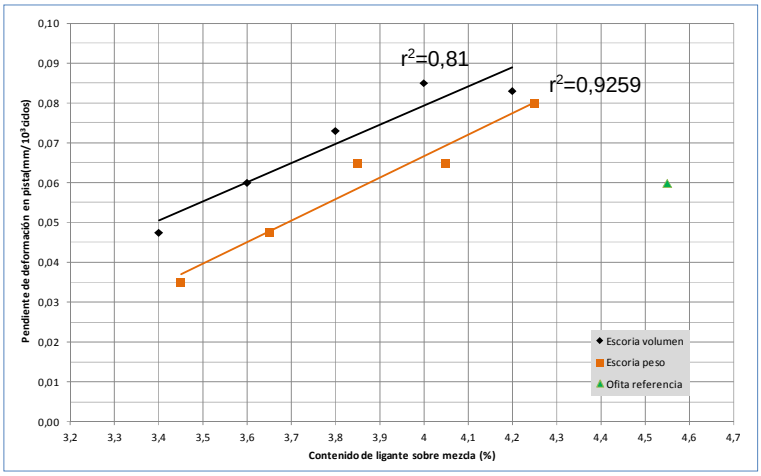


Figura 98: Pendiente media de deformación en pista. Para la ofita de referencia solo se representa el punto que corresponde al 5%.

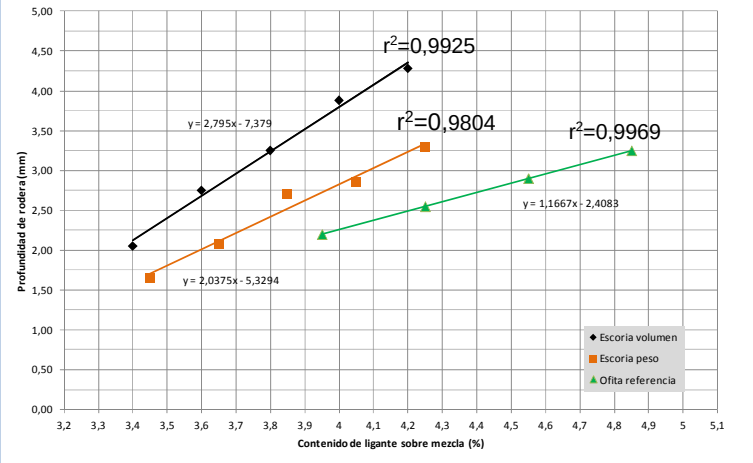


Figura 99: Curvas de evolución de la profundidad de rodera en función del betún.

Del análisis de ambas gráficas se deduce que la escoria en volumen tiene un comportamiento análogo a la ofita de referencia para un mismo contenido de huecos en mezcla. Es la escoria, sin embargo, ligeramente más susceptible que la ofita frente a variaciones en cuanto al contenido de betún.

De la escoria dosificada en peso se puede decir que su resistencia a las deformaciones plásticas es netamente superior a las dos mezclas anteriores.

4.3.2.1.7 Resumen final de resultados

La tabla siguiente muestra un resumen de toda la caracterización mecánica realizada y de las propiedades volumétricas más relevantes analizadas previamente en este documento:

	DENOMINACIÓN DE LAS MEZCLAS ESTUDIADAS		
Valores característicos para 5% H_{mezcla}	Ofita referencia	Escoria volumen	Escoria peso
Dotación de ligante (% s/m)	4,55	3,60	3,65
$H_{áridos}$ (%)	16,08	15,47	15,66
$H_{rellenos}$ (%)	69,09	68,81	67,81
Densidad (Kg/dm^3)	2,509	3,043	2,997
Relación filler/betún	1,20	1,39	1,56
Sensibilidad al agua, ITSR(%)	93	87	103
Tensión a tracción indirecta,15ºC (kp/cm^2)	21,00	19,84	23,97
Tensión a tracción indirecta,20ºC (kp/cm^2)	–	17,87	19,48
Módulos resilientes, 20ºC (Mpa)	10.152	11.656	14.905
Wheel tracking test, 60ºC (mm/10^3 ciclos)	0,06	0,06	0,06
Profundidad de rodera en rodadura, 60ºC (mm)	2,9	2,8	2,1
Módulos dinámicos, 20ºC y 10Hz (Mpa,º)	$7{,}855^{22{,}1º}$	$11.066^{18{,}0º}$	–
Deformación a fatiga 10^6 ciclos, 20ºC y 10Hz (µm/m)	212,5	163,5	–

Tabla 80: Resultados resumidos de los ensayos de las 3 mezclas estudiadas.

4.3.2.1.8 Contenido de ligante y granulometría

Una vez ejecutadas las obras se recogieron pruebas de los diferentes tramos comprobar su contenido de ligante y granulometría.

Contenido de ligante

	% Ligante en mezcla	% Ligante en áridos
Tramo de prueba experimental 1	4,54	4,76
Tramo de prueba experimental 2A (0/6)	4,45	4,65
Tramo de prueba experimental 2B (0/4)	4,48	4,69

Tabla 81: Contenido de ligante de las mezclas.

Granulometría

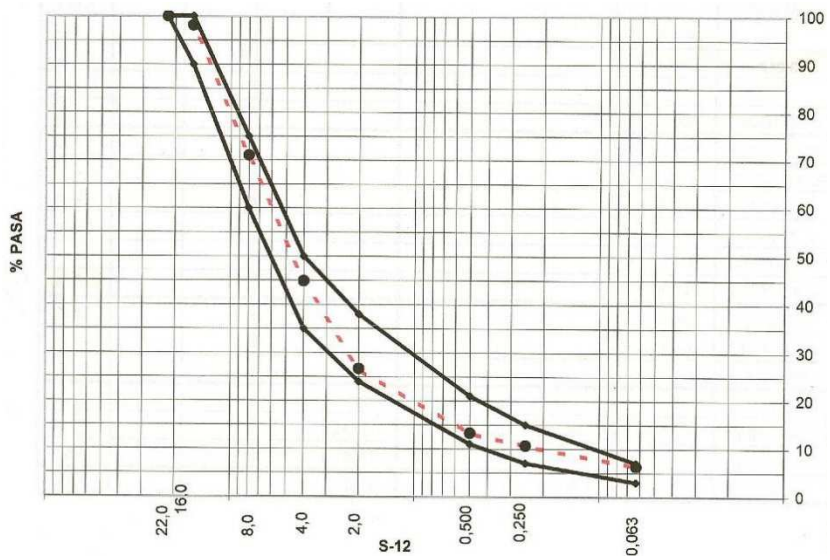


Figura 100: Granulometría del árido recuperado en la Zona de prueba 1.

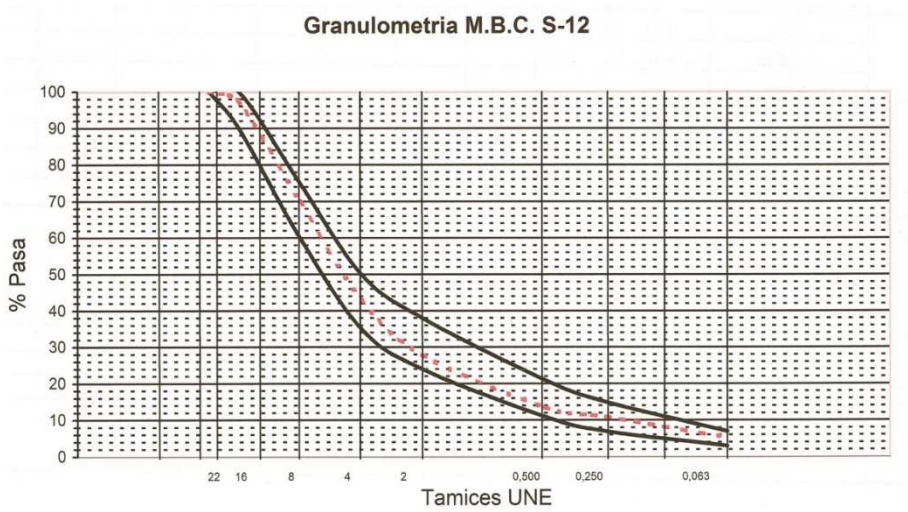


Figura 101: Granulometría del árido recuperado en la Zona de prueba 2A.

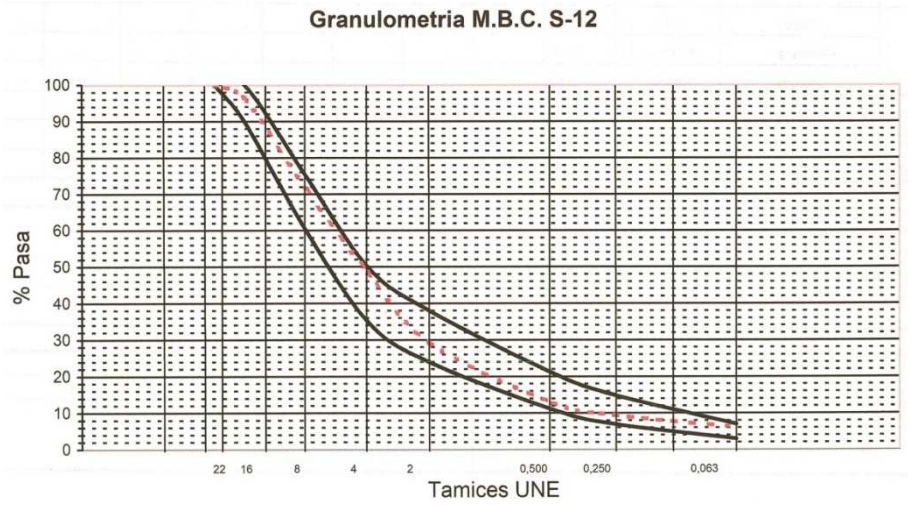


Figura 102: Granulometría del árido recuperado en la Zona de prueba 3.

4.3.2.2 Áreas de experimentación post-laboratorio

4.3.2.2.1 Área experimental 1

Diseñada la mezcla, el 7 de abril de 2009 se procedió a la realización de un tramo de prueba experimental de 759 m^2 y 5 cm de espesor.

La mezcla utilizada en el primer tramo de pruebas fue AC 16 SURF 50/70 S con un 46% de fracción gruesa compuesta al 100% por árido siderúrgico y 54% de fracción fina con 50 % de árido calizo 0/6 mm.

Figura 103: Zona de prueba 1 en las instalaciones de Emilio Bolado.

TIPO MEZCLA ASFÁLTICA	AC16S	FECHA	14/05/2009

Betún	4,5 %
Áridos	95,5 %

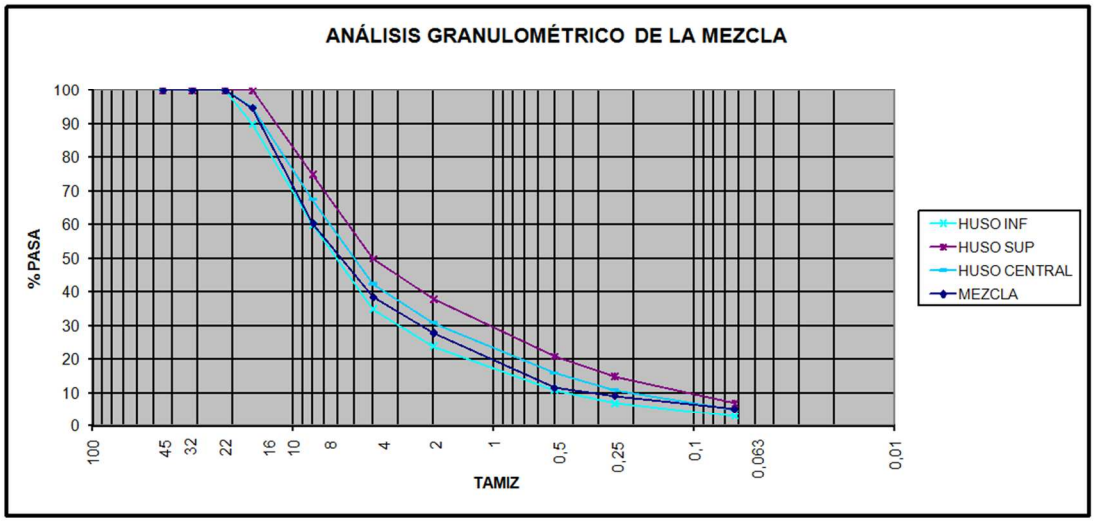
Superficie	758 m^2
Espesor	5 cm
Densidad	2,80 t/m^3

	DENOMINACIÓN	% MASA ÁRIDOS
Árido 1	0/6 Lamadrid	25,0
Árido 2	0/6 Escoria	25,0
Árido 3	6/12 Escoria	21,0
Árido 4	12/18 Escoria	25,0
Árido 5		0,0
Árido 6	Filler	4,0
	TOTAL	100,0

DOSIFICACIÓN	
Betún	45,0 Kg/t
0/6 Lamadrid	238,8 Kg/t
0/6 Escoria	238,8 Kg/t
6/12 Escoria	200,6 Kg/t
12/18 Escoria	238,8 Kg/t
	0,0 Kg/t
Filler	38,2 Kg/t
TOTAL	1.000 Kg/t

Betún	4,8 t
0/6 Lamadrid	25,3 t
0/6 Escoria	25,3 t
6/12 Escoria	21,3 t
12/18 Escoria	25,3 t
	0,0 t
Filler	4,1 t
Mezcla total	106,1 t

TAMICES	0/6 Lamadrid	0/6 Escoria	6/12 Escoria	12/18 Escoria		Filler	HUSO INF	HUSO SUP	HUSO CENTRAL	MEZCLA
45	100	100	100	100		100	100	100	100	100
32	100	100	100	100		100	100	100	100	100
22	100	100	100	100		100	100	100	100	100
16	90	100	100	89		100	90	100	95	95
8	64	100	69	4		100	60	75	68	60
4	44	89,52	5	1		100	35	50	43	39
2	31	62,87	2	0,5		100	24	38	31	28
0,500	16	13,72	0,5	0,5		100	11	21	16	12
0,250	11	9,18	0,5	0,5		100	7	15	11	9
0,063	5	2,75	0,3	0,3		80	3	7	5	5,3



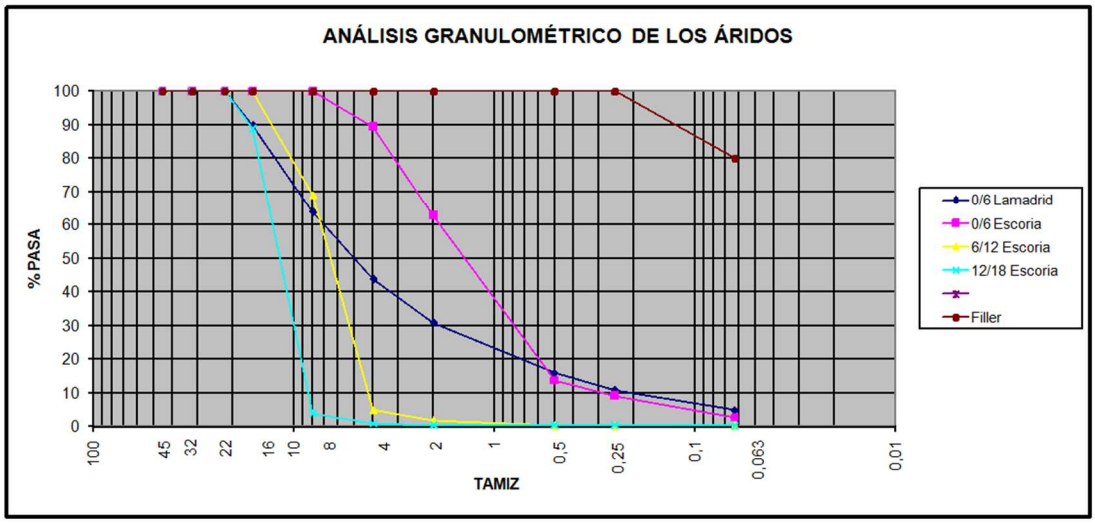


Figura 104: Mezcla AC16-S empleada en la Zona de prueba 1.

Figura 105: Asfaltado con extendedora.

Figura 106: Asfaltado finalizado.

4.3.2.2.2 Área experimental 2

Diseñada la mezcla, el 15 de abril de 2009 se procedió a la realización de un tramo de prueba experimental de 1400 m^2 y 7 cm de espesor.

La mezcla utilizada en el primer tramo de pruebas fue AC 16 SURF 50/70 S con un 46% de fracción gruesa compuesta al 100% por árido siderúrgico y 54% de fracción fina con 50 % de árido calizo 0/6 mm.

En el segundo tramo se utilizó una AC 16 SURF 50/70 S con un 46% de fracción gruesa compuesta al 100% por árido siderúrgico y una fracción fina con un 50% de árido calizo 0/4 mm.

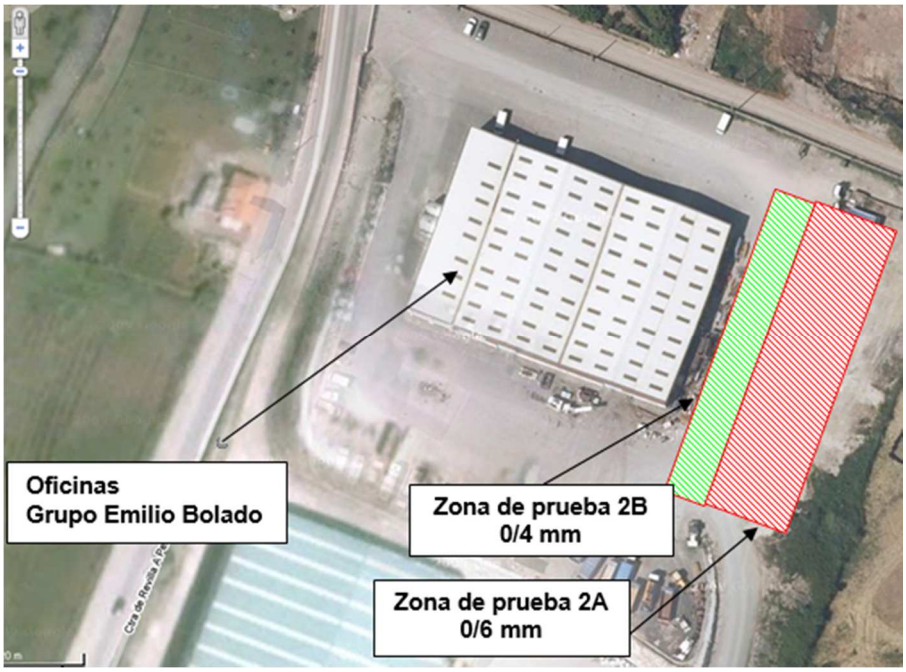


Figura 107: Zona de prueba 2A y 2B en las instalaciones de Emilio Bolado.

Mezcla AC16-S empleada en la Zona de prueba 2A

TIPO MEZCLA ASFÁLTICA	AC16S	FECHA	14/05/2009

Betún	4,5 %
Áridos	95,5 %

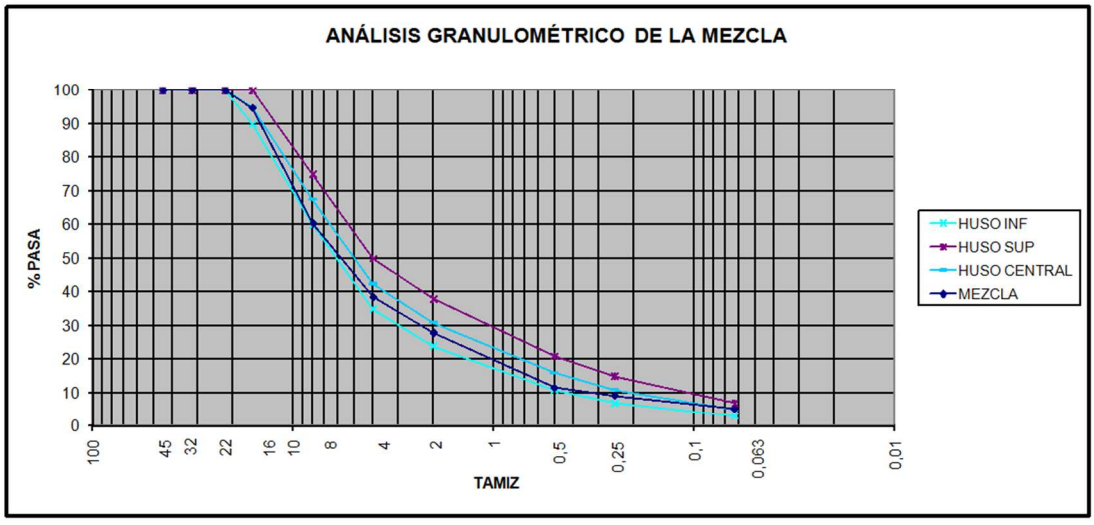
Superficie	800 m^2
Espesor	7 cm
Densidad	2,85 t/m^3

	DENOMINACIÓN	% MASA ÁRIDOS
Árido 1	0/6 Lamadrid	25,0
Árido 2	0/6 Escoria	25,0
Árido 3	6/12 Escoria	21,0
Árido 4	12/18 Escoria	25,0
Árido 5		0,0
Árido 6	Filler	4,0
	TOTAL	100,0

DOSIFICACIÓN	
Betún	45,0 Kg/t
0/6 Lamadrid	238,8 Kg/t
0/6 Escoria	238,8 Kg/t
6/12 Escoria	200,6 Kg/t
12/18 Escoria	238,8 Kg/t
	0,0 Kg/t
Filler	38,2 Kg/t
TOTAL	1.000 Kg/t

Betún	7,2 t
0/6 Lamadri	38,1 t
0/6 Escoria	38,1 t
6/12 Escoria	32,0 t
12/18 Escori	38,1 t
	0,0 t
Filler	6,1 t
Mezcla total	159,6 t

TAMICES	0/6 Lamadrid	0/6 Escoria	6/12 Escoria	12/18 Escoria		Filler	HUSO INF	HUSO SUP	HUSO CENTRAL	MEZCLA
45	100	100	100	100		100	100	100	100	100
32	100	100	100	100		100	100	100	100	100
22	100	100	100	100		100	100	100	100	100
16	90	100	100	89		100	90	100	95	95
8	64	100	69	4		100	60	75	68	60
4	44	89,52	5	1		100	35	50	43	39
2	31	62,87	2	0,5		100	24	38	31	28
0,500	16	13,72	0,5	0,5		100	11	21	16	12
0,250	11	9,18	0,5	0,5		100	7	15	11	9
0,063	5	2,75	0,3	0,3		80	3	7	5	5,3



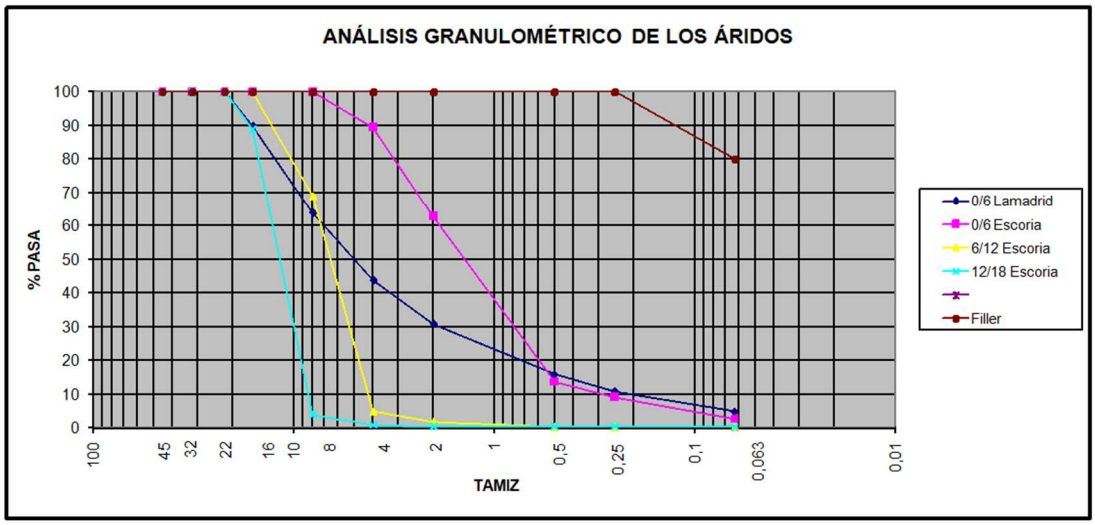


Figura 108: Mezcla AC16-S empleada en la Zona de prueba 2A.

Mezcla AC16-S empleada en la Zona de prueba 2B

TIPO MEZCLA ASFÁLTICA	AC16S	FECHA	14/05/2009

Betún	4,5 %
Áridos	95,5 %

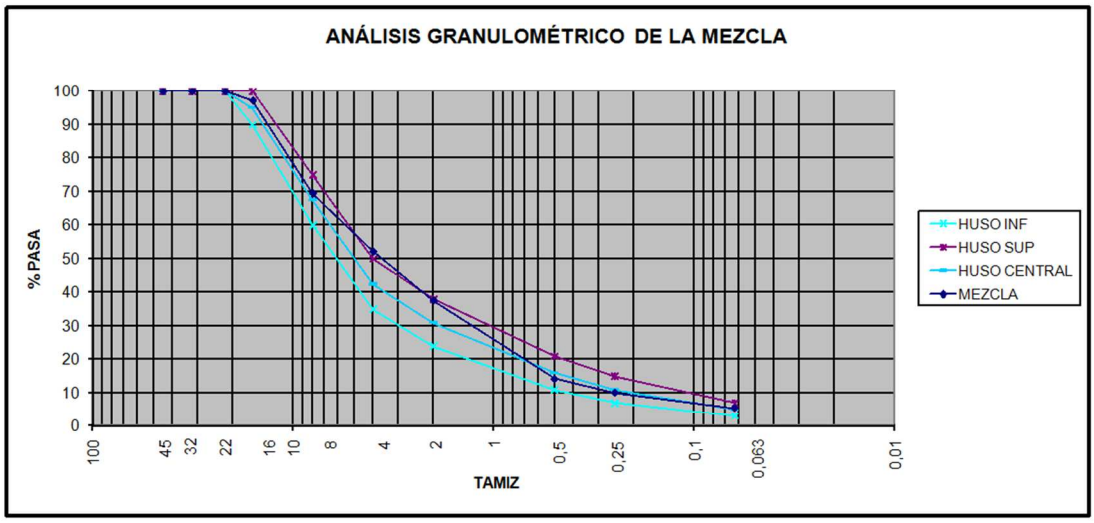
Superficie	600 m^2
Espesor	7 cm
Densidad	2,85 t/m^3

	DENOMINACIÓN	% MASA ÁRIDOS
Árido 1	0/4 Lamadrid	25,0
Árido 2	0/6 Escoria	25,0
Árido 3	6/12 Escoria	21,0
Árido 4	12/18 Escoria	25,0
Árido 5		0,0
Árido 6	Filler	4,0
	TOTAL	100,0

DOSIFICACIÓN	
Betún	45,0 Kg/t
0/4 Lamadrid	238,8 Kg/t
0/6 Escoria	238,8 Kg/t
6/12 Escoria	200,6 Kg/t
12/18 Escoria	238,8 Kg/t
	0,0 Kg/t
Filler	38,2 Kg/t
TOTAL	1.000 Kg/t

Betún	5,4 t
0/4 Lamadri	28,6 t
0/6 Escoria	28,6 t
6/12 Escoria	24,0 t
12/18 Escori	28,6 t
	0,0 t
Filler	4,6 t
Mezcla total	119,7 t

TAMICES	0/4 Lamadrid	0/6 Escoria	6/12 Escoria	12/18 Escoria		Filler	HUSO INF	HUSO SUP	HUSO CENTRAL	MEZCLA
45	100	100	100	100		100	100	100	100	100
32	100	100	100	100		100	100	100	100	100
22	100	100	100	100		100	100	100	100	100
16	100	100	100	89		100	90	100	95	97
8	100	100	69	4		100	60	75	68	69
4	98	89,52	5	1		100	35	50	43	52
2	69,4	62,87	2	0,5		100	24	38	31	38
0,500	26,4	13,72	0,5	0,5		100	11	21	16	14
0,250	14,1	9,18	0,5	0,5		100	7	15	11	10
0,063	5,6	2,75	0,3	0,3		80	3	7	5	5,4



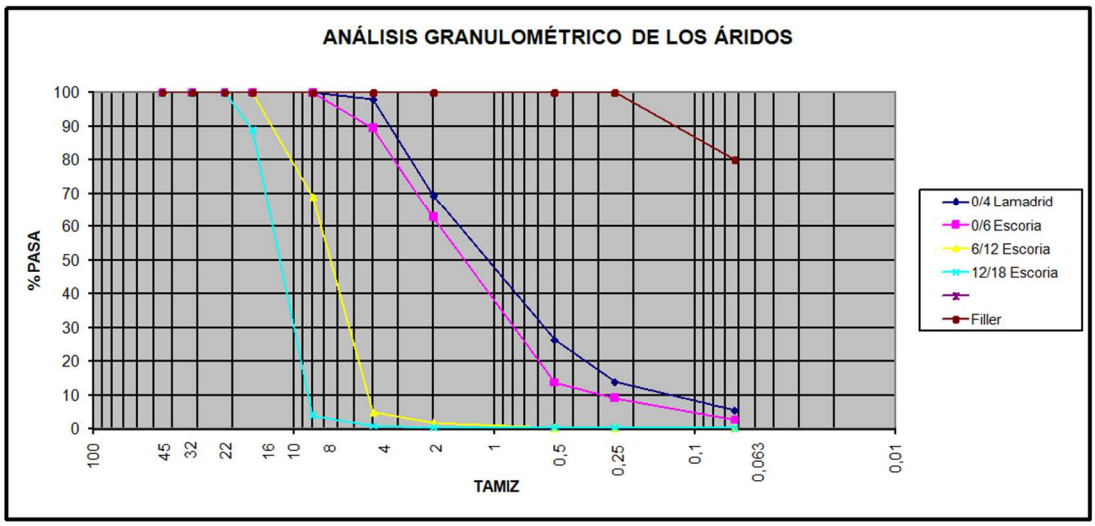


Figura 109: Mezcla AC16-S empleada en la Zona de prueba 2B.

Figura 110: Comienzo de extensión en zona experimental 2.

Figura 111: Compactación de la zona.

4.3.2.2.3 Área experimental 3

El 26 de abril de 2009 se procedió a la realización del tramo de prueba experimental 3, de 742 m^2 y 5 cm de espesor.

La mezcla utilizada en el tercer tramo de pruebas fue AC 16 SURF 50/70 S con 40% de fracción gruesa con 100% de árido siderúrgico y 60% de fracción fina con 50% de árido calizo 0/6 mm.

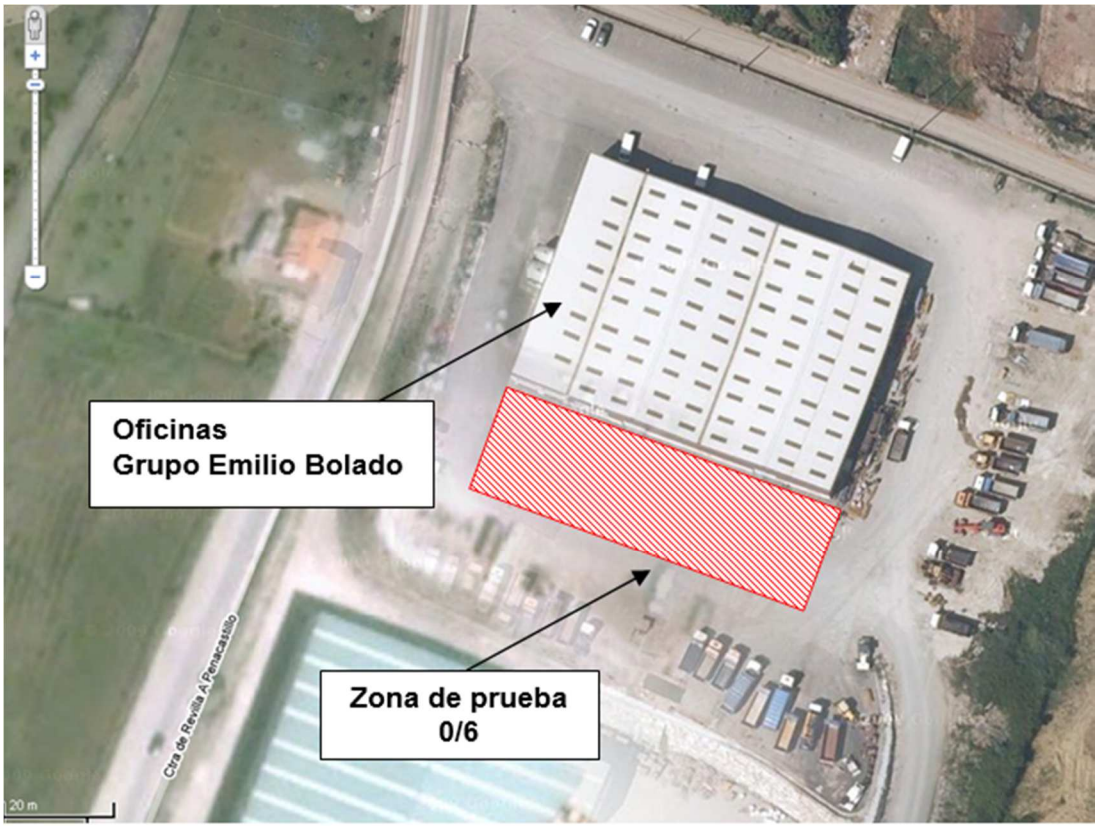


Figura 112: Zona de prueba 3 en las instalaciones de Emilio Bolado.

TIPO MEZCLA ASFÁLTICA	AC16S	FECHA	14/05/2009

Betún	4,5 %
Áridos	95,5 %

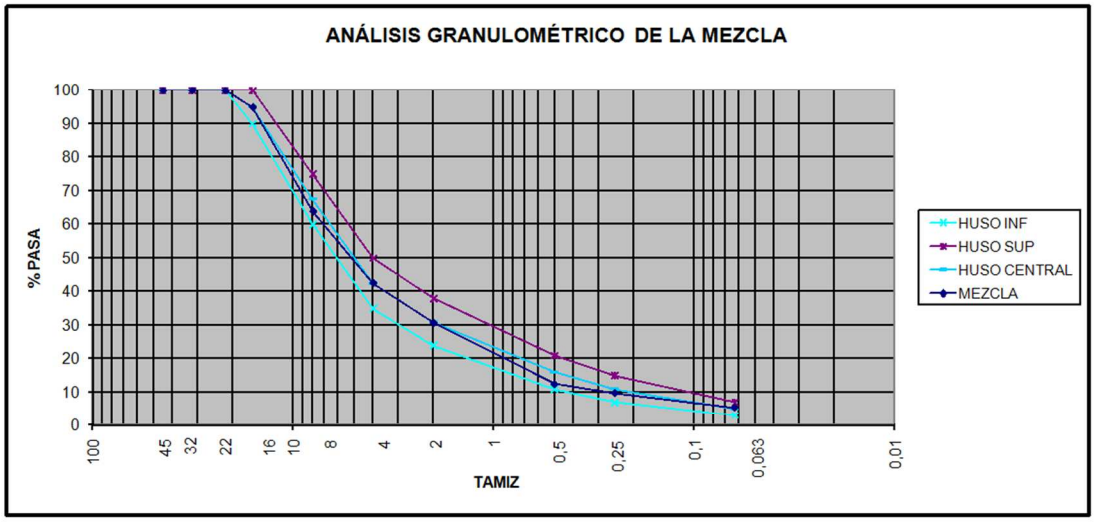
Superficie	742 m^2
Espesor	5 cm
Densidad	2,82 t/m^3

	DENOMINACIÓN	% MASA ÁRIDOS
Árido 1	0/6 Lamadrid	28,0
Árido 2	0/6 Escoria	28,0
Árido 3	6/12 Escoria	19,0
Árido 4	12/18 Escoria	21,0
Árido 5		0,0
Árido 6	Filler	4,0
	TOTAL	100,0

DOSIFICACIÓN	
Betún	45,0 Kg/t
0/6 Lamadrid	267,4 Kg/t
0/6 Escoria	267,4 Kg/t
6/12 Escoria	181,5 Kg/t
12/18 Escoria	200,6 Kg/t
	0,0 Kg/t
Filler	38,2 Kg/t
TOTAL	1.000 Kg/t

Betún	4,7 t
0/6 Lamadri	28,0 t
0/6 Escoria	28,0 t
6/12 Escoria	19,0 t
12/18 Escori	21,0 t
	0,0 t
Filler	4,0 t
Mezcla total	104,7 t

TAMICES	0/6 Lamadrid	0/6 Escoria	6/12 Escoria	12/18 Escoria		Filler	HUSO INF	HUSO SUP	HUSO CENTRAL	MEZCLA
45	100	100	100	100		100	100	100	100	100
32	100	100	100	100		100	100	100	100	100
22	100	100	100	100		100	100	100	100	100
16	90	100	100	89		100	90	100	95	95
8	64	100	69	4		100	60	75	68	64
4	44	89,52	5	1		100	35	50	43	43
2	31	62,87	2	0,5		100	24	38	31	31
0,500	16	13,72	0,5	0,5		100	11	21	16	13
0,250	11	9,18	0,5	0,5		100	7	15	11	10
0,063	5	2,75	0,3	0,3		80	3	7	5	5,5



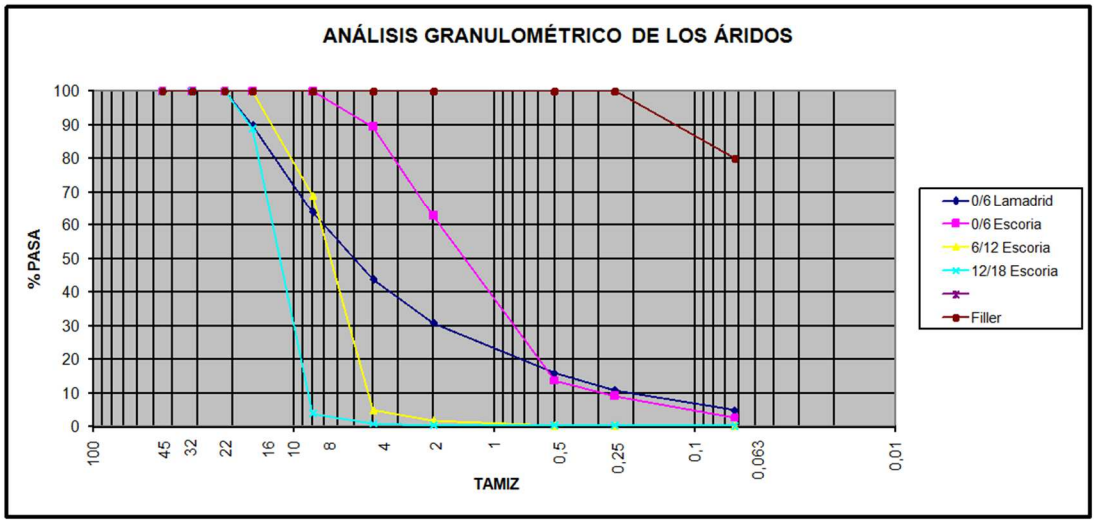


Figura 113: Mezcla AC16-S empleada en la Zona de prueba 3.

4.3.2.2.4 Área experimental 4

El 28 de abril de 2009 se procedió a la realización del tramo de prueba experimental 4, de 702 m^2 y 5 cm de espesor.

La mezcla utilizada en el cuarto tramo de pruebas fue AC 16 SURF 50/70 S con 40% de fracción gruesa con 100% de árido siderúrgico y 60% de fracción fina con 50% de árido calizo 0/6 mm.

Figura 114: Área experimental 4 en las instalaciones de Emilio Bolado.

TIPO MEZCLA ASFÁLTICA	AC16S	FECHA	14/05/2009

Betún	4,5 %
Áridos	95,5 %

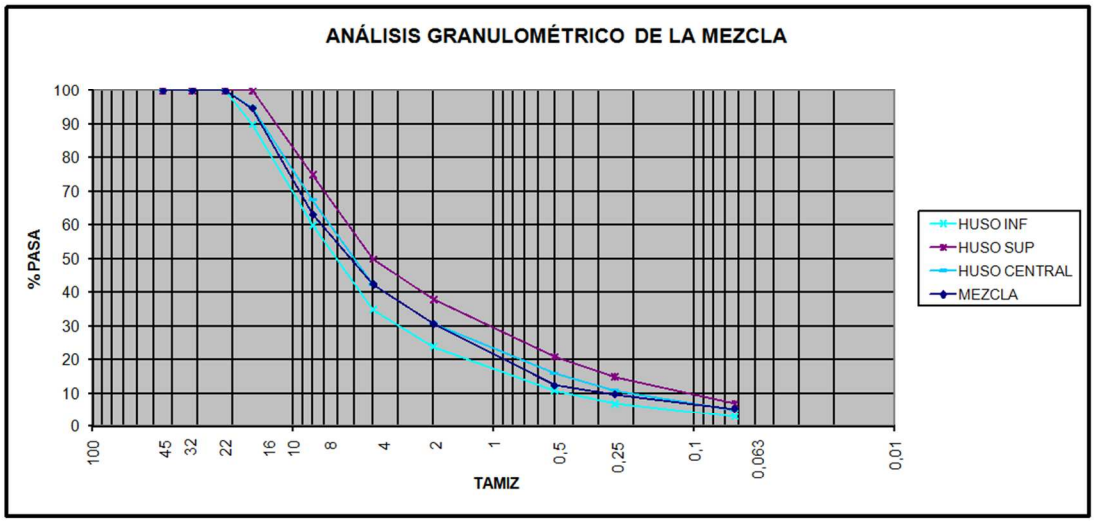
Superficie	702 m^2
Espesor	5 cm
Densidad	2,84 t/m^3

	DENOMINACIÓN	% MASA ÁRIDOS
Árido 1	0/6 Lamadrid	28,0
Árido 2	0/6 Escoria	28,0
Árido 3	6/12 Escoria	18,0
Árido 4	12/18 Escoria	22,0
Árido 5		0,0
Árido 6	Filler	4,0
	TOTAL	100,0

DOSIFICACIÓN	
Betún	45,0 Kg/t
0/6 Lamadrid	267,4 Kg/t
0/6 Escoria	267,4 Kg/t
6/12 Escoria	171,9 Kg/t
12/18 Escoria	210,1 Kg/t
	0,0 Kg/t
Filler	38,2 Kg/t
TOTAL	1.000 Kg/t

Betún	4,5 t
0/6 Lamadrid	26,7 t
0/6 Escoria	26,7 t
6/12 Escoria	17,1 t
12/18 Escoria	20,9 t
	0,0 t
Filler	3,8 t
Mezcla total	99,7 t

TAMICES	0/6 Lamadrid	0/6 Escoria	6/12 Escoria	12/18 Escoria		Filler	HUSO INF	HUSO SUP	HUSO CENTRAL	MEZCLA
45	100	100	100	100		100	100	100	100	100
32	100	100	100	100		100	100	100	100	100
22	100	100	100	100		100	100	100	100	100
16	90	100	100	89		100	90	100	95	95
8	64	100	69	4		100	60	75	68	63
4	44	89,52	5	1		100	35	50	43	43
2	31	62,87	2	0,5		100	24	38	31	31
0,500	16	13,72	0,5	0,5		100	11	21	16	13
0,250	11	9,18	0,5	0,5		100	7	15	11	10
0,063	5	2,75	0,3	0,3		80	3	7	5	5,5



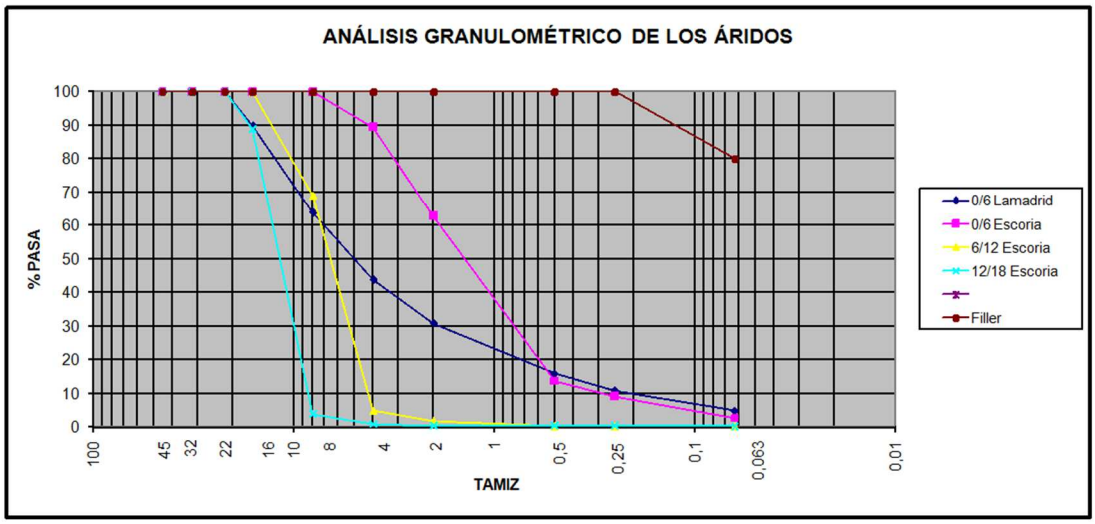


Figura 115: Mezcla AC16-S empleada en la Zona de prueba 4.

4.3.2.2.5 Ensayo Marshall

Por otra parte y aunque la normativa no lo exige, se realizaron ensayos Marshall para determinar la estabilidad y deformabilidad de las diferentes mezclas bituminosas. Los ensayos ejecutaron sobre las muestras recogidas.

Los ensayos se realizaron según la norma UNE-EN 12697 “Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 34: Ensayo Marshall”.

	Estabilidad (kN)	Deformación (mm)
Tramo de prueba experimental 1	1485	2,45
Tramo de prueba experimental 2A (0/6)	1306	2,65
Tramo de prueba experimental 2B (0/4)	1560	2,88
Tramo de prueba experimental 3	1283	2,60
Tramo de prueba experimental 4	1291	2,65
Tramo de prueba experimental 5	1283	2,70

Tabla 82: Ensayo Marshall

4.3.2.2.6 Ensayo de Inmersión-Compresión

	IRC (%)
Tramo de prueba experimental 1	87,2
Tramo de prueba experimental 2A (0/6)	89,0
Tramo de prueba experimental 2B (0/4)	89,0
Tramo de prueba experimental 3	88,7
Tramo de prueba experimental 4	88,4
Tramo de prueba experimental 5	90,1

Tabla 83: Ensayo Inmersión-Compresión

4.3.2.3 Tramos de prueba Gobierno Regional

Verificadas en las áreas de prueba las mezclas desarrolladas en laboratorio Se procedió en a la ejecución de tramos de prueba en carreteras del gobierno regional CA136 y CA137.

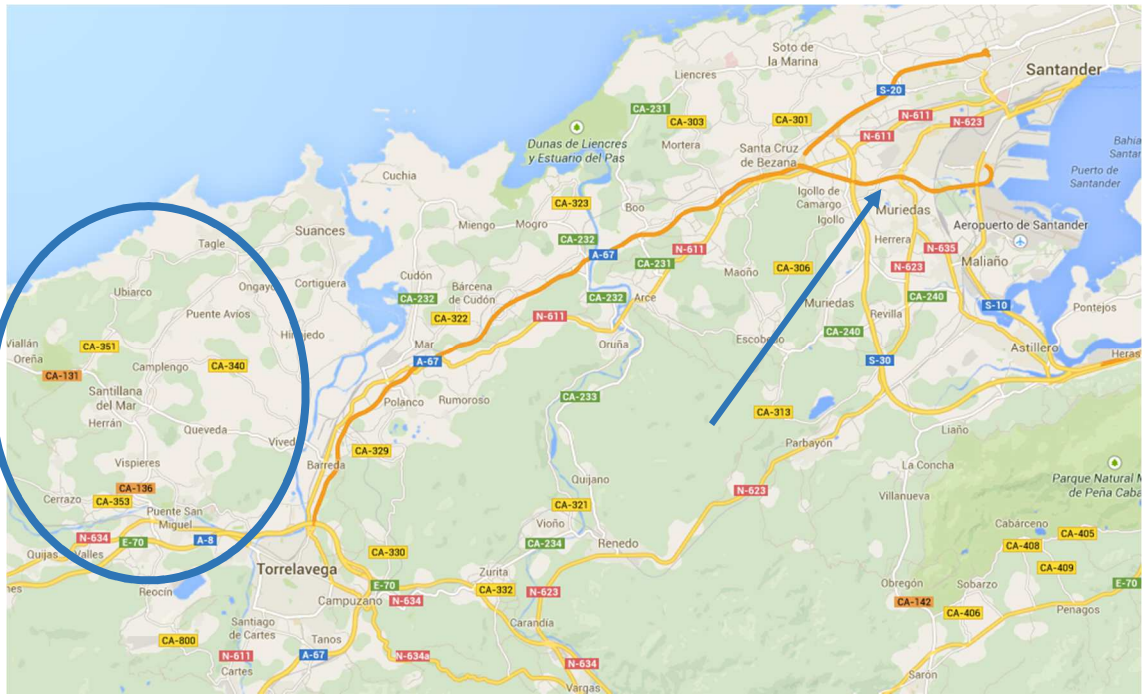


Figura 116: Plano de situación de los tramos de estudio.

La carretera CA-136, también conocida como Variante de Santillana, transcurre a través de los municipios de Reocín, Santillana del Mar y Suances. Se trata de una carretera convencional de una única calzada con doble sentido de circulación. La longitud del tramo es de 8900 metros.

En esta carretera se utilizaron dos tipos de mezclas bituminosas. En marzo del 2011 se ejecutó del PK 0+000 al 3+880 con una mezcla fabricada con árido silíceo. Previamente, en diciembre del 2010, se construyó del PK 3+880 al 8+900 con una mezcla en la que se sustituyó el árido natural por árido siderúrgico.

En esta carretera se llevaron a cabo ensayos de CRD, CRT y textura.

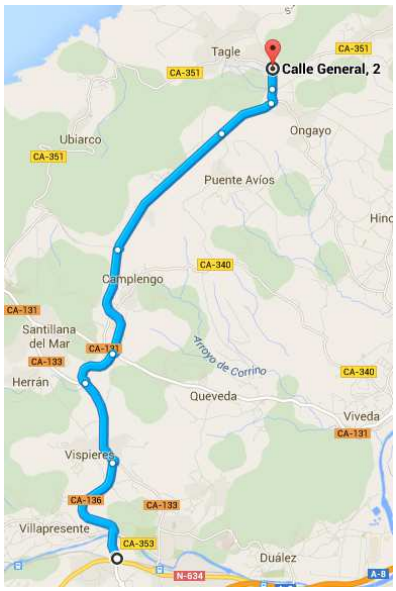


Figura 117: CA-136 - Variante de Santillana.

La carretera CA-137, también conocida como Variante de Suances, transcurre únicamente a través del municipio de Santillana del Mar. Al igual que la carretera CA-136, se trata de una carretera convencional de una única calzada con doble sentido de circulación. La longitud total del tramo es de 2500 metros. Esta carretera se construyó en diciembre del año 2010 utilizando árido siderúrgico.

Al igual que en la CA-136 se han realizado ensayos del coeficiente de resistencia al deslizamiento, del coeficiente de rozamiento transversal y de la textura

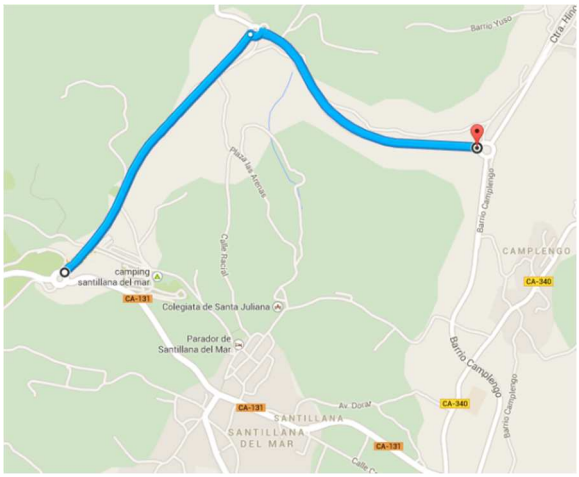


Figura 118: CA-137 - Variante de Suances.

CA-136 (Del PK 0+000 al PK 3+880)

La carretera CA-136 fue construida con dos tipos distintos de mezcla. El primer tramo, del PK 0+000 al PK 3+880 se empleó un árido natural silíceo. Sin embargo, en el segundo tramo, del PK 3+880 al PK 8+860 se empleó árido siderúrgico.

El tipo de mezcla empleado en el primer tramo fue del tipo BBTM 11 A, a excepción de las rotondas que se utilizó una mezcla del tipo AC16 S Sílice con la siguiente dosificación:

Áridos	%
0/6 Sílice	45
6/12 Sílice	38
12/18 Sílice	13
Filler	4
Betún	4,8

Tabla 84: Dosificación Sílice del PK 0+000 al PK 3+880.

CA-136 (Del PK 3+880 al PK 8+860) y CA-137

En el segundo tramo de la carretera CA-136 y la carretera CA-137 se empleó árido siderúrgico como sustitutivo del árido natural en las mezclas bituminosas. La mezcla empleada fue del tipo: AC16 Surf 50/70 S. Los principales parámetros de dosificación de esta mezcla son los siguientes:

Figura 119: Puesta en obra de la mezcla con árido siderúrgico.

Áridos	%		Kg
0/6 Caliza	25		238
0/6 Escoria	25		239
6/12 Escoria	21		203
12/18 Escoria	25		240
Filler	4		38
Betún	S/áridos	4,38	42
	S/mezcla	4,20	
SUMA	**100**		**1000**

Tabla 85: Dosificación AC16 Surf Escoria.

4.3.3 ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES SUPERFICIALES DE LOS TRAMOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

Es fundamental en un pavimento que exista una superficie que genere un buen rozamiento entre el neumático y el propio pavimento. Se trata de construir una superficie que proporcione niveles mínimos de seguridad para los usuarios de la carretera. Esta característica se define como adherencia o resistencia al deslizamiento.

La adherencia va disminuyendo con el paso del tiempo, variando sus valores según el pavimento se encuentre seco o mojado y llegando, incluso, comportarse de manera estacional. Generalmente se trata de un indicador del estado de una carretera, evaluándose mediante el coeficiente de fricción.

Existen diferentes métodos para cuantificar la resistencia al deslizamiento. Los más utilizados debido a su sencillez operativa y coste relativo son equipos de medida continua como el SCRIM. También, ante la necesidad de evaluar la adherencia de manera puntual en los tramos de prueba, se realizaron ensayos con el péndulo TRRL.

Figura 120: Péndulo TRRL.

En este apartado se muestran los resultados los ensayos realizados para determinar las propiedades superficiales de los tramos de pruebas experimentales llevados a cabo en distintos puntos de la geografía cántabra.

4.3.3.1 CRT y Textura

En los siguientes apartados se muestran los resultados obtenidos en el ensayo realizado con el equipo Scrim en mayo del 2014. En las tablas, a la vez que se dan los valores del CRT y la textura medida, se indica si existe algún tipo de incidencia (banda rugosa, cambio de pavimento, puente, etc.) a la hora de recoger los resultados.

CA-136 Vía creciente

Figura 121: Inicio tramo CA-136, vía creciente

Figura 122: Fin tramo CA-136, vía creciente

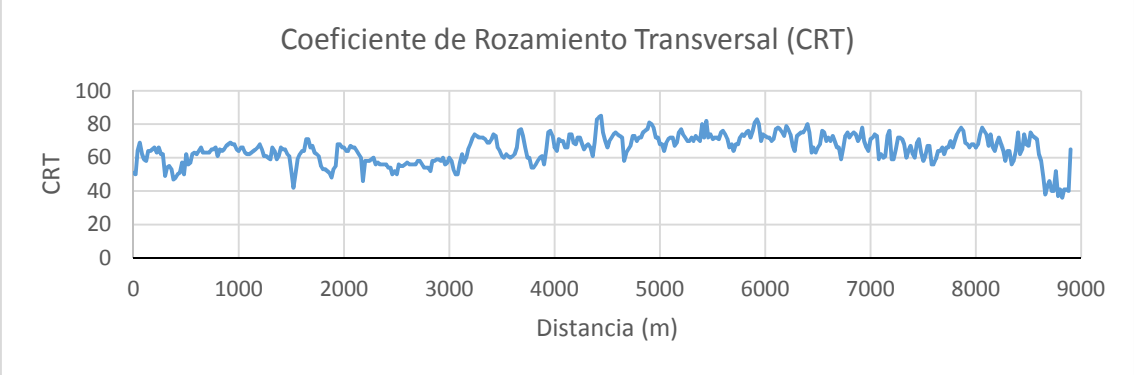


Figura 123: CRT CA-136 vía creciente

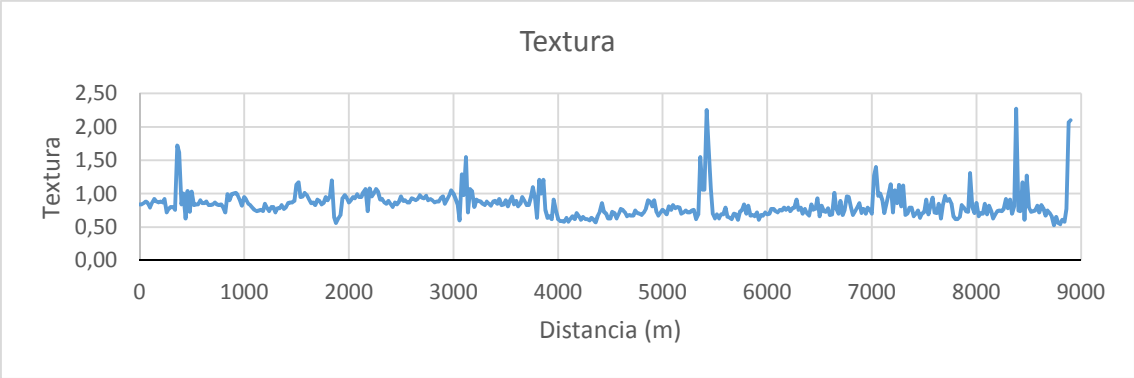


Figura 124: Textura CA-136 vía creciente.

CA-136 Vía decreciente

Figura 125: Inicio tramo CA-136, vía decreciente.

Figura 126: Fin tramo CA-136, vía decreciente.

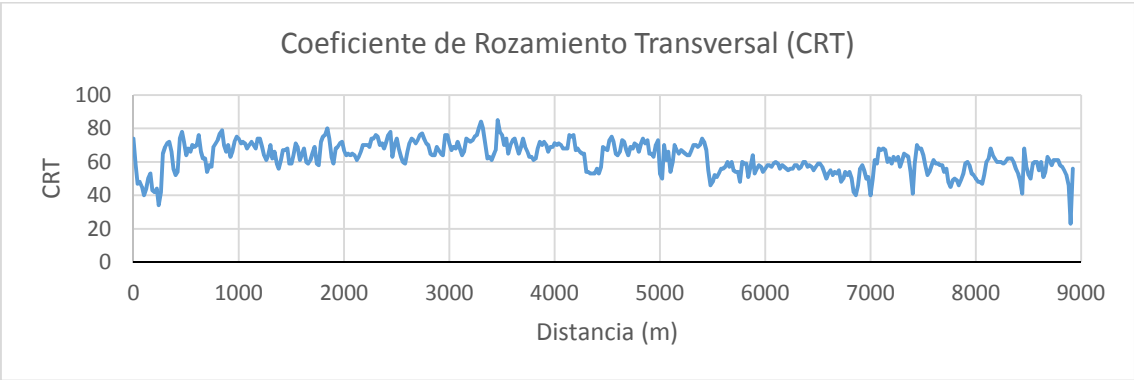


Figura 127: CRT CA-136 vía decreciente.

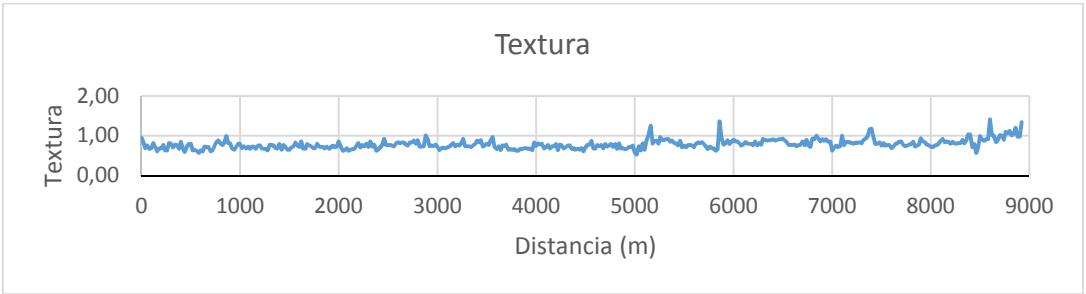


Figura 128: Textura CA-136 vía decreciente.

CA-137 Vía creciente

Figura 129: Inicio tramo CA-137, vía creciente.

Figura 130: Fin tramo CA-137, vía creciente.

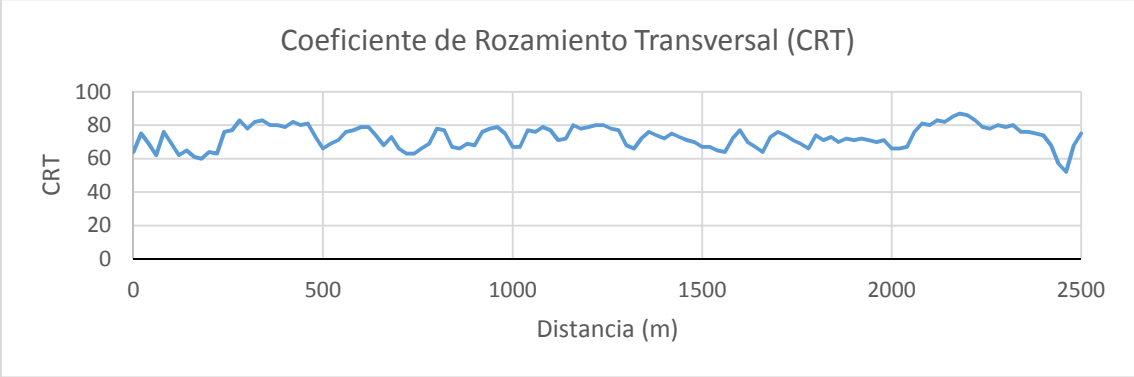


Figura 131: CRT CA-137 vía creciente.

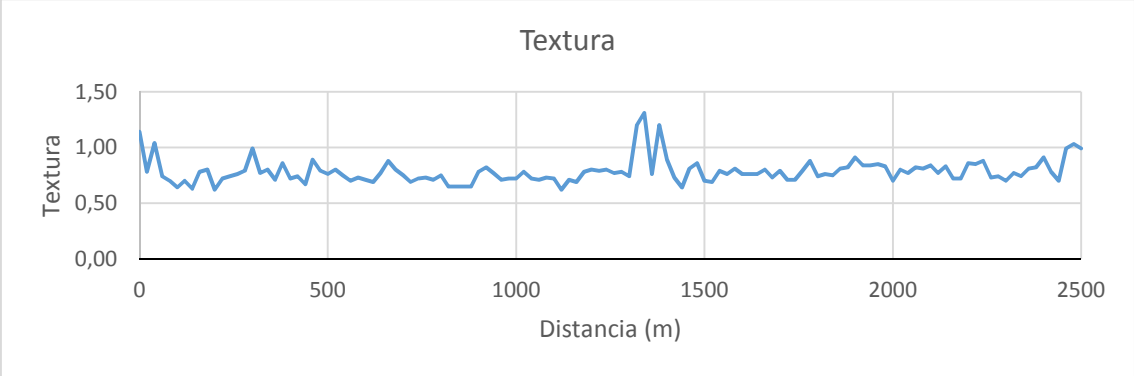


Figura 132: Textura CA-137 vía creciente.

CA-137 Vía decreciente

Figura 133: Inicio tramo CA-137, vía decreciente.

Figura 134: Fin tramo CA-137, vía decreciente.

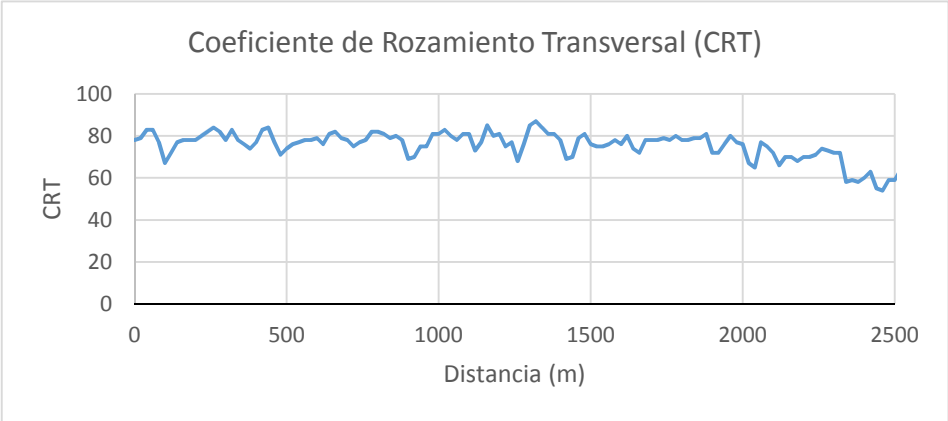


Figura 135: CRT CA-137 vía decreciente

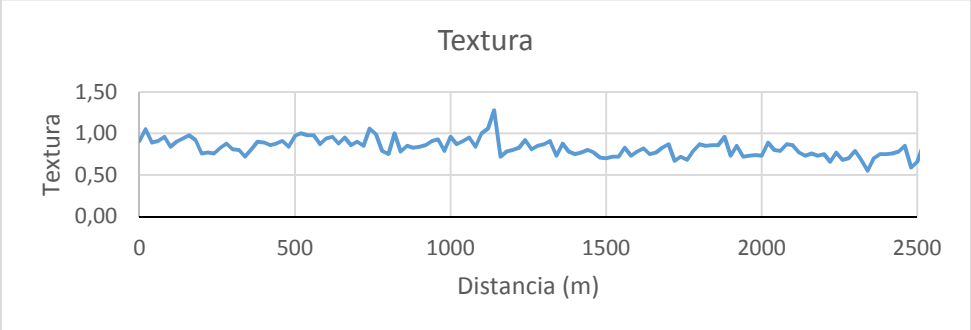


Figura 136: Textura CA-137 vía decreciente

4.3.3.2 Resistencia al deslizamiento

CA-136 y CA-137

En el mes de noviembre del año 2013 se realizaron medidas del CRD mediante el péndulo TRRL. Los ensayos se ejecutaron únicamente aquellos tramos en los que la mezcla bituminosa utilizada fue fabricada con árido siderúrgico. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

CA-136	
PK	CRD
5+950 MD	77
8+200 MI	82,3

CA-137	
PK	CRD
0+600 MD	79,3
1+100 ext. rotonda	84,3
1+800 MD	75,7

Tabla 86: Resultados CRD en la CA-136 y CA-137

Oficinas Grupo Emilio Bolado

Con el objetivo de valorar la evolución la superficie se procedió a realizar el ensayo del péndulo TRRL en siete puntos diferentes de las zonas de prueba.

Los resultados obtenidos en los ensayos se presentan en la siguiente tabla y figura:

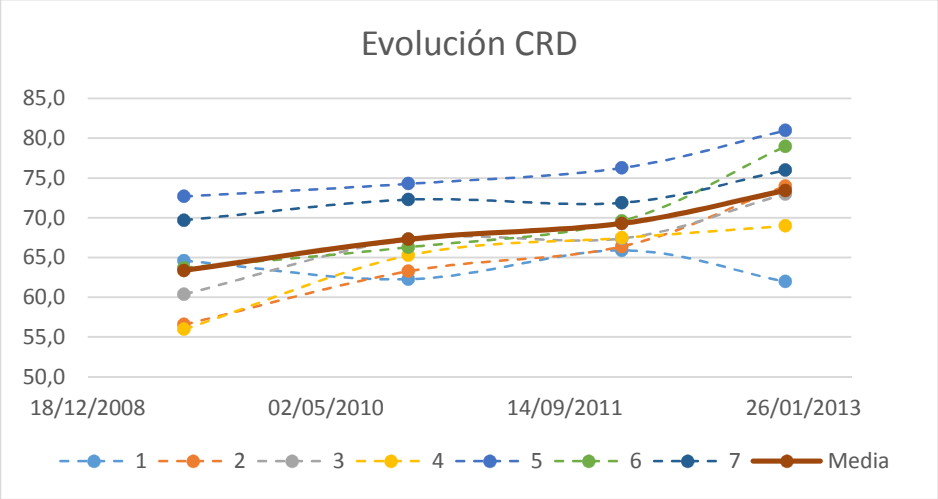


Figura 137: Resultados CRD en las oficinas de Emilio Bolado

Figura 138: Ensayo de resistencia al deslizamiento con el péndulo TRRL.

De los resultados obtenidos se puede apuntar que las mezclas presentan una microtextura aceptable, tal y como era de esperar tras los ensayos de CPA realizados sobre las escorias negras.

4.3.4 ESTUDIO ESTADÍSTICO

Este apartado pretende mostrar un análisis estadístico a distintos niveles de los datos recogidos en los ensayos realizados.

Por una parte, se realiza análisis de los valores recogidos por el equipo SCRIM del coeficiente de rozamiento transversal y de la textura en las mezclas fabricadas.

Por otra, se muestra un breve análisis de aquellos valores disponibles de la caracterización de las mezclas bituminosas fabricadas con escorias negras siderúrgicas. Para ello, se utilizan tanto los datos empleados en los apartados anteriores como los obtenidos en otra serie de ensayos que no han sido utilizados en la elaboración de esta Tesis Doctoral.

4.3.4.1 Comparación de las propiedades superficiales de las mezclas bituminosas convencionales y de las mezclas bituminosas fabricadas con áridos siderúrgicos

Resultados de los diferentes tramos

En las siguientes tablas se muestra los parámetros estadísticos anteriormente mencionados. Se muestran los resultados individualizando para cada tramo, diferenciando, además, cuando la mezcla ha sido fabricada con árido natural o árido siderúrgico.

Para realizar los cálculos de los diferentes parámetros se han seguido los siguientes pasos:

1. Se han descartado aquellos valores en los que se detectó el tránsito sobre una banda rugosa.
2. Se ha calculado la media y la desviación típica para cada tramo.
3. Se han descartado aquellos valores fuera del intervalo $\mu - 3\sigma < x < \mu + 3\sigma$.
4. Se ha vuelto a calcular la media y la desviación típica, así como el resto de parámetros estadísticos.

A continuación se muestran los resultados de forma tabular:

	CA-136 (Sílice)				CA-136 (Escoria)			
	Creciente		Decreciente		Creciente		Decreciente	
	CRT	Textura	CRT	Textura	CRT	Textura	CRT	Textura
Nº mediciones	187	184	187	184	234	238	243	244
Min	42	0,56	41	0,65	46	0,53	43	0,61
Max	77	1,29	74	1,20	85	1,17	85	0,95
Media	60,86	0,89	57,80	0,84	69,77	0,75	67,38	0,73
Desviación típica	6,47	0,11	6,19	0,10	6,11	0,11	7,12	0,07
Varianza	41,87	0,01	38,29	0,01	37,29	0,01	50,66	0,00
Primer cuartil	56	0,83	54	0,77	66	0,68	64	0,68
Mediana	62,00	0,88	58,00	0,83	71,00	0,73	69,00	0,73
Tercer cuartil	65,00	0,95	61,00	0,90	74,00	0,79	72,00	0,78
Percentil 95	72,00	1,07	68,75	1,02	78,25	0,97	76,00	0,86

Tabla 87: Resultados análisis estadístico CA-136.

	CA-137 (Escoria)			
	Creciente		Decreciente	
	CRT	Textura	CRT	Textura
Nº mediciones	121	117	123	123
Min	60	0,62	58	0,66
Max	87	1,04	87	1,06
Media	73,18	0,77	75,93	0,83
Desviación típica	6,17	0,08	5,88	0,09
Varianza	38,02	0,01	34,60	0,01
Primer cuartil	68,00	0,72	73	0,75
Mediana	73,00	0,76	77	0,83
Tercer cuartil	78,00	0,81	80	0,90
Percentil 95	83,00	0,91	84	0,99

Tabla 88: Resultados análisis estadístico CA-137.

Diagrama de cajas

En las siguientes figuras se representan mediante diagramas de cajas los principales valores calculados del Coeficiente de Rozamiento Transversal (CRT) y de la Textura de la superficie del pavimento. Al igual que en las tablas anteriores se diferencia entre los tramos fabricados con diferentes materiales.

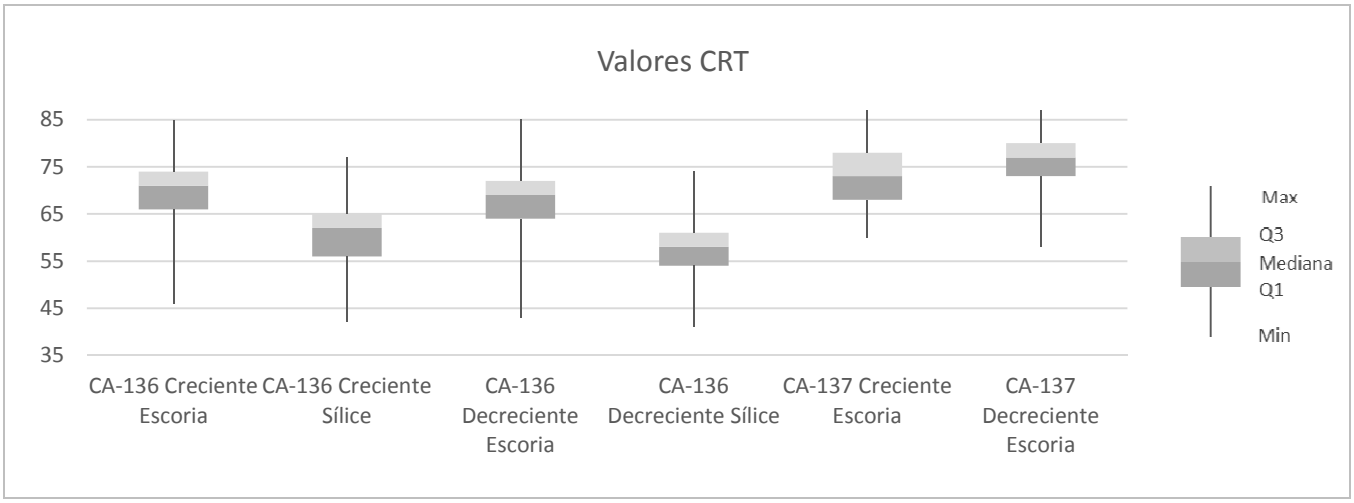


Figura 139: Diagrama de cajas del CRT.

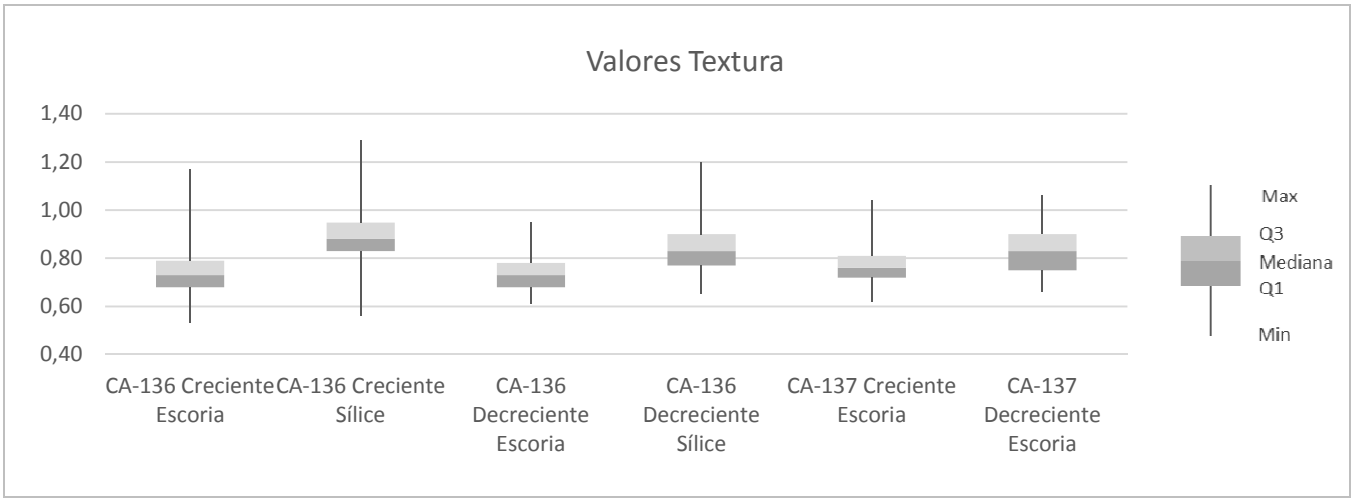


Figura 140: Diagrama de cajas de la Textura.

Histograma de probabilidad y línea de tendencia

En las siguientes figuras se muestra en forma de histograma la probabilidad de que se de cada valor en los resultados recogidos del coeficiente de rozamiento transversal y de la textura.

De manera superpuesta se muestra la línea de tendencia de los resultados recogidos en los ensayos:

CA-136 Creciente - Escoria

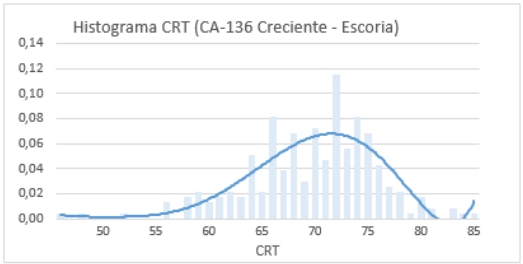


Figura 141: Histograma CRT (CA-136 Creciente - Escoria).

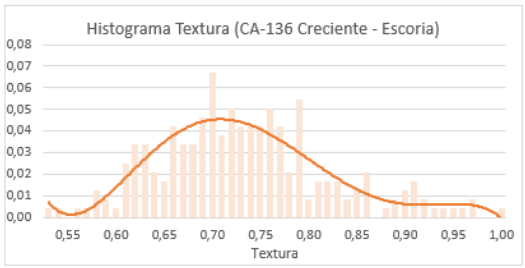


Figura 142: Histograma Textura (CA-136 Creciente - Escoria).

CA-136 Creciente – Sílice

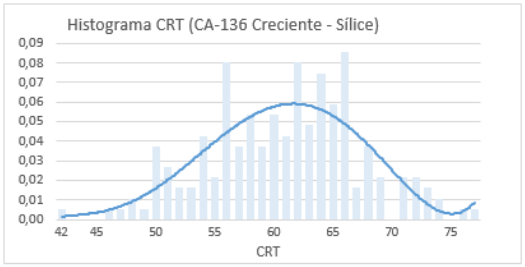


Figura 143: Histograma CRT (CA-136 Creciente - Sílice).

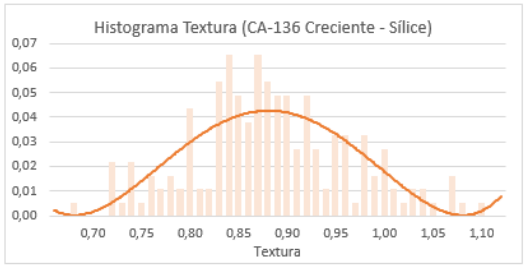


Figura 144: Histograma Textura (CA-136 Creciente - Sílice).

CA-136 Decreciente - Escoria

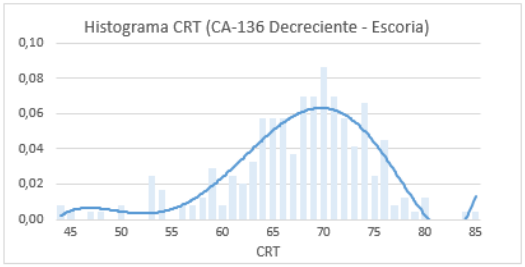


Figura 145: Histograma CRT (CA-136 Decreciente - Escoria).

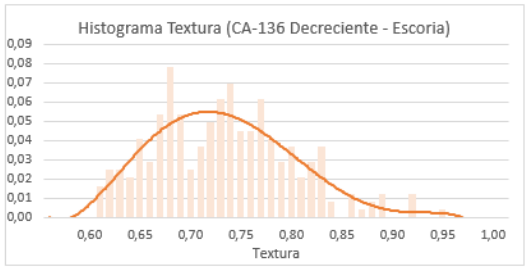


Figura 146: Histograma CRT (CA-136 Decreciente - Escoria).

CA-136 Decreciente - Sílice

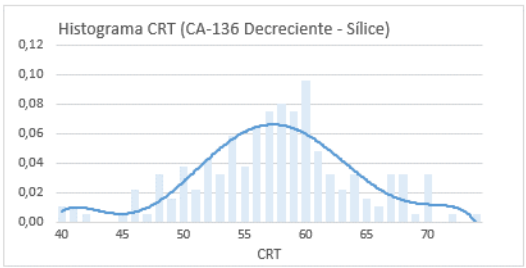


Figura 147: Histograma CRT (CA-136 Decreciente - Sílice).

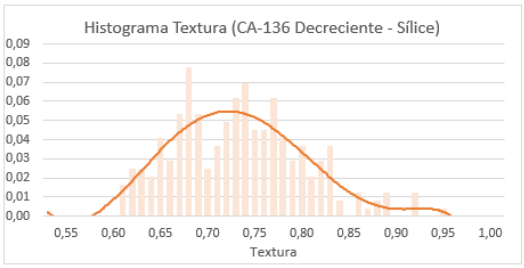


Figura 148: Histograma Textura (CA-136 Decreciente - Sílice).

CA-137 Creciente - Escoria

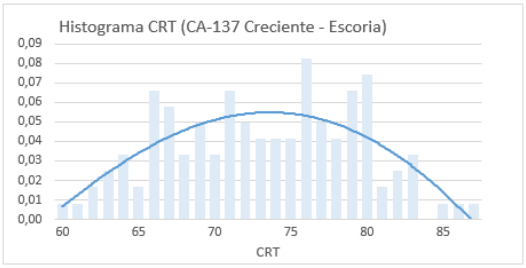


Figura 149: Histograma CRT (CA-137 Creciente - Escoria).

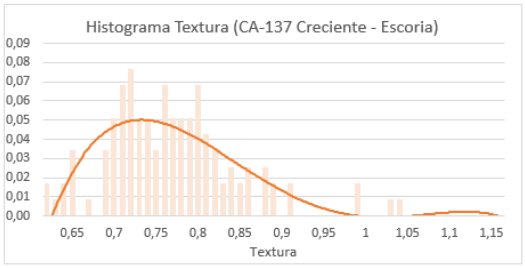


Figura 150: Histograma Textura (CA-137 Creciente - Escoria).

CA-137 Decreciente - Escoria

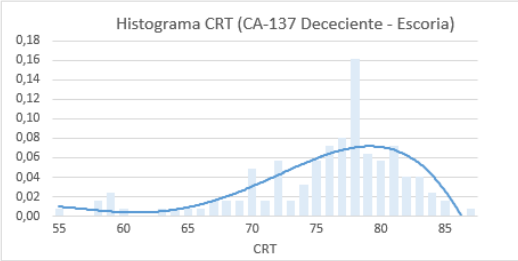


Figura 151: Histograma CRT (CA-137 Decreciente - Escoria).

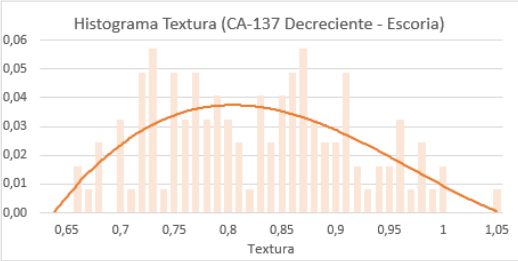


Figura 152: Histograma Textura (CA-137 Decreciente - Escoria).

Resultados agrupados

Por otro lado, se ha realizado un análisis estadístico en el que se han agrupado los resultados obtenidos en los diferentes tramos y en las diferentes direcciones según el árido empleado en cada mezcla. En la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos:

	Escoria		Sílice	
	CRT	Textura	CRT	Textura
Nº mediciones	720	722	374	368
Min	45	0,53	40	0,56
Max	87	1,08	77	1,25
Media	70,6	0,76	59,2	0,86
Desviación típica	6,97	0,09	6,70	0,11
Varianza	48,58	0,01	44,87	0,01
Primer cuartil	66	0,69	55	0,79
Mediana	71,00	0,75	59,00	0,86
Tercer cuartil	76,00	0,81	64,00	0,91
Percentil 95	81,00	0,94	70,00	1,05

Tabla 89: Resultados análisis estadístico datos agrupados.

Las siguientes figuras muestran, al igual que en apartados anteriores, el histograma y la línea de tendencia de los valores del CRT y la textura recogidos en los ensayos. Después se presentan los parámetros estadísticos más importantes de forma gráfica mediante un diagrama de cajas y bigotes.

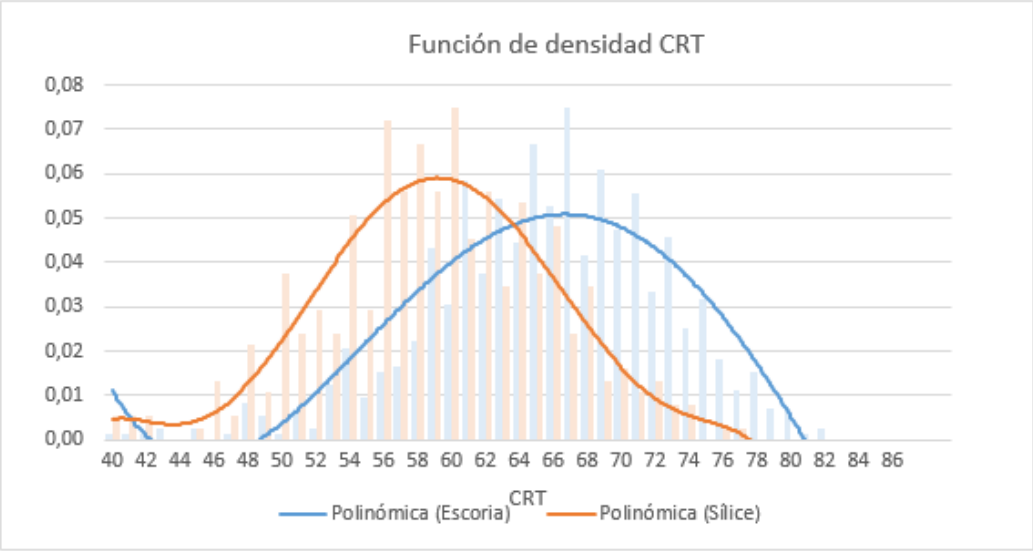


Figura 153: Histograma y línea de tendencia del CRT.

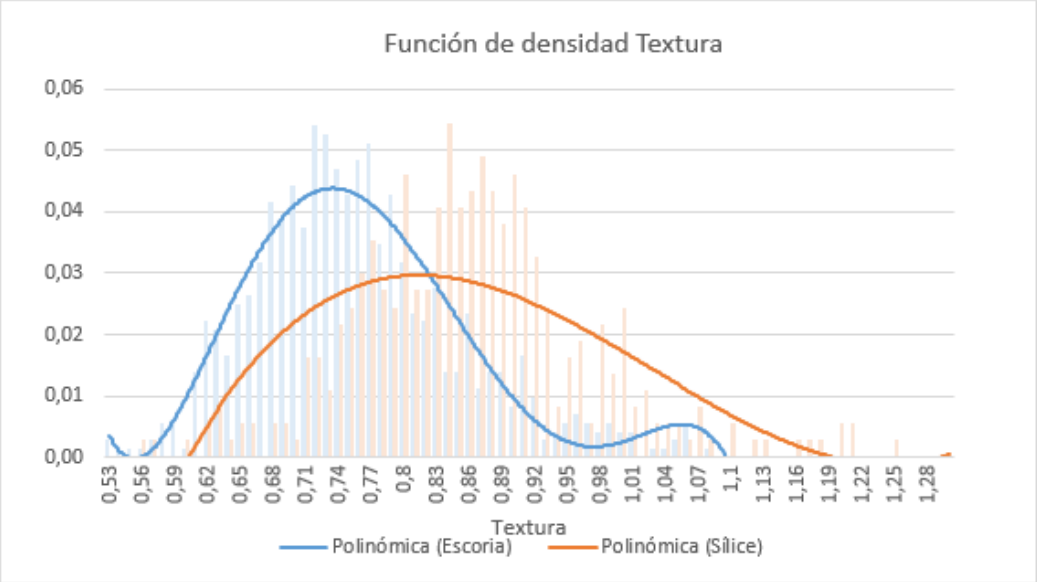


Figura 154: Función densidad de la Textura.

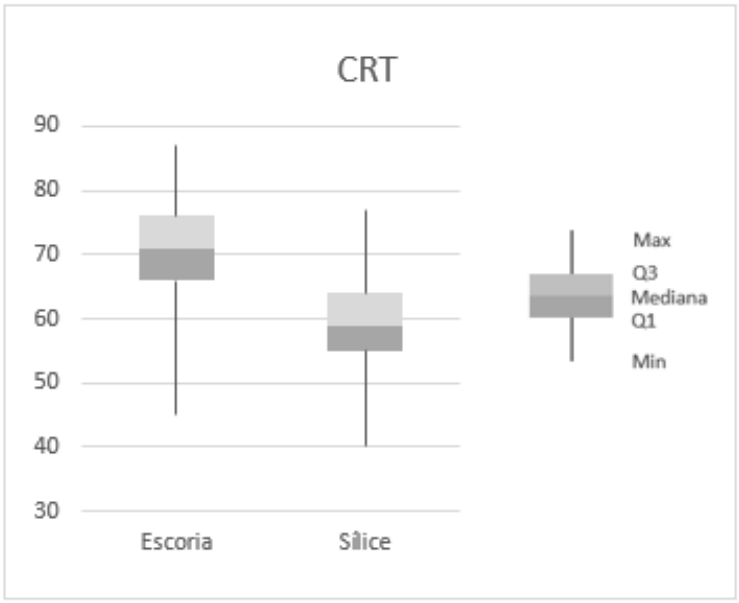


Figura 155: Diagrama de cajas de los valores del CRT agrupados.

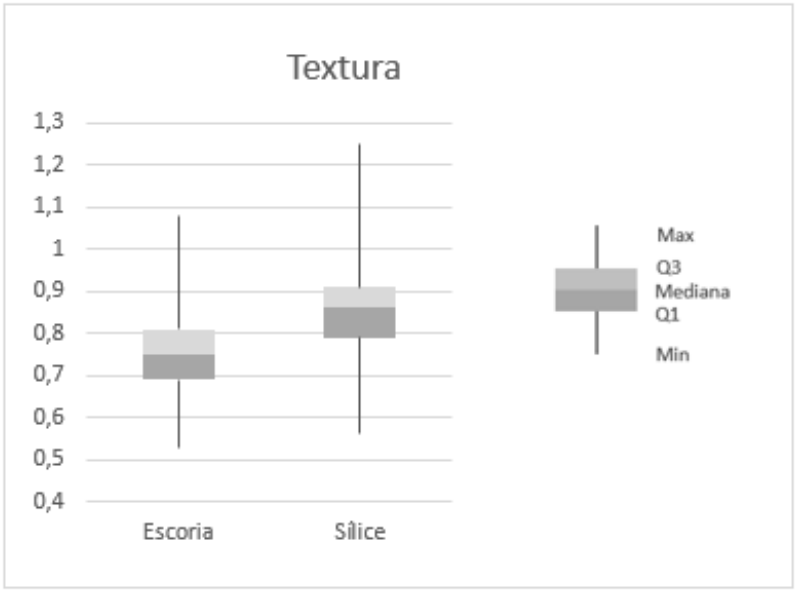


Figura 156: Diagrama de cajas de los valores la Textura agrupados.

4.3.4.2 Caracterización de las mezclas bituminosas fabricadas con áridos siderúrgicos

En las siguientes tablas se muestra el recuento, la desviación típica y la media de todos los parámetros de caracterización de las mezclas bituminosas fabricadas con escorias negras siderúrgicas analizadas en esta Tesis Doctoral. Además, en aquellos casos en los que procede, se muestra el límite que marca la correspondiente normativa para permitir su uso en la fabricación de mezclas bituminosas, hormigones o zahorras.

La mezcla considerada es una AC16 Surf 50/70 S.

AC 16 SURF 50/70 S	RECUENTO	DESV. TÍPICA	MEDIA	Límite normativo[1]
% Betún mezcla	31	0,31	**4,25**	≥ 3,3[2]
% Betún áridos	21	0,24	**4,56**	No aplica
% Huecos en áridos	24	2,30	**17,91**	
% Huecos en mezcla	29	2,32	**5,45**	≈ 5
%Huecos rellenos	13	11,64	**73,73**	No aplica
Filler/Betún	24	0,18	**1,24**	≈ 1,2
Densidad (t/m3)	124	0,06	**2,86**	No aplica
Estabilidad Marshall (kN)	61	1,86	**14,36**	
Deformación Marshall (mm)	61	0,39	**2,93**	
Estabilidad en agua (kN) (Inmersión-compresión)	30	0,97	**45,86**	
Estabilidad en aire (kN) (Inmersión-compresión)	30	1,73	**51,62**	
CRD	25	3,03	**59,04**	
Resistencia a tracción indirecta (kN)	5	0,95	**14,63**	
Módulo resiliente (MPa)	6	1415,70	**6092,33**	
ITSw (%) (Resistencia a la tracción indirecta húmeda)	8	1,12	**17,62**	
ITSd (%) (Resistencia a la tracción indirecta seca)	8	0,77	**18,63**	

Tabla 90: Análisis de la caracterización de mezclas bituminosas con filler natural.

(1) La normativa de referencia es el PG-3.

(2) Según del artículo 542.3 del PG-3 en el caso de que la densidad de los áridos sea diferente de dos gramos y sesenta y cinco centésimas de gramo por centímetro cúbico (2,65 g/cm³), los contenidos mínimos de ligante de la tabla 542.11 se deben corregir multiplicando por el factor:

α = 2 ,65/ρd; donde ρd es la densidad de las partículas de árido.

En las siguientes figuras se relaciona los principales parámetros que definen las mezclas bituminosas. En ellas se representan los valores empíricos obtenidos en los ensayos y la línea de tendencia que los relaciona. En todos los casos se cruzan los datos obtenidos en la caracterización de las mezclas fabricadas con filler natural.

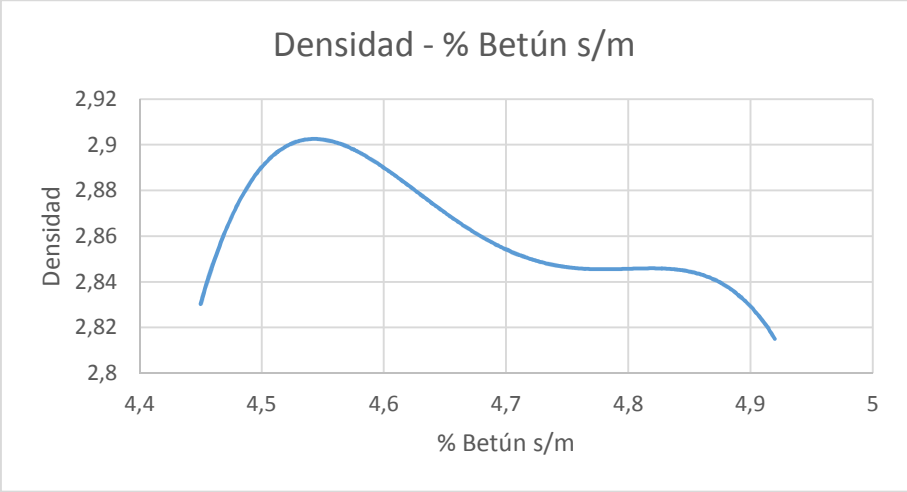


Figura 157: Densidad - % Betún s/m.

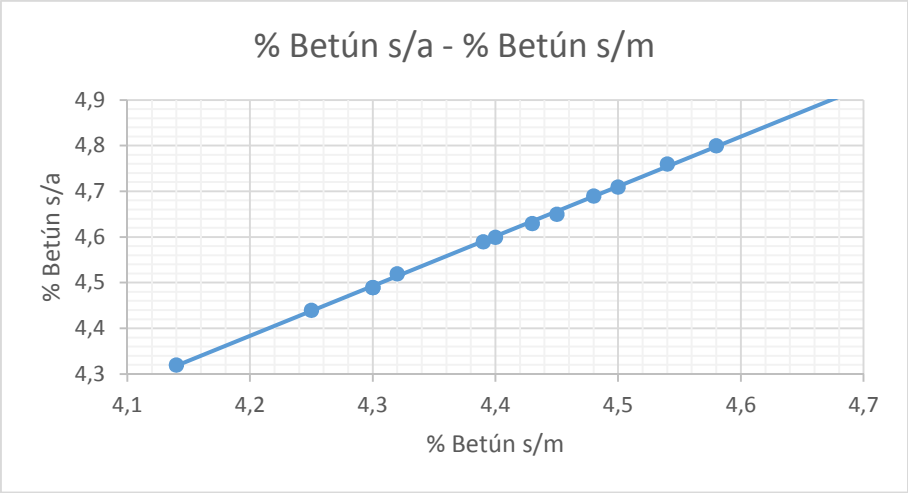


Figura 158: % Betún s/a - % Betún s/m.

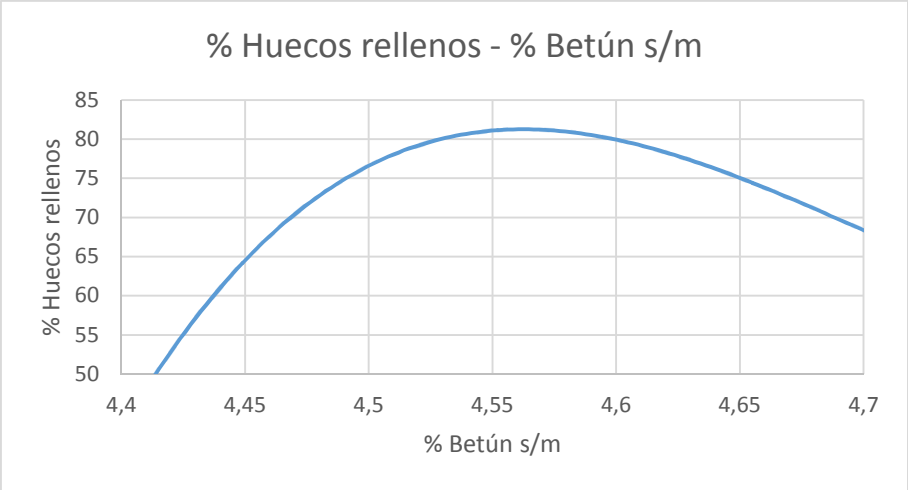


Figura 159: % Huecos rellenos - % Betún s/m.

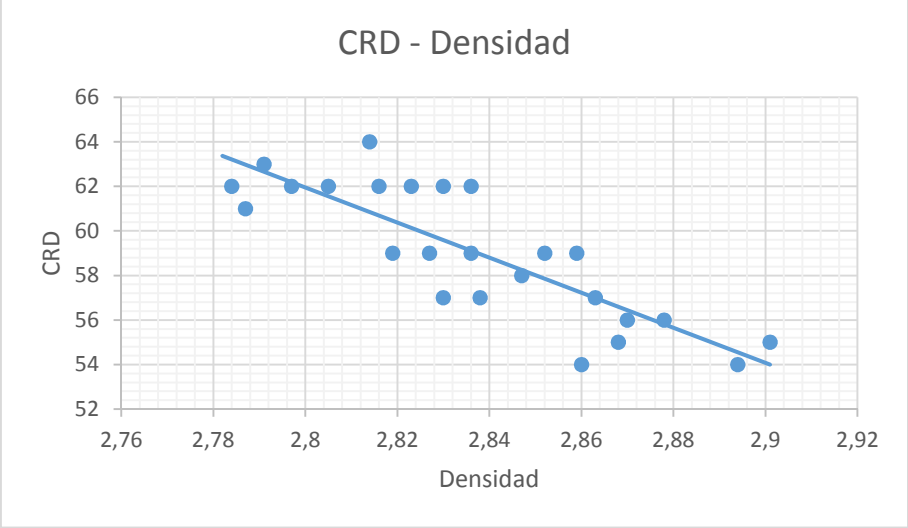


Figura 160: CRD - Densidad.

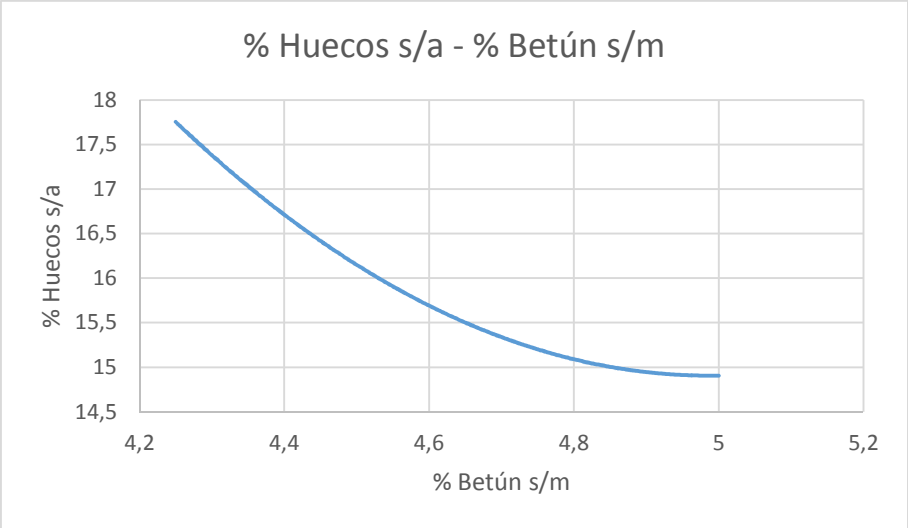


Figura 161: % Huecos s/a - % Betún s/m.

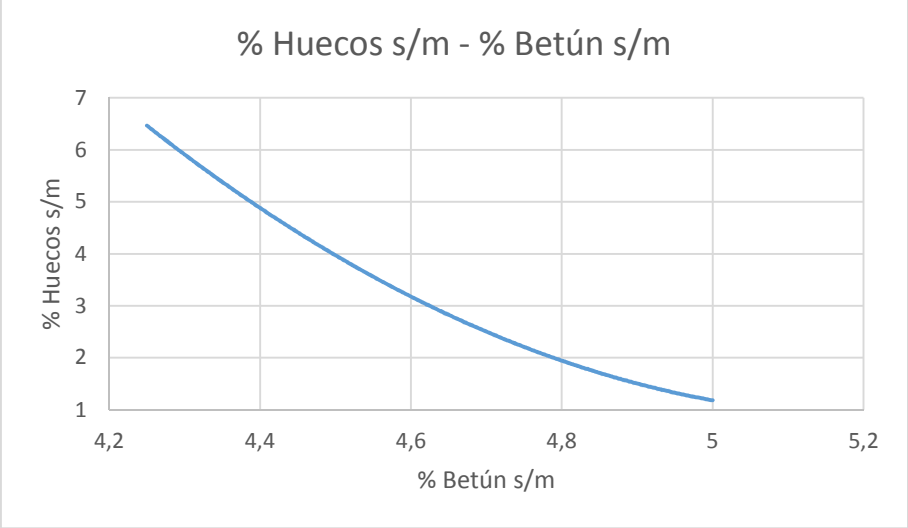


Figura 162: % Huecos s/m - % Betún s/m.

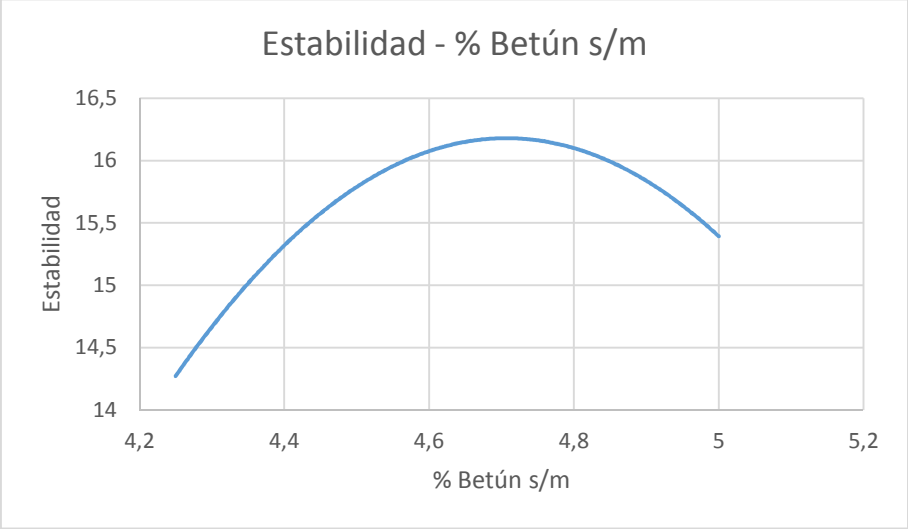


Figura 163: Estabilidad - % Betún s/m.

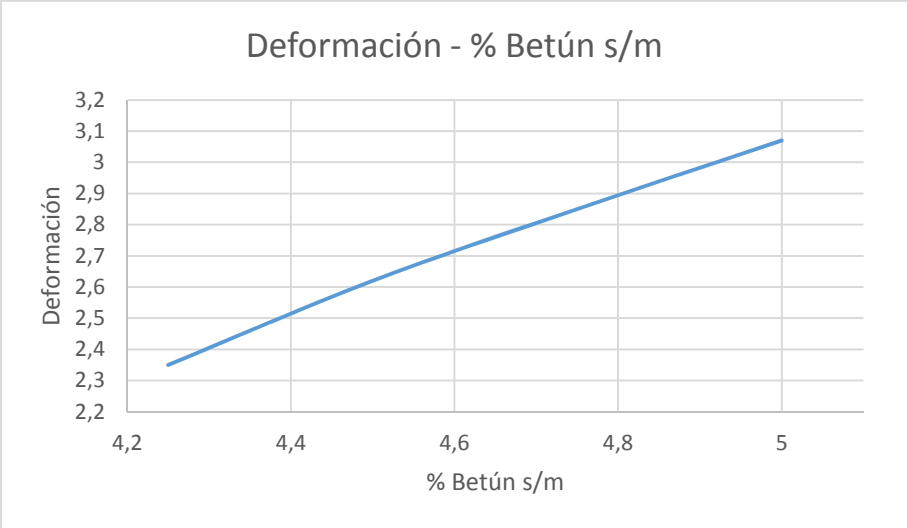


Figura 164: Deformación - % Betún s/m.

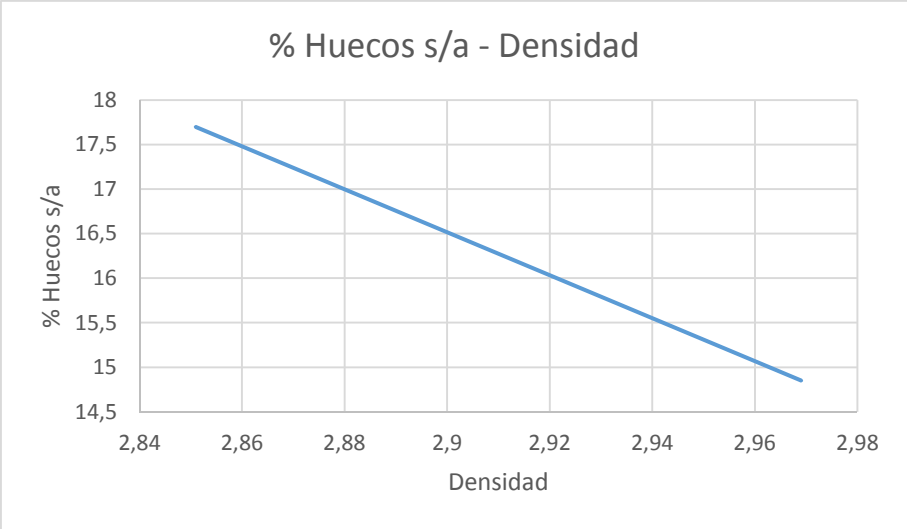


Figura 165: % Huecos s/a - Densidad.

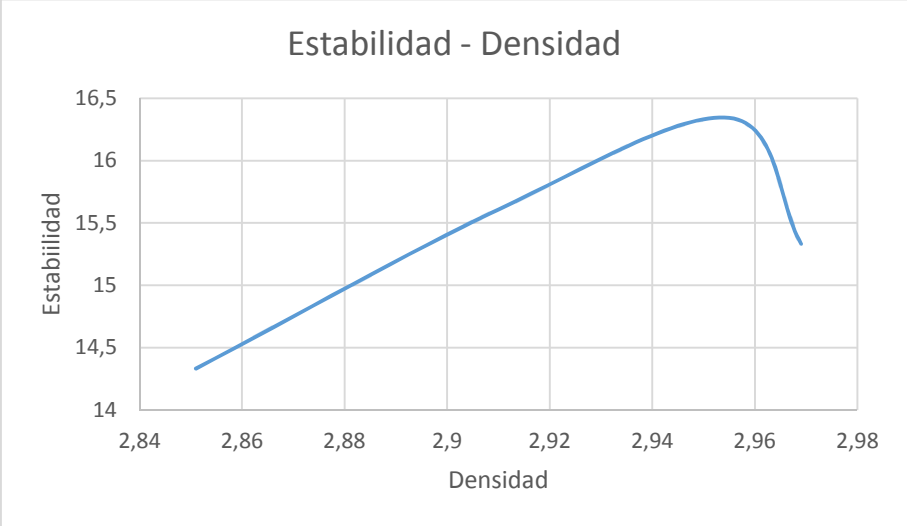


Figura 166: Estabilidad - Densidad.

4.3.5 ESTUDIO ECONÓMICO

En base al análisis y conocimiento de los procesos productivos de los componentes de las mezclas bituminosas y las condiciones de transporte, se estimarán los costes que supone en las mezclas, la utilización de áridos naturales y áridos siderúrgicos.

La utilización de áridos siderúrgicos en mezclas bituminosas aporta ventajas comparativas económicas respecto al uso de áridos naturales como la ofita y el sílice, tal y como se demostrará tras este apartado.

Para la obtención del coste de la mezcla se consideran los costes debidos a:

1. Proceso de obtención del árido y transporte a la planta asfáltica.
2. Transporte de la mezcla a obra.

El estudio se basa en el análisis de una mezcla bituminosa tipo AC16Surf con la máxima cantidad de árido siderúrgico recomendable, obtenido mediante:

- Fragmentación térmica y el cribado del material.

Además se estudiarán los casos en los que se utiliza un árido natural en la mezcla:

- Árido silíceo.
- Árido ofítico.

Finalmente se realizará una cuantificación y posterior análisis comparativo de los costes.

4.3.5.1 Evaluación de costes asociados al uso de maquinaria

Con el objeto de documentar y facilitar la comprensión de los costes, se desarrolla a continuación una exposición del método de cálculo seguido en la estimación de costes asociados al uso de la maquinaría.

Para ello, se ha seguido el Manual de Costes de Maquinaría (SEOPAN; 2008) y los precios extraídos de la base de datos de precios básicos (Colegio de Arquitectos y Aparejadores de Cantabria; 2011).

Nomenclatura y definiciones

E Promedio anual estadístico de los días laborables de puesta a disposición de la máquina

T Vida o número de años que la máquina está en condiciones normales de alcanzar los rendimientos medios. Se obtiene como cociente de dividir H_{ut} por H_{ua}.

V Valor de reposición de la máquina.

V_r Valor residual. Valor de venta de la máquina al final de su vida útil. Se expresa como un % de V.

H_{ut} Promedio de horas de funcionamiento económico, característico de cada máquina.

H_{ua} Promedio anual estadístico de horas de funcionamiento de la máquina.

M+C Gastos en % de V debidos a las reparaciones generales y la conservación ordinaria de la máquina durante el período de vida.

i Interés anual bancario para inversiones en maquinaria.

i_m Interés medio anual equivalente, que se aplica a la inversión total dependiente de la vida de la máquina.

S Seguros y otros gastos fijos anuales como impuestos, almacenajes, etc.

A_d % de la amortización de la máquina que pesa sobre el coste de puesta a disposición de la misma.

C_d Coeficiente unitario del día de puesta a disposición de la máquina expresado en % de V. Este coeficiente se refiere, en todo el presente trabajo, a días laborables en los cuales esté presente la máquina en la obra, independientemente de que trabaje o no, cualquiera que sea la causa.

C_h Coeficiente unitario de la hora de funcionamiento de la máquina, expresado en % de V. Este coeficiente se refiere a las horas de funcionamiento real de la máquina.

D Días de disposición de la máquina. Días laborables que ha estado la máquina en obra, trabaje o no.

H Horas totales en las que ha funcionado la máquina durante D días.

Conceptos básicos

Vida o longevidad

Se calcula en función del número de horas útiles al año:

$$T = \frac{H_{ut}}{H_{ua}}$$

Interés medio

Dado un interés anual y una vida útil de la máquina de T años, el interés medio anual se calcula como sigue:

$$i_m = \frac{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^T \cdot i}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^T - 1} - \frac{100}{T}$$

Reposición del capital

En cada tipo de máquina hay que considerar qué parte de las amortizaciones ha de cargarse a la puesta a disposición y cuál al funcionamiento. A_d señala la parte de la amortización correspondiente a la puesta a disposición; el

complemento a 100 de A_d indica la parte de amortización que pesa sobre la hora de funcionamiento.

Reparaciones generales y conservación ordinaria

Las reparaciones generales consisten en las revisiones de los montajes de partes esenciales de las máquinas y reparaciones o sustituciones en los casos necesarios.

La conservación ordinaria tiene por objeto la puesta a punto continua de la máquina con sustitución de elementos de rápido desgaste y pequeñas reparaciones y revisiones. En caso de trabajar las máquinas con materiales muy abrasivos, se deberá tener en cuenta los consumos reales debidos a las características del material tratado.

Los gastos de una y otra se agrupan en el término M + C, dando un valor único por la dificultad de marcar una frontera entre ambos conceptos. Este término no constituye una variable independiente, ya que está directamente relacionado con el número de horas de vida útil que se fija para cada máquina.

Seguros y otros gastos fijos

Se incluyen los seguros de daños propios, los impuestos sobre maquinaria, gastos de almacenaje y conservación fuera de servicio, adoptándose un 2% anual.

Estructura del coste e hipótesis

$$\boldsymbol{Coste\ Total = Coste\ intrínseco + Coste\ complementario}$$

Coste intrínseco

Se considera proporcional al valor de la máquina, V, y está formado por:

- Interés del capital invertido en la máquina.
- Seguros y otros gastos fijos.
- Reposición del capital invertido.
- Reparaciones generales y conservación.

$$C_d = \frac{i_m + S}{E} + \left(\frac{A_d \cdot H_{ua}}{E \cdot H_{ut}} \cdot \left(1 - \frac{V_r}{100}\right)\right)$$

$$C_h = \left(\frac{100 - A_d}{H_{ut}} \cdot \left(1 - \frac{V_r}{100}\right)\right) + \frac{M + C}{H_{ut}}$$

$$\boldsymbol{Coste\ intrínseco = (C_d \cdot D + C_h \cdot H) \cdot \frac{V}{100}}$$

Coste complementario

No depende del valor de la máquina, aunque como puede comprenderse, depende de otras características de la misma y estará constituida por:

- Mano de obra, de manejo y conservación de la máquina.
- Consumo.

Respecto a la mano de obra, se tiene la consideración de que el coste es el correspondiente a los días de puesta a disposición, esté o no funcionando la máquina. Se establecen los siguientes costes para el maquinista y encargado:

MANO DE OBRA	€/h
Encargado	18,68
Maquinista	16,51

Tabla 91: Coste recursos humanos. (Colegio de arquitectos y aparejadores de Cantabria; 2011)

Con relación a los consumos pueden diferenciarse dos clases:

- Principales. Son el gasóleo, la gasolina y la energía eléctrica; que varían fundamentalmente con las características del trabajo y el estado de la máquina. Supuestas unas condiciones normales de la máquina y del trabajo a ejecutar, se pueden considerar que los consumos principales son según Manual de Costes maquinaria (SEOPAN; 2008):
    - Gasóleo: 0,16 litros consumidos en 1 hora por kW instalado.
    - Gasolina: 0,35 litros consumidos en 1 hora por kW instalado.
    - Energía eléctrica: 0,65 kWh por kW instalado.

El coste de los combustibles se estiman en base a los costes de mercado como:

- Gasóleo: 0,90 €/l.
- Gasolina: 1,20 €/l.
- Electricidad: 0,15 €/kWh.

- Los consumos secundarios se refieren a los constituidos por materiales de lubricación y accesorios para los mismos fines. En base al Manual de Costes maquinaria (SEOPAN; 2008) se estiman como un porcentaje de los consumos principales:
    - Máquinas de motor de gasóleo: 15%.
    - Máquinas de motor de gasolina: 8%.
    - Accionamiento por energía eléctrica: 5%.
- Precios de mano de obra y el coste asociado a cada uno de ellos según los precios de mercado:

$$Mano\ de\ obra = (Maquinista + Encargado) \cdot D$$

$$Consumo\ principal = kW\ inst. \cdot Consumo\ horario \cdot Coste\ combustible \cdot Días\ disposición$$

$$Consumo\ secundario = \% \cdot Consumo\ principal$$

$$\boldsymbol{Coste\ complementario = Mano\ de\ obra + Consumo\ ppal + Consumo\ secundario}$$

$$\boldsymbol{Coste\ Total = Coste\ intrínseco + Coste\ complementario}$$

4.3.5.2 Análisis de sensibilidad del coste de producción y transporte

Coste árido siderúrgico

Este apartado evalúa los coste asociados al proceso de valorización de las escorias negras de arco eléctrico para transformarlas en áridos siderúrgicos. De este modo se obtendrá el coste último de adquisición de este material.

El árido siderúrgico considerado en este estudio económico tiene un proceso de valorización particular que comprende las siguientes etapas:

1. Enfriamiento mediante aspersión y lanza de agua a presión de las escorias dentro de la nave.
2. Escarificado mediante medios mecánicos para enfriamiento.
3. Precribado y cinta transportadora fuera de la nave de valorización.
4. Separación de elementos metálicos de los áridos siderúrgicos mediante overband.
5. Cribado del árido.
6. Carga mediante pala cargadora y transporte a acopios de árido clasificado.
7. Carga del árido siderúrgico clasificado mediante pala cargadora en camión bañera.

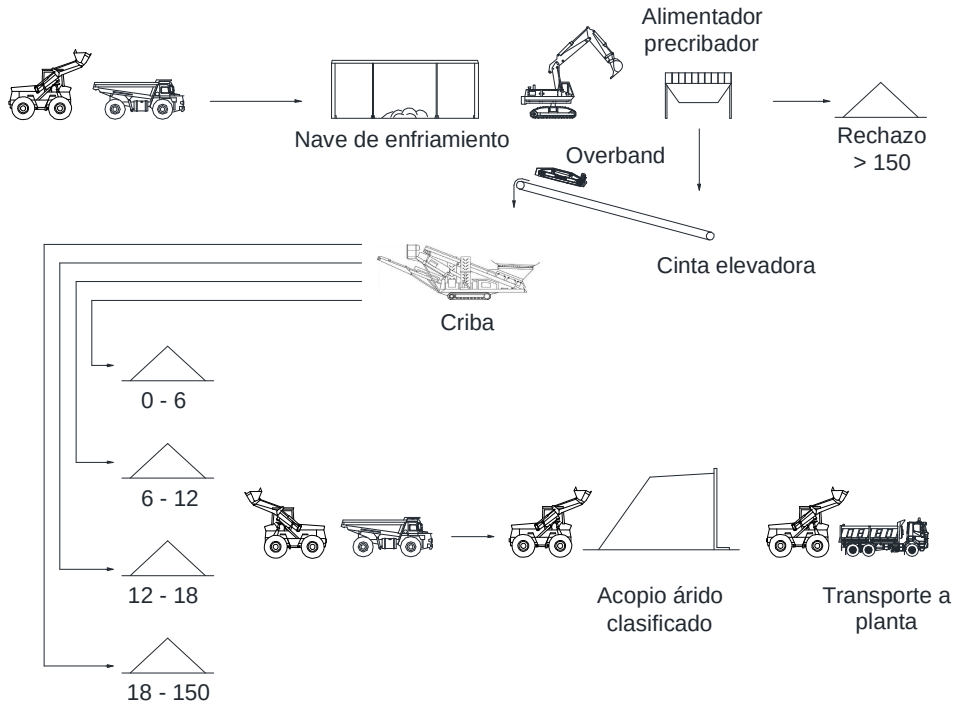


Figura 167: Flujograma del proceso de valorización.

Para obtener una estimación del coste que conlleva el proceso de valorización se tienen en cuenta los siguientes costes asociados a cada una de las máquinas que intervienen:

DUMPER							
					Horas de funcionamiento	2	horas
COSTE INTRÍNSECO					COSTE COMPLEMENTARIO		
Funcionamiento económico	Hut	12.000,00	horas		Maquinista	16,51	€/h
Funcionamiento de la máquina	Hua	1.500,00	horas/año		Encargado	18,68	€/h
Longevidad	T	8,00	años		Mano de obra	169,44	€
Interes	i	5,00	%		Consumo principal	86,4	€
Int. medio	im	2,97	%		kW instalado	300	kW·h
Seguros	s	2,00	%		Consumo horario	0,16	-
Días laborables	E	190,00	días		Precio combustible	0,9	-
Amortización	Ad	35,00	%		% consumo secundario	15	%
Valor residual	Vr	2,00	%		Consumo secundario	12,96	€
Valor maq.	V	250.000,00	€				
Coef. coste int. día disposición	Cd	0,0487	%/días				
Reparación	M+C	80,00	%				
Coef. coste int. hora func.	Ch	0,0120	%/horas				
Días de disposición	D	1	días				
Horas de funcionamiento	H	2	horas				
Coste int. maq.	Cint	181,71	€		Coste complementario	268,8	€
		0,45	€/t			0,67	€/t
COSTE TOTAL	450,51	€	en	1	días de funcionamiento		
COSTE	**1,13**	**€/t**					

Tabla 92: Coste detallado dumper.

RETROEXCAVADORA							
					Horas de funcionamiento	2	horas
COSTE INTRÍNSECO					COSTE COMPLEMENTARIO		
Funcionamiento económico	Hut	12.000,00	horas		Maquinista	16,51	€/h
Funcionamiento de la máquina	Hua	1.500,00	horas/año		Encargado	18,68	€/h
Longevidad	T	8,00	años		Mano de obra	169,44	€
Interes	i	5,00	%		Consumo principal	37,44	€
Int. medio	im	2,97	%		kW instalado	130	kW·h
Seguros	s	2,00	%		Consumo horario	0,16	-
Días laborables	E	210,00	días		Precio combustible	0,9	-
Amortización	Ad	30,00	%		% consumo secundario	15	%
Valor residual	Vr	10,00	%		Consumo secundario	5,616	€
Valor maq.	V	200.000,00	€				
Coef. coste int. día disposición	Cd	0,0397	%/días				
Reparación	M+C	75,00	%				
Coef. coste int. hora func.	Ch	0,0115	%/horas				
Días de disposición	D	1	días				
Horas de funcionamiento	H	2	horas				
Coste int. maq.	Cint	125,50	€		Coste complementario	212,496	€
		0,31	€/t			0,53	€/t
COSTE TOTAL	337,99	€	en	1	días de funcionamiento		
COSTE	**0,84**	**€/t**					

Tabla 93: Coste detallado retroexcavadora.

ALIMENTADOR + CINTA + OVERBAND							
					Horas de funcionamiento	6	horas
COSTE INTRÍNSECO					COSTE COMPLEMENTARIO		
Funcionamiento económico	Hut	8.000,00	horas		Maquinista	0	€/h
Funcionamiento de la máquina	Hua	1.000,00	horas/año		Encargado	0	€/h
Longevidad	T	8,00	años		Mano de obra	0	€
Interes	i	5,00	%		Consumo principal	4,68	€
Int. medio	im	2,97	%		kW instalado	8	kW·h
Seguros	s	2,00	%		Consumo horario	0,65	-
Días laborables	E	170,00	días		Precio combustible	0,15	-
Amortización	Ad	25,00	%		% consumo secundario	5	%
Valor residual	Vr	2,00	%		Consumo secundario	0,234	€
Valor maq.	V	35.000,00	€				
Coef. coste int. día disposición	Cd	0,0473	%/días				
Reparación	M+C	100,00	%				
Coef. coste int. hora func.	Ch	0,0217	%/horas				
Días de disposición	D	1	días				
Horas de funcionamiento	H	6	horas				
Coste int. maq.	Cint	62,09	€		Coste complementario	4,914	€
		0,16	€/t			0,01	€/t
COSTE TOTAL	67,00	€	en	1	días de funcionamiento		
COSTE	**0,17**	**€/t**					

Tabla 94: Coste detallado sistema alimentador/cinta/overband.

PALA CARGADORA (Con y sin molino)							
					Horas de funcionamiento	4	horas
COSTE INTRÍNSECO					COSTE COMPLEMENTARIO		
Funcionamiento económico	Hut	12.000,00	horas		Maquinista	16,51	€/h
Funcionamiento de la máquina	Hua	1.500,00	horas/año		Encargado	18,68	€/h
Longevidad	T	8,00	años		Mano de obra	169,44	€
Interes	i	5,00	%		Consumo principal	86,4	€
Int. medio	im	2,97	%		kW instalado	150	kW·h
Seguros	s	2,00	%		Consumo horario	0,16	-
Días laborables	E	200,00	días		Precio combustible	0,9	-
Amortización	Ad	55,00	%		% consumo secundaro	15	%
Valor residual	Vr	10,00	%		% consumo secundario	12,96	€
Valor maq.	V	220.000,00	€				
Coef. coste int. día disposición	Cd	0,0558	%/días				
Reparación	M+C	60,00	%				
Coef. coste int. hora func.	Ch	0,0084	%/horas				
Días de disposición	D	1	días				
Horas de funcionamiento	H	4	horas				
Coste int. maq.	Cint	196,46	€		Coste complementario	268,8	€
		0,49	€/t			0,67	€/t
COSTE TOTAL	465,26	€	en	1	días de funcionamiento		
COSTE	**1,16**	**€/t**					

Tabla 95: Coste detallado Pala Cargadora.

CRIBA MOVIL							
					Horas de funcionamiento	6	horas
COSTE INTRÍNSECO					COSTE COMPLEMENTARIO		
Funcionamiento económico	Hut	8.000,00	horas		Maquinista	16,51	€/h
Funcionamiento de la máquina	Hua	800,00	horas/año		Encargado	18,68	€/h
Longevidad	T	10,00	años		Mano de obra	103,4	€
Interes	i	5,00	%		Consumo principal	129,6	€
Int. medio	im	2,95	%		kW instalado	150	kW·h
Seguros	s	2,00	%		Consumo horario	0,16	-
Días laborables	E	170,00	días		Precio combustible	0,9	-
Amortización	Ad	40,00	%		% consumo secundario	15	%
Valor residual	Vr	2,00	%		Consumo secundario	19,44	€
Valor maq.	V	200.000,00	€				
Coef. coste int. día disposición	Cd	0,0522	%/días				
Reparación	M+C	70,00	%				
Coef. coste int. hora func.	Ch	0,0161	%/horas				
Días de disposición	D	1	días				
Horas de funcionamiento	H	6	horas				
Coste int. maq.	Cint	297,56	€		Coste complementario	252,44	€
		0,74	€/t			0,63	€/t
COSTE TOTAL	550,00	€	en	1	días de funcionamiento		
COSTE	**1,37**	**€/t**					

Tabla 96: Coste detallado Criba.

EQUIPO	HORAS	COSTE INTRÍNSECO	COSTE COMPLEMENTARIO	COSTE (€/t)
Pala cargadora	4	0,49	0,67	1,16
Dumper	2	0,45	0,67	1,13
Retroexcavadora	2	0,31	0,53	0,84
Alimentador + Cinta + Overband	6	0,16	0,01	0,17
Criba móvil	6	0,74	0,63	1,37
			TOTAL (€/t)	4,68
			TOTAL (€/m³)	9,82

Tabla 97: Coste estimado de producción de árido siderúrgico clasificado

En el transporte de estos áridos se ha de considerar un incremento del coste generado por la diferencia de densidades existente entre áridos naturales y siderúrgicos. La cuantificación porcentual se obtiene mediante la relación de densidades, como se expone en la siguiente tabla:

TIPO DE ÁRIDO	DENSIDAD t/m³	RELACIÓN
A. Natural	1,7	23,5%
A. Siderúrgico	2,1	

Tabla 98: Relación entre densidades de áridos

	PRODUCCIÓN	
	€/t	€/m³
Á. Sid.	4,68	9,82

Tabla 99: Coste del árido siderúrgico

Coste árido natural

A continuación se analiza el coste de los áridos naturales que la normativa vigente permite utilizar en capas de rodadura, siendo estos:

- Árido silíceo
- Árido ofítico.

Al igual que el árido siderúrgico, el coste del árido natural tiene dos partidas principales:

- Coste de producción.
- Coste de transporte.

El coste de producción considera los costes asociados a su extracción en canteras, mientras que el de transporte, es el debido a la distribución de los áridos desde su centro productivo hasta la planta productora de mezcla.

La producción depende del tipo de material, características geométricas dela cantera, maquinaría y personal disponible, niveles de producción, etc…

La concentración de las canteras de áridos naturales silíceos u ofíticos se encuentra de manera tal que existe una distribución discontinua sobre el territorio nacional, como se puede extraer sobre el análisis del catastro minero del Ministerio de Industria, Energía y Turismo del Gobierno de España.

Lo expuesto anteriormente complica determinar un precio único del árido natural, así como de su transporte, por lo que se realiza un análisis de sensibilidad:

	PRODUCCIÓN	
	€/t	**€/m³**
Á. Nat1	7	11,9
Á. Nat2	8	13,6
Á. Nat3	9	15,3
Á. Nat4	10	17
Á. Nat5	11	18,7
Á. Nat6	12	20,4
Á. Nat7	13	22,1
Á. Nat8	14	23,8
Á. Nat9	15	25,5

Tabla 100: Coste de producción analizado de áridos naturales

Comparativa de costes

Como se ha comentado anteriormente, el transporte es un factor principal en coste final del árido, pudiendo hacer que un árido pierda o gane competitividad respecto a otros.

Por otra parte, el coste por kilómetro tonelada varía según la distancia de transporte, puesto que para desplazamientos cortos, generalmente la velocidad del viaje a menor, que para distancias más largas. Todo ello repercute en los rendimientos. Se considera que la distancia límite ronda los 20 km en base a la experiencia.

En las siguientes tablas se detalla la obtención del coste de transporte según Manual de Costes maquinaria (SEOPAN; 2008):

CAMIÓN BAÑERA							
					Horas de funcionamiento	8	horas
COSTE INTRÍNSECO					COSTE COMPLEMENTARIO		
Funcionamiento económico	Hut	14.000,00	horas		Conductor	16,51	€/h
Funcionamiento de la máquina	Hua	1.250,00	horas/año		Encargado	0	€/h
Longevidad	T	11,20	años		Mano de obra	132,08	€
Interes	i	5,00	%		Consumo principal	230,4	€
Int. medio	im	2,95	%		kW instalado	200	kW·h
Seguros	s	2,00	%		Consumo horario	0,16	-
Días laborables	E	220,00	días		Precio combustible	0,9	-
Amortización	Ad	50,00	%		% consumo secundaro	15	%
Valor residual	Vr	2,00	%		Consumo secundario	34,56	€
Valor maq.	V	100.000,00	€				
Coef. coste int. día disposición	Cd	0,0424	%/días		Viajes	10	viajes/día
Reparación	M+C	80,00	%		Distancia del recorrido	20	km
Coef. coste int. hora func.	Ch	0,0092	%/horas		Carga por viaje	26	t
Días de disposición	D	1	días		Producción diaria	260	t/día
Horas de funcionamiento	H	8	horas				
Coste int. maq.	Cint	116,09	€		Coste complementario	397,04	€
		0,45	€/t			1,53	€/t
COSTE TOTAL	513,13	€	en	1	días de funcionamiento		
COSTE	**0,099**	**€/t·km**					

Tabla 101: Coste detallado transporte hasta 20 km.

CAMIÓN BAÑERA							
					Horas de funcionamiento	8	horas
COSTE INTRÍNSECO					COSTE COMPLEMENTARIO		
Funcionamiento económico	Hut	14.000,00	horas		Conductor	16,51	€/h
Funcionamiento de la máquina	Hua	1.250,00	horas/año		Encargado	0	€/h
Longevidad	T	11,20	años		Mano de obra	132,08	€
Interes	i	5,00	%		Consumo principal	230,4	€
Int. medio	im	2,95	%		kW instalado	200	kW·h
Seguros	s	2,00	%		Consumo horario	0,16	-
Días laborables	E	220,00	días		Precio combustible	0,9	-
Amortización	Ad	50,00	%		% consumo secundaro	15	%
Valor residual	Vr	2,00	%		Consumo secundario	34,56	€
Valor maq.	V	100.000,00	€				
Coef. coste int. día disposición	Cd	0,0424	%/días		Viajes	2	viajes/día
Reparación	M+C	80,00	%		Distancia del recorrido	200	km
Coef. coste int. hora func.	Ch	0,0092	%/horas		Carga por viaje	23	t
Días de disposición	D	1	días		Producción diaria	46	t/día
Horas de funcionamiento	H	8	horas				
Coste int. maq.	Cint	116,09	€		Coste complementario	397,04	€
		2,52	€/t			8,63	€/t
COSTE TOTAL	513,13	€	en	1	días de funcionamiento		
COSTE	**0,056**	**€/t·km**					

Tabla 102: Coste detallado transporte para distancias mayores a 20 km.

Representando el coste del transporte de los áridos en función de la distancia, teniendo en cuenta los valores obtenidos en las tablas anteriores y aplicando el coeficiente mayorador debido a la diferencia de densidades que existe entre los áridos siderúrgicos y naturales se obtiene:

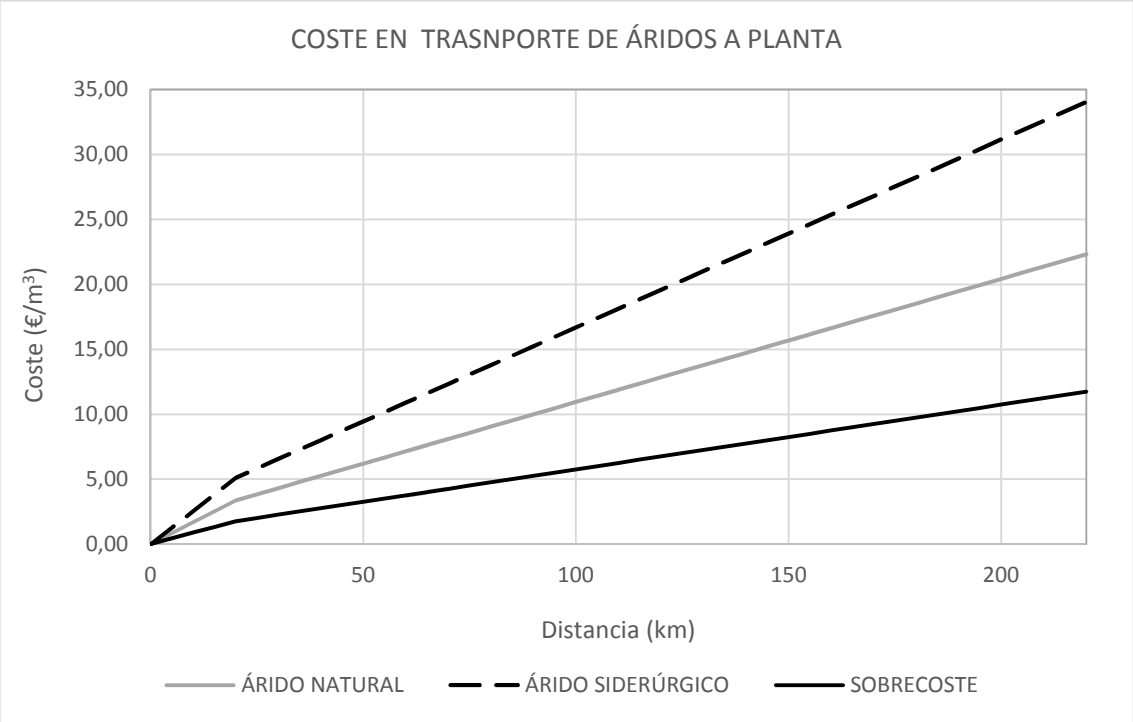


Figura 168: Coste del árido natural y siderúrgico según coste de transporte a planta

Se puede observar que el árido siderúrgico genera un sobre coste respecto al transporte del árido natural. A la vista de la figura el uso de árido siderúrgico penaliza el coste último de este, aunque debido a su coste productivo y sus

cualidades técnicas equiparables a áridos naturales, como la ofita o el sílice, le hacen competir en coste con estos.

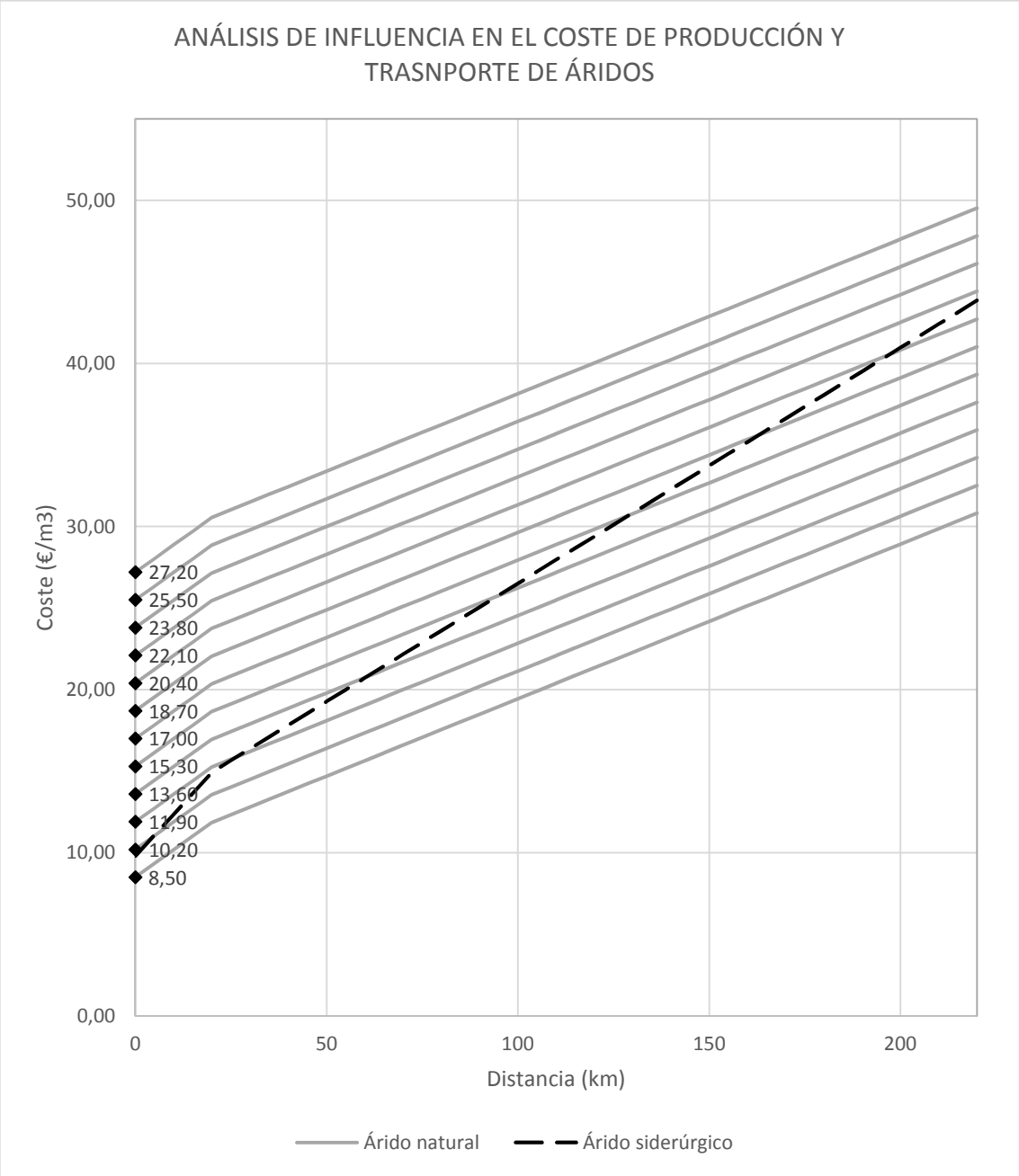


Figura 169: Coste del árido natural y siderúrgico según coste de producción y transporte

Los valores en el eje de ordenadas representa el coste productivo de los áridos. De dónde parten las líneas que incluyen el coste del transporte detallados anteriormente. Se diferencia entre áridos naturales (línea continua) y áridos siderúrgicos (línea discontinua).

Las líneas continuas que quedan por encima de la línea discontinua indican para qué coste productivo y hasta qué distancia de transporte, los áridos naturales pierden competitividad con los áridos siderúrgicos.

4.3.5.3 Aplicación

Como se ha mostrado a la hora de calcular el coste el árido natural, la evaluación del coste del árido en planta es variable y difícil de generalizar. Por tanto, se estimará el coste del árido mediante la fórmula del PERT:

$$Coste = (Coste\ mín + 4 \cdot Coste\ probable + Coste\ máx)/6$$

En el análisis a realizar se han teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- La planta de aglomerados está en las inmediaciones de Santander.
- Los áridos naturales silíceos y ofíticos proceden de una distancia de 200 km, ya que los áridos en esta planta provenían de la cantera de "Ofitas de San Felices" situada en Haro, La Rioja y de "Áridos Antolín" situada en Dueñas, Palencia.
- El coste de transporte a grandes distancias calculado mediante el Manual de Costes de Maquinaria (SEOPAN 2008) es de 0,06 €/t para grandes distancias, mientras que para distancias cortas se obtiene 0,10 €/t.

Coste de las mezclas bituminosas

Tras lo expuesto en los apartados anteriores, se evalúa el coste asociado a cada mezcla tipo AC16 Surf según el tipo de árido utilizado en su producción.

Mezcla bituminosa a base de árido silíceo

El coste de producción estimado aplicando la ecuación del PERT se refleja en la siguiente tabla:

COSTE ADQUISICIÓN DE ÁRIDO SÍLICE	
Valor máximo	9 €/t
Valor mínimo	5 €/t
Valor probable	6 €/t
COSTE ESTIMADO	**6,3 €/t**

Tabla 103: Coste estimado de producción estimado de sílice

Expresando el coste en € por metro cúbico mediante la multiplicación de su densidad aparente (1,70 t/m^3), se obtiene que el coste de este material en la planta es de:

ÁRIDO EN PLANTA (€/m^3)			
Sílice	Árido	Transporte	Total
	10,8	**12,06**	**22,86**

Tabla 104: Coste estimado de sílice en planta de aglomerado

El filler es un árido fino que pasa por el tamiz 0,063 de la norma UNE EN 933-2:96.Proviene de los propios áridos y depende de las curvas granulométricas de los mismos, imputando su coste al árido predominante en la mezcla.

El coste del betún es el elemento más caro en las mezclas bituminosas, alcanzado un coste estimado en planta según valores de mercado de:

BETÚN EN PLANTA	(€/m^3)
Betún	525,0

Tabla 105: Coste estimado del betún 50/70

El coste de la mezcla se especifica a continuación:

MATERIAL	FRACCIÓN	%/TONELADA de MEZCLA	COSTE (€/TON)	COSTE TONELADA en MEZCLA
Á. SILÍCEO	12/18 6/12 0/6	91,6	13,45	12,32
FILLER		3,8	13,45	0,51
BETÚN 50/70		4,6	500	22,90
			TOTAL	**35,73**

Tabla 106: Coste estimado de mezcla bituminosa AC16 Surf con sílice.

Mezcla bituminosa a base de árido ofítico

El coste de producción estimado mediante la formulación PERT es el que se refleja en la siguiente tabla:

COSTE ADQUISICIÓN DE ÁRIDO OFITA	
Valor máximo	16 €/t
Valor mínimo	11 €/t
Valor probable	12 €/t
COSTE ESTIMADO	**12,5 €/t**

Tabla 107: Coste estimado de producción estimado de la ofita

Expresando el coste en € por metro cúbico mediante la multiplicación de su densidad aparente (1,70 t/m^3), se obtiene que el coste de este material en la planta es de:

ÁRIDO EN PLANTA (€/m^3)			
	Árido	Transporte	Total
Sílice	**21,25**	**12,06**	**33,31**

Tabla 108: Coste estimado de sílice en planta de aglomerado

De manera análoga al caso anterior el coste del filler se atribuye al de la ofita y el betún tiene el mismo coste.

MATERIAL	FRACCIÓN	%/TONELADA de MEZCLA	COSTE (€/TON)	COSTE TONELADA en MEZCLA
Á. OFÍTICO	12/18 6/12 0/6	91,6	33,31	30,51
FILLER		3,8	33,31	1,27
BETÚN 50/70		4,6	500	22,90
			TOTAL	**54,69**

Tabla 109: Coste estimado de mezcla bituminosa AC16 Surf con ofita

Mezcla bituminosa a base de árido siderúrgico

Dado que las fórmulas que se utilizan para el estudio contienen una fracción de árido calizo, se debe analizar previamente el coste de este árido.

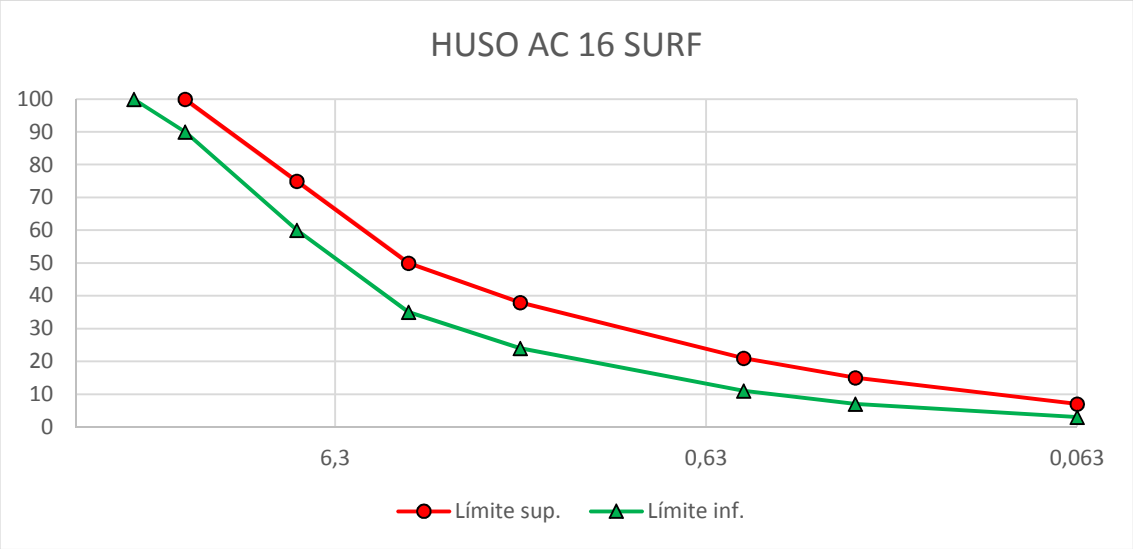


Figura 170: Huso granulométrico para mezcla tipo AC16 Surf.

De todos los áridos naturales considerados en este apartado, es la caliza el que tiene menor coste. A continuación se muestran valores habituales de mercado:

COSTE ADQUISICIÓN DE ÁRIDO OFITA	
Valor máximo	4 €/t
Valor mínimo	3 €/t
Valor probable	3,5 €/t
COSTE ESTIMADO	**3,5 €/t**

Tabla 110: Coste estimado de producción estimado de caliza.

Debido a la abundancia de árido calizo, habitualmente las plantas de aglomerados están situadas cerca de un suministrador de árido calizo o en la propia cantera. Por esta razón no se considera el transporte en su coste.

El coste por metro cúbico se obtiene a través del producto entre el peso y la

densidad de la caliza (1,70 t/m^3):

ÁRIDO EN PLANTA (€/m^3)			
Caliza	Árido	Transporte	Total
	5,95	**0,00**	**5,95**

Tabla 111: Coste estimado de la caliza en planta de aglomerado.

COSTE ADQUISICIÓN DE ÁRIDO SIDERÚRGICO	
COSTE ESTIMADO	**9,82 €/t**

Tabla 112: Coste estimado de producción estimado de sílice.

En el caso del árido siderúrgico si se debe considerar el transporte de este a la planta de aglomerado. Se hace la hipótesis de que se realiza mediante camiones bañera y que la distancia de transporte es de 20 km.

También, se ha de considerar la diferencia de densidades en el transporte por metro cúbico de árido siderúrgico. Esto es debido a que al tener mayor densidad que el árido natural se deben transportar más toneladas para un mismo volumen de mezcla.

Por tanto, el coste estimado por metro cúbico de árido siderúrgico tras realizar el ajuste debido a la diferencia de densidades es el que se detalla en la tabla:

ÁRIDO EN PLANTA (€/m^3)			
Escoria	Árido	Transporte	Total
	9,82	4,16	13,98

Tabla 113: Coste estimado del árido siderúrgico en la planta de aglomerado.

MATERIAL	FRACCIÓN	%/TONELADA de MEZCLA	COSTE (€/TON)	COSTE TONELADA en MEZCLA
Á. SIDERÚRGICO	12/18 6/12 0/6	68,2	6,65	4,54
Á. CALIZO	0/6	23,8	3,50	0,83
FILLER		3,8	3,50	0,13
BETÚN 50/70		4,2	500	21,00
			TOTAL	**26,50**

Tabla 114: Coste estimado de mezcla bituminosa AC16 Surf con árido siderúrgico.

Comparativa de resultados

A continuación se analizan los costes asociados a mezclas bituminosas compuestas por diferentes tipos de áridos, sin considerar el transporte a obra.

TIPO DE ÁRIDO	DENSIDAD t/m³	RELACIÓN
M.B. A. Silíceo	85,75	12,4%
M.B. A. Siderúrgico	76,32	

Tabla 115: Relación costes mezcla AC16 Surf árido silíceo frente árido siderúrgico.

TIPO DE ÁRIDO	DENSIDAD t/m³	RELACIÓN
M.B. A. Ofítico	131,26	72%
M.B. A. Siderúrgico	76,32	

Tabla 116: Relación coste producción mezcla AC16 Surf árido ofítico frente árido siderúrgico.

Como se ha expuesto anteriormente, por la diferencia de densidades que presentan las diferentes mezclas existe un incremento en el coste de transporte para el caso de las fabricadas con árido siderúrgico.

En general, el transporte de mezclas bituminosas a distancias superiores a los 100 km no se realiza por razones de enfriamiento de la mezcla. Analizando el coste por kilómetro de transporte de las mezclas se observa que la mezcla con árido siderúrgico es más competitiva que con los áridos ofita y sílice, aun considerando el sobrecoste del transporte por efecto de sus densidades.

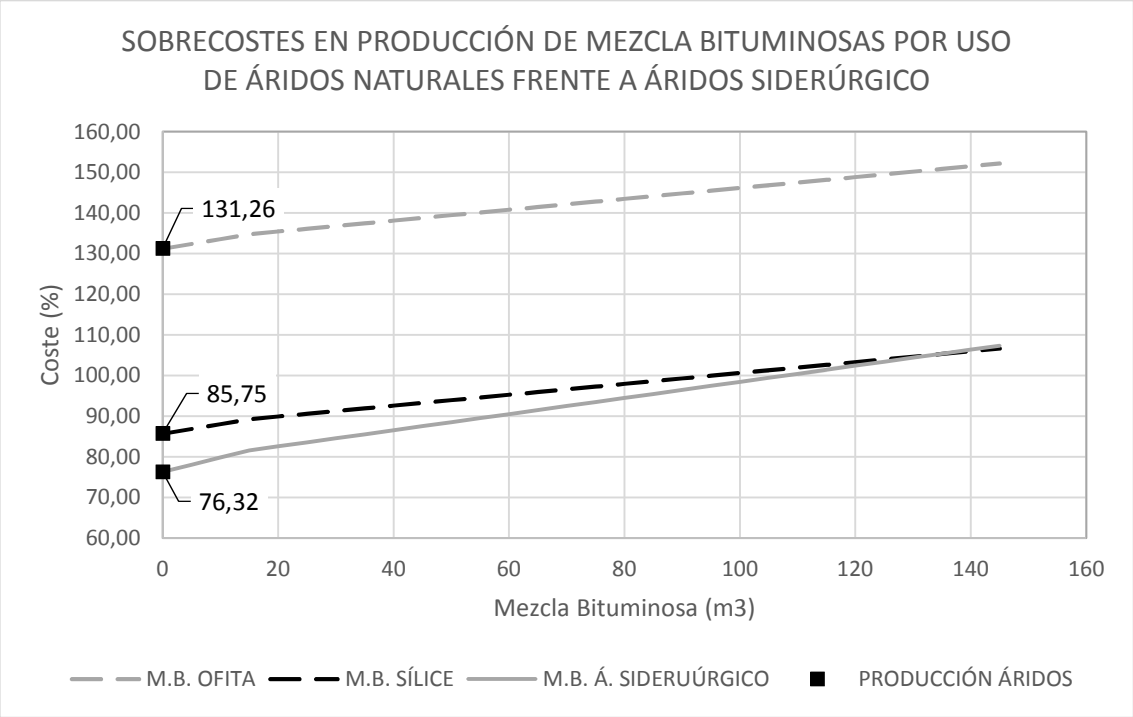


Figura 171: Influencia de la distancia en el transporte de Mezclas Bituminosas AC16 Surf.

Análisis experiencia

Las dimensiones medias de las carreteras convencionales CA-136 y CA-137, con un carril en cada sentido y arcenes transitables según la Instrucción de carreteras 6.1. tienen las siguientes dimensiones:

DIMENSIONES	m
Carril	3,50
Arcén	1,50
Carril	3,50
Espesor Capa	0,05

Tabla 117: Dimensiones según 6.1. I.C.

La mezcla que se utiliza en la capa de rodadura es tipo AC16 Surf, con un espesor de 5 cm y con las dosificaciones expuestas en el apartado 4.3.2.1.Dosificaciones en laboratorio.

VOLUMEN m^3/ Km
500

Tabla 118: Volumen AC16Surf por km de carretera convencional.

RELACIÓN DE COSTES	€/m^3	€/Km carretera	Transporte €/m^3	Transporte €/Km carretera	€/Km carretera	%
M.B. A. Silíceo	85,75	42.875	4,752	2.376	45.251	110,3
M.B. A. Ofítico	131,26	65.630	4,752	2.376	68.006	165,8
M.B. A. Siderúrgico	76,32	38.160	5,702	2.851,2	41.011,2	100

Tabla 119: Costes de producción de mezcla AC16Surf.

Representando en un diagrama de barras las variaciones porcentuales de la supuesta utilización de los diferentes tipos de mezclas, se observa que en todos los casos la mezcla con áridos siderúrgicos supone un ahorro frente al resto.

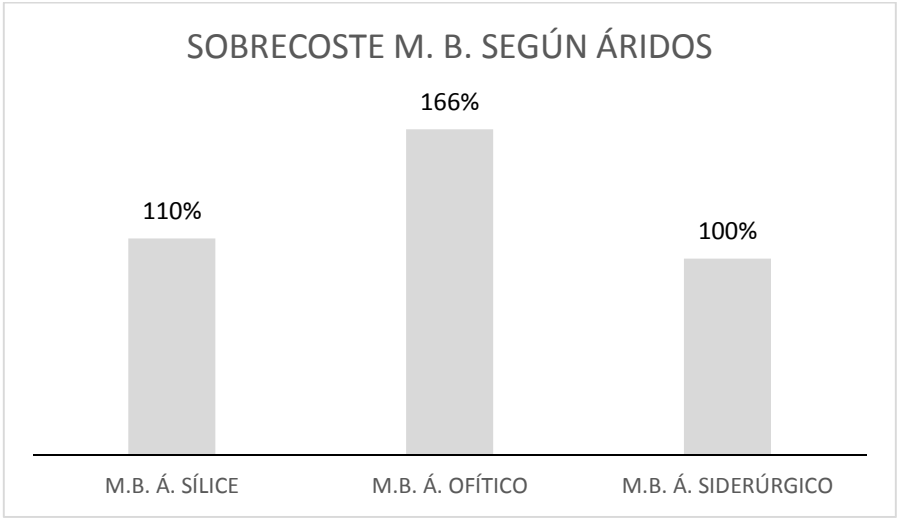


Figura 172: Influencia de la distancia en el transporte de Mezclas Bituminosas AC16 Surf.

Analizando la longitud de estas actuaciones se obtiene la siguiente tabla:

DIMENSIONES	Km	€/Km carretera	€ obra	€ diferencia
M. B. A. Silíceo	7,52	45.251	340.287,52	45.006,88
M.B. A. Ofítico	7,52	68.006	511.405,12	171.117,6
M. B. A. Siderúrgico	7,52	41.011,2	295.280,64	-

Tabla 120: Longitud de tramo realizado con Mezclas bituminosas con áridos siderúrgicos.

Desglosando el sobrecoste que supondría la realización de dicho tramo con diferentes mezclas se obtiene:

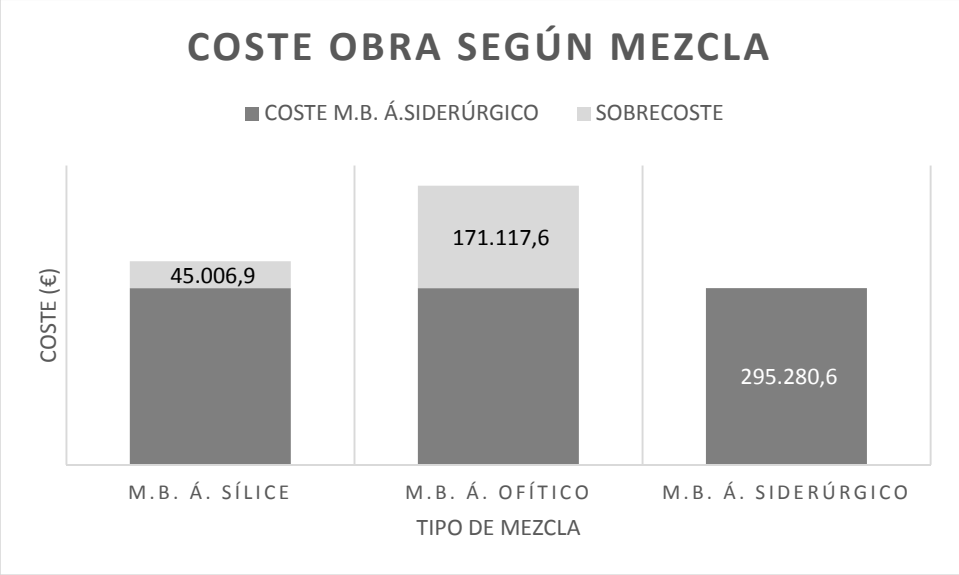


Figura 173: Coste desglosado de Mezcla Bituminosa en la obra.

4.4 DESARROLLO DE HORMIGONES CON ÁRIDOS SIDERÚRGICOS

En este apartado se pretende demostrar la viabilidad técnica de estos hormigones en los que se ha sustituido el árido natural por escorias negras siderúrgicas.

Para tal fin, en primer lugar se define un hormigón patrón que servirá de referencia a la hora de caracterizar el hormigón fabricado con escorias negras. Después se explica el proceso seguido para obtener un hormigón fabricado con árido siderúrgico de aspecto similar al del patrón, logrando así una dosificación adecuada.

Finalmente, y tras fabricar una serie de probetas normalizadas, se caracteriza el hormigón realizando una serie de ensayos.

4.4.1 DEFINICIÓN DE LAS DOSIFICACIONES

4.4.1.1 Hormigón patrón y dosificación preliminar

El punto de partida fue la elaboración de un hormigón patrón fabricado con árido natural calizo de manera que pudiera ser utilizado como amasada de referencia.

Basándose en esta dosificación se realizaron sustituciones del 100% del árido natural por escorias siderúrgicas. Se trató de mantener la misma relación agua-cemento en la amasada añadiendo aditivos superfluidificantes de forma que se conservara la consistencia obtenida en la amasada de referencia. Por otra parte, se llevó a cabo un ajuste granulométrico de los áridos mediante el método de Fuller.

El método de Fuller está indicado para piezas no muy armadas, donde los hormigones son fabricados con áridos redondeados con tamaños inferiores a 70 mm y una cantidad mínima de cemento de 300 kg/m^3.

Para poder utilizar este método es necesario conocer la granulometría tanto del árido natural como de las escorias. En el Capítulo 3 se ha descrito la metodología a seguir para obtener estos parámetros y en el segundo apartado de este capítulo se presentan los resultados obtenidos en estos ensayos.

En base a estos resultados y tras los adecuados cálculos empleando el método de Fuller se obtuvo la dosificación que se presenta en la siguiente tabla.

DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN CON ESCORIAS 100%	
MATERIAL	Dosificación seca para 1 m^3
Arena sílice 0/1(ANS)	487,5
Escoria 0/6	742,5
Escoria 6/12	776,25
Escoria 12/18	393,75
Cemento (II am)	300

Tabla 121: Dosificación seca para un hormigón 100% de incorporación de escorias como árido grueso.

Se tuvo en cuenta la granulometría de la escoria, de forma que se propusieron las proporciones de las tres fracciones granulométricas por separado. Se pretendía así conseguir un máximo aprovechamiento de las escorias.

Las cantidades de agua y aditivo se ajustaron experimentalmente y se presentan en el siguiente apartado.

4.4.1.2 Consistencia

El ensayo de consistencia realizado es el del cono de Abrams, siguiendo la norma UNE 83313:1990, y como se ha explicado en el capítulo metodología.

Las cantidades ideales de agua y aditivo se obtuvieron mediante un método experimental iterativo, ajustando estas cantidades a las exigencias de resistencia y consistencia del hormigón fresco.

La consistencia obtenida en la primera prueba fue excesivamente fluida: LÍQUIDA.

1ª PRUEBA DE AJUSTE DE LA CONSISTENCIA	
Componente	Cantidad (kg/m^3)
Aditivo Melcret PF75	2,00
Aditivo Rheobuild 1057	2,50
Agua	160
a/c	0,53

Tabla 122: Cantidades de agua y aditivos en la primera prueba de consistencia.

Figura 174: Asiento del cono de Abrams de la primera de las dosificaciones de prueba.

Una vez realizado el ensayo y obtenido un resultado muy poco satisfactorio se reajustó la dosificación para obtener una consistencia más adecuada.

Una vez reajustada la fórmula se procedió a realizar el ensayo de nuevo, obteniendo en esta segunda prueba un asiento del cono de Abrams de 15 cm. En la siguiente tabla se presenta la dosificación utilizada y a continuación muestra una imagen del momento del ensayo.

2ª PRUEBA DE AJUSTE DE LA CONSISTENCIA	
Componente	Cantidad (kg/m^3)
Aditivo Melcret PF75	1,50
Aditivo Rheobuild 1057	2,00
Agua	150
a/c	0,50

Tabla 123: Cantidades de agua y aditivos en la segunda prueba de consistencia.

Figura 175: Asiento del cono de Abrams de la segunda de las dosificaciones de prueba.

En la tercera y última prueba se empleó la siguiente dosificación, consiguiendo un asiento de 5 cm. A continuación se muestra la información de forma tabular y una imagen del ensayo:

3ª PRUEBA DE AJUSTE DE LA CONSISTENCIA	
Componente	Cantidad (kg/m^3)
Aditivo Melcret PF75	1,00
Aditivo Rheobuild 1057	1,50
Agua	150
a/c	0,50

Tabla 124: Cantidades de agua y aditivos en la tercera prueba de consistencia.

Figura 176: Asiento del cono de Abrams de la tercera de las dosificaciones de prueba.

Por lo tanto, la dosificación final propuesta para el hormigón con una sustitución del 100% del árido natural por escoria es la siguiente:

DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN CON ESCORIAS 100%	
MATERIAL	Dosificación seca para 1 m^3
Arena sílice 0/1(ANS)	487,5
Escoria 0/6	742,5
Escoria 6/12	776,25
Escoria 12/18	393,75
Cemento (II am)	300
Aditivo Melcret PF75	1,00
Aditivo Rheobuild 1057	1,50
Agua	150
a/c	0,50

Tabla 125: Dosificación final seca para un hormigón con 100% de incorporación de escorias como árido grueso.

4.4.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES

Con el fin de caracterizar los hormigones fabricados con las escorias negras y poder compararlos con un hormigón patrón se realizaron los siguientes ensayos:

- Densidad aparente
- Densidad relativa
- Densidad saturada
- Porosidad abierta
- Absorción
- Resistencia a compresión y a tracción
- Permeabilidad al oxígeno
- Velocidad de impulsos ultrasónicos
- Abrasión por desgaste

En los siguientes apartados se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos.

4.4.2.1 Propiedades físicas del hormigón endurecido

Siguiendo la metodología descrita en el Capítulo 3 se calcularon las principales características físicas del hormigón endurecido. En la siguiente tabla se presentan los resultados del hormigón fabricado con escorias y del hormigón de control a los 28 días de edad.

Muestra	D_a (g/cm^3)	D_r (g/cm^3)	D_s (g/cm^3)	P (%)	A (%)
Control	2,35	2,57	2,44	8,56	3,64
EBE 100%	2,88	2,95	2,90	2,36	0,82

Tabla 126: Características físicas de los hormigones con escorias y de control.

donde:

- D_a: Densidad aparente.
- D_r: Densidad relativa.
- D_s: Densidad saturada.
- P: Porosidad abierta.
- A: Absorción.

4.4.2.2 Resistencia a compresión y a tracción

En la siguiente tabla se presentan los resultados realizados según la norma UNE-EN 12390-3:2009 referentes a la resistencia mecánica a compresión y a tracción de los hormigones con escorias y de control.

Muestra	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)
Control	50,9	3,8
EBE 100%	43,4	3,8

Tabla 127: Características mecánicas de los hormigones con escorias y de control.

En base a los resultados obtenidos se puede afirmar que dada la dosificación mostrada anteriormente, la sustitución del árido natural por escorias no supone una pérdida en la resistencia a tracción. Sin embargo, la resistencia a compresión se ve mermada en aproximadamente un 15%.

4.4.2.3 Permeabilidad al oxígeno y profundidad máxima de penetración de agua bajo presión

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de permeabilidad al oxígeno y la profundidad máxima alcanzada por agua bajo presión. Los resultados se muestran para el hormigón de control y el fabricado con escorias a los 28 días de edad:

Muestra	Coef. de permeabilidad al oxígeno (m^3)	Penetración de agua bajo presión (mm)
Control	$2{,}70x10^{-17}$	36
EBE 100%	$3{,}03\ x10^{-17}$	51

Tabla 128: Permeabilidad al oxígeno y profundidad máxima de penetración de agua bajo presión de los hormigones con escorias y de control.

Analizando los resultados, se puede ver que la permeabilidad del hormigón con escorias es un 12% superior respecto al de control. Respecto a la penetración del agua bajo presión ocurre prácticamente lo mismo, obteniéndose en los dos casos valores cercanos a límite marcado por la normativa.

4.4.2.4 Velocidad de impulsos ultrasónicos

A continuación se muestran los resultados del ensayo de mediad de la velocidad de impulsos ultrasónicos, realizado según la norma UNE-EN 12504-4.

Muestra	Longitud (mm)	Tiempo (μs)	Velocidad (km/s)
Control	194	42,6	4,55
EBE 100%	102	21,0	4,86

Tabla 129: Ensayos de velocidad de impulsos ultrasónicos.

Se ve como la velocidad registrada para los hormigones fabricados con escorias entorno a un 6% superior que el hormigón fabricado con áridos naturales. Esto se puede explicar por la mayor densidad de las escorias respecto al árido calizo.

4.4.2.5 Abrasión por desgaste

En referencia al ensayo de abrasión por desgaste, se muestran en la siguiente tabla los resultados obtenidos para el hormigón fabricado con escorias y el fabricado con árido calizo. Los valores presentados son la media de las tres medidas realizadas en ambos lados de cada submuestra.

Muestra	Abrasión (mm)
Control	12,47
EBE 100%	13,59

Tabla 130: Abrasión por desgaste.

4.4.2.6 Seguimiento de las probetas normalizadas

Para comprobar que no acontecía ningún comportamiento extraño en los hormigones fabricados con áridos siderúrgicos, se llevó a cabo un seguimiento visual las probetas. En las siguientes imágenes se muestra brevemente la evolución de las probetas en el tiempo.

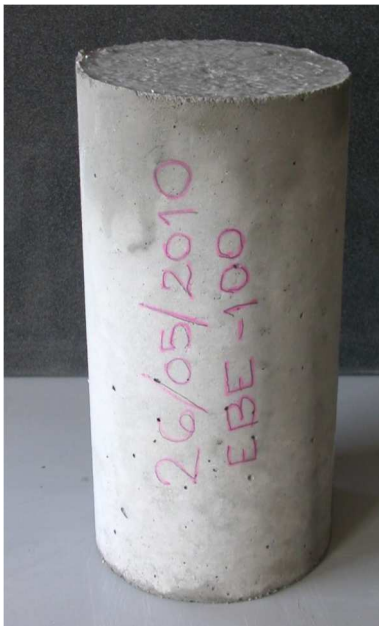


Figura 177: Aspecto del hormigón con 100% de incorporación y 26 días de edad.

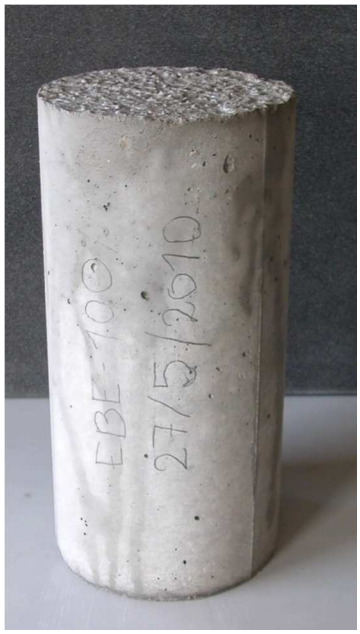


Figura 178: Aspecto del hormigón con 100% de incorporación y 25 días de edad.

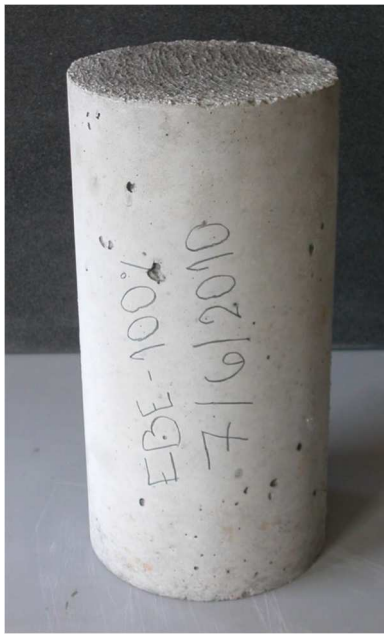


Figura 179: Aspecto del hormigón con 100% de incorporación y 15 días de edad.

4.5 CONCLUSIONES

En vista de los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones en función de la finalidad buscada para las escorias negras.

4.5.1 CONCLUSIONES SOBRE EL EMPLEO EN LA FABRICACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS

En cuanto a las características de los áridos siderúrgicos:

Los resultados del ensayo de **lixiviación** confirman que la escoria negra de GSW cumple el Decreto de valorización de escorias de la Comunidad Autónoma de Cantabria, es decir, no presenta riesgo de contaminación de las aguas de escorrentía o de las aguas subterráneas.

Su **composición química y mineralógica** y su carácter básico garantizan una buena adhesividad con los betunes convencionales.

Su estructura vacuolar en las fracciones más gruesas hace que la **superficie específica** aumente ligeramente en el global de la mezcla, por lo que se deberá tener en cuenta para que la envuelta de las partículas gruesas sea eficiente.

Presenta una elevada densidad, pudiéndose clasificar como árido pesado con un 30% más de peso específico que una caliza o una ofita. Posee una absorción comprendida entre un 1% y un 3,5%, lo que apenas influye en la dotación extra de ligante a aportar.

El resultado del valor del **equivalente de arena** de 90 significa que no tiene materia orgánica o compuestos plásticos y que su limpieza como árido es excelente.

Su **forma cúbica** con un 100% de caras de fractura aporta un alto rozamiento interno entre partículas y mejora la resistencia a las deformaciones permanentes bajo las solicitaciones del tráfico.

La falta de finos que presenta la escoria de 0.5 mm no es un problema porque se consigue fácilmente encajarla dentro del huso del PG-3 empleando arena caliza.

La elevada **resistencia al desgaste** y el excelente **coeficiente de pulimento acelerado** hace que el uso de la escoria sea especialmente deseable en capas de rodadura donde las condiciones del tráfico sean muy exigentes. Resultado de los Ángeles de 17 y un coeficiente de pulimento acelerado de 17. Se puede mejorar la resistencia al desgaste mediante el molido de la escoria.

Se comprueba que cuando la escoria está sometida a un proceso de valorización adecuado se consigue reducir su potencial expansivo por debajo del 0.5% y el I.G.E. está muy por debajo del 1%. Por lo tanto, su potencial expansivo es muy reducido y no debería ser excusa para argumentar su no utilización en

firmes de carreteras.

En cuanto a la fabricación y extendido de la mezcla:

El único inconveniente que tiene la escoria de arco eléctrico es que debido a la alta densidad de la mezcla respecto a mezclas convencionales. Esto repercute de forma que se requiere un mayor tonelaje de mezcla para ocupar el mismo volumen.

El procedimiento de extendido se realiza sin diferencias respecto a una mezcla convencional. Sin embargo, la energía de compactación necesaria es algo menor.

Es previsible que la maquinaria sufra mayores desgastes debido a la dureza y el peso específico de las escorias.

En cuanto a las características de la mezcla bituminosa:

Adherencia neumático-pavimento se puede aumentar en los resultados sustituyendo la fracción fina de arena caliza por ofita, pero comprobando que no se empeore la resistencia conservada por debajo del 85% en el ensayo de sensibilidad al agua. Además, a la vista de los resultados, se puede apreciar como con contenidos más bajos de betún se obtienen resultados de sensibilidad al agua mayores, 107 y 105 respeto a 90.

En el caso de las mezclas con arena 0/6 mm caliza, los tramos 1 y 2A presentan un contenido en huecos del 3% y del 6% respectivamente, acercándose a las especificaciones del PG3 (4% – 6 %). Las mezclas con arena caliza 0/4 poseen un contenido de huecos del 4,5%.

Según el PG3 la dotación mínima de betún para este tipo de mezclas en capas de rodadura debe ser del 4,5% si la densidad del árido es de 2,65 t/m^3. En este caso, al poseer la escoria negra una densidad mayor a 2,65 se podría corregir la cantidad mínima de ligante a la baja. Teniendo en cuenta la diferencia de densidades en los áridos podría llegar a una dotación mínima de ligante del 3,8%. Para ello, se debe comprobar si la estabilidad, deformación, huecos y la resistencia conservada son adecuados. Aun así, el contenido en betún en las mezclas estudiadas es del 4,54%.

El ensayo de **resistencia conservada** no representa un problema para este material. Se ha dado la peculiar circunstancia que el ITSR ha sido en algunos casos por encima del 100%. En el caso de las mezclas con arena 0/6 mm caliza, los tramos 1 y 2A la mezcla presenta excelente adhesividad árido-ligante; con un Índice de Resistencia conservada ISTR > 85%.

En cuanto a los **módulos de rigidez**, la escoria es claramente superior a la ofita. El elevado rozamiento interno de la escoria así como su alto peso específico son las variables que explican este buenísimo comportamiento.

La resistencia a las **deformaciones plásticas** es muy similar para la ofita y para la escoria dosificada en volumen. Para la escoria dosificada en peso se

consiguen valores incluso mejores.

En lo referente a la vida útil por **fatiga** la ofita se comporta más eficientemente. Según aumenta el número de ciclos permite mayores deformaciones conservando las propiedades resistentes respecto a la escoria.

El CRD obtenido en los ensayos es muestra de una buena microtextura de la mezcla así como una buena adherencia neumático-pavimento. Valor del coeficiente de pulimento acelerado de 17

Cuando se utilizan mayores cantidades de betún (5,5%) la resistencia en seco es del orden de un 13% a la resistencia de las probetas húmedas.

El aspecto más destacable de estos ensayos es que la aportación de filler de cemento provoca que la resistencia conservada tras la inmersión sea superior al 100%, significando esto que tras someter las probetas a unas condiciones desfavorables la resistencia a tracción indirecta ha aumentado. Esto es debido a que la aportación de cal realizada al añadir filler de cemento reacciona con el agua aumentado de este modo la resistencia de la mezcla.

<u>En cuanto a las características de la mezcla bituminosa en el tiempo:</u>

Observando los resultados obtenidos de la comparación de las propiedades superficiales de las mezclas, se aprecia como el CRT en las mezclas bituminosas fabricadas con escorias negras es mayor que en las mezclas convencionales, 70,6 frente a 59,2.

Estos valores fueron tomados tras 3 años de la puesta en servicio de la carretera. Se demuestra así como tras el paso de este tiempo, el CRT de las mezclas bituminosas elaboradas con árido siderúrgico sobrepasa en 5 puntos el límite marcado por la norma para este parámetro medido dos meses después de la puesta en servicio de la carretera (65). Sin embargo, la superficie fabricada con árido sílice está 5 puntos por debajo de este límite.

Por el contrario, la textura de las mezclas convencionales es mejor que las fabricadas con árido siderúrgico, 0,86 frente a 0,76. Respecto a la textura, el PG-3 indica que el valor medido antes de la puesta en servicio de la carretera debe ser mayor o igual que 0,7. Con los datos obtenidos en el análisis estadístico se demuestra que aun siendo peores los resultados del árido siderúrgico, siguen cumpliendo la normativa incluso tras 3 años de utilización de la carretera.

Observando la forma en que se distribuyen las probabilidades del CRT y de la textura, se aprecia como en todos los tramos de la carretera estudiada siguen una distribución similar a la normal.

Un análisis estadístico más minucioso demuestra que en las mezclas bituminosas fabricadas con escorias, el 75% de los valores medidos del CRT es mayor que 66, mientras que en las mezclas convencionales fabricadas con sílice solo el 25% es mayor que 64.

Respecto a la textura, en las mezclas fabricadas con árido siderúrgico casi

el 75% de los valores cumplen con el valor marcado por la normativa en el momento de la puesta en servicio.

De estos resultados se desprende que las escorias ofrecen unas prestaciones superiores al sílice en lo que al CRT se refiere. Su empleo es aconsejable tanto por sus características iniciales como por su buena evolución en el tiempo.

En relación a la textura, aun obteniéndose valores menores en las escorias que en sílice, su empleo es viable puesto que se cumple la normativa vigente incluso a los 3 años de la puesta en servicio.

Por otro lado, la medida del CRD en las instalaciones del Grupo Emilio Bolado demuestra como los valores obtenidos evolucionan positivamente, aumentando de forma general en 10 puntos en el transcurso de cuatro años.

El aspecto visual de los tramos de prueba es bueno. No se ha producido disgregaciones apreciables ni deformaciones plásticas a pesar del paso de vehículos pesados en las instalaciones del Grupo Emilio Bolado.El uso de la escoria junto a betunes modificados podría ser una buena solución en situaciones en las que el pavimento esté sometido a altos esfuerzos y niveles elevados de compromiso.

A la vista de los resultados se puede afirmar que la utilización en capas de rodadura de este árido siderúrgico es técnicamente viable, si bien se debe tener precaución con el polvo mineral de aportación y sus propiedades.

Análisis estadístico

De la caracterización de las escorias negras

De la caracterización de las escorias negras, se obtiene tras la realización de múltiples ensayos que la densidad de partículas es alrededor de 3,6 t/m^3. Esta densidad resulta superior al resto de áridos convencionales y, como se ha visto anteriormente, esto puede repercutir en el precio del transporte. Sin embargo, en aquellos casos en los que sean necesarios áridos con una alta densidad (hormigones de alta densidad) este factor puede suponer una ventaja.

Los ensayos de Equivalente de Arena realizados para la redacción de esta Tesis Doctoral muestran que las escorias negras cumplen con holgura los valores marcados por la normativa, resultando ser un árido con una baja proporción de finos.

En los ensayos de desgaste de Los Ángeles siempre se han obtenido valores menores que 20. Esto es resultado de la alta dureza del material, permitiendo su empleo en la capa de rodadura para todas las categorías de tráfico excepto en el caso de las mezclas bituminosas discontinuas y drenantes. Incluso en estos tipos de mezclas, podrían ser utilizados estos áridos siderúrgicos para categorías de tráfico bajas.

En todos los ensayos realizados de expansividad se han obtenido valores muy

inferiores al valor marcado por la norma (5%). Los resultados obtenidos a las 24 y 168 horas son 0,125 y 0,400% respectivamente.

En lo que se refiere a los ensayos de lixiviados, todos los ensayos obtenidos están por debajo de los límites marcados

Los valores de lixiviados cumplen en todos los casos con los límites impuestos por el Decreto de valorización de escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria.

Sobre los ensayos para la determinación de óxido de magnesio libre y óxido de calcio libre es interesante matizar la importancia que estos tienen, ya que se relacionan directamente con la expansividad.

Estos ensayos están regulados por las normas referencia UNE-EN 1744-1:2010+A1:2012 donde se describe un método para determinar la cal libre (CaO) de las escorias de fundición de acero y la UNE-EN 192-2:2014 donde se ofrecen métodos de cálculo para el óxido de calcio total y el óxido de magnesio total.

En estas normas existen diferentes métodos de evaluación. Los más comúnmente utilizados no permite distinguir entre cal libre (CaO), que es potencialmente expansiva y cal hidratada ($Ca(OH)_2$) que no lo es. Para distinguir ambos compuestos es necesario recurrir a la difracción de rayos X y/o a la termogravimetría.

De manera análoga, los métodos clásicos no permite distinguir entre MgO, potencialmente expansivo y $Mg(OH)_2$ que no lo es. Para distinguir entre óxidos e hidróxidos es necesario recurrir a técnicas tales como termogravimetría, difracción de rayos X y fluorescencia de rayos X.

Por tanto, los valores que se obtienen en la mayoría de los métodos que no permiten discernir entre la hidratación o no de los elementos, sirven para cuantificar de manera rápida si se superan los valores límite dispuestos en la legislación. Por esta razón es necesario recurrir a técnicas más específicas si se pretende distinguir entre óxidos e hidróxidos.

De la caracterización de las mezclas bituminosas

En el análisis de las mezclas bituminosas fabricadas con áridos siderúrgicos se ha obtenido una densidad superior a la de las mezclas convencionales. Como ya se ha comentado, esto se debe a la mayor densidad de partículas de las escorias negras. Tras el breve estudio estadístico realizado se puede afirmar que el valor medio es 2,86 t/m^3.

En el caso de las mezclas fabricadas con filler natural el porcentaje de betún en mezcla es menor que el mínimo exigido por la norma para las mezclas bituminosas en caliente (4,5%). Sin embargo, el artículo 542.3 del PG-3 permite reducir la dotación de ligante en función de la densidad del árido. En este caso, la alta densidad de las escorias negras (3,6 t/m^3), permite reducir la cantidad de ligante hasta un 3,3%.

Por otra parte, los valores del contenido de huecos en mezcla y la relación filler/betún se encuentran entorno a los valores que aconseja el PG-3, siendo del 5% y de 1,2 respectivamente. Habiendo fabricado mezclas con estos parámetros y obteniendo tras su caracterización uno buenos resultados, se demuestra que las escorias negras son un árido con gran potencial a la hora de fabricar mezclas bituminosas.

Por otra parte, las mezclas fabricadas con filler de cemento demuestran tener unas excelentes prestaciones en lo que a resistencia a tracción conservada se refiere, obteniendo valores muy por debajo del límite normativo.

4.5.2 CONCLUSIONES SOBRE EL EMPLEO EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGONES

Basadas en la investigación realizada con estas muestras, pueden obtenerse las siguientes conclusiones con carácter general:

Los áridos analizados presentan una buena distribución **granulométrica** para las diferentes fracciones estudiadas.

La **densidad** de las escorias negras es superior a la presentada por los áridos naturales.

Los resultados del ensayo de **machacabilidad** muestran que las escorias poseen unas mejores prestaciones mecánicas que el árido natural calizo.

La baja **absorción** de las escorias provoca que sea necesaria una mayor relación agua/cemento para obtener una consistencia adecuada.

La sustitución del 100% del árido natural por escorias no supone una pérdida importante en la **resistencia** a tracción. Sin embargo, sí que se aprecia un pérdida aproximada del 15% de la resistencia a compresión.

Los hormigones fabricados con escorias también ven afectadas sus propiedades físicas. La alta densidad de la escoria hace que la densidad del hormigón aumente comparándolo con un hormigón convencional. Además, se aprecia una disminución tanto en la porosidad como en la absorción del hormigón.

Los resultados de los ensayos de **permeabilidad al oxígeno y penetración de agua bajo presión** indican que el hormigón con escorias presenta menor capacidad resistente a los efectos agresivos del ambiente.

De los ensayos de **abrasión** por desgaste se obtienen unos buenos resultados, confirmando los resultados obtenidos en los ensayos de machacabilidad.

Como conclusión final, se comprueba que la sustitución de los áridos naturales por escorias es una opción a considerar cuando la alta densidad del hormigón no suponga un problema.

4.5.3 CONCLUSIONES ECONÓMICAS

A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que:

El coste productivo de los áridos siderúrgicos es inferior al coste estimado en el estudio, constituyendo una ventaja importante en su utilización.

El transporte de áridos siderúrgicos y de las mezclas bituminosas a base de estos, se encarece en un 23,5% y 20% respectivamente frente a los áridos naturales por el efecto que tiene los diferentes valores de densidad.

En las mezclas, este incremento de coste no llega a ser suficiente como para sobrepasar el coste estimado de mezcla bituminosa con áridos naturales, ya que en la práctica, las distancias de transporte superiores a 100 km no se suelen dar porque se pueden producir variaciones negativas en las características técnicas de la mezcla.

Por tanto, los áridos siderúrgicos utilizados en capa de rodadura son competitivos técnica y económicamente, comparados con los áridos naturales.

CAPÍTULO 5.
ESCORIAS DE FERROSILICOMANGANESO: ÁRIDOS

En este capítulo se pretende caracterizar las escorias de ferrosilicomanganeso producidas por la empresa Ferroatlántica, así como la viabilidad técnica de su empleo como zahorra artificial en capas de base y subbase.

El capítulo se ordena de la siguiente manera:

- Procedencia de las escorias de ferroaleaciones estudiadas.
- Caracterización de las escoras de ferrosilicomanganeso.
- Estudio de viabilidad técnica para el empleo como base y subbase.
- Conclusiones obtenidas.

5.1 INTRODUCCIÓN

Las escorias de ferrosilicomanganeso (SiMn) que son objeto de análisis en esta Tesis Doctoral son las producidas por la empresa Ferroatlántica. Ferroatlántica es uno de los pilares más importantes del Grupo Villar Mir produciendo la totalidad de las ferroaleaciones a nivel nacional, contando con cinco centros de producción. Las escorias estudiadas en esta Tesis Doctoral son las producidas en el Bóo de Guarnizo, Cantabria. Las instalaciones se encuentran junto al puerto de Santander, a 10 kilómetros de la ciudad de Santander.

5.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS DE FERROSILICOMANGANESO

Con el fin de caracterizar las escorias de ferrosilicomanganeso de la empresa Ferroatlántica, se realizaron aquellos ensayos que se consideran necesarios de cara a definir áridos que van a ser empleados como zahorras artificiales. Los ensayos desarrollados fueron los siguientes:

Caracterización física y mecánica

- Análisis granulométrico
- Coeficiente de forma
- Densidad aparente y porosidad
- Densidad relativa
- Equivalente de arena
- Índice de lajas
- Coeficiente de desgaste de Los Ángeles
- Proctor Modificado
- California Bearing Ratio (CBR)

En los siguientes apartados se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos.

5.2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA

5.2.1.1 Análisis granulométrico

Se realizaron ensayos granulométricos sobre escorias que habían sido tratadas de diferentes formas.

- Molido sin Cribar

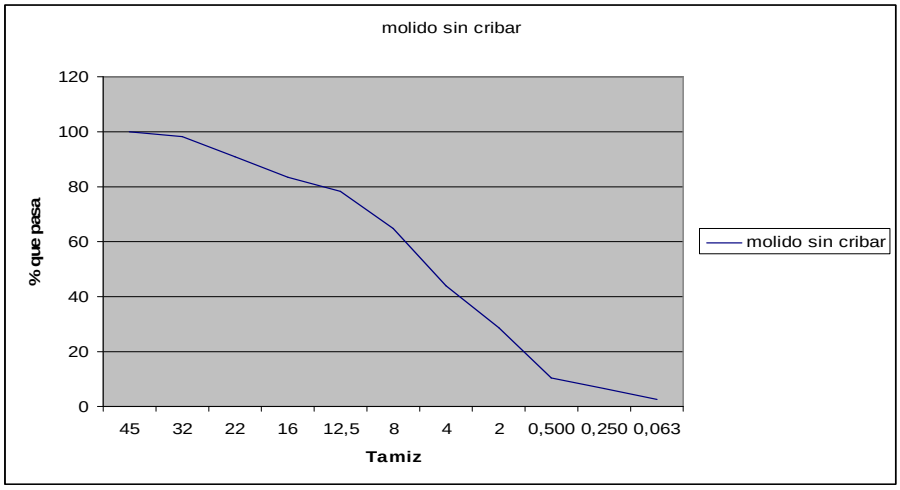


Figura 180: Granulometría escoria SiMn molido sin cribar.

- Rechazo de molienda

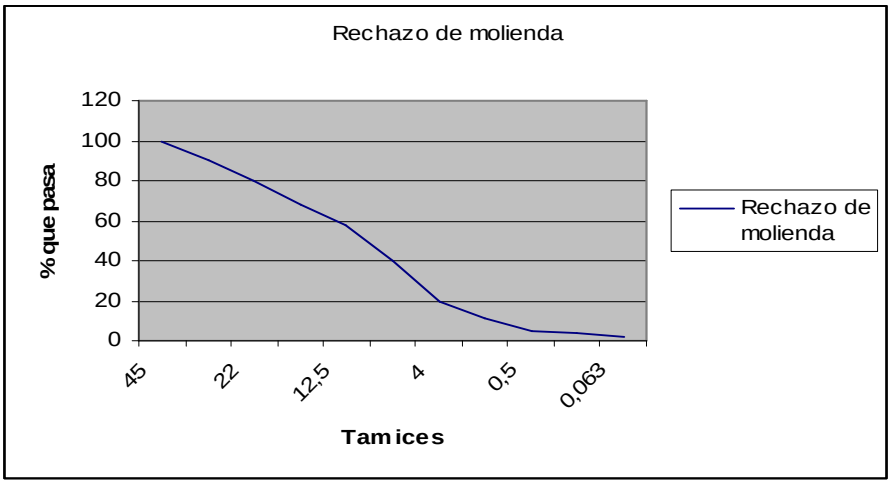


Figura 181: Granulometría escoria SiMn rechazo de molienda.

- Rechazo de molienda cribado

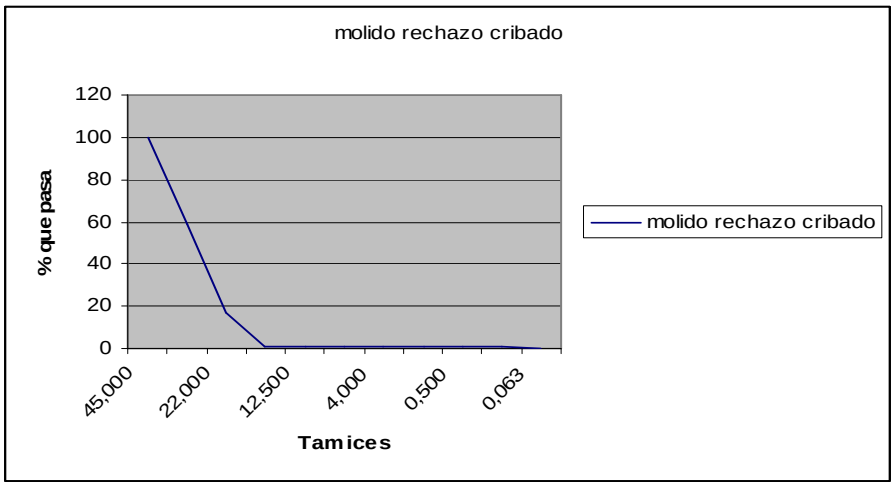


Figura 182: Granulometría escoria SiMn rechazo de molienda cribado.

- Molido y Cribado 0-6

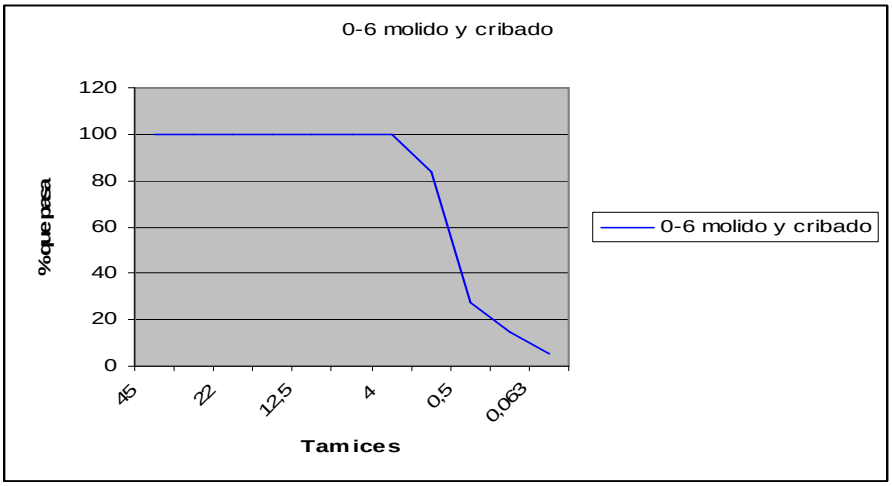


Figura 183: Granulometría escoria SiMn molida y cribada 0-6.

- Molido y Cribado 6-12

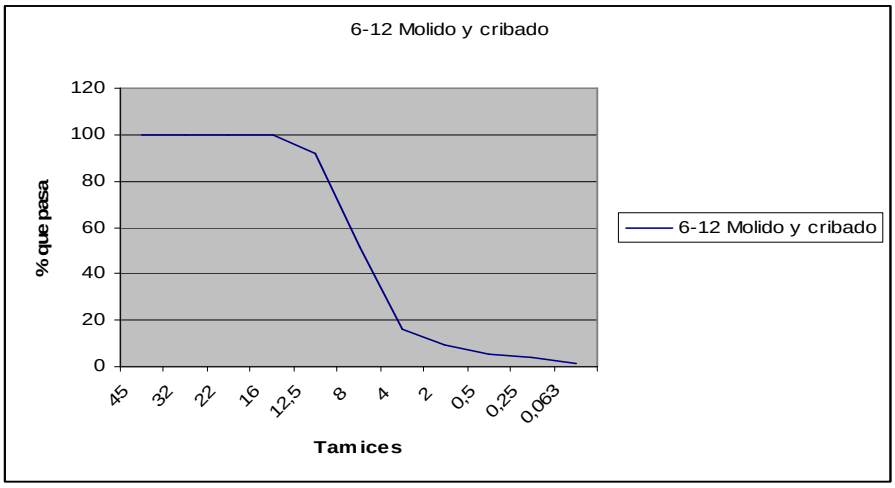


Figura 184: Granulometría escoria SiMn molida y cribada 6-12.

- Molido y Cribado 12-18

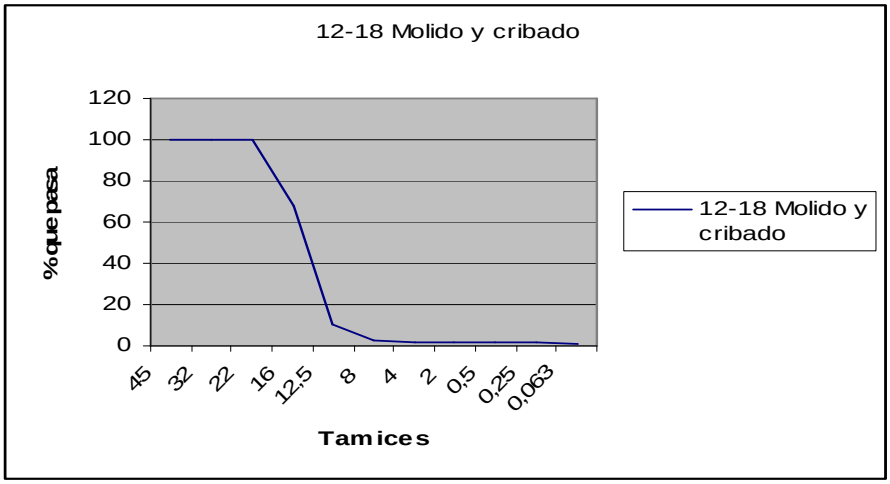


Figura 185: Granulometría escoria SiMn molida y cribada 12-18.

- Cribado 0-6

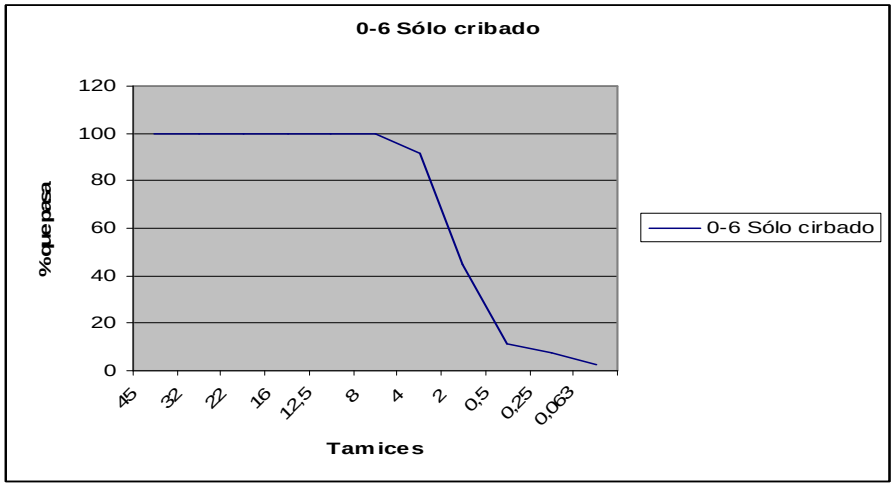


Figura 186: Granulometría escoria SiMn cribada 0-6.

- Cribado 6-12

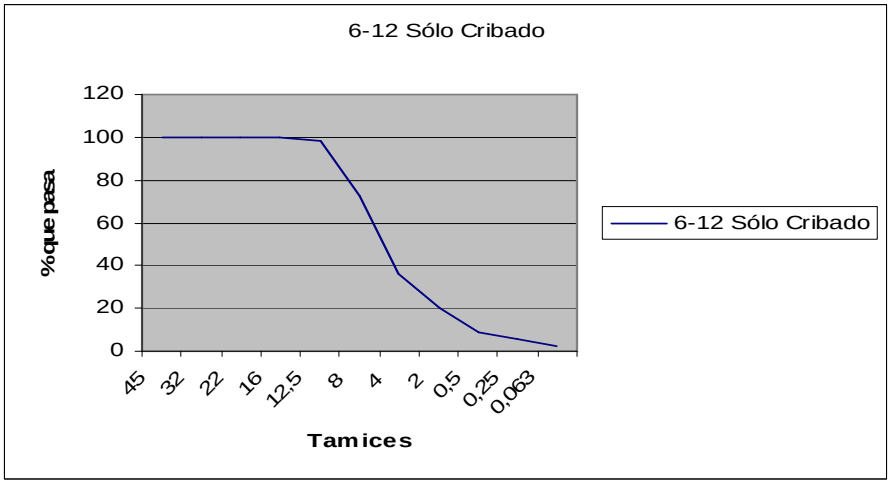


Figura 187: Granulometría escoria SiMn cribada 6-12.

- Cribado 12-18

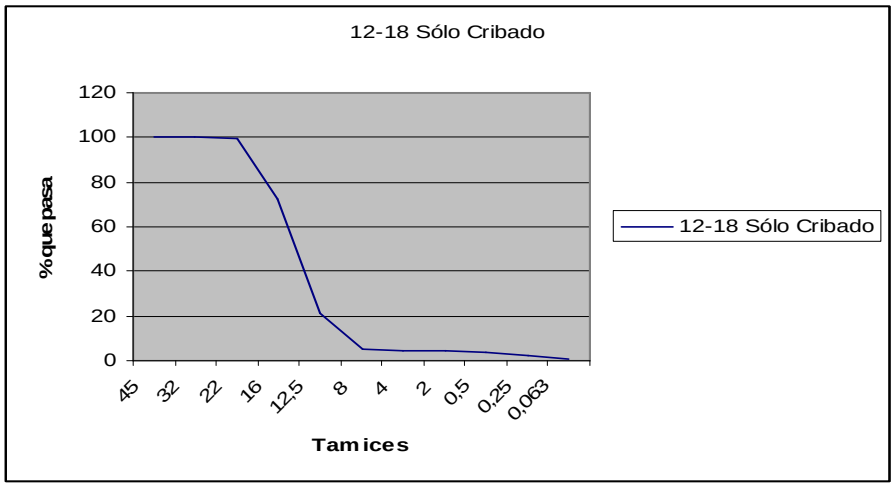


Figura 188: Granulometría escoria SiMn cribada 12-18.

5.2.1.2 Coeficiente de forma

El ensayo para determinar el coeficiente de forma se lleva a cabo siguiendo las especificaciones de la norma UNE-EN 933-4. El ensayo fue realizado por una parte, para la escoria solamente molida; y por otra, para la escoria con fracción granulométrica 12-18 cribada y cribada y molida. Los resultados obtenidos fueron los siguientes

Escoria	Coef. de forma
Escoria molida	14%
Escoria cribada 12-18	28%
Escoria cribada y molida 12-18	12%

Tabla 131: Coeficiente de forma escoria de SiMn.

Los tres valores obtenidos representan el % de partículas no cúbicas con respecto a las partículas totales retenidas por el tamiz. Valores bajos del coeficiente de forma indican que las partículas tienen una mejor distribución en su forma.

El empleo de áridos gruesos con formas inadecuadas dificulta extraordinariamente la obtención de buenas resistencias y, en todo caso, exige un estudio de mejoramiento de suelo. Por esta razón, para evitar la presencia de áridos laminares y aciculares en una proporción excesiva, se limita el coeficiente de forma del árido.

5.2.1.3 Densidad aparente y porosidad

El ensayo fue realizado para la escoria molida sin cribar, 12-18 molida y cribada, 12-18 sólo cribada. Los valores obtenidos son los siguientes:

Fracción de SiMn	Densidad Aparente (t/m^3)	Porosidad (%)
Molida sin cribar	1,704	43,5
Molida y Cribada 12-18	1,477	51
Sólo cribada 12-18	1,483	50,8

Tabla 132: Densidad aparente y porosidad escoria de SiMn.

5.2.1.4 Densidad relativa y absorción

Para la obtención de la densidad relativa y la absorción se utilizó la granulometría completa de la escoria de ferrosilicomanganeso. En la siguiente tabla se muestran los resultados:

Densidad relativa	**3,012 t/m^3**
Absorción	**0,8%**

Tabla 133: Densidad relativa y absorción escoria de SiMn.

5.2.1.5 Equivalente de arena

El material ensayado fue la escoria de SiMn molida sin cribar, y el valor arrojado en el ensayo fue el de 83. Tal valor indica que el contenido de arena es alto y por el contrario el de finos es bajo. En la siguiente tabla se muestran los resultados:

	1ª Submuestra	2ª Submuestra	EA
EA	84	82	**83**
NOTA - Los valores de 100 × (h_2 / h_1) de las dos submuestras de ensayo no deben diferir en más de 4.			

Tabla 134: Equivalente de arena escoria de SiMn.

5.2.1.6 Índice de lajas

El material ensayado es la escoria molida sin cribar, la 12-18 sólo cribada y la 12-18 molida y cribada. Tales materiales fueron ensayados en 2 ocasiones cada uno por lo que el valor mostrado es la media de los 2 valores obtenidos. A continuación se exponen los resultados:

Fracción de SiMn	Índice de lajas
Molida sin cribar	7
Molida y Cribada 12-18	11
Sólo cribada 12-18	8

Tabla 135: Índice de lajas escoria de SiMn.

Debido a que tal índice es la relación del material lajoso con respecto al retenido en la fracción correspondiente se obtiene que el material ensayado es homogéneo.

5.2.1.7 Coeficiente de desgaste de Los Ángeles

Los materiales empleados y resultados obtenidos del ensayo de Los Ángeles son los mostrados en la siguiente tabla. Cabe destacar que la escoria 12-18 molida y cribada tiene 4 valores de los cuales sólo los 2 primeros se obtienen como la media de dos ensayos; y el tercer y cuarto valor corresponden a resultados de Los Ángeles para el material vitrificado y mate respectivamente.

Fracción de SiMn	Los Ángeles
Molido y cribado 6-12	24
Molido y cribado 12-18	22
Molido y cribado 12-18 (vitrificado)	38
Molido y cribado 12-18 (mate)	17
Sólo cribado 12-18	35

Tabla 136: Coeficiente de Los Ángeles escoria de SiMn.

Figura 189: Material 6-12 molido y cribado para ser ensayado en Los Ángeles.

Figura 190: Material 12-18 molido y cribado ya ensayado en Los Ángeles.

Figura 191: Material 12-18 molido y cribado ya ensayado en Los Ángeles.

Figura 192: Material 12-18 molido y cribado mate para ser ensayado en Los Ángeles.

5.2.1.8 Proctor modificado

El material ensayado fue la escoria molida sin cribar. Se realizaron 9 probetas con distintas humedades con la intención de buscar la humedad óptima y determinar así la densidad máxima compactada seca (DMCS). Los resultados obtenidos se encuentran justificados en la siguiente tabla:

PUNTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
DENSIDAD	2,218	2,250	2,278	2,308	2,331	2,308	2,284	2,267	2,271
% HUMEDAD	2,2	2,9	3,2	3,6	3,8	3,9	4,1	3,9	4,8

Tabla 137: Resultados ensayo P.M y Humedad.

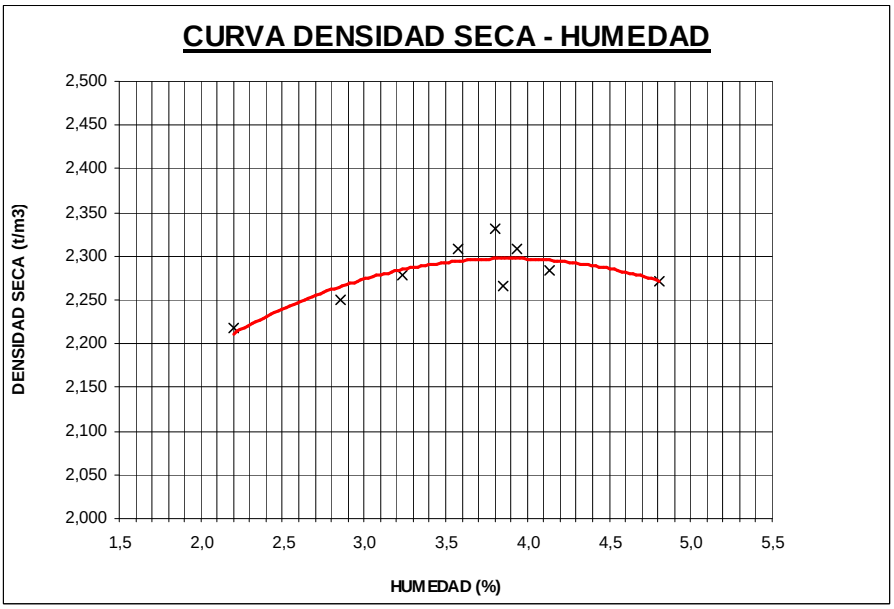


Figura 193: Curva Densidad seca - Humedad.

A la vista de los resultados anteriores se deducen los siguientes datos:

- Humedad Óptima = 3.9
- Densidad Máxima = 2.3 t/m^3

5.2.1.9 California Bearing Ratio (CBR)

Se procede anotando la presión necesaria para lograr unas deformaciones de 0; 0.25; 0.5; 0.75; 1.00; 1.5; 2.00; 2.5; 3.00; 4.00; 5.00; 7.50; 10.00 y 12.5. Finalizado éste proceso se procede a determinar el CBR para las deformaciones 2.5 mm y 5 mm.

El índice viene dado por la relación:

$$CBR = \frac{CARGA\ UNITARIA\ DEL\ ENSAYO}{CARGA\ UNITARIA\ DEL\ PATRON}$$

obteniendo los siguientes resultados:

Molde 1 para 15 golpes

Penetración (mm)	Lectura (kN)	Lectura (kg)	CBR
0,00	0,00	0	
0,25	0,54	55	
0,50	0,92	94	
0,75	1,38	141	
1,00	1,82	186	
1,50	2,86	292	
2,00	3,78	385	
2,50	4,62	471	**35**
3,00	5,34	544	
4,00	7,69	784	
5,00	9,57	976	**48**
7,50	13,61	1387	
10,00	17,28	1761	
12,50	20,07	2046	
			48

Tabla 138: Lectura CBR para una compactación de 15 golpes.

Se toma como resultado de CBR el valor mayor por lo que el CBR será de 48.

Molde 1 para 30 golpes

Penetración (mm)	Lectura (kN)	Lectura (kg)	CBR
0	0,00	0	
0,25	0,74	75	
0,50	1,41	144	
0,75	2,10	214	
1,00	2,71	276	
1,50	4,05	413	
2,00	5,18	528	
2,50	6,37	649	**48**
3,00	7,43	757	
4,00	9,96	1015	
5,00	11,93	1216	**60**
7,50	17,03	1736	
10,00	21,96	2239	
12,50	26,83	2735	
			60

Tabla 139: Lectura CBR para una compactación de 30 golpes.

Se toma como resultado de CBR el valor mayor por lo que el CBR será de 60.

Molde 1 para 60 golpes

Penetración (mm)	Lectura (kN)	Lectura (kg)	CBR
0	0,00	0	
0,25	1,46	149	
0,50	1,93	197	
0,75	2,83	288	
1,00	3,40	347	
1,50	3,82	389	
2,00	4,96	506	
2,50	6,27	639	**47**
3,00	7,67	782	
4,00	10,63	1084	
5,00	13,64	1390	**68**
7,50	21,59	2201	
10,00	29,47	3004	
12,50	36,80	3751	
			68

Tabla 140: Lectura CBR para una compactación de 60 golpes.

Se toma como resultado de CBR el valor mayor por lo que el CBR será de 68.

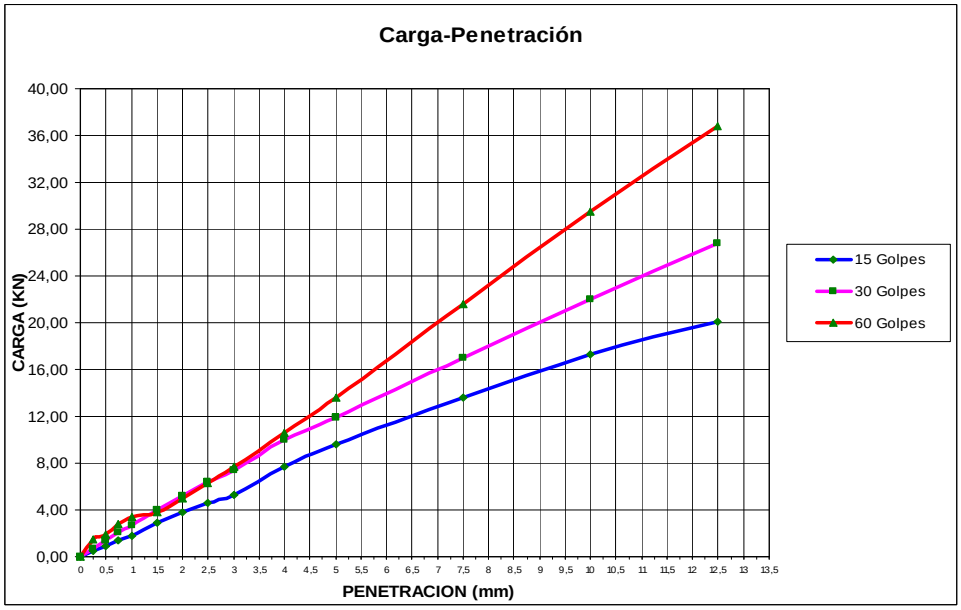


Figura 194: Curva Carga - Penetración.

Gráfico Densidad – CBR

Se procede a graficar para cada densidad seca los valores del CBR para obtener su valor al 100% y al 95 %.

DENSIDAD	CBR
2,038	48
2,148	60
2,240	68

Tabla 141: Valores Densidad seca - CBR.

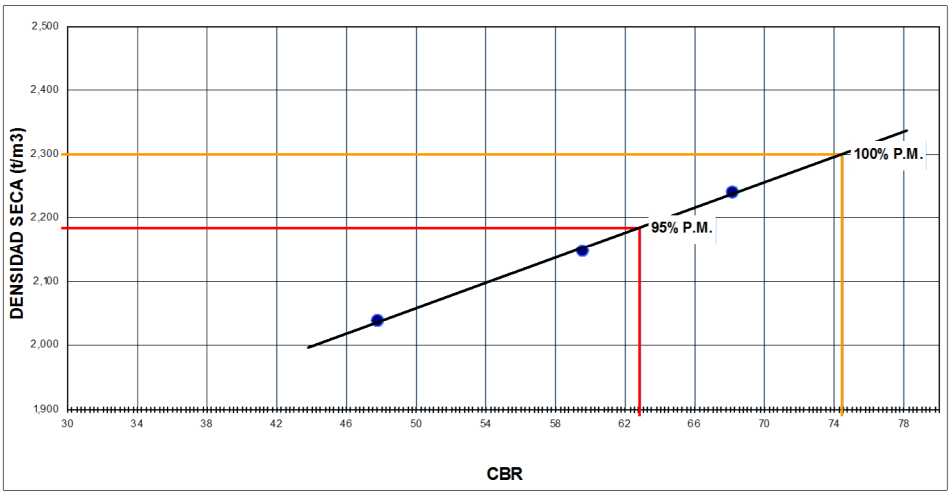


Figura 195: Curva Densidad seca - CBR.

CBR DE PROYECTO		
100 % P.M.	**2,300**	**74**
95 % P.M.	**2,185**	**63**

Tabla 142: CBR de proyecto.

Gráficamente se puede determinar cada valor de CBR; obteniendo un valor de CBR 74 y 63 para una densidad Proctor Modificado del 100% y el 95% respectivamente.

5.3 ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS INDUSTRIALES PROVENIENTES DE ESCORIAS DE FERROSILICOMANGANESO EN CAPAS BASE Y SUBBASE

La caracterización realizada en el apartado anterior muestra el potencial que presentan las escorias de ferrosilicomanganeso como sustituto del árido natural, por lo que ahora se pretende definir la idoneidad o no del empleo de este subproducto siderúrgico en capas de base y subbase.

Para ello, en este apartado se muestran en primer lugar los husos granulométricos exigidos por el PG-3 que un árido debe cumplir para poder ser utilizado como zahorra artificial en capas de base y subbase.

Finalmente se realiza un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en la caracterización granulométrica realizada en el apartado anterior y los valores exigidos por la normativa.

5.3.1 HUSOS GRANULOMÉTRICOS DE LAS ZAHORRAS ARTIFICIALES

En el informe citado anteriormente se realizó un análisis granulométrico comparando los resultados obtenidos en el capítulo 4 con los valores indicados en el "PG-3: Parte 5ª FIRMES Y PAVIMIENTOS". Dicha norma indica que la granulometría del material, según la UNE-EN 933-1, deberá estar comprendida dentro de alguno de los husos fijados en la siguiente tabla:

TIPO DE ZAHORRA ARTIFICIAL	HUSO GRANULOMÉTRICO ZA (% MASA). TAMICES UNE-EN 933-2								
	40	25	20	8	4	2	0,500	0,250	0,063
ZA 25	100	100-75	90-65	63-40	45-26	32-15	21-7	16-4	9-0
ZA 20	-	100	100-75	73-45	54-31	40-20	24-9	18-5	9-0
ZAD 20	-	100	100-65	58-30	37-14	15-0	6-0	4-0	2-0

Tabla 143: Husos granulométricos de las zahorras artificiales.

5.3.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO COMPARATIVO

A lo largo de este apartado se muestran los resultados obtenidos de la comparación de las granulometrías de las escorias de ferroaleaciones con los husos marcados por el PG3.

5.3.2.1 Uso como Zahorra ZA 25

Se analizó en un principio el material para fabricar una zahorra ZA 25 con las siguientes escorias de ferrosilicomanganeso: 12-18 molida y cribada, 12-18 sólo cribada, molida sin cribar. A continuación se incluye una tabla resumen de los resultados obtenidos en capítulos anteriores y los husos superior e inferior de una ZA 25.

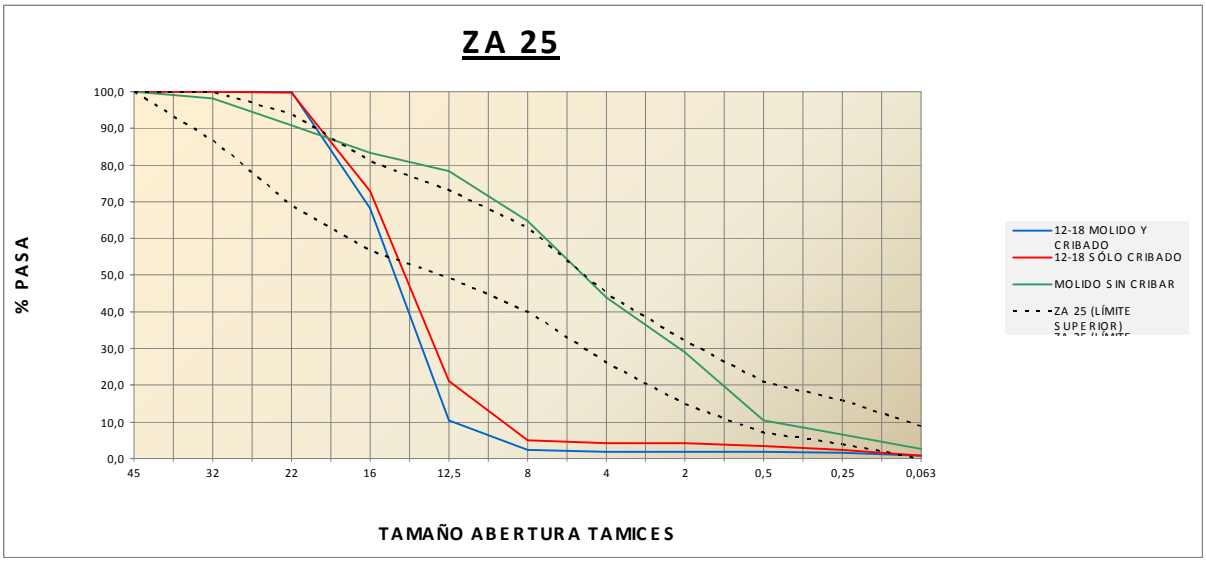


Figura 196: Comparativa ZA 25 y escorias de SiMn.

Como se puede observar la zahorra artificial debe presentar una granulometría uniforme. De los tres materiales analizados es la escoria molida y sin cribar la que mejor se ajusta a los límites granulométricos. Aun así, no se encuentra dentro de los límites en toda su granulometría por lo que en el caso de querer utilizarla sería necesario realizar unos estudios complementarios.

5.3.2.2 Uso como Zahorra ZA 20

Más tarde, se analizó el material para ser utilizado como una zahorra ZA 20 con las mismas escorias de ferrosilicomanganeso que en el caso anterior. A continuación se incluyen los datos necesarios para realizar el citado análisis:

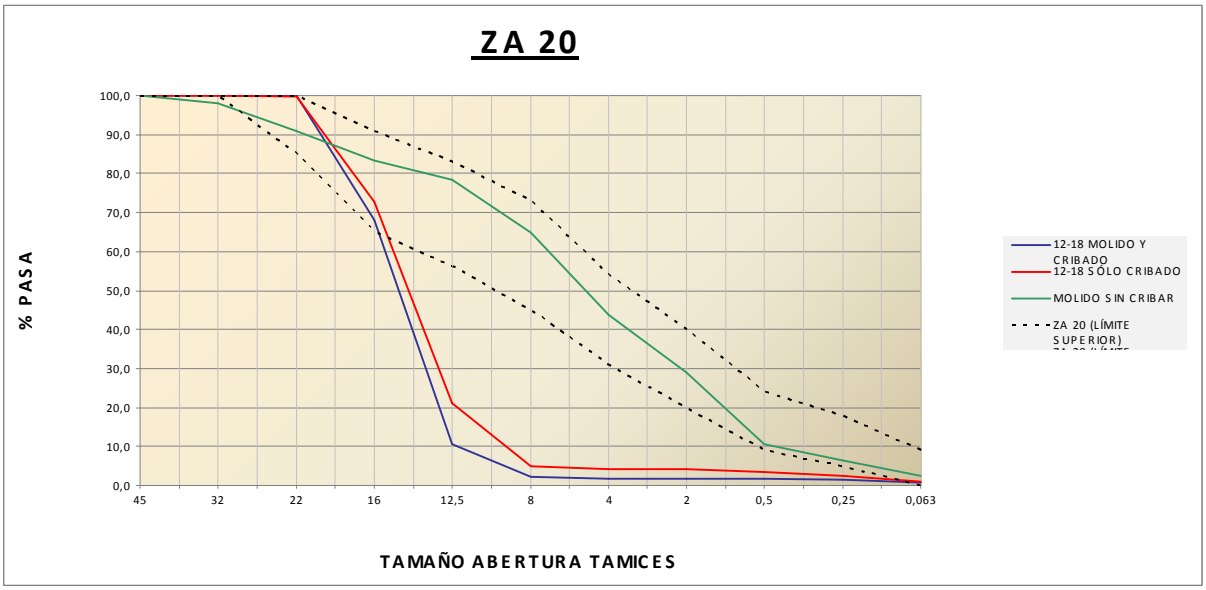


Figura 197: Comparativa ZA 20 y escorias de SiMn.

En este caso se puede observar como la escoria molida y sin cribar se encuentra en todo momento dentro del huso de la ZA 20, sin embargo no cumple con la media por lo que sería un material apto para continuar con su caracterización. Por otra parte, podemos ver cómo, al igual que antes, las escorias que han sido cribadas no son adecuadas para ser utilizadas como zahorras.

5.3.2.3 Uso como Zahorra ZAD 20

Finalmente se analizó la posibilidad de emplear las escorias como zahorras artificiales drenantes (ZAD 20), los resultados obtenidos fueron similares a los de la ZA 25. A continuación se detallan los resultados las granulometrías empleadas en los ensayos y su representación gráfica:

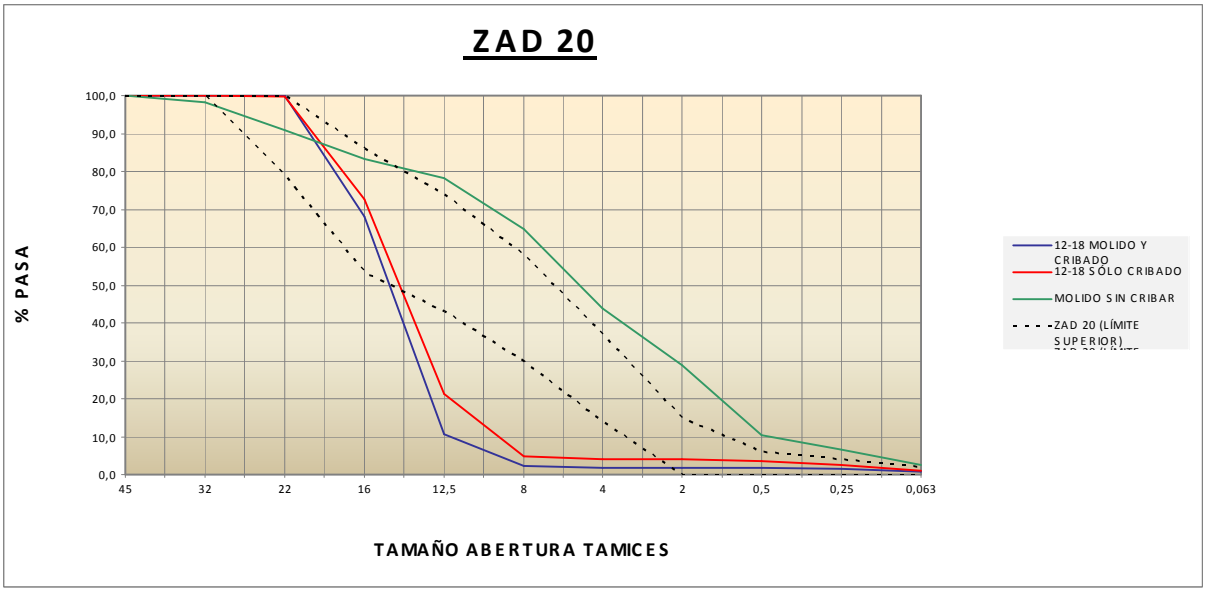


Figura 198: Comparativa ZAD 20 y escorias de SiMn.

5.4 CONCLUSIONES

Tras la observación de los resultados, podemos extraer las siguientes conclusiones:

El material en cuestión presenta parámetros apropiados e inapropiados para su empleo como zahorra artificial. Debido a que los ensayos fueron realizados para distintas fracciones granulométricas se presentan las conclusiones de manera individualizada para cada una de ellas.

La fracción Molido y Cribado 12-18 posee un **coeficiente de forma** menor por lo que al presentar menos partículas no cúbicas es un material más resistente y puede ser utilizado como Zahorra Artificial.

El material molido sin cribar presenta menos huecos con respecto al material sólo cribado por lo que su **densidad aparente** es mayor. Al tener este material una densidad mayor y una absorción menor, responderá mejor frente a las solicitaciones, por lo que podemos concluir que el material molido sin cribar es el más adecuado como zahorra artificial.

El material ensayado muestra muy poca presencia de **finos**. El valor máximo que impone la norma para que un material pueda ser utilizado en zahorras es del 30%. Todos los ensayos realizados muestran que se cumple ampliamente este valor.

El valor máximo de **índice de lajas** que un material puede presentar para ser utilizado como zahorra artificial es de 35, por lo que es un material apto.

El material molido y cribado 12-18 VITRIFICADO no entrega un **coeficiente de Los Ángeles** adecuado para zahorra artificial por sobrepasar el máximo exigido. Por el contrario, al realizar el mismo ensayo sobre la escoria molida y cribada 12-18 MATE se obtiene un valor adecuado para ser utilizada. Por otro lado, el material sólo cribado se encuentra en el límite exigido para las zahorras artificiales por lo que se recomienda analizar nuevamente este material y contrastar los resultados obtenidos.

Con respecto al **CBR**, el valor exigido para zahorras artificiales no debe ser menor a 20, de manera que la fracción de material ensayado cumple con las especificaciones de CBR.

Cabe mencionar que a pesar de que las características físicas de algunos materiales permiten su utilización como zahorra artificial, lamentablemente no se cumplen las especificaciones sobre la **granulometría**. Ninguno de los materiales estudiados cumple con los husos granulométricos establecidos por la normativa.

CAPÍTULO 6.
PURGAS DE LA CALCINACIÓN DE LA CALIZA: ÁRIDOS Y HORMIGONES

En este capítulo se pretende caracterizar las purgas de calcinación de la caliza generadas por la empresa Solvay, así como la viabilidad técnica de su empleo en la fabricación de hormigones.

El capítulo se ordena de la siguiente manera:

- Procedencia de las purgas de calcinación de la caliza estudiadas.
- Caracterización de las purgas.
- Estudio de viabilidad técnica para el empleo en la fabricación de hormigones.
- Conclusiones obtenidas.

6.1 INTRODUCCIÓN

Las purgas de calcinación de la caliza objeto de análisis en esta Tesis Doctoral son las producidas por la empresa Solvay en el municipio de Torrelavega, Cantabria.

La planta química de Solvay tiene una producción anual aproximada de 80.000 toneladas de purgas. Las instalaciones se encuentran junto a la autovía A-67, a 5 kilómetros de la ciudad de Torrelavega y 25 de Santander.

6.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS PURGAS DE CALCINACIÓN DE LA CALIZA

Con el fin de caracterizar las purgas de calcinación de la caliza de la empresa Solvay, se realizaron aquellos ensayos que se consideran necesarios de cara a definir áridos que van a ser empleados en la fabricación de hormigones. Los ensayos desarrollados fueron los siguientes:

Caracterización física y mecánica

- Identificación visual
- Análisis granulométrico
- Humedad
- Machacabilidad

Caracterización química y mineralógica

- Análisis químico elemental
- Difracción de Rayos X

En los siguientes apartados se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos. Se incluyen, además, los resultados del análisis de humedad realizado al resto de componentes necesarios para la fabricación de la mezcla.

6.2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA

6.2.1.1 Identificación visual

Un análisis visual sirvió para detectar la variedad de componentes que constituyen en el material recibido. El material encontrado en mayor cantidad es de naturaleza caliza; en menor cantidad se hallaron partículas de carbón procedentes, probablemente del proceso de calcinación; y en último lugar se encontraron pequeños fragmentos de cal libre. La siguiente imagen muestra los diferentes componentes encontrados.

Figura 199: Distintos componentes encontrados tras el examen visual.

6.2.1.2 Análisis granulométrico

El análisis granulométrico del material recibido arrojó los siguientes resultados:

Abertura (mm)	Retenido (gr)	Retenido (%)	Pasa acum. (%)
12,7	1112	35,19	64,81
9,52	614,2	19,44	45,37
6,35	410,78	13	32,37
4,76	216,4	6,85	25,52
<4,76	806,22	25,52	74,48

Tabla 144: Granulometría de las purgas.

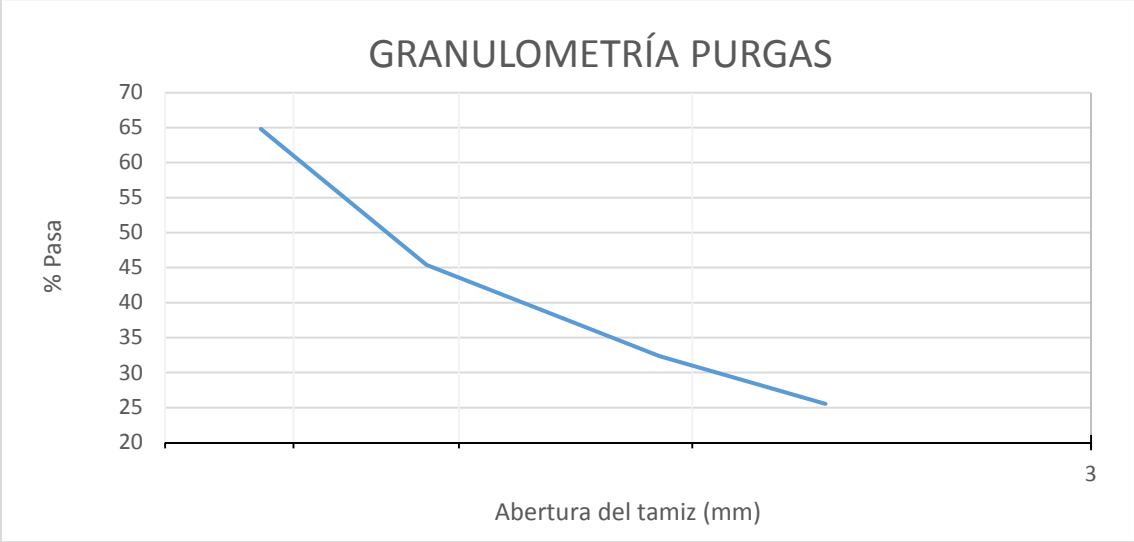


Figura 200: Granulometría de las purgas.

6.2.1.3 Humedad

Finalmente, se realizaron ensayos de humedad sobre los áridos. En la siguiente tabla se muestran los pesos anteriores y posteriores al proceso de secado de los diferentes áridos, así como el porcentaje de humedad.

Muestra	Peso Humedo	Peso Seco	Humedad (%)
Arena silícea	1644,2	1379,2	19,21
Gravilla caliza	1269,5	1257	0,99
Grava caliza	2218,3	2183,6	1,59
Purga Solvay	2232,9	2145,1	4,09
Arena caliza	1350,8	1307	3,35

Tabla 145: Humedad de los áridos.

Como era de esperar, la mayor humedad era presentada por la arena silícea y la menor por la gravilla caliza.

6.2.1.4 Índice de machacabilidad

Con el objetivo de conocer la resistencia a compresión del árido, se realizaron ensayos de machacabilidad sobre las fracciones 10-14 y 14-20. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos.

Fracción	Material retenido (gr)	Peso muestra (gr)	Índice de machacabilidad (%)
10-14	2162,3	3482,7	37,91%
14-20	2158,9	3476,5	37,90%

Tabla 146: Resultado del ensayo de machacabilidad para las dos fracciones analizadas.

Cabe destacar que el índice de machacabilidad resulta muy similar en las dos fracciones, por lo que en principio se puede pensar que el tamaño de árido no afecta a este valor.

6.2.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA

6.2.2.1 Análisis químico elemental

Por otra parte, se realizó un análisis químico elemental cuantitativo sobre las purgas de calcinación de la caliza. Los valores medios obtenidos tras el ensayo se muestran a continuación de manera tabular:

Elemento	Porcentaje en peso (%)	Porcentaje atómico (%)
O	33,52	55,69
Si	0,74	0,70
Ca	65,74	43,60

Tabla 147: Análisis químico elemental de las purgas.

6.2.2.2 Difracción de Rayos X

Con el fin de determinar la cristalografía de las muestras, se llevó a cabo un análisis mineralógico mediante la técnica de la difracción de rayos X. El ensayo se realizó sobre dos muestras distintas, con tamaños máximos de grano diferente. Una fracción fina con partículas menores que 1,125 mm y una fracción gruesa con partículas mayores que 1,125 mm.

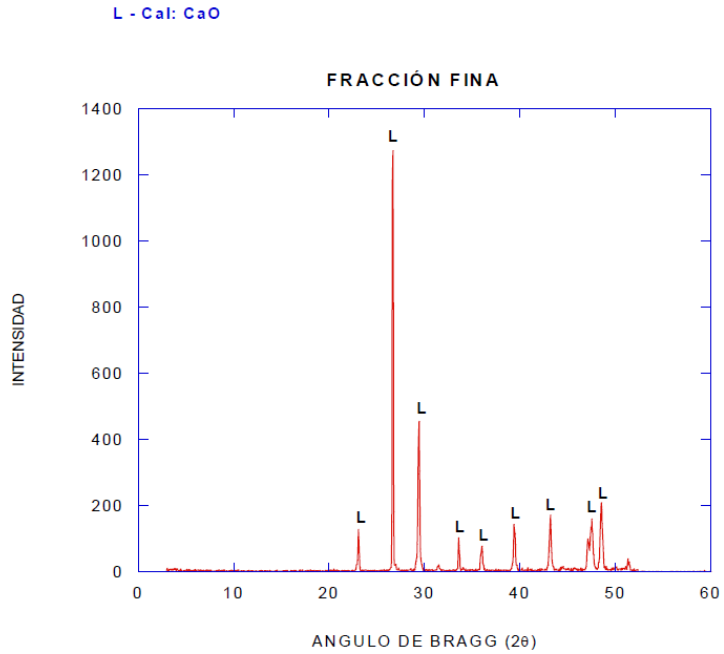


Figura 201: Composición mineralógica de la fracción fina. L-Cal: CaO.

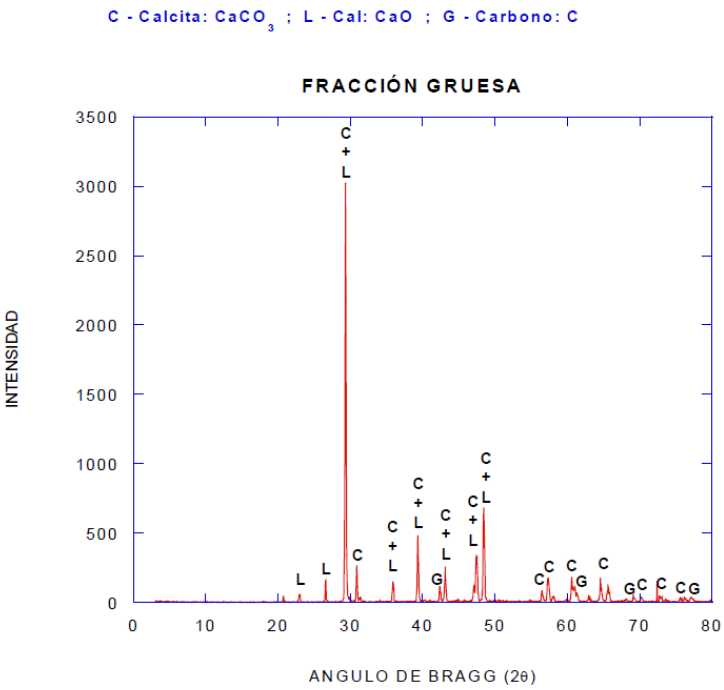


Figura 202: Composición mineralógica de la fracción gruesa. C.Calcita: $CaCO_3$; L-Cal: CaO y G-Carbono: C.

6.3 DESARROLLO DE HORMIGONES CON PURGAS DE CALCINACIÓN DE LA CALIZA

La caracterización realizada en el apartado anterior fue realizada con el fin de estudiar la posibilidad de fabricar hormigones en los que se sustituya el árido natural por las purgas de calcinación de la caliza.

Para tal fin, una vez realizada la caracterización de este subproducto industrial, en primer lugar se definieron las dosificaciones de los hormigones a fabricar. A continuación, se realizó la mezcla, preparando las probetas y caracterizando la mezcla obtenida.

Una vez el hormigón había endurecido se realizó el ensayo de compresión uniaxial con el fin de caracterizar su comportamiento.

Finalmente, y tras las observaciones realizadas durante todo el proceso se decidió hacer un seguimiento visual de las probetas.

6.3.1 DEFINICIÓN DE LAS DOSIFICACIONES

El primer paso fue definir las cuatro dosificaciones a fabricar. La primera de ellas fue un hormigón de control que sirviera como punto de comparación para los hormigones fabricados con purgas. A continuación se presentan las cuatro dosificaciones:

Dosificación Hormigón de control – 20 litros	
MATERIAL	**MASA (kg)**
Arena Caliza 0/4	16,10
Arena Sílice	3,00
Árido 10/20	9,60
Árido 4/10	9,60
Cem II-AM 42.5 R	3,30
Agua	3,50

Tabla 148: Dosificación del hormigón de control para una amasada de 20 l.

Dosificación I Hormigón con purgas – 20 litros	
MATERIAL	**MASA (kg)**
Purga	38,30
Cem II-AM 42.5 R	3,30
Agua	3,50

Tabla 149: Dosificación del hormigón 100% de purgas para una amasada de 20 l.

Dosificación II Hormigón reciclado con purgas y arena de sílice – 20 litros	
MATERIAL	**MASA (kg)**
Purga	35,30
Arena Sílice	3,00
Cem II-AM 42.5 R	3,30
Agua	2,00

Tabla 150: Dosificación del hormigón con purgas y arena de sílice para una amasada de 20 l.

Dosificación III Hormigón reciclado con purgas y arena caliza – 20 litros	
MATERIAL	**MASA (kg)**
Purga	35,30
Arena Caliza	5,00
Cem II-AM 42.5 R	3,30
Agua	2,50

Tabla 151: Dosificación del hormigón con purgas y arena caliza para una amasada de 20 l.

6.3.2 FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

6.3.2.1 Hormigón en estado fresco

En la siguiente tabla se recogen diversos parámetros medidos en el hormigón en estado fresco para cada una de las dosificaciones:

	Tª ambiente (º C)	Tª hormigón inicial (º C)	Tª hormigón final (º C)	Asiento del cono de Abrams (cm)
Dosificación de control	11	11,5	12	11
Dosificación I	7,5	10,0	10,3	Sin consistencia
Dosificación II	7,5	10,5	11,0	14
Dosificación III	8	11,5	12,0	6

Tabla 152: Caracterización fresco fabricado con purgas.

Durante la fabricación del hormigón con *Dosificación I* se observó segregación de los áridos y muy poca consistencia. Esto puede ser debido a la falta de árido fino, por lo que se decidió desechar el hormigón y realizar dos nuevas dosificaciones, una utilizando una arena de tipo silíceo y otra de naturaleza caliza.

La *Dosificación II* corresponde con el hormigón fabricado con arena silícea, y se observó que la mezcla presentaba un buen aspecto

La *Dosificación III* corresponde con el hormigón fabricado con arena caliza. En este caso se inició la amasada con 3 kg de dicha arena y más tarde se decidió añadir 2 kg más de arena junto con otros 0,4 litros de agua. En estas condiciones, el hormigón presentó un buen aspecto.

Figura 203: Aspecto del hormigón reciclado fresco, *Dosificación I*.

Figura 204: Asiento del hormigón reciclado, *Dosificación I*.

6.3.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN UNIAXIAL

Una vez las probetas de hormigón endurecieron se realizaron ensayos de compresión uniaxial, según la Norma UNE-EN 12390-3. El ensayo, se llevó a cabo en probetas con 7 días de edad, utilizando una prensa servohidráulica Suzpecar de 1500 kN de capacidad, a una velocidad de 9,8 kN/s. El ensayo se realizó hasta la rotura, obteniendo los siguientes resultados:

HL15 Patrón						
Compactación	Fecha de ensayo	Fecha de fabricación	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Rotura (ton)	Resistencia a compresión (MPa)
Picado con barra	01/02/2009	25/01/2010	300	150	7,5	4,16
Picado con barra	01/02/2009	25/01/2010	300	150	7,6	4,21

Tabla 153: Resultados del ensayo de compresión uniaxial en hormigón patrón.

HL15 Silícea						
Compactación	Fecha de ensayo	Fecha de fabricación	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Rotura (ton)	Resistencia a compresión (MPa)
Picado con barra	02/02/2009	26/01/2010	300	150	12,5	6,93
Picado con barra	02/02/2009	26/01/2010	300	150	11,6	6,43

Tabla 154: Resultados del ensayo de compresión uniaxial en hormigón con arena silícea.

HL15 Caliza						
Compactación	Fecha de ensayo	Fecha de fabricación	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Rotura (ton)	Resistencia a compresión (MPa)
Picado con barra	01/02/2009	25/01/2010	300	150	7,5	5,71
Picado con barra	01/02/2009	25/01/2010	300	150	7,6	6,38

Tabla 155: Resultados del ensayo de compresión uniaxial en hormigón con arena caliza.

A continuación, se muestra un detalle del montaje en la máquina de ensayo.

Figura 205: Probeta normalizada en prensa.

6.3.4 SEGUIMIENTO VISUAL DE LAS PROBETAS

Tras 24 horas de curado se observó una fuerte retracción en las probetas de control y en las fabricadas con purgas. Por ello, se consideró conveniente realizar un seguimiento visual de todas las probetas.

Una vez transcurridos 5 días en la cámara de humedad se detectó el descascarillamiento en todas aquellas probetas en las que el hormigón había sido fabricado con purgas. Tras detectar este problema se concluyó que el efecto era debido a las purgas por tener un alto contenido de cal libre. Esta cal libre se hidrata produciendo procesos expansivos.

A continuación se muestran una serie de imágenes en las que se puede apreciar el descascarillamiento.

Figura 206: Hormigón endurecido tras 5 días de curado.

Figura 207: Detalle del hormigón endurecido tras 5 días de curado en humedad.

Figura 208: Detalle de uno de los descascarillamientos.

Figura 209: Detalle de un proceso de expansión tras 5 días de curado en humedad.

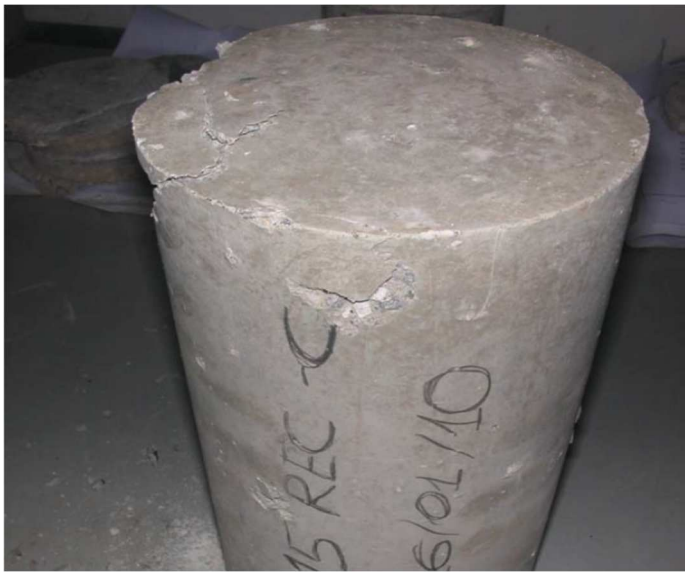


Figura 210: Probeta tras10 días de curado.

Figura 211: Descascarillamiento tras10 días de curado.

Figura 212: Estado del hormigón tras10 días de curado.

6.4 CONCLUSIONES

Basándose en los resultados obtenidos en la elaboración del informe indicado previamente, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

El **análisis visual** permitió identificar una variedad de componentes en las purgas recibidas. El material más numeroso eran gravas de naturaleza caliza, mientras que el encontrado en menor cantidad era fragmentos de carbón. Estos fragmentos proceden, probablemente, del proceso de calcinación de la caliza. También se encontraron pequeños nódulos blancos compuestos posiblemente por cal libre. Las proporciones de las distintas fracciones son muy parecidas.

Los ensayos de **composición química** muestran que el elemento más común en las muestras analizadas es el calcio, con 65%. Después de este, es el oxígeno combinado el más común, con 33%. También se han encontrado pequeñas trazas de silicio.

También se realizó un **análisis mineralógico** por difracción de Rayos X. Se llevó a cabo en dos fracciones: una gruesa y otra fina. En la fracción gruesa se encontró Calcita ($CaCO_3$), Cal (CaO) y Carbón (C). Sin embargo, en la fracción fina, la mayor parte del material se presenta en forma de Cal (CaO).

En lo que se refiere a las propiedades mecánicas del material, del ensayo de **machacabilidad** se obtuvo un índice del 39% para las mismas dos fracciones analizadas, fracción gruesa y fracción fina. Este valor es inferior al que se podría obtener al ensayar áridos de naturaleza caliza. Esto es se debe a que las purgas están compuestas por árido calizo y otros materiales de mayor friabilidad como pueden ser el carbón y la cal.

De las dosificaciones fabricadas podemos concluir que aquella en la que se sustituyó el 100% del árido natural por purgas no es viable por la falta de finos. Por otra parte, aquellas en las que se incorporó arena caliza o arena de sílice, presentaron una buena consistencia y aspecto.

La **resistencia a compresión** obtenida a los 7 días del hormigón patrón, del fabricado con purgas y arena de sílice y del fabricado con purgas y arena caliza es 4,2; 6,7 y 6,0 respectivamente.

Se observó una fuerte retracción durante las primeras 24 horas de curado en las probetas del hormigón de control y las del hormigón fabricado con purgas. Debido a esto se decidió hacer un seguimiento de estos parámetros.

A los 5 días de curado se observó en todas las probetas en las que se utilizaron purgas para su fabricación un **descascarillamiento** en su superficie. A los 10 días de curado en la cámara de humedad este efecto se hizo más evidente. Se achaca este problema a procesos expansivos provocados por la hidratación de la cal libre presente en las purgas de calcinación de la caliza

Finalmente se concluye que a pesar de los buenos resultados obtenidos a

priori de la resistencia a compresión, debe descartarse el empleo de purgas provenientes de los residuos de calcinación por el efecto expansivo que estas tienen sobre el hormigón.

CAPÍTULO 7.
CONCLUSIONES GENERALES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1 CONCLUSIONES GENERALES

Escorias negras

Tras la elaboración de esta Tesis Doctoral se puede concluir que la escoria negra tras un proceso de valorización adecuado es un árido con unas prestaciones físicas, químicas y mecánicas que puede rivalizar con los áridos naturales tradicionales.

Ha quedado demostrado que tras el adecuado tratamiento el potencial expansivo de las mismas es mínimo por lo que no debería ser una razón para argumentar su no utilización en firmes de carreteras.

El elevado coeficiente de desgaste de Los Ángeles hace que el uso de la escoria sea especialmente deseable en capas de rodadura donde las condiciones del tráfico sean muy exigentes. Además, se puede mejorar esta resistencia mediante el molido de la escoria.

El principal inconveniente de este material puede ser su alta densidad, si bien es cierto que utilizado en determinadas aplicaciones puede suponer una ventaja.

La falta de finos que presenta la escoria por debajo de 0,5 mm no es un problema porque se puede encajar fácilmente dentro de los husos del PG-3 complementándola con arena natural.

En lo que se refiere a la fabricación de mezclas bituminosas, los resultados obtenidos en los ensayos realizados aconsejan su utilización en la capa de rodadura.

Observando los resultados obtenidos en los ensayos del CRT se aprecia como en las mezclas bituminosas fabricadas con escorias negras los valores son mucho mayores que en las mezclas convencionales de sílice, 70,6 frente a 59,2. De aquí se desprende que su empleo está aconsejado tanto por sus características iniciales como por su buena evolución en el tiempo.

Por otro lado, la medida del CRD en las instalaciones del Grupo Emilio Bolado demuestra como los valores obtenidos evolucionan positivamente, aumentando de forma general en 10 puntos en el transcurso de cuatro años.

Con la realización de otros ensayos se ha demostrado que el aporte de filler de cemento incrementa la resistencia a tracción indirecta si las probetas han sido sumergidas. Esto es debido a que la aportación de cal realizada al añadir filler de cemento reacciona con el agua aumentado de este modo la resistencia de la mezcla.

La fabricación de hormigones con árido siderúrgico ha evidenciado que la baja porosidad de las escorias reduce la absorción del hormigón, haciendo necesaria una mayor relación agua/cemento para obtener una consistencia adecuada

Además, la sustitución del 100% del árido natural por escorias no supone una pérdida importante en la resistencia a tracción. Sin embargo, sí que se aprecia

un pérdida aproximada del 15% de la resistencia a compresión.

Se comprueba que la sustitución de los áridos naturales por escorias en la fabricación de mezclas bituminosas y hormigones es una opción a considerar cuando el aumento de la densidad de la mezcla debido a la alta densidad de la escoria no suponga un problema.

El estudio económico realizado muestra que el coste de producción del árido siderúrgico para su utilización en capas de rodadura presenta ventajas competitivas frente a áridos naturales como la sílice y la ofita.

Por otra parte, se ha demostrado que la distancia desde los centros productivos de los áridos naturales hasta las plantas productoras de mezclas bituminosas es un factor a tener en cuenta ya que puede suponer un importante incremento del coste total debido al transporte del material.

Como conclusión final se puede decir que los áridos siderúrgicos provenientes de escorias negras de arco eléctrico son adecuadas para los usos pretendidos aportando ventajas significativas frente a áridos naturales desde los puntos de vista técnicos, económico y medioambiental.

Escorias de ferrosilicomanganeso

Los resultados obtenidos en esta Tesis Doctoral muestran que las escorias de ferrosilicomanganeso tienen unas propiedades mecánicas y químicas que permiten su empleo como zahorra artificial.

La baja presencia de finos hace que las granulometrías obtenidas tras los procesos de cribado y machaqueo no se ajusten a los husos granulométricos marcados por la normativa. Esto se debe corregir complementándolas con áridos naturales.

Para poder utilizar las escorias de ferrosilicomanganeso como zahorra artificial es necesario machacar y cribar el material para poder realizar más tarde una dosificación que se adecue a los husos granulométricos de la normativa.

Los áridos provenientes de las escorias de ferrosílicomanganeso son aptos desde el punto de vista técnico para las aplicaciones estudiada y suponen una importante ventaja medioambiental frente a los áridos naturales que pueden sustituir.

Purgas de calcinación de la caliza

El análisis realizado mostró que las purgas de calcinación de la caliza están compuestas principalmente por gravas de naturaleza caliza con, entre otras, pequeños nódulos blancos compuestos por cal libre.

Los ensayos realizados sobre hormigones fabricados con este residuo

arrojaron unos resultados prometedores, alcanzándose resistencias a compresión mayores que en hormigones convencionales.

Sin embargo, tras varios días de curado se produce un descascarillamiento de las probetas achacado a procesos expansivos provocados por la presencia de cal libre en las purgas.

Por lo tanto, se puede concluir que a pesar de los buenos resultados obtenidos a priori de la resistencia a compresión, debe descartarse el empleo de purgas provenientes de los residuos de calcinación por el efecto expansivo que estas tienen sobre el hormigón.

7.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Escorias negras

El futuro de este material se presenta a todas luces muy prometedor en el sector de la construcción y especialmente en la obra civil.

Sin duda, siendo su precio competitivo con los áridos naturales como ha quedado demostrado, no tardaremos mucho tiempo en ver las escorias de forma generalizada en los firmes de nuestras carreteras, autopistas y autovías.

El estudio de la evolución de la resistencia al deslizamiento y en general la durabilidad de mezclas bituminosas constituidas con áridos siderúrgicos comparadas otro tipo de mezclas bituminosas constituidas por áridos ofíticos u otros es una de las fututas líneas de investigación.

También sería interesante comprobar su valía en mezclas semidensas, en microaglomerados en frío o en tratamientos superficiales de mejora de la adherencia.

En relación a la fabricación de hormigones con este tipo de residuos, se deben buscar aplicaciones en las que las ventajas aportadas en relación a su elevada densidad hagan viable su empleo demostrando su durabilidad a largo plazo.

Escorias de ferrosilicomanganeso

Las características mecánicas presentadas por estos materiales demuestran su potencial. El futuro de las escorias de ferrosilicomanganeso pasa por la búsqueda de una dosificación que permita su utilización como zahorras artificiales.

Esto se puede lograr ya sea mezclando de manera correcta las distintas fracciones obtenidas al cribar el material o bien añadiendo las cantidades adecuadas de árido natural que supla las necesidades granulométricas de las propias escorias.

Una futura línea de investigación es su empleo como parte integrante de mezclas bituminosas mezcladas con otras fracciones gruesas de áridos naturales.

Purgas de calcinación de la caliza

Las purgas de calcinación de la caliza han demostrado no ser un residuo técnicamente viable para la fabricación de hormigones.

A modo de ejemplo, el futuro de este residuo en ingeniería civil podría pasar por su empleo en la estabilización de suelos.

REFERENCIAS

Allahverdi A, Ahmadnezhad S (2013). “Mechanical activation of silicomanganese slag and its influence on the properties of Portland slag cement”.

Arabani M, Azarhoosh AR (2012). “The effect of recycled concrete and Steel slag on the dynamic properties of asphat mixtures”.

Arm A, Frogner-Knokum P, Lindqvist J, Suer P (2009). “Reproducing ten years of road ageing – Accelerated carbonatation and leaching of EAF steel slag”.

ASEFMA (2009). “Utilización de áridos siderúrgicos de acería de horno eléctrico en capas de rodadura”.

ASEFMA (2014). “Análisis de la medida en laboratorio de la resistencia al deslizamiento de mezclas bituminosas con el equipo Wehner Schulze. Comparación con equipos de alto rendimiento empleados en campo”:

Asphalt Institute (1991). “Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente”.

Australasian Slag Association (2002). “A guide to the use of iron and steel slag in roads”.

Baldo N, Pasetto M (2010). “Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnance Steel slags”.

Baldo N, Pasetto M (2011). “Performace comparative analysis of stone mastic asphalts with eletric arc furnance Steel slag: a laboratory evaluation”.

Baldo N, Pasetto M (2013). “Fatigue performance of asphalt concrete made with Steel slags and modifies bituminous binders”.

Berridi I (2008). “Análisis de la influencia de residuos metalúrgicos como áridos en las propiedades del hormigón”.

CEDEX (2011). “Escorias de acería de horno de arco eléctrico”.

Environmental Protection Agency. Página web: “http://www.epa.gov/ epaoswer/non-hw/recycle/jtr/comm/sand.htm”.

Frías M, Sánchez MI, Uría A (2001). “Estudio de la inestabilidad en escorias negras de horno de arco eléctrico”.

Frías M, Sánchez de Rojas MI, Menéndez I, García de Lomas M, Rodríguez C (2005). “Propiedades de la escoria de SiMn como material puzolánico en la fabricación de cementos portland”.

Frías M, García de Lomas M, Sánchez de Rojas MI, Menéndez I, Rincón JM (2005). “Viabilidad de una escoria de ferroaleaciones para la elaboración de hormigones”.

Frías M, Sánchez de Rojas MI, Santamaría J, Rodríguez C (2005). “Recycling of silicomanganese slag as pozzolanic material in Portland cements: Basic and engineerig properties”.

Frías M, Rodríguez C (2007). “Effect of incorporating ferroalloy industry wastes as complementary cementing material on the properties of blended cement matrices”.

Frías M, Sánchez de Rojas MI, Rodríguez C (2008). “The influence of SiMn slag on chemical resistence of blended cement pastes”.

Gascón CM (2009). “Empleo de escorias de acería en capas granulares y mezclas bituminosas”.

Geiseler J (1996). “Use of stellworks salg in Europe”.

GITECO (2010). “Estudio del uso de escoria como zahorra artificial en la construcción de carreteras”.

GITECO (2010). “Informe de resultados de laboratorio: ensayo de sensibilidad al agua para el tramo de prueba del 16 de julio en las instalaciones de Emilio Bolado en Camargo”.

GITECO (2010). “Informe de resultados de laboratorio: ensayo para la determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa (UNE-EN 12697-12:2008)”.

GITECO (2011). “Empleo de escoria de arco eléctrico como árido en mezclas bituminosas”.

Grupo Emilio Bolado (2011). “Informe del desarrollo de mezclas asfálticas con áridos siderúrgicos (Escorias negras)”.

Haydée A (2000). “Aseguramiento de la calidad de mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de su ejecución”.

Hernández Puy J (2007). “Estudio de la estabilidad volumétrica, propiedades físicas y químicas de la escoria negra de acero de horno de arco eléctrico”.

IHOBE (1999). “Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones: Escorias de acería”.

Kesim AG, Toykay M, Yaman IO, Ozturk A (2013). “Properties of alinite cement produced by using soda sludge”.

Kraemer C (2004). “Ingeniería de Carreteras”.

LADICIM (2010). “Fabricación de hormigones incorporando residuos de calcinación de la empresa Solvay (Torrelavega)”.

LADICIM (2011). “Hormigón reciclado con escorias de fundición”.

Lancieri F, Losa M, Marradi A (200?). “Resistence to polishing and mechanical

properties of aggregates for asphalt concrete wearing courses".

Losañez M (2007). "Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil".

Mancio M (2001). "Contribuição ao estudo do fenômeno da instabilidade volumétrica das escórias de aciaria elétrica".

Manso JM, González JJ y Polanco JA (2004). "Electric Arc Furnace Slag in Concrete".

Manso JM, Setién J (2006). "Investigación de nuevos usos de las escorias de horno eléctrico de arco (EAF). La oportunidad de los hormigones".

Mehta PK, Monteiro PJM (1994). "Concreto: estructura, propiedades e materiais".

Monismith C, Finn F, Vallerga B (1989). "A comprehensive asphalt concrete mixturedesign system. Asphalt concrete mix design: development of more rational approaches".

Morino K, Iwatsuki E (1999). "Durability of concrete using electric arc furnace oxidizing slag aggregates". Monografía. Sheffield Academic Press.

Mroueh U, Whahlström M (2002). "By-products and recycled materials in earth construction in Finland".

Ortega V (1999). "Utilización de escoria siderúrgica para construir caminos y estabilizar suelos".

Ortega V (2011). "Aprovechamiento de escorias blancas (LFA) y negras (EAFS) de acería eléctrica en la estabilización de suelos y en capas de firmes de caminos rurales".

Pareuil P, Bordas Fracois, Joussein Emmanuel, Bollinger JC (2011). "Environmental Pollution; alteration of a Mn-rich slag in contact with soil: In-situ experiment during one year".

Pasetto M, Baldo N (2010). "Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnance slag".

Qiao X (2001). "Dry process processing caustic sludge to produce earth for earthwork".

Rodríguez J, Rodríguez D (1999). "Los procedimientos clásicos de fabricación de la sosa".

San José JT (2000). "Reutilización y valoración en obra civil de escorias de horno de arco eléctrico".

San José JT, Uría A (2001). "Escorias de horno de arco eléctrico (EHE) en mezclas bituminosas".

Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco (1999). "Libro

Blanco para la Minimización de Residuos y Emisiones. Escorias de Acería".

Sorlini S, Sanzeni A, Rondi L (2012). "Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures".

Traxler RN (1961). "El asfalto: su composición, propiedades y usos".

Vaisman Y, Kalinina E, Rudakova L, Glushankova I (2013). "Substantiation the use of sludge calcium carbonate for insulation of solid waste at landfill".

Vázquez E, Barra M (2001). "Reactividad y expansión de las escorias de acería de horno de arco eléctrico en relación con sus aplicaciones en construcción".

Wagaman T, Stanley WJ (2005). "Slag: the ultimate renewable resource".

ANEXOS

ANEXO A. ENSAYOS

ANEXO A.1 ESCORIAS NEGRAS

CARACTERIZACIÓN

Análisis Químico

Sercamat
SERVICIO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Servicios Científico Técnicos de Investigación
Laboratorios de I+D, Planta 4
Plaza de la Ciencia s/n
Universidad de Cantabria
39005 Santander

INFORME 10P002

Fecha:	10 de marzo de 2010	*Pedido*		*Referencia*	10P002

DATOS DEL CLIENTE

Persona de contacto	Daniel Castro Fresno				
Institución/Empresa	Universidad de Cantabria				
Departamento	Grupo de Tecnología de la Construcción				
Dirección	E.T.S.I.C.C.P. Avda. Los Castros s/n			C.P.	39005
Localidad	Santander		*Provincia*	Cantabria	
Teléfono	942 202053	*Fax* 942 201703	*e-mail*	castrod@unican.es	

CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

Tipo de ensayo	Análisis químico semicuantitativo mediante fluorescencia de rayos X y espectroscopia IR según las instrucciones de ensayo I-VaE-03 y I-VaE-05 respectivamente. Análisis mediante difracción de rayos X. (LADICIM)				
Nº de muestras	1	Nº de ensayos	3	Tipo de muestra	Escoria
Recepción de muestras	18/01/2010	Inicio del ensayo	18/01/2010	Fin de Ensayo	05/03/2010

RESULTADOS OBTENIDOS

1. ANÁLISIS QUÍMICO

Resultados en % en peso

MUESTRA	Fe2O3	CaO	SiO2	Al2O3	MnO	MgO	Cr2O3	TiO2	Resto
Escoria	34.8	29.1	16.5	7.55	5.09	4.42	1.03	0.53	<0.50

2. ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPÍA IR

En la figura 1 se representa el espectro IR de la muestra de escoria. A partir de la comparación de dicho espectro con espectros IR de muestras puras se identifica la presencia de los siguientes compuestos:

Bandas:
MgO (3424.56, 1643.84).
CaCO3 (2931.51, 2838.36, 871.23, 854.79)
FeO (2931.51, 2838.36, 706.85)
CaO (1424.66, 526.03)
MgO (1424.66)
Aluminosilicatos (997.26, 909.59)

Autorizado por: *David Hernández Manrique*
Director Técnico del SERCAMAT

El informe solo afecta a las muestras ensayadas
El informe no podrá reproducirse parcialmente sin la autorización escrita del laboratorio

Servicios Científico Técnicos de Investigación
Laboratorios de I+D, Planta -4
Plaza de la Ciencia s/n
Universidad de Cantabria
39005 Santander

INFORME 10P002

RESULTADOS OBTENIDOS

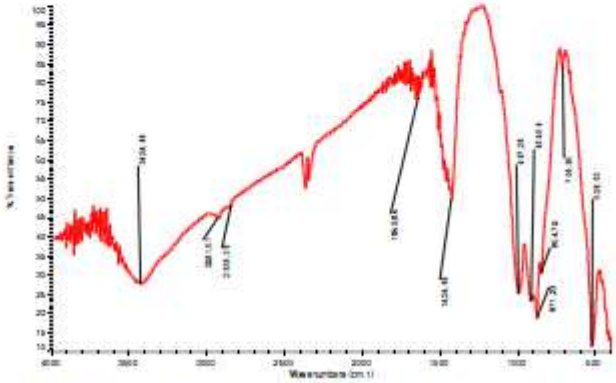
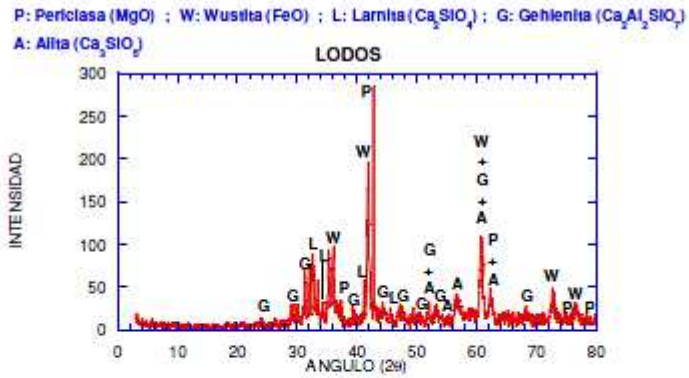


Figura 1. Espectro de absorción IR de las muestra de escoria.

3. DIFRACCIÓN DE RAYOS X



Autorizado por: *David Hernández Manrique*
Director Técnico del SERCAMAT

El informe solo afecta a las muestras ensayadas
El informe no podrá reproducirse parcialmente sin la autorización escrita del laboratorio

ESCORIAS NEGRAS

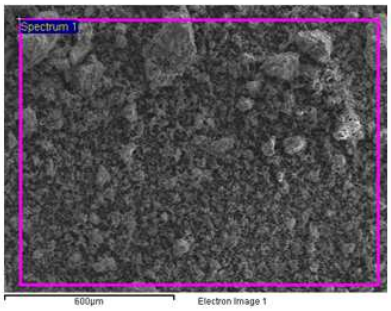
10/24/2008 1:56:21 PM

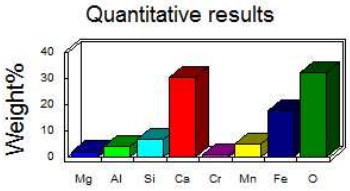
Sample: ESCORIA REINOSA
Type: Default
ID:

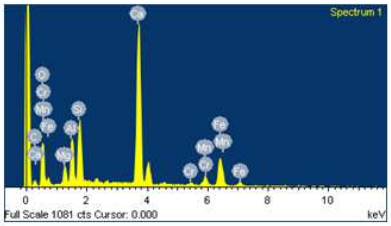
Spectrum processing :
Peaks possibly omitted : 2.300, 2.640, 9.740 keV

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)
Number of iterations = 2

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Mg K	2.13	2.36	3.53	MgO
Al K	4.41	4.41	8.34	Al2O3
Si K	6.93	6.65	14.81	SiO2
Ca K	30.40	20.46	42.53	CaO
Cr K	0.96	0.50	1.41	Cr2O3
Mn K	4.87	2.39	6.29	MnO
Fe K	17.94	8.67	23.08	FeO
O	32.36	54.55		
Totals	100.00			







Comment:

ESCORIAS NEGRAS

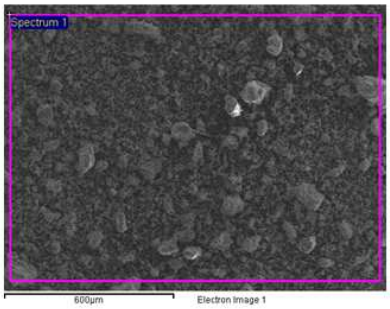
10/24/2008 1:56:40 PM

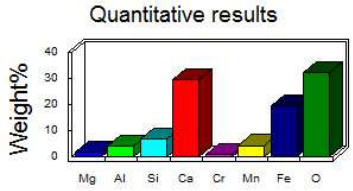
Sample: ESCORIA REINOSA
Type: Default
ID:

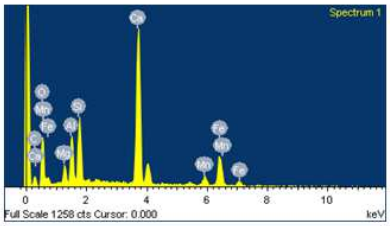
Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)
Number of iterations = 2

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Mg K	2.04	2.27	3.38	MgO
Al K	4.42	4.43	8.34	Al2O3
Si K	6.93	6.68	14.83	SiO2
Ca K	29.31	19.81	41.01	CaO
Cr K	0.92	0.48	1.35	Cr2O3
Mn K	4.48	2.21	5.78	MnO
Fe K	19.67	9.54	25.31	FeO
O	32.23	54.57		
Totals	100.00			







Comment:

ESCORIAS NEGRAS

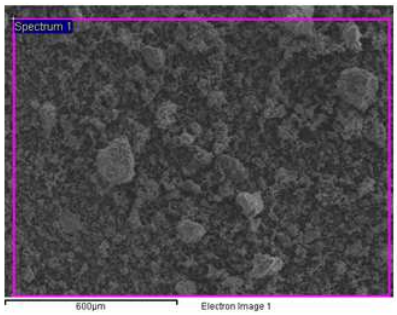
10/24/2008 1:56:32 PM

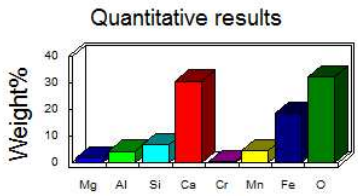
Sample: ESCORIA REINOSA
Type: Default
ID:

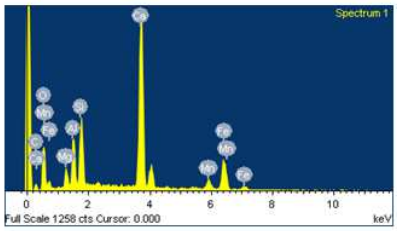
Spectrum processing :
Peak possibly omitted : 2.290 keV

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)
Number of iterations = 2

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Mg K	2.06	2.29	3.42	MgO
Al K	4.46	4.47	8.43	Al2O3
Si K	6.83	6.57	14.61	SiO2
Ca K	30.55	20.60	42.75	CaO
Cr K	0.49	0.25	0.71	Cr2O3
Mn K	4.63	2.28	5.98	MnO
Fe K	18.73	9.06	24.09	FeO
O	32.24	54.47		
Totals	100.00			







Comment:

ESCORIAS NEGRAS

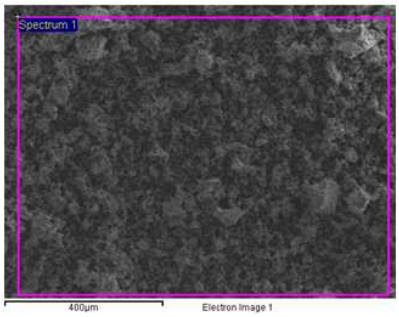
10/24/2008 1:58:20 PM

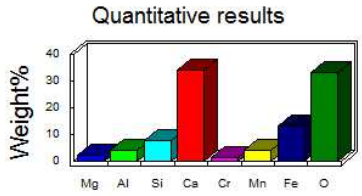
Sample: ESCORIA SANTANDER
Type: Default
ID:

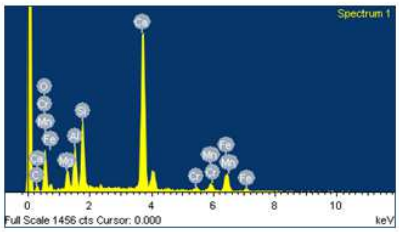
Spectrum processing :
Peak possibly omitted : 2.331 keV

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)
Number of iterations = 2

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Mg K	2.27	2.46	3.76	MgO
Al K	4.34	4.25	8.21	Al2O3
Si K	7.61	7.16	16.29	SiO2
Ca K	33.87	22.33	47.39	CaO
Cr K	1.65	0.84	2.41	Cr2O3
Mn K	4.00	1.92	5.17	MnO
Fe K	13.04	6.17	16.78	FeO
O	33.21	54.85		
Totals	100.00			







Comment:

ESCORIAS NEGRAS

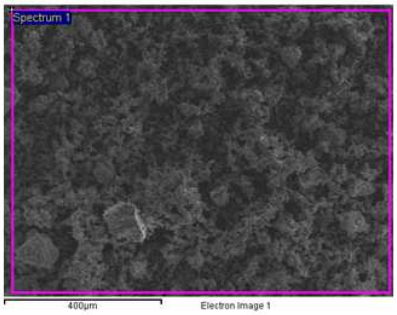
10/24/2008 1:58:31 PM

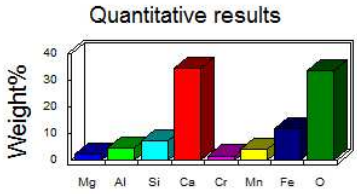
Sample: ESCORIA SANTANDER
Type: Default
ID:

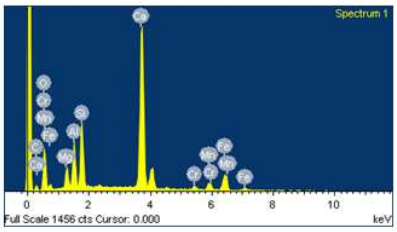
Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)
Number of iterations = 2

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Mg K	2.34	2.53	3.88	MgO
Al K	4.76	4.64	9.00	Al2O3
Si K	7.39	6.93	15.82	SiO2
Ca K	34.38	22.57	48.10	CaO
Cr K	1.76	0.89	2.57	Cr2O3
Mn K	4.31	2.07	5.57	MnO
Fe K	11.71	5.52	15.07	FeO
O	33.34	54.85		
Totals	100.00			







Comment:

ESCORIAS NEGRAS

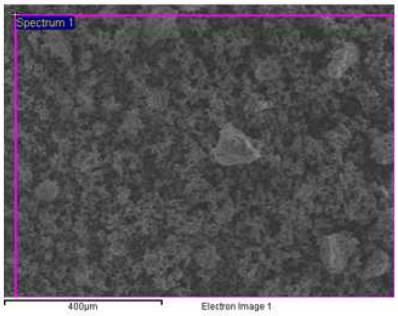
10/24/2008 1:58:41 PM

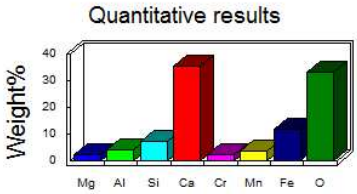
Sample: ESCORIA SANTANDER
Type: Default
ID:

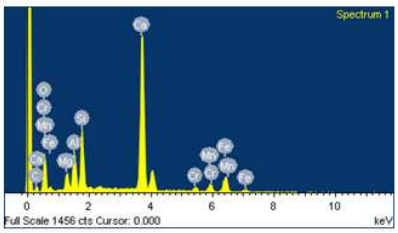
Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)
Number of iterations = 2

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Mg K	2.27	2.47	3.76	MgO
Al K	4.10	4.02	7.75	Al2O3
Si K	7.29	6.87	15.60	SiO2
Ca K	35.33	23.33	49.44	CaO
Cr K	2.16	1.10	3.16	Cr2O3
Mn K	3.90	1.88	5.03	MnO
Fe K	11.86	5.62	15.26	FeO
O	33.08	54.72		
Totals	100.00			







Comment:

Cal Libre y Magnesio Libre

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Departamento de Ciencias y Técnicas
Del Agua y del Medio Ambiente
Avda. Los Castros, s/n
39005 Santander (España)

Determinación de cal libre en dos muestras de escoria.

La empresa Emilio Bolado S.A. solicitó éste análisis y envió dos muestras de escoria negra. Se han realizado ensayos de cal libre en las dos muestras. Para la determinación de la cal libre se siguió la norma UNE-EN 1744-1:1998. Las muestras fueron entregadas a José Ramón Mira Soto.

Preparación de muestras.

La muestra a ensayar es molida en mortero hasta que toda ella pase por el tamiz UNE 0,63 mm.

Resultados.

Escoria 1 0´33 (% CaO)
Escoria 2 < 0´2 (% CaO)

De cada muestra se realizaron tres determinaciones

Santander, 9 de diciembre de 2009

DPTO. CIENCIAS Y TÉCNICAS DEL AGUA Y DEL MEDIO AMBIENTE UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Fdo: José Ramón Mira

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Departamento de Ciencias y Técnicas
Del Agua y del Medio Ambiente
Avda. Los Castros, s/n
39005 Santander (España)

Determinación de magnesia libre en dos muestras de escoria.

La empresa Emilio Bolado S.A. solicitó éste análisis y envió dos muestras de escoria negra. Se han realizado ensayos de magnesia libre en las dos muestras. Para la determinación de la magnesia libre se siguió la norma UNE-EN 196-2:2006. Las muestras fueron entregadas a José Ramón Mira Soto.

Preparación de muestras.

La muestra a ensayar es molida en mortero hasta que toda ella pase por el tamiz UNE 0,63 mm.

Resultados.

Escoria 1 < 3 (% MgO)
Escoria 2 < 3 (% MgO)

De cada muestra se realizaron tres determinaciones

Santander, 9 de diciembre de 2009

DPTO. CIENCIAS Y TÉCNICAS DEL AGUA Y DEL MEDIO AMBIENTE
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Fdo: José Ramón Mira

Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente
Avda. Los Castros, s/n.
39005 Santander (España)

ANÁLISIS QUÍMICO DE MUESTRAS DE ESCORIA

INTRODUCCIÓN.

A petición de Daniel Castro se ha procedido a determinar cal libre y óxido de magnesio libre en dos muestras de escoria con las referencias 1453/10 y 1512/10

MATERIAL Y MÉTODOS.

Se utilizaron los equipos de análisis del Laboratorio de Ecología de la Escuela de Caminos de Santander
El método de medida es el de la norma UNE-EN 1744-1: 2009

RESULTADOS.

Muestra 1453/10

-Cal libre (en %) ..... 0`12
-Magnesio libre (en %)..... < 0`02

Muestra 1512/10

-Cal libre (en %)..... 0`15
-Magnesio libre (en %)..... 0`04

Santander, 11-11-2010.

GITECO UC UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción
Universidad de Cantabria

José Ramón Mira Soto.

LABORATORIO DE INGENIERÍA TRIAX,S.A.

Análisis de una muestra de escoria procedente de Triax S.A.

C/ Faustino Casado 28 • 39011 PEÑACASTILLO, SANTANDER (Cantabria) • Teléfono 942 266 099 - Fax 942 266 100

La empresa Triax S.A. entregó al laboratorio de Ecología una muestra de escoria para analizar óxido de calcio y óxido de magnesio, según la norma UNE-EN 196-2

Resultados analíticos

	CaO con EDTA (% en masa)	MgO con EDTA (% en masa)
1409/10	0'73	<0'01

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001
www.triax.es
Acreditado por ENAC

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Departamento de Ciencias y Técnicas
Del Agua y del Medio Ambiente
Avda. Los Castros, s/n
39005 Santander (España)

Análisis químico de muestras de escoria.

Introducción

A petición de Daniel Castro se ha procedido a determinar cal libre y óxido de magnesio en tres muestras de escoria con las referencias 1453/10, 1512/10 y 1578/10.

Material y métodos

Se utilizaron los equipos de análisis del Laboratorio de Ecología de la Escuela de Caminos de Santander.
El método de medida es el de la norma UNE-EN 196-2:2006

Resultados

Muestra	Cal libre (en %)	Mg libre (en %)
1453/10	0`12	<0`02
1512/10	0´15	0`04
1578/10	0`19	0`07

Santander, 29 de noviembre de 2010.

Fdo: José Ramón Mira

Lixiviados

Laboratorio de control de calidad
Edificación y Obra Civil
Sondeos, Hormigón, Geotecnia,
Aguas, Medio Ambiente
Tel. 942 54 13 38

Referencia: 2748/2212/92491
Fecha de recepción: 31/10/2008 Hora: 10:30
Inicio de análisis: 12/11/2008
Fin de análisis: 28/11/2008
Nº albarán Soningeo: 21531

INFORME DE LABORATORIO
ANÁLISIS DE ESCORIAS

SOLICITANTE: SIDENOR INDUSTRIAL. S.L.	SIDENOR INDUSTRIAL, S.L.
Nº EXP/OBRA: 2748 / CARACTERIZACIÓN DE UN RESIDUO	PASEO ALEJANDRO CALONJE 1
LOCALIZACIÓN: ESCORIA NEGRA - M1(31/10/08)	39200 REINOSA CANTABRIA

Recogida por: ☐ Laboratorio ☒ Externo

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	MÉTODO
Test de lixiviación	...	10 l/Kg	EN 12457-4
SOBRE EL LIXIVIADO	...		EN 12457-5
Bario	mg/Kg materia seca	7	A.atomica (C.grafito)
Arsénico	mg/Kg materia seca	<0,1	A.atomica (C.grafito)
Cadmio	mg/Kg materia seca	<0,03	A.atomica (C.grafito)
Cromo total	mg/Kg materia seca	0,1	A.atomica (C.grafito)
Niquel	mg/Kg materia seca	<0,1	A.atomica (C.grafito)
Plomo	mg/Kg materia seca	0,2	A.atomica (C.grafito)
Zinc	mg/Kg materia seca	0,1	A.atomica (C.grafito)
Mercurio	mg/Kg materia seca	<0,003	A.atomica (generador hidruros)
Cobre	mg/Kg materia seca	<0,1	A.atomica (C.grafito)
Cloruros	mg/Kg materia seca	29	SM 4500-Cl-B
Sulfatos	mg/Kg materia seca	49	SM 4500-SO42-C
COD	mg/Kg materia seca	18	espectrofotometría UV-VIS
Fluoruros	mg/Kg materia seca	11	espectrofotometría UV-VIS
Índice de fenol	mg/Kg materia seca	<0,1	espectrofotometría UV-VIS
Selenio	mg/Kg materia seca	0,06	A.atomica (C.grafito)
Antimonio	mg/Kg materia seca	<0,02	A.atomica (C.grafito)
Molibdeno	mg/Kg materia seca	0,4	A.atomica (C.grafito)

Observaciones:

SONINGEO, S.L.
Laboratorio de Control de Calidad
Edificación y Obra Civil
C.I.F. B-39512172
Pol. Ind. Heras, Parcela 211 • 39792 HERAS (Cantabria)
Tfno.: 942 541 338 • Fax: 942 543 387

Responsable Dpto. Aguas y Medio Ambiente

* Fecha de emisión del informe: 1 de diciembre de 2008

* Las determinaciones analíticas efectuadas solamente dan fé de La muestra recibida en el Laboratorio.
* En este Laboratorio existe un registro donde se encuentran documentados los detalles relativos a la recepción de las muestras.
* No podrá reproducir parcial o totalmente este informe sin la aprobación por escrito del Laboratorio SONINGEO, S.L.
* El tiempo máximo de conservación de las muestras, una vez emitido el informe analítico de las mismas, será de un mes.
FO.09.01.03

Eva Pérez Gonzalez
Ingeniera Química

Laboratorio acreditado por la Consejería de Obras Públicas y Vivienda del Gobierno de Cantabria para el Control de Calidad de la Edificación en las Áreas EHC, GTC, GTL, VSG, VBF, AFC, AFH y AMC. Acreditaciones ENAC según UNE-EN ISO/IEC 17025 en Ensayos de Hormigón y Ensayos de Legionella en Aguas. Certificaciones ISO 9001:2000, Medio Ambiente ISO 14001:2004; I+D+i UNE 166002:2002. Empresa Colaboradora de Organismo de Cuenca Tipo I (Ministerio de Medio Ambiente)

Pag. 1 de 1

Expansividad

LABORATORIO DE INGENIERÍA

TRIAX, S.A.

EXPANSIVIDAD DE ESCORIAS

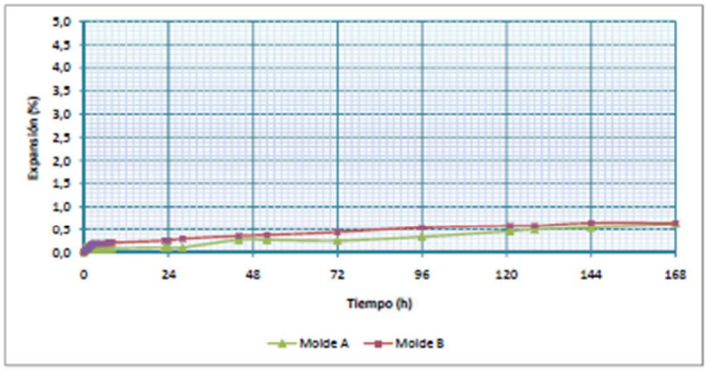
UNE EN 1744-1:2010

FECHA: 14/10/2010
CLIENTE: TRIAX, S.A.
OBRA: Proyecto de I+D+i DHMB
MUESTRA: Primera toma
FECHA DE ENSAYO: 07/10/2010
REFERENCIA: 1409/10
OBSERVACIONES:

C/ Faustino Corredor 28 • 39011 PEÑACASTILLO, SANTANDER (Cantabria) • Teléfono 942 260 099 - Fax 942 260 100

	MOLDE A	MOLDE B
DENSIDAD APARENTE DE LAS PARTÍCULAS (g/cm³)	3,75	3,75
VOLUMEN DE MUESTRA COMPACTADA (cm³)	1653,9	1662,53
DENSIDAD DEL CONJUNTO COMPACTADO (g/cm3)	2,71	2,71
CONTENIDO DE HUECOS DEL CONJUNTO (%)	27,61	27,63

	MOLDE A	MOLDE B	VALOR MEDIO
EXPANSIÓN A LAS 24 h. (%)	0,1	0,3	0,2
EXPANSIÓN A LAS 168 h. (%)	0,6	0,6	0,6



TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001
gerencia@triax.es
geotecnia@triax.es
www.triax.es
oficinatecnica@triax.es
administracion@triax.es
Acreditado por ENAC

LABORATORIO DE INGENIERÍA

TRIAX,S.A.

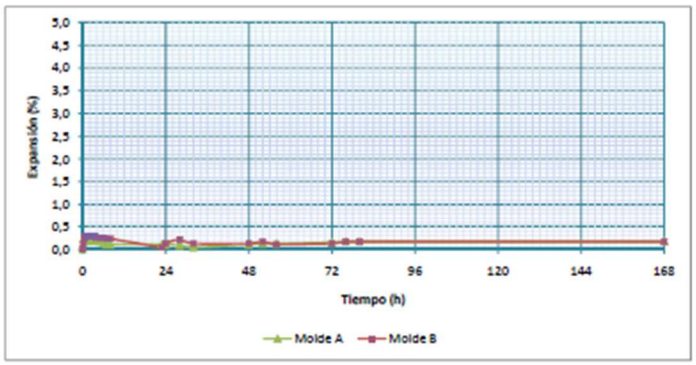
EXPANSIVIDAD DE ESCORIAS

UNE EN 1744-1:2010

FECHA: 19/10/2010
CLIENTE: TRIAX, S.A.
OBRA: Proyecto de I+D+i DHMB
MUESTRA: Segunda toma
FECHA DE ENSAYO: 21/10/2010
REFERENCIA: 1453/10
OBSERVACIONES:

	MOLDE A	MOLDE B
DENSIDAD APARENTE DE LAS PARTÍCULAS (g/cm³)	3,75	3,75
VOLUMEN DE MUESTRA COMPACTADA (cm³)	1662,5	1662,53
DENSIDAD DEL CONJUNTO COMPACTADO (g/cm3)	2,70	2,71
CONTENIDO DE HUECOS DEL CONJUNTO (%)	27,91	27,87

	MOLDE A	MOLDE B	VALOR MEDIO
EXPANSIÓN A LAS 24 h. (%)	0,1	0,1	0,1
EXPANSIÓN A LAS 168 h. (%)	0,2	0,2	0,2



C/ Faustino Covadas 28 • 39011 PEÑACASTILLO, SANTANDER (Cantabria) • Teléfono 942 260 099 - Fax 942 260 100

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001
garencia@triax.es
geotecnia@triax.es
www.triax.es
oficinatecnica@triax.es
administracion@triax.es
Acreditada por ENAC

LABORATORIO DE INGENIERÍA

TRIAX,S.A.

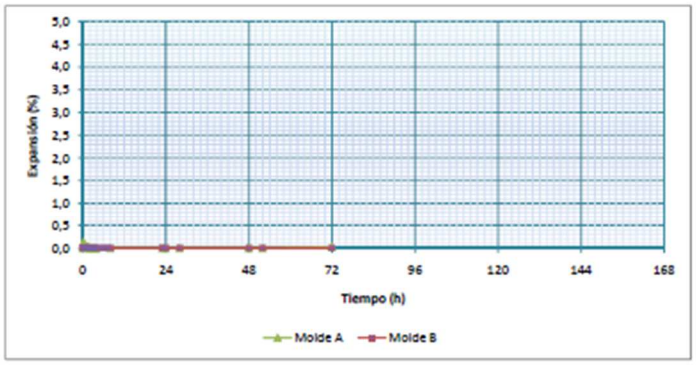
EXPANSIVIDAD DE ESCORIAS

UNE EN 1744-1:2010

FECHA: 02/11/2010
CLIENTE: TRIAX, S.A.
OBRA: Proyecto de I+D+i DHMB
MUESTRA: Tercera toma
FECHA DE ENSAYO: 09/11/2010
REFERENCIA: 1512/10
OBSERVACIONES: Aunque el contenido en MgO es inferior al 5%, se mantuvo la corriente de vapor durante dos días más a modo de comprobación

	MOLDE A	MOLDE B
DENSIDAD APARENTE DE LAS PARTÍCULAS (g/cm³)	3.75	3.75
VOLUMEN DE MUESTRA COMPACTADA (cm³)	1603.6	1563.82
DENSIDAD DEL CONJUNTO COMPACTADO (g/cm3)	2.81	2.88
CONTENIDO DE HUECOS DEL CONJUNTO (%)	24.99	23.09

	MOLDE A	MOLDE B	VALOR MEDIO
EXPANSION A LAS 24 h. (%)	0.0	0.0	0.0
EXPANSION A LAS 72 h. (%)	0.0	0.0	0.0



C/ Faustino Cavadas 28 • 39011 PEÑACASTILLO, SANTANDER (Cantabria) • Teléfono 942 260 099 - Fax 942 260 100

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001
garencia@triax.es
geotecnia@triax.es
www.triax.es
oficinatecnica@triax.es
administracion@triax.es
Acreditada por ENAC

LABORATORIO DE INGENIERÍA

TRIAX,S.A.

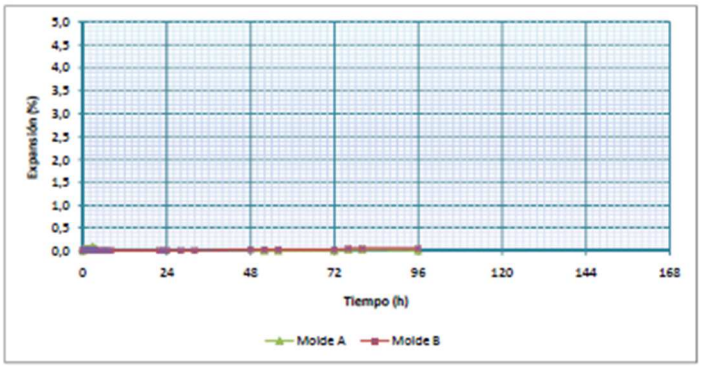
EXPANSIVIDAD DE ESCORIAS

UNE EN 1744-1:2010

FECHA: 16/11/2010
CLIENTE: TRIAX, S.A.
OBRA: Proyecto de I+D+i DHMB
MUESTRA: Cuarta toma
FECHA DE ENSAYO: 18/11/2010
REFERENCIA: 1578/10
OBSERVACIONES: Aunque el contenido de MgO resulta inferior al 5% se ha mantenido el ensayo durante cuatro días más como comprobación

	MOLDE A	MOLDE B
DENSIDAD APARENTE DE LAS PARTÍCULAS (g/cm³)	3.75	3.75
VOLUMEN DE MUESTRA COMPACTADA (cm³)	1662.5	1636.55
DENSIDAD DEL CONJUNTO COMPACTADO (g/cm3)	2.71	2.75
CONTENIDO DE HUECOS DEL CONJUNTO (%)	27.84	26.64

	MOLDE A	MOLDE B	VALOR MEDIO
EXPANSIÓN A LAS 24 h. (%)	0.0	0.0	0.0
EXPANSIÓN A LAS 96 h. (%)	0.0	0.0	0.0



C/ Faustino Cavadas 28 • 39011 PEÑACASTILLO, SANTANDER (Cantabria) • Teléfono 942 260 099 - Fax 942 260 100

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001
gerencia@triax.es oficinatecnica@triax.es
www.triax.es
geotecnia@triax.es administracion@triax.es
Acreditado por ENAC

LABORATORIO DE INGENIERÍA

TRIAX,S.A.

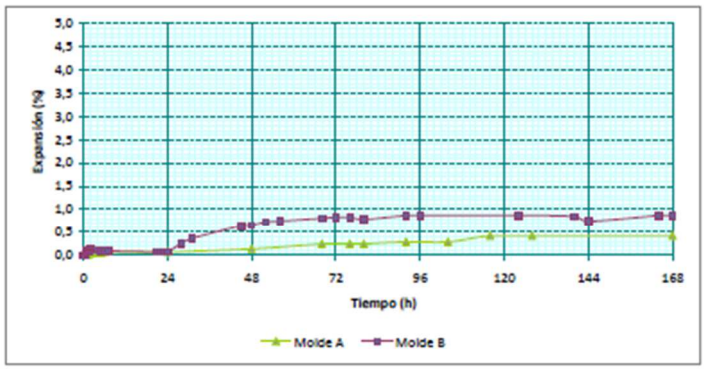
EXPANSIVIDAD DE ESCORIAS

UNE EN 1744-1:2010

FECHA: 17/01/2010
CLIENTE: TRIAX, S.A.
OBRA: Proyecto de I+D+i DHMB
MUESTRA: Primera toma. Segundo camión
FECHA DE ENSAYO: 01/02/2011
REFERENCIA: 071/11
OBSERVACIONES: El contenido de MgO de la muestra es bastante elevado

	MOLDE A	MOLDE B
DENSIDAD APARENTE DE LAS PARTICULAS (g/cm³)	3,75	3,75
VOLUMEN DE MUESTRA COMPACTADA (cm³)	1589,8	1631,36
DENSIDAD DEL CONJUNTO COMPACTADO (g/cm3)	2,81	2,74
CONTENIDO DE HUECOS DEL CONJUNTO (%)	25,17	27,07

	MOLDE A	MOLDE B	VALOR MEDIO
EXPANSION A LAS 24 h. (%)	0,1	0,1	0,1
EXPANSION A LAS 168 h. (%)	0,4	0,9	0,6



C/ Faustino Cavalles 28 • 39011 PEÑACASTILLO, SANTANDER (Cantabria) • Teléfono 942 260 099 - fax 942 260 100

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 e ISO 14001
gerencia@triax.es
gestiontecnica@triax.es
www.triax.es
oficinatecnica@triax.es
administracion@triax.es
Acreditado por ENAC

LABORATORIO DE INGENIERÍA

TRIAX,S.A.

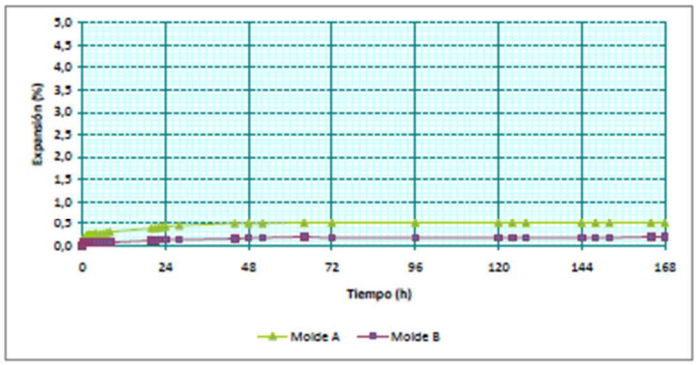
EXPANSIVIDAD DE ESCORIAS

UNE EN 1744-1:2010

FECHA: 07/02/2011
CLIENTE: TRIAX, S.A.
OBRA: Proyecto de I+D+i DHMB
MUESTRA: Segunda toma. Segundo camión
FECHA DE ENSAYO: 09/02/2011
REFERENCIA: 155/11
OBSERVACIONES: El contenido de MgO es bastante elevado

	MOLDE A	MOLDE B
DENSIDAD APARENTE DE LAS PARTICULAS (g/cm³)	3,75	3,75
VOLUMEN DE MUESTRA COMPACTADA (cm³)	1638,3	1653,87
DENSIDAD DEL CONJUNTO COMPACTADO (g/cm³)	2,75	2,91
CONTENIDO DE HUECOS DEL CONJUNTO (%)	26,64	22,32

	MOLDE A	MOLDE B	VALOR MEDIO
EXPANSION A LAS 24 h. (%)	0,4	0,1	0,3
EXPANSION A LAS 168 h. (%)	0,5	0,2	0,3



C/ Faustino Cavadas 28 • 39011 PEÑACASTILLO, SANTANDER (Cantabria) • Teléfono 942 260 099 - Fax 942 260 100

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 e ISO 14001
gerencia@triax.es
geotecnia@triax.es
www.triax.es
oficinatecnica@triax.es
administracion@triax.es
Acreditado por ENAC

LABORATORIO DE INGENIERÍA

TRIAX, S.A.

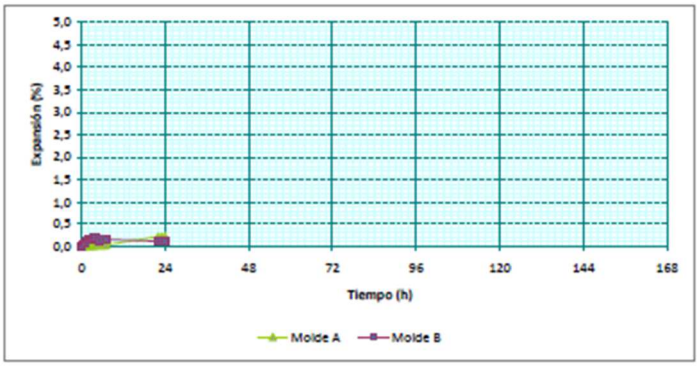
EXPANSIVIDAD DE ESCORIAS

UNE EN 1744-1:2010

FECHA: 21/02/2011
CLIENTE: TRIAX, S.A.
OBRA: Proyecto de I+D+i DHMB
MUESTRA: Tercera muestra. Segundo camión
FECHA DE ENSAYO: 09/02/2011
REFERENCIA: 248/11
OBSERVACIONES:

	MOLDE A	MOLDE B
DENSIDAD APARENTE DE LAS PARTICULAS (g/cm³)	3,75	3,75
VOLUMEN DE MUESTRA COMPACTADA (cm³)	1660,8	1652,14
DENSIDAD DEL CONJUNTO COMPACTADO (g/cm3)	2,71	2,70
CONTENIDO DE HUECOS DEL CONJUNTO (%)	27,78	27,97

	MOLDE A	MOLDE B	VALOR MEDIO
EXPANSIÓN A LAS 24 h. (%)	0,2	0,1	0,2
EXPANSIÓN A LAS 168 h. (%)			



C/ Faustino Covadas 28 • 39011 PEÑACASTILLO, SANTANDER (Cantabria) • Teléfono 942 260 099 - Fax 942 260 100

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 e ISO 14001
gerencia@triax.es oficinatecnica@triax.es
www.triax.es
geotecnia@triax.es administracion@triax.es
Acreditado por ENAC

LABORATORIO DE INGENIERÍA

TRIAX, S.A.

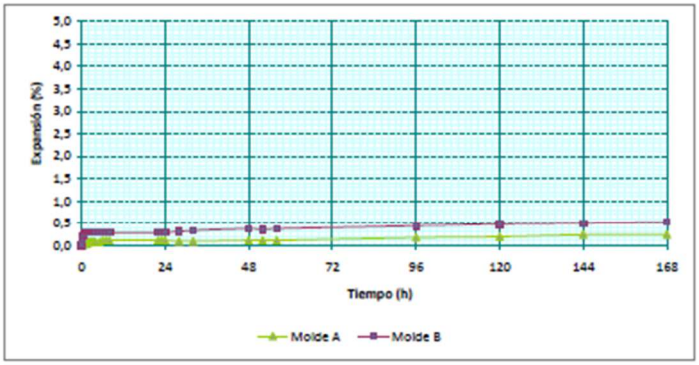
EXPANSIVIDAD DE ESCORIAS

UNE EN 1744-1:2010

FECHA: 07/03/2011
CLIENTE: TRIAX, S.A.
OBRA: Proyecto de I+D+i DHMB
MUESTRA: Cuarta muestra. Segundo camión
FECHA DE ENSAYO: 15/03/2011
REFERENCIA: 289/11
OBSERVACIONES:

	MOLDE A	MOLDE B
DENSIDAD APARENTE DE LAS PARTICULAS (g/cm³)	3,75	3,75
VOLUMEN DE MUESTRA COMPACTADA (cm³)	1646,9	1594,99
DENSIDAD DEL CONJUNTO COMPACTADO (g/cm3)	2,67	2,83
CONTENIDO DE HUECOS DEL CONJUNTO (%)	28,72	24,45

	MOLDE A	MOLDE B	VALOR MEDIO
EXPANSION A LAS 24 h. (%)	0,2	0,3	0,3
EXPANSION A LAS 168 h. (%)	0,2	0,5	0,4



C/ Faustino Cavada 28 • 39011 PEÑACASTILLO, SANTANDER (Cantabria) • Teléfono 942 260 099 - Fax 942 260 100

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 e ISO 14001
gerencia@triax.es
geotecnia@triax.es
www.triax.es
oficinatecnica@triax.es
administracion@triax.es
Acreditado por ENAC

Los Ángeles

ENSAYO DE LOS ANGELES
EN 1097 - 2 : 1998

El coeficiente de los Angeles **(LA)** es el porcentaje en masa de la muestra de ensayo que haya pasado a través del tamiz de 1,6 n a la terminación del ensayo despues de lavarla. La muestra de ensayo deberá tener una **masa inicial** lavada de **(5.000 ± 5) gram**

La carga abrasiva consiste en **11 bolas** con diámetro entre 45 y 49 mm y una masa comprendida entre 400 gr. y 445 gr.
La masa total deberá estar comprendida entre 4.690 gr. y 4.860 gr.

La masa de la muestra inicial deberá ser al menos de 15 kg, con una granulometria comprendida entre 10 mm. y 14 mm.

El ensayo se realizará con el árido que pase por el tamiz de 14 mm. y quede retenido en el tamiz de 10 mm.
Lavar cada fráccion del arido por separado, antes de meterlas en la máquina.

Debera cumplir los siguientes requisitos:

Por el tamiz de 12,5 mm deberá pasar entre el 60 % y el 70 % de árido, o sino,
Por el tamiz de 11,2 mm deberá pasar entre el 30 % y el 40 % de árido

Identificación de la muestra **ESCORIA 12-18 (2)** **FECHA** **12 de marzo de 2010**

Fracción granulometrica apartir de las cuales se obtuvo la muestra de ensayo **11,2 a 16** **12 BOLAS**

30%	40%	60%	70%	
1.498,5	2.002,0	2.997,0	3.503,5	
CUMPLE		3.071,9	3.061,9	
1.933,1		**3.070,7**		5.003,8
CUMPLE				

LA = 19

$$LA = \left(\frac{5.000 - m}{50}\right)$$

m = Es la masa retenida por el tamiz de 1,6 mm, expresada en gramos. m= **4.037,3**

Fracciones granulométricas mm	Tamaño del tamiz intermedio mm	Porcentaje que pasa por el tamiz intermedio %	Número de bolas
11,2 a 16	**14**	**60 a 70**	**12**

Nota: El anexo A viene dado por una granulómetria distinta de 10/14

ANEXO A

Tamaño de tamiz intermedio mm	Tamaño del tamiz intermedio mm	Porcentaje que pasa por el tamiz intermedio %	Número de bolas
4 a 6,3	**5**	**30 a 40**	**7**
4 a 8	**6,3**	**60 a 70**	**8**
6,3 a 10	**8**	**30 a 40**	**9**
8 a 11,2	**10**	**60 a 70**	**10**
11,2 a 16	**14**	**60 a 70**	**12**

Figura 213: Los Ángeles escorias negras GSW.

Árido:	Escoria GSW
Situación:	Planta Igollo

Toma de muestra:	13/04/2009
Fecha ensayo:	14/04/2009

Granulometría de la muestra para ensayo

Tamaño del tamiz (abertura cuadrada) mm		Peso muestra	Peso carga abrasiva	Nº de bolas
Pasa	Retenido			
16	11,2	5000	5120 a 5300	12
11,2	8	5000	4260 a 4420	10
10	6,3	5000	3840 a 3980	9
8	4	5000	3410 a 3450	8
14	10	5000	4690 a 4860	11

Ensayo

Granulometría	16 11	Peso Fracción (gr.)	
Tamices		Primer ensayo	Segundo ensayo
Pasa	Retiene		
16,0	11,2	5.000	
	Total	5.000	

Nº. Vueltas : 500	1º ensayo	2º ensayo	
Bolas después (gr.)			Coef.desgaste
Bolas antes (gr.)			Los Angeles :
Diferencia (gr.)			17
Peso Muestra (gr.)	5.000		
Retenido 1,6 (gr.)	4.129		Suma
Pérdida (gr.)	871		
Pérdida (%)	17,42		
		Media	

DESGASTE LOS ANGELES

UNE EN - 1097-2

SITUACIÓN : P. IGOLLO **FECHA :** 13/04/09

MATERIAL : ESCORIAS

Tamiz(abertura cuad				
Pasa	Retenido	**Peso muestra**	**Peso carga abrasiva**	**Nº de bolas**
16	11,2	5000	5120 a 5300	12
11,2	8	5000	4280 a 4420	10
10	6,3	5000	3840 a 3980	9
8	4	5000	3410 a 3450	8
14	10	5000	4690 a 4860	11

Ensayo

Granulometria 16-11		Peso Fracción (gr.		Nº de Vueltas : 500	Primer ensayo	Segundo ensayo	
Tamices		Primer ensayo	Segundo ensayo				
Pasa	Retiene			Bolas después (grs)			Coeficiente
				Bolas antes (grs)			Los Angeles
				Diferencia (grs)			17,4
16	11,2	5000		Peso muestra (grs)		5000	
				Retenido 1,6 (grs)		4129	Suma
				Pérdida (grs)		871	
	Toral	5000		Pérdida (%)		17,42	
						Media	

Equivalente de Arena

Escorias Cribadas Cantera Revilla

DIPUTACION REGIONAL DE CANTABRIA
Servicio de Carreteras Regionales
Laboratorio de Materiales

Trabajo n.º

EQUIVALENTE DE ARENA

OBRA Acopios en Revilla
CONTRATISTA E. Bolados
SITUACION Acopios
MATERIAL Escorias Cribadas

OBSERVACIONES

Arena 0-6

		ENSAYOS 1	2	3	suma	Media
S =	Lectura de arena	102	108	106		
C =	Lectura de arcilla	130	126	138		
$\frac{S}{C} \cdot 100$ =	Equivalente de arena	78.46	85.71	76.81	240.99	80.33

OBSERVACIONES

Escorias Cribadas en Cantera de Revilla

Arena 0-6

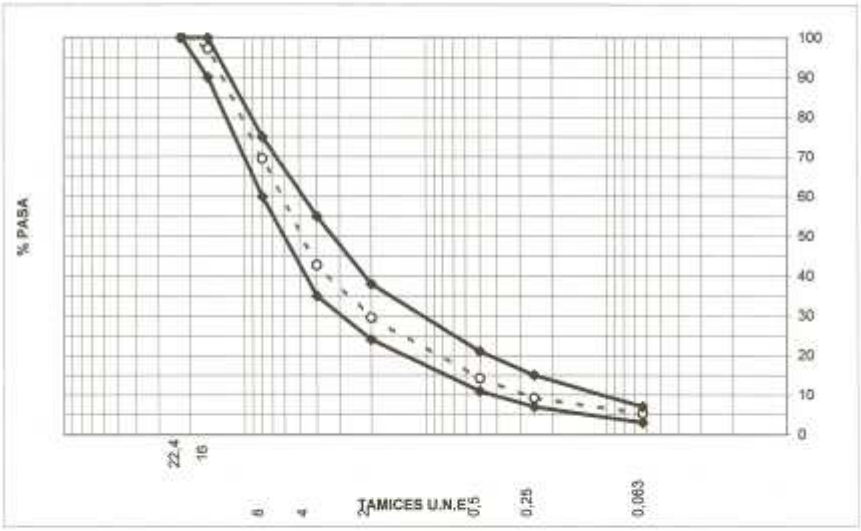
Realizado por	Conforme	V.º B.º

MEZCLAS BITUMINOSAS

Dosificación

DOSIFICACIÓN DE AGLOMERADO S - 12 ESCORIAS

PORCENAJES	4	60	21	25				100	FILLER QUITADO		
TAMICES	filler	0/6 ca+o	6/12 esc	12/18 os				GRA.	HUSO S-12		TAMICES
	100	100	100	100							
	100	100	100	100							
	100	100	100	100							
22,4	100	100	100	100				100	100	100	22,4
16	100	100	100	89				97	90	100	16
8	100	100	69	4				69	60	75	8
4	100	75	5	1				43	35	55	4
2	100	50	2	0,5				30	24	38	2
0,5	100	20	0,5	0,5				14	11	21	0,5
0,25	100	10	0,5	0,5				9	7	16	0,25
0,063	80	4	0,3	0,3				5,3	3	7	0,063



Betún : 4,5 % s/m

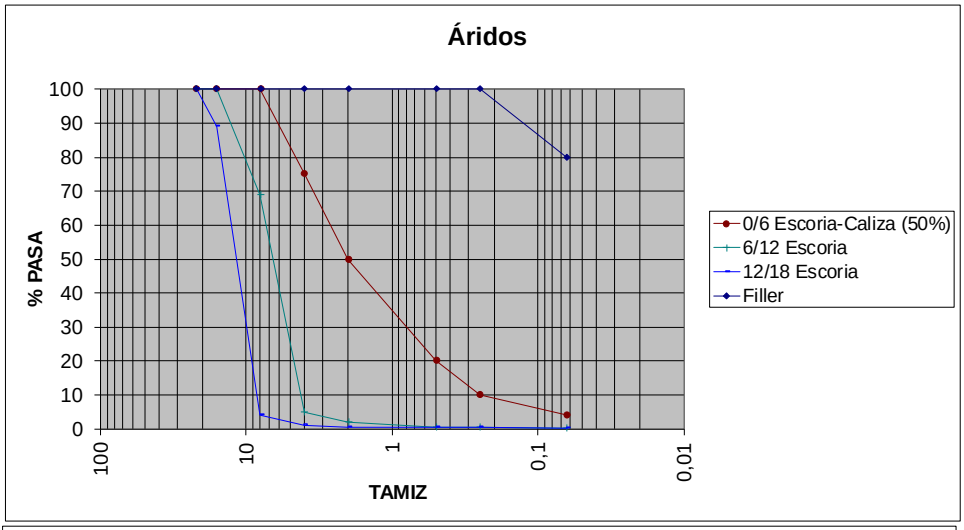
FORMULA DE TRABAJO CON TOLVAS EN CALIENTE
TOMADAS EN ABRIL DEL 2009.

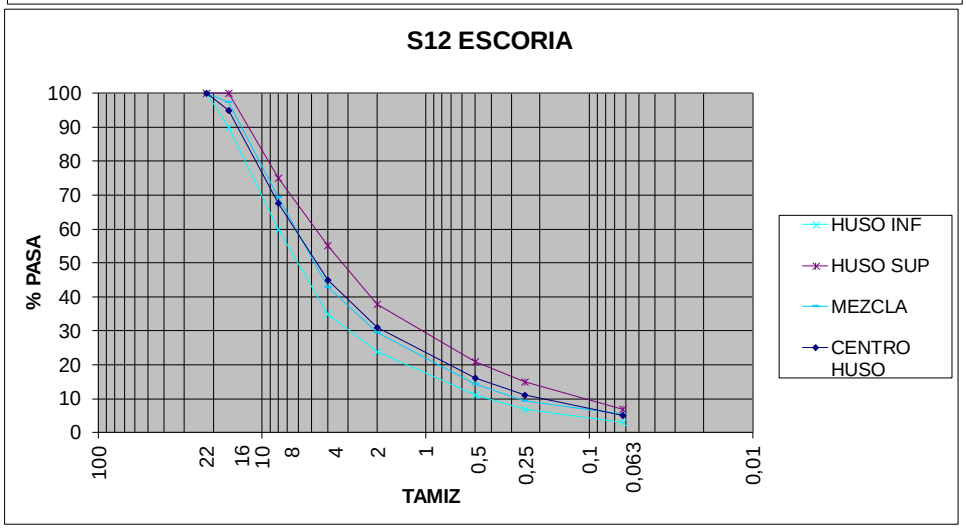
12/18 = 240
6/12 = 200
0/ 6 = 477
Filler = 38
Betún = 45

% Masa áridos	50	21	25	4

TAMICES	0/6 ca+esc	6/12 esc	12/18 esc	Filler	HUSO S12		ENTRO HUS	MEZCLA
22	100	100	100	100	100	100	100	100
16	100	100	89	100	90	100	95	97
8	100	69	4	100	60	75	67,5	69
4	75	5	1	100	35	55	45	43
2	50	2	0,5	100	24	38	31	30
0,5	20	0,5	0,5	100	11	21	16	14
0,25	10	0,5	0,5	100	7	15	11	9
0,063	4	0,3	0,3	80	3	7	5	5,3

Áridos	95,5 %
Betún	4,5 %
12/18 esc	238,8 kg/t
6/12 esc	200,6 kg/t
0/6 ca+esc	477,5 kg/t
Filler	38,2 kg/t



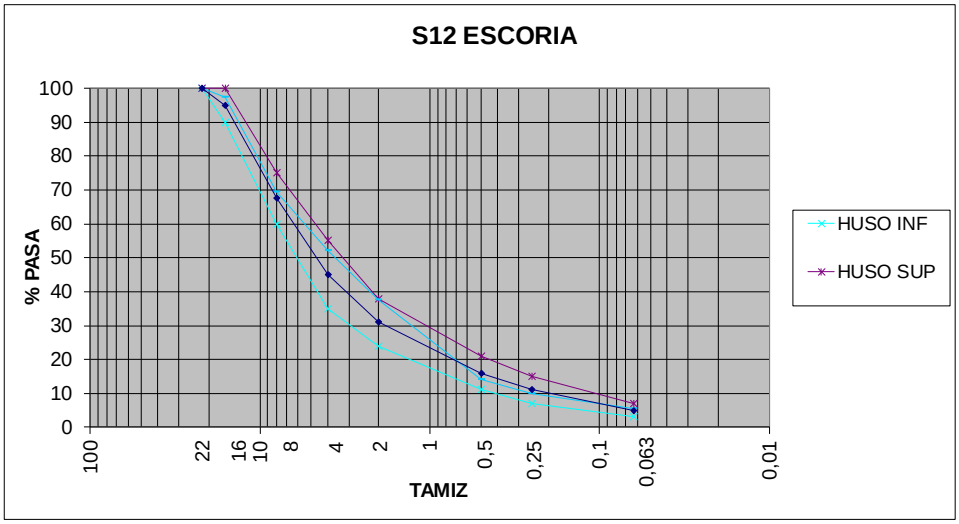


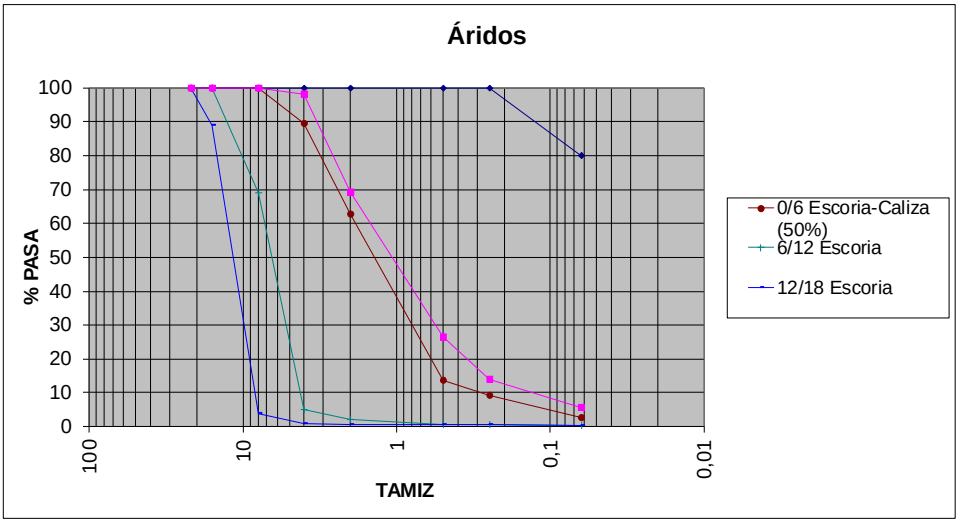
Superficie	100 m^2	200 m^2	300 m^2	400 m^2	600 m^2
Espesor	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm	5 cm
Densidad de Mezcla	2,8 t/m^3	2,8 t/m^3	2,8 t/m^3	2,8 t/m^3	2,8 t/m^3
Mezcla total	14 t	28 t	42 t	56 t	84 t
Betún	0,63 t	1,26 t	1,89 t	2,52 t	3,78 t
0/6 Escoria	3,3 t	6,7 t	10,0 t	13,4 t	20,1 t
0/6 Calizo	3,3 t	6,7 t	10,0 t	13,4 t	20,1 t
6/12 Escoria	2,8 t	5,6 t	8,4 t	11,2 t	16,8 t
12/18 Escoria	3,3 t	6,7 t	10,0 t	13,4 t	20,1 t
Filler	0,5 t	1,1 t	1,6 t	2,1 t	3,2 t

% Masa áridos	25,0	25,0	21,0	25,0	4,0				100,0

TAMICES	0/6 esc	0/4cal	6/12 esc	12/18 esc	Filler	HUSO S12		CENTRO HUSO	MEZCLA
22	100	100	100	100	100	100	100	100	100
16	100	100	100	89	100	90	100	95	97
8	100	100	69	4	100	60	75	67,5	69
4	89,52	98	5	1	100	35	55	45	52
2	62,87	69,4	2	0,5	100	24	38	31	38
0,5	13,72	26,4	0,5	0,5	100	11	21	16	14
0,25	9,18	14,1	0,5	0,5	100	7	15	11	10
0,063	2,75	5,6	0,3	0,3	80	3	7	5	5,4

Áridos	95,5 %
Betún	4,5 %
12/18 esc	238,8 kg/t
6/12 esc	200,6 kg/t
0/6 esc	238,8 kg/t
0/4 cal	238,8 kg/t
Filler	38,2 kg/t





Superficie	100	m^2	200 m^2	300 m^2	400 m^2	1400 m^2
Espesor	5	cm	5 cm	5 cm	5 cm	7 cm
Densidad de Mezcla	2,8	t/m^3	2,8 t/m^3	2,8 t/m^3	2,8 t/m^3	2,9 t/m^3
Mezcla total	14	t	28 t	42 t	56 t	284,2 t
Betún	0,63	t	1,26 t	1,89 t	2,52 t	12,789 t
0/6 Escoria	1,7	t	3,3 t	5,0 t	6,7 t	33,9 t
0/6 Calizo	1,7	t	3,3 t	5,0 t	6,7 t	33,9 t
6/12 Escoria	2,8	t	5,6 t	8,4 t	11,2 t	57,0 t
12/18 Escoria	3,3	t	6,7 t	10,0 t	13,4 t	67,9 t
Filler	0,5	t	1,1 t	1,6 t	2,1 t	10,9 t

Análisis granulométrico en áridos recuperados y Marshall

icinsa
Polígono Industrial de Heras - Parcela 135. 39792 - HERAS (Cantabria)
Teléfono: 942 543 265. Fax: 942 543 273

Referencia: 2121(291-1/2
Fecha Entrada: 14-dic-10
Fecha Salida: 15-dic-10

ENSAYO: ANALISIS GRANULOMETRICO DE ARIDOS RECUPERADOS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS. NORMA: UNE-EN 12697-1 Y 2

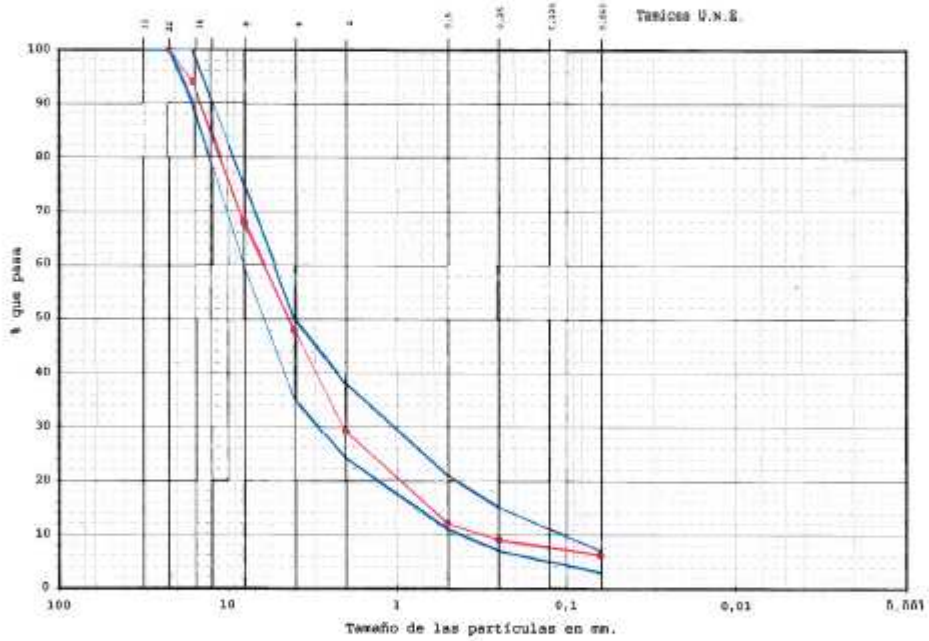
SOLICITANTE: EMILIO BOLADO S.L.

OBRA: CARRETERA SUANCES- SANTILLANA

LOCALIZACION: P.K. 3+550. CAPA RODADURA. PLANTA DE LAMADRID

FECHA DE TOMA DE LA MUESTRA: 14-dic-10

TAMICES UTILIZADOS (U.N.E.) / (A.S.T.M.): U.N.E.
GRANULOMETRIA (EN SECO) / (POR LAVADO): POR LAVADO



Observaciones: HUSO AC16 SURF 50/70 S ESCORIA
% BETUN S/MEZCLA= 4,10
% BETUN S/ARIDOS= 4,27
TEMPERATURA= 153 °C

Jefe Area Laboratorio de Construcción:
Jesús Mª Manzanedo Borbolla
Ingeniero Técnico

icinsa
Polígono Industrial de Heras-Parcela 135
Teléfono 942 54 32 66 Fax 942 54 32 73
39792 HERAS (Cantabria)

Director del Laboratorio:
Marian Salado Rodríguez
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

icinsa
Polígono Industrial de Heras – Parcela 135 39792 – HERAS (Cantabria)
Teléfonos y Fax: 942 54 32 73 y 942 54 32 65

Referencia: 21210291-3
Fecha Salida: 14-12-10

CONTROL DE AGLOMERADO
MARSHALL NLT-159/00

SOLICITANTE: EMILIO BOLADO S.L.
OBRA: CARRETERA SUANCES- SANTILLANA
LOCALIZACION: P.K. 3+5550. CAPA RODADURA. PLANTA LAMADRID

Planta de aglomerado ..... LAMADRID
Tipo de mezcla ..... S-12 ESCORIA
Fecha de recogida 14-12-10
Temperatura 153º

- ESTABILIDAD (KN)	13.0
- DEFORMACION (mm)	1.91
DENSIDAD APARENTE DE LA MEZCLA (t/m³) dap	2,886
% BETUN EN ARIDOS	4.27
% BETUN EN MEZCLA	4.10
% HUECOS EN ARIDOS	16.8
% HUECOS EN MEZCLA	5.3
% HUECOS RELLENOS	68.4

Jefe Area Laboratorio de Construcción:
Jesús Mª Manzadón Borbolla
Ingeniero Técnico

icinsa
Polígono Industrial de Heras-Parcela 135
Teléfono 942 54 32 65 Fax 942 54 32 73
39792 HERAS (Cantabria)

Director del Laboratorio:
Miriam Saludo Rodríguez
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

icinsa
Polígono industrial de Heras - Parcela 135, 39792 - HERAS (Cantabria)
Teléfono: 942 543 265. Fax: 942 543 279

Referencia: 21210251-4/5
Fecha Entrada: 14-dic-10
Fecha Salida: 15-dic-10

ENSAYO: ANALISIS GRANULOMETRICO DE ARIDOS RECUPERADOS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS. NORMA: UNE-EN 12697-1 Y 2

SOLICITANTE: EMILIO BOLADO S.L.

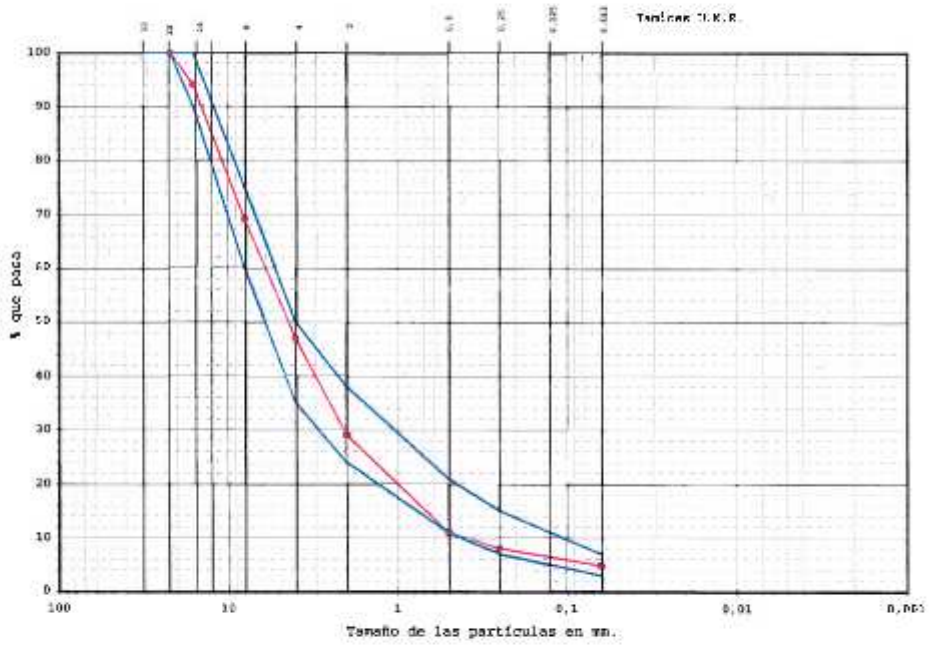
OBRA: CARRETERA SUANCES- SANTILLANA

LOCALIZACION: P.K. 3+550. CAPA RODADURA. PLANTA DE OJAIZ

FECHA DE TOMA DE LA MUESTRA: 14-dic-10

TAMICES UTILIZADOS (U.N.E.) / (A.S.T.M.): U.N.E.

GRANULOMETRIA (EN SECO) / (POR LAVADO): POR LAVADO



Observaciones: HUSO AC16 SURF 50/70 S ESCORIA

% BETUN S/MEZCLA= 3,76

% BETUN S/ARIDOS= 3,91

TEMPERATURA= 148 °C

Jefe Area Laboratorio de Construcción:
Jesús Mª Manzano Portolla
Ingeniero Técnico

icinsa
Polígono Industrial de Heras-Parcela 135
Teléfono 942 54 32 68 Fax 942 54 32 73
39792 HERAS (Cantabria)

Director del Laboratorio:
Miriam Saludo Rodriguez
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

icinsa
Polígono Industrial de Heras – Parcela 135. 39792 – HERAS (Cantabria)
Teléfonos y Fax: 942.54.32.73 y 942.54.32.65

Referencia: 21210291-3
Fecha Salida: 14-12-10

CONTROL DE AGLOMERADO
MARSHALL NLT-159/00

SOLICITANTE: EMILIO BOLADO S.L.
OBRA: CARRETERA SUANCES- SANTILLANA
LOCALIZACION: P.K. 3+5550. CAPA RODADURA. PLANTA OJAIZ

Planta de aglomerado ..... OJAIZ
Tipo de mezcla ..... S-12 ESCORIA
Fecha de recogida 14-12-10
Temperatura 148º

- ESTABILIDAD (KN)	15.5
- DEFORMACION (mm)	2.33
DENSIDAD APARENTE DE LA MEZCLA (t/m^3) dap	2,835
% BETUN EN ARIDOS	3.91
% BETUN EN MEZCLA	3.76
% HUECOS EN ARIDOS	18.0
% HUECOS EN MEZCLA	7.7
% HUECOS RELLENOS	57.2

Jefe Area Laboratorio de Construcción:
Jesús Mª Mimoso Bachiller
Ingeniero Técnico

icinsa
Polígono Industrial de Heras-Parcela 135
Teléfono 942 54 32 65 Fax 942 54 32 73
39792 HERAS (Cantabria)

Director del Laboratorio:
Mirian Sañudo Rodríguez
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

TRIAX,S.A.

C/ Faustino Cavadas, 28
39011 Peñacastillo
Santander (Cantabria)
Tel.: 942 - 260099
fax 942 - 260100

Laboratorio Acreditado
(EHC) (GTL) (GTC) (VSG)
(AFC) (AFH) (ACH) (AMC)

EXTRACCIONES, GRANULOMETRICOS Y MARSHALL

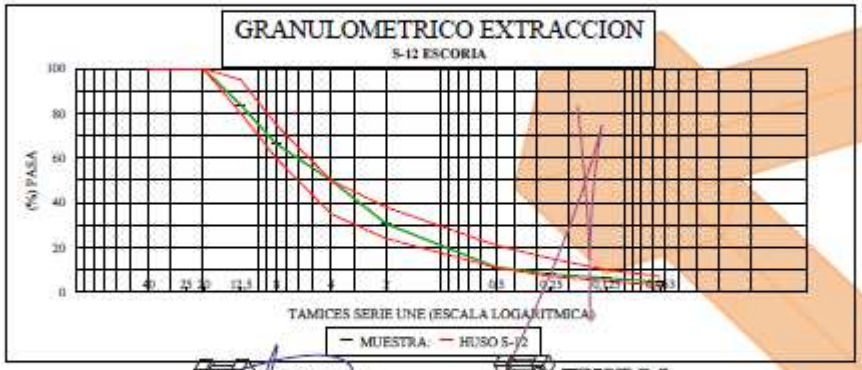
FECHA ENSAYO: 23-11-2010
CLIENTE: EJIOLADO
PROCEDENCIA: CTRA.SANTILLANA-SUANCES
MUESTRA: AGLOMERADO I.A MADRID
TIPO DE MEZCLA: S-12 ESCORIAS
TEMPERATURA MEZCLA: 159,1 °C
OBSERVACIONES: CODIGO 10411

CAPA: RODADURA
DESTINO: TRAMO C PK-1+070
REFERENCIA: 1600/10
PESO ESPEC. ARIDOS (GR/CM3): 3,430
PESO ESPEC. BETUN (GR/CM3): 1,030
MATRICULA CAMIÓN: 4432-CRZ
FECHA TOMA DE MUESTRA: 23-11-2010
HORA TOMA DE MUESTRA: 11:45

EXTRACCIONES	1º	EN CINTA
Molde+filtro	3.036,00	
Molde+filtro+aglom	5.036,00	
Molde+filtro+aridos	4.950,00	
Aglomerado	2.000,00	
Arido	1.914,00	
Betún	86,00	
Filler	87,40	
% Betún mezcla	4,30	
% Betún aridos	4,49	
Filler/betún	1,02	
Volumen de aridos	82,06	
Volumen de betún	12,21	
Volumen conjunto	94,26	
%Huecos en aridos	17,94	
%Huecos en mezcla	5,74	

MARSHALL	1-EXTRACCIÓN			
PROBETA Nº	1	2	3	MEDIA
Peso en aire (grs)	1.506,3	1.506,0	1.507,8	-
Peso en agua (grs)	993,0	997,9	1.002,1	-
Peso SSS	1.514,8	1.512,2	1.512,1	-
Volumen	521,8	514,3	510,0	
Densidad (t/m3)	2,887	2,928	2,956	2,924
Lec. estabilidad	505	520	510	
Cte. anillo	2,387	2,387	2,387	
Factor de correccion	1,00	1,00	1,00	
Estabilidad (kN)	13,9	13,7	13,5	13,68
Deformacion (mm.)	3,18	3,36	3,20	3,25

GRANULOMETRICO Tamiz UNE	1-EXTRACCION Retenido	1-EXTRACCION % PASA	EN CINTA Retenido	EN CINTA % PASA	HUSO S-12 % PASA
40	0,00	100,00			100
25	0,00	100,00			100
20	0,00	100,00			100
12,5	309,80	83,81			80-95
8	563,40	68,38			60-75
4	955,40	50,08			35-50
2	1329,00	30,56			24-38
0,5	1706,80	11,14			11-23
0,25	1759,60	8,07			7-15
0,125	1794,00	6,27			5-10
0,063	1826,60	4,57			3-7



Fdo.: Pedro Hoyo Ajo
Ingeniero Técnico Industrial
Responsable del Area

Fdo.: Jesús de Paz Fauntmann
Ingeniero de Caminos
Canales y Puertos
Director del Laboratorio

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001

www.triax.es

TRIAX,S.A.

C/ Faustino Covadas, 28
39011 Peñacastillo
Santander (Cantabria)
Tel.: 942 - 260099
Fax 942 - 260100

Laboratorio Acreditado
(EHC) (GTL) (GTC) (VDG)
(AFC) (AFH) (ACH) (AMC)

EXTRACCIONES, GRANULOMETRICOS Y MARSHALL

FECHA ENSAYO: 24-11-2010
CLIENTE: EJIDADO
PROCEDENCIA: CTRA.SANTILLANA-SUANCES
MUESTRA: ACOPIO/EJIDO. LA MADRID
TIPO DE MEZCLA: S-12 ESCORIAS
TEMPERATURA MEZCLA: 164.2 ºC
OBSERVACIONES: CODIGO 10411

CAPA: RODADURA
DESTINO: ZONA CEMENTERIO
REFERENCIA: 1604/10
PESO ESPEC. ARIDOS (GR/CM3): 3,430
PESO ESPEC. BETUN (GR/CM3): 1,030
MATRICULA CAMIÓN: 6976-DZL
FECHA TOMA DE MUESTRA: 24-11-2010
HORA TOMA DE MUESTRA: 9:15

EXTRACCIONES	1ª	EN CINTA
Molde+filtro	5.035,00	
Molde+filt+aglom	5.035,00	
Molde+filt+aridos	4.950,00	
Aglomerado	2.000,00	
Aridos	1.915,00	
Betún	85,00	
Filler	92,80	
% Betún mezcla	4,25	
% Betún aridos	4,44	
Filler/betún	1,09	
Volumen de aridos	83,29	
Volumen de betún	12,24	
Volumen conjunto	95,53	
%Huecos en aridos	16,71	
%Huecos en mezcla	4,47	

MARSHALL	1-EXTRACCION			
PROBETA Nº	1	2	3	MEDIA
Peso en aire (grs)	1.509,5	1.505,5	1.498,2	-
Peso en agua (grs)	1.001,3	1.002,5	998,1	-
Peso SSS	1.513,2	1.508,6	1.501,7	-
Volumen	511,9	506,1	503,6	
Densidad (t/m3)	2,949	2,975	2,975	2,966
Lec. estabilidad	440	455	440	
Cte. anillo	2,587	2,587	2,587	
Factor de correccion	1,00	1,04	1,04	
Estabilidad (kN)	11,4	12,9	12,1	12,06
Deformacion (mm.)	3,17	3,40	3,48	3,35

GRANULOMETRICO Tamiz UNE	1-EXTRACCION Retenido	1-EXTRACCION % PASA	EN CINTA Retenido	EN CINTA % PASA	HUSO S-12 % PASA
40	0,00	100,00			100
25	0,00	100,00			100
20	0,00	100,00			100
12,5	353,00	81,57			80-95
8	605,80	68,37			60-75
4	960,80	49,83			35-50
2	1368,00	28,56			24-38
0,5	1729,60	9,68			11-23
0,25	1770,80	7,53			7-15
0,125	1795,80	6,22			5-10
0,063	1822,20	4,85			3-7

Fdo.: Pedro Hoyo Arbe
Ingeniero Técnico Industrial
Responsable del Area

Fdo.: Jesús de Paz Fuentenaya
Ingeniero de Caminos
Canales y Puertos
Director del Laboratorio

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001

www.triax.es

Acreditado por ENAC

TRIAX,S.A.

C/ Faustino Cavadas, 28
39011 Peñacastillo
Santander (Cantabria)
Tel.: 942 - 260099
Fax 942 - 260100

Laboratorio Acreditado
(EHC) (GTL) (GTC) (VSG)
(AFC) (AFH) (ACH) (AMC)

EXTRACCIONES, GRANULOMETRICOS Y MARSHALL

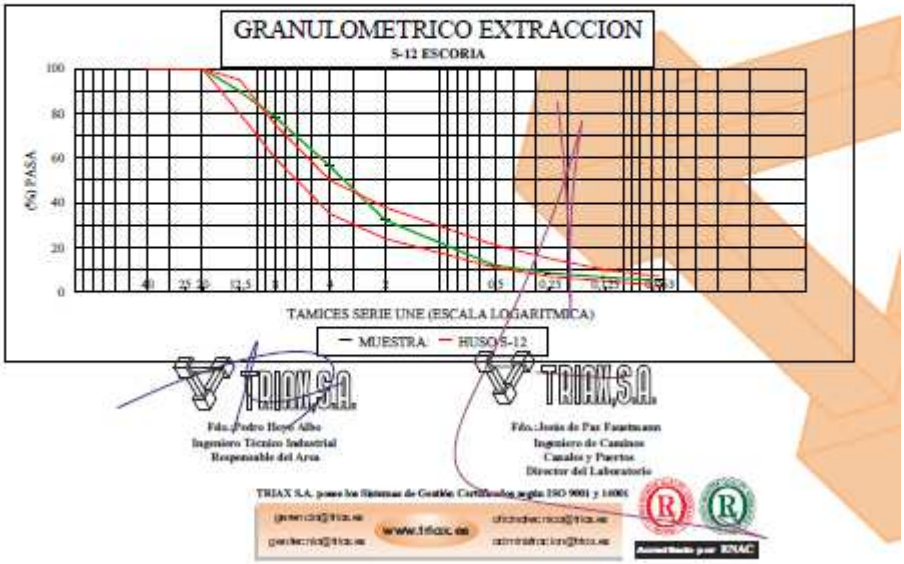
FECHA ENSAYO: 25-11-2010
CLIENTE: EJIDADO
PROCEDENCIA: CTRA.SANTILLANA-SUANCES
MUESTRA: AGLOMERADO PLANTA OJAIZ
TIPO DE MEZCLA: S-12 ESCORIAS
TEMPERATURA MEZCLA: 163 ºC
OBSERVACIONES: CODIGO 10611

CAPA: RODADURA
DESTINO: TRAMO II A 1 KM DEL CEMENTI
REFERENCIA: 1607/10
PESO ESPEC. ARIDOS (GR/CM3): 3,410
PESO ESPEC. BITUN (GR/CM3): 1,030
MATRICULA CAMIÓN: S-2251-V
FECHA TOMA DE MUESTRA: 25-11-2010 a las 09:25

EXTRACCIONES	1º	EN CINTA
Molde+filtro	3.030,10	
Molde+filtro+agloy	5.030,10	
Molde+filtro+arido	4.940,10	
Aglomerado	2.000,00	
Arido	1.910,00	
Betún	90,00	
Filler	80,00	
% Betún mezcla	4,50	
% Betún aridos	4,71	
Filler/betún	1,10	
Volumen de aridos	73,65	
Volumen de betún	11,80	
Volumen conjunto	87,45	
%Huecos en aridos	24,35	
%Huecos en mezcla	12,55	

MARSHALL	1-EXTRACCION			
PROBETA Nº	1	2	3	MEDIA
Peso en aire (grs)	1.506,0	1.475,4	1.505,3	-
Peso en agua (grs)	967,3	956,5	957,0	-
Peso SSS	1.517,6	1.488,1	1.515,4	-
Volumen	550,3	551,6	558,4	
Densidad (t/m3)	2,733	2,675	2,696	2,701
Lec. estabilidad	450	460	455	
Cte. anillo	2,587	2,587	2,587	
Factor de correccion	0,89	0,89	0,89	
Estabilidad (kN)	10,6	10,8	10,7	10,69
Deformacion (mm.)	3,70	3,65	3,60	3,65

GRANULOMETRICO Tamiz UNE	1-EXTRACCION Retenido	1-EXTRACCION % PASA	EN CINTA Retenido	EN CINTA % PASA	HUSO S-12 % PASA
40	0,00	100,00			100
25	0,00	100,00			100
20	0,00	100,00			100
12,5	192,80	89,91			80-95
8	413,40	78,36			60-75
4	655,00	66,28			35-50
2	1294,80	32,21			24-38
0,5	1683,40	11,86			11-21
0,25	1746,40	8,97			7-15
0,125	1784,00	6,60			5-10
0,063	1811,20	5,17			3-7



Fdo.: Pedro Hoyo Albo
Ingeniero Técnico Industrial
Responsable del Area

Fdo.: Jesús de Paz Fuentesaux
Ingeniero de Caminos
Canales y Puertos
Director del Laboratorio

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001

www.triax.es

Acreditado por ENAC

TRIAX,S.A.

C/ Faustino Cavadas, 28
39011 Peñacastillo
Santander (Cantabria)
Tel. 942 - 260099
Fax 942 - 260100

Laboratorio Acreditado
(EHC) (GTL) (GTC) (VBG)
(AFC) (AFH) (ACH) (AMC)

EXTRACCIONES, GRANULOMETRICOS Y MARSHALL

FECHA ENSAYO: 17-11-2010
CLIENTE: ELOLADO
PROCEDENCIA: CTRA.SANTELLANA-SUANCES
MUESTRA: AGLOMERADO. LA MADRID
TIPO DE MEZCLA: S-12 ESCORIAS
TEMPERATURA MEZCLA: 161,5 ºC
OBSERVACIONES: CODIGO 10411

CAPA: RODADURA
DESTINO: ACCESO A VIOS PK-2+900
REFERENCIA: 1582/10
PESO ESPEC. ARIDOS (GR/CM3): 3,400
PESO ESPEC. BETUN (GR/CM3): 1,030
MATRICULA CAMIÓN: 7489-DMW
FECHA TOMA DE MUESTRA: 27-11-2010
HORA TOMA DE MUESTRA: 11:45

EXTRACCIONES	1ª	EN CINTA
Molde+filtro	3.034,00	
Molde+filt+aglom	5.034,00	
Molde+filt+aridos	4.948,00	
Aglomerado	2.000,00	
Arido	1.914,00	
Betún	86,00	
Filler	103,20	
% Betún mezcla	4,30	
% Betún aridos	4,49	
Filler/betún	1,20	
Volumen de aridos	83,24	
Volumen de betún	12,38	
Volumen conjunto	95,62	
%Huecos en aridos	16,76	
%Huecos en mezcla	4,38	

MARSHALL	I-EXTRACCION			
PROBETA Nº	1	2	3	MEDIA
Peso en aire (grs)	1.502,4	1.496,1	1.503,0	-
Peso en agua (grs)	995,8	997,6	995,8	-
Peso SSS	1.504,3	1.497,8	1.504,9	-
Volumen	508,5	500,2	509,1	
Densidad (t/m3)	2,955	2,991	2,952	2,966
Lec. estabilidad	555	540	545	
Cte. anillo	2,587	2,587	2,587	
Factor de correccion	1,04	1,04	1,00	
Estabilidad (kN)	15,2	14,8	14,4	14,82
Deformacion (mm.)	3,12	3,19	3,14	3,15

GRANULOMETRICO Tamiz UNE	I-EXTRACCION Retenido	I-EXTRACCION % PASA	EN CINTA Retenido	EN CINTA % PASA	HUSO S-12 % PASA
40	0,00	100,00			100
25	0,00	100,00			100
20	0,00	100,00			100
12,5	302,50	84,19			80-95
8	611,60	68,05			60-75
4	940,60	50,86			35-50
2	1349,80	29,48			24-38
0,5	1703,60	10,09			11-23
0,25	1751,40	8,50			5-15
0,125	1791,20	6,42			5-10
0,063	1810,80	5,39			3-7

Fdo.:Pedro Hoyo Alba
Ingeniero Técnico Industrial
Responsable del Area

Fdo.:Jesús de Paz Fauvmann
Ingeniero de Caminos
Canales y Puertos
Director del Laboratorio

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001

www.triax.es

TRIAX,S.A.

C/ Faustino Cavadas, 28
39011 Peñacastillo
Santander (Cantabria)
Tel.: 942 - 260099
Fax 942 - 260100

Laboratorio Acreditado
(EHC) (GTL) (GTC) (VSG)
(AFC) (AFH) (ACH) (AMC)

EXTRACCIONES, GRANULOMETRICOS Y MARSHALL

FECHA ENSAYO: 30-11-2010
CLIENTE: EMILIO ROLADO
PROCEDENCIA: CTRA.SANTILLANA-SUANCES
MUESTRA: AGLOMERADO PLANTA LA MADRID
TIPO DE MEZCLA: S-12 ESCORIAS
TEMPERATURA MEZCLA: 163,4 ºC
OBSERVACIONES: CODIGO 10411

CAPA: RODADURA
DESTINO: TRAMO A PK 4+400
REFERENCIA: 1813/10
PESO ESPEC. ARIDOS (GR/CM3): 3,410
PESO ESPEC. BETUN (GR/CM3): 1,030
MATRICULA CAMIÓN: 6673 BCV
FECHA TOMA DE MUESTRA: 29-11-2010
HORA TOMA DE MUESTRA: 14:30

EXTRACCIONES	1ª	EN CINTA
Molde+filtro	3.036,60	
Molde+filtro+aglom	5.036,60	
Molde+filtro+ados	4.948,80	
Aglomerado	2.000,00	
Arido	1.912,20	
Betún	87,80	
Filler	121,20	
% Betún mezcla	4,39	
% Betún aridos	4,59	
Filler/betún	1,38	
Volumen de aridos	82,84	
Volumen de betún	12,59	
Volumen conjunto	95,43	
%Huecos en aridos	17,16	
%Huecos en mezcla	4,57	

MARSHALL	1-EXTRACCION			
PROBETA Nº	1	2	3	MEDIA
Peso en aire (gre)	1.492,1	1.494,1	1.310,6	-
Peso en agua (gre)	986,0	993,7	999,8	-
Peso SSS	1.494,0	1.495,1	1.512,5	-
Volumen	508,0	501,4	512,7	
Densidad (t/m3)	2,937	2,980	2,946	2,954
Lec. estabilidad	620	605	615	
Cte. anillo	2,587	2,587	2,587	
Factor de correccion	1,04	1,04	1,00	
Estabilidad (kN)	17,0	16,6	16,2	16,62
Deformacion (mm.)	3,18	3,22	3,10	3,17

GRANULOMETRICO Tamiz UNE	1-EXTRACCION Retenido	1-EXTRACCION % PASA	EN CINTA Retenido	EN CINTA % PASA	HUSO S-12 % PASA
40	0,00	100,00			100
25	0,00	100,00			100
20	0,00	100,00			100
12,5	375,60	80,38			80-95
8	662,00	66,43			60-75
4	956,20	49,99			35-50
2	1336,40	30,11			24-38
0,5	1675,60	12,37			11-23
0,25	1726,80	9,70			7-15
0,125	1759,20	8,00			5-10
0,063	1791,00	6,34			3-7

TRIAX,S.A.
Fdo.: Pedro Hoyo Aller
Ingeniero Técnico Industrial
Responsable del Area

TRIAX,S.A.
Fdo.: Jesús de Paz Faustmann
Ingeniero de Caminos
Canales y Puertos
Director del Laboratorio

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001

www.triax.es

Acreditado por ENAC

TRIAX,S.A.

C/ Faustino Cavados, 28
39011 Peñacastillo
Santander (Cantabria)
Tel. 942 - 260099
Fax 942 - 260100

Laboratorio Acreditado
(EHC) (GTL) (GTC) (VSG)
(AFC) (AFH) (ACH) (AMC)

EXTRACCIONES, GRANULOMETRICOS Y MARSHALL

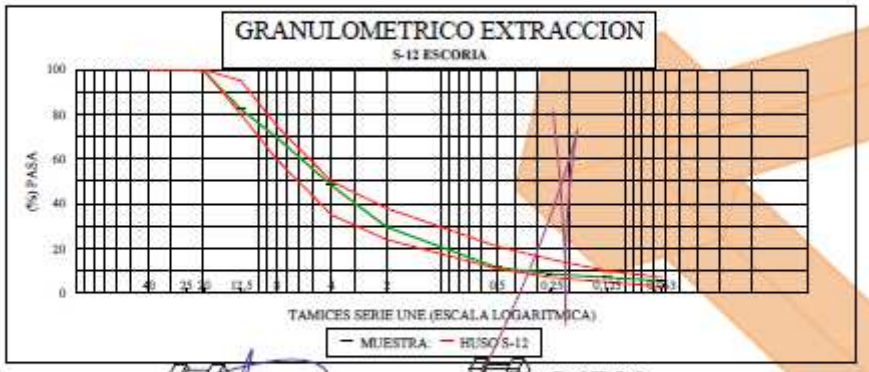
FECHA ENSAYO: 14-12-2010
CLIENTE: EMILIO BOLADO
PROCEDENCIA: CTRA.SANTILLANA-SUANCES
MUESTRA: AGLOMERADO PLANTA LA MADRID
TIPO DE MEZCLA: S-12 ESCORIAS
TEMPERATURA MEZCLA: 157,0 °C
OBSERVACIONES: CODIGO 10411
CONTRASTE CON DIPUTACIÓN E ICINSA

CAPA: RODADURA
DESTINO: TRAMO A PK 3+550
REFERENCIA: 1483/10
PESO ESPEC. ARIDOS (GR/CM3): 3,410
PESO ESPEC. BETUN (GR/CM3): 1,030
MATRICULA CAMIÓN: 2013-FFB
FECHA TOMA DE MUESTRA: 14-12-2010 a las 10:30

EXTRACCIONES	1ª	EN CINTA
Molde/filtro	3.029,00	
Molde/filtro/aglom.	5.029,00	
Molde/filtro/aridos	4.942,60	
Aglomerado	2.000,00	
Arido	1.913,60	
Betún	86,40	
Filler	104,20	
% Betún mezcla	4,32	
% Betún aridos	4,52	
Filler/Betún	1,21	
Volumen de aridos	82,53	
Volumen de betún	12,34	
Volumen conjunto	94,87	
%Huecos en aridos	17,47	
%Huecos en mezcla	5,13	

MARSHALL	1-EXTRACCION			
PROBETA Nº	1	2	3	MEDIA
Peso en aire (grs)	1.489,7	1.493,8	1.511,4	-
Peso en agua (grs)	982,7	992,8	1.001,7	-
Peso SSS	1.493,1	1.497,8	1.514,5	-
Volumen	510,4	505,0	512,8	
Densidad (t/m3)	2,919	2,958	2,947	2,943
Lec. estabilidad	570	575	560	
Cte. anillo	2,587	2,587	2,587	
Factor de corrección	1,00	1,00	1,00	
Estabilidad (kN)	15,0	15,2	14,8	15,00
Deformacion (mm.)	3,19	3,21	3,16	3,19

GRANULOMETRICO	1-EXTRACCION		EN CINTA		HUSO S-12
Tamiz UNE	Retenido	% PASA	Retenido	% PASA	% PASA
40	0,00	100,00			100
25	0,00	100,00			100
20	13,40	99,30			100
12,5	338,60	82,31			80-95
8	578,40	69,77			60-75
4	991,40	48,19			35-50
2	1347,00	29,61			24-38
0,5	1693,60	11,50			13-21
0,25	1749,60	8,57			7-15
0,125	1779,80	6,99			5-10
0,063	1809,40	5,45			3-7



Fdo.: Pedro Hoyo Albo
Ingeniero Técnico Industrial
Responsable del Area

Fdo.: Jesús de Paz Faustmann
Ingeniero de Caminos
Canales y Puertos
Director del Laboratorio

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001

www.triax.es

Acreditado por ENAC

TRIAX,S.A.

C/ Faustino Covadas, 28
39011 Peñacastillo
Santander (Cantabria)
Tel. 942 - 260099
Fax 942 - 260100

Laboratorio Acreditado
(EHC) (GTL) (GTC) (VSG)
(AFC) (AFH) (ACH) (AMC)

EXTRACCIONES, GRANULOMETRICOS Y MARSHALL

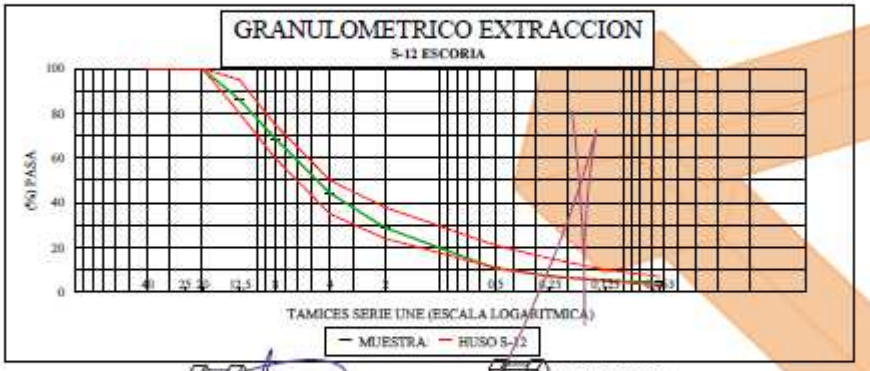
FECHA ENSAYO: 14-12-2010
CLIENTE: EMILIO BOLADO
PROCEDENCIA: CTRA.SANTILLANA-SUANCES
MUESTRA: AGLOMERADO PLANTA LA MADRID
TIPO DE MEZCLA: S-12 ESCORIAS
TEMPERATURA MEZCLA:
OBSERVACIONES: CODIGO 10411
CONTRASTE CON DIPUTACIÓN E ICINSA // MUESTRA ENTREGADA POR DIPUTACIÓN

CAPA: RODADURA
DESTINO: TRAMO A PK 3+550
REFERENCIA: 1684/10
PESO ESPEC. ARIDOS (GR/CM3): 3,410
PESO ESPEC. BITUN (GR/CM3): 1,030
MATRICULA CAMIÓN:
FECHA TOMA DE MUESTRA: 14-12-2010 a las 10:30

EXTRACCIONES	1º	EN CINTA
Molde+filtro	3.031,20	
Molde+filtro+agloe	9.031,20	
Molde+filtro+arido	4.948,30	
Aglomerado	2.000,00	
Arido	1.917,10	
Betún	82,90	
Filler	82,90	
% Betún mezcla	4,14	
% Betún arido	4,32	
Filler/betún	1,00	
Volumen de arido	82,10	
Volumen de betún	11,75	
Volumen conjunto	93,85	
%Huecos en arido	17,90	
%Huecos en mezcla	6,15	

MARSHALL	1-EXTRACCION			
PROBETA Nº	1	2	3	MEDIA
Peso en aire (grs)	1.471,3	1.505,4	1.523,1	-
Peso en agua (grs)	972,2	996,4	1.007,1	-
Peso SSS	1.476,6	1.513,5	1.526,3	-
Volumen	504,4	517,1	519,2	
Densidad (Vm3)	2,917	2,911	2,934	2,921
Lec. estabilidad	570	560	590	
Cte. anillo	2,587	2,587	2,587	
Factor de correccion	1,04	1,00	1,00	
Estabilidad (kN)	15,6	14,8	15,6	15,34
Deformacion (mm.)	3,43	3,47	3,35	3,42

GRANULOMETRICO Tamiz UNE	1-EXTRACCION		EN CINTA		HUSO S-12
	Retenido	% PASA	Retenido	% PASA	% PASA
40	0,00	100,00			100
25	0,00	100,00			100
20	0,00	100,00			100
12,5	266,60	86,09			80-95
8	598,80	68,77			60-75
4	1008,80	44,25			35-50
2	1364,20	28,84			24-38
0,5	1714,20	10,58			11-21
0,25	1780,20	7,14			5-15
0,125	1814,80	5,34			5-10
0,063	1834,20	4,32			3-7



TRIAX,S.A.
Fdo.: Pedro Hoyo Alba
Ingeniero Técnico Industrial
Responsable del Area

TRIAX,S.A.
Fdo.: Jesús de Paz Fuentesanta
Ingeniero de Caminos
Canales y Puertos
Director del Laboratorio

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001

www.triax.es

Acreditado por ENAC

TRIAX,S.A.

C/ Faustino Cavadas, 28
39011 Peñacastillo
Santander (Cantabria)
Tel.: 942 - 260099
Fax 942 - 260100

Laboratorio Acreditado
(EHC) (GTL) (GTC) (VSG)
(AFC) (AFH) (ACH) (AMC)

EXTRACCIONES, GRANULOMETRICOS Y MARSHALL

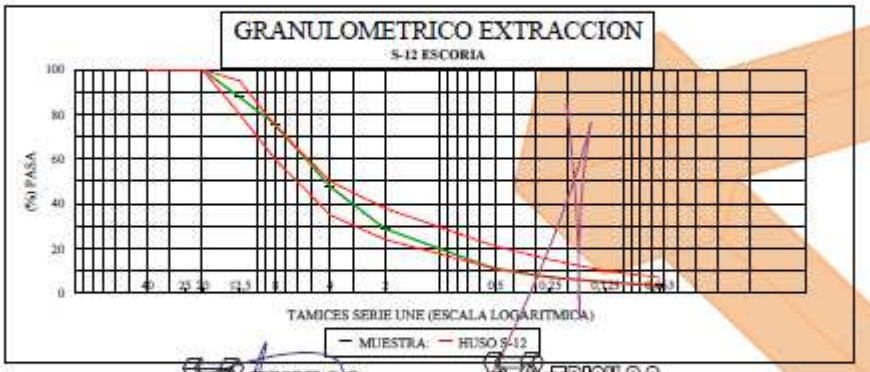
FECHA ENSAYO: 16-12-2010
CLIENTE: EMILIO BOLADO
PROCEDENCIA: AVDA. DE LOS CASTROS en SANTANDER
MUESTRA: AGLOMERADO PLANTA EMILIO BOLADO (GIAIZ)
TIPO DE MEZCLA: S-12 ESCORIAS
TEMPERATURA MEZCLA: 166,0 ºC
OBSERVACIONES: MUESTRA RECOGIDA POR PLANTA

CAPA: RODADURA
DESTINO:
REFERENCIA: 3690/10
DOS (GR/CM3): 3,410
PESO ESPEC. BETUN (GR/CM3): 1,030
MATRICULA CAMIÓN: 3122 DLK
FECHA TOMA DE MUESTRA: 15-12-2010 a las 09:30

EXTRACCIONES	1º	EN CINTA
Molde+filtro	3.036,20	
Molde+filtro+aglom.	5.036,20	
Molde+filtro+todo	6.944,60	
Aglomerado	2.000,00	
Arido	1.908,40	
Betún	91,60	
Filler	70,80	
% Betún mezcla	4,58	
% Betún áridos	4,80	
Filler/betún	0,77	
Volumen de áridos	78,46	
Volumen de betún	12,47	
Volumen conjunto	80,93	
%Huecos en áridos	21,54	
%Huecos en mezcla	8,07	

MARSHALL	1-EXTRACCION			
PROBETA Nº	1	2	3	MEDIA
Peso en aire (grs)	1.486,9	1.474,1	1.482,8	-
Peso en agua (grs)	960,3	954,7	959,3	-
Peso SSS	1.490,0	1.480,3	1.488,8	-
Volumen	529,7	525,6	529,5	-
Densidad (t/m3)	2,807	2,805	2,800	**2,804**
Lec. estabilidad	540	510	510	
Cte. anillo	2,597	2,597	2,597	
Factor de correccion	0,96	0,96	0,96	
Estabilidad (kN)	13,7	12,9	12,9	**13,18**
Deformacion (mm.)	3,24	3,32	3,42	**3,33**

GRANULOMETRICO Tamiz UNE	1-EXTRACCION Retenido	1-EXTRACCION % PASA	EN CINTA Retenido	EN CINTA % PASA	HUSO S-12 % PASA
40	0,00	100,00			100
25	0,00	100,00			100
20	0,00	100,00			100
12,5	236,20	87,62			80-95
8	466,40	75,67			60-75
4	997,60	47,73			35-50
2	1358,40	28,82			24-38
0,5	1701,00	10,87			11-21
0,25	1771,60	7,17			5-15
0,125	1814,40	4,93			5-10
0,063	1837,60	3,71			3-7



Fdo.: Pedro Hoyo-Alba
Ingeniero Técnico Industrial
Responsable del Area

Fdo.: Jesús de Paz Fuentmaan
Ingeniero de Caminos
Canales y Puertos
Director del Laboratorio

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001

www.triax.es

Acreditado por ENAC

TRIAX,S.A.

C/ Faustino Cavedas, 28
39011 Peñacastillo
Santander (Cantabria)
Tel. 942 - 260099
Fax 942 - 260100

Laboratorio Acreditado
(EHC) (GTL) (GTC) (VSG)
(AFC) (AFH) (ACH) (AMC)

EXTRACCIONES, GRANULOMETRICOS Y MARSHALL

FECHA ENSAYO: 05-01-2011
CLIENTE: EMILIO BOLADO
PROCEDENCIA: CTRA.SANTILLANA-SUANCES
MUESTRA: AGLOMERADO PLANTA LA MADRID
TIPO DE MEZCLA: S-12 ESCORIAS
TEMPERATURA MEZCLA: 180.2 ºC
OBSERVACIONES: CODIGO 10411

CAPA: RODADURA
DESTINO: TRAMO A PK 1+180 M.I.
REFERENCIA: 1721/2010
PESO ESPEC. ARIDOS (GR/CM3): 3,410
PESO ESPEC. BETUN (GR/CM3): 1,030
MATRICULA CAMIÓN: 6064-BSC
FECHA TOMA DE MUESTRA: 22-12-2010 a las 11:51

EXTRACCIONES	1ª	EN CINTA
Molde+filtro	3.030,80	
Molde+filtro+aglom	5.030,80	
Molde+filtro+aridos	4.942,90	
Aglomerado	2.000,00	
Arido	1.912,10	
Betún	87,90	
Filler	115,90	
% Betún mezcla	4,40	
% Betún aridos	4,60	
Filler/Betún	1,32	
Volumen de aridos	81,57	
Volumen de betún	12,41	
Volumen conjunto	93,99	
%Huecos en aridos	18,43	
%Huecos en mezcla	6,61	

MARSHALL	1-EXTRACCION			
PROBETA Nº	1	2	3	MEDIA
Peso en aire (grs)	1.490,3	1.495,4	1.497,3	-
Peso en agua (grs)	978,6	979,3	990,1	-
Peso SSS	1.491,6	1.498,2	1.499,1	-
Volumen	513,0	518,9	509,0	
Densidad (t/m3)	2,905	2,882	2,942	2,910
Lec. estabilidad	680	640	655	
Cte. anillo	2,587	2,587	2,587	
Factor de correccion	1,00	1,00	1,00	
Estabilidad (kN)	18,0	16,9	17,3	17,38
Deformacion (mm.)	3,35	3,04	3,06	3,15

GRANULOMETRICO	1-EXTRACCION		EN CINTA		HUSO S-12
Tamiz UNE	Retenido	% PASA	Retenido	% PASA	% PASA
40	0,00	100,00			100
25	0,00	100,00			100
20	0,00	100,00			100
12,5	211,40	88,94			80-95
8	495,80	74,07			60-75
4	929,80	51,37			35-50
2	1284,80	32,81			24-38
0,5	1630,80	14,71			11-21
0,25	1706,80	10,74			7-15
0,125	1762,00	7,85			5-10
0,063	1796,20	6,06			3-7

Fdo.: Pedro [illegible]
Ingeniero Técnico Industrial
Responsable del Área

Fdo.: Jesús de Paz Faustmann
Ingeniero de Caminos
Canales y Puertos
Director del Laboratorio

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001

www.triax.es

Acreditado por ENAC

TRIAX, S.A.

C/ Faustino Cavadas, 28
39011 Peñacastillo
Santander (Cantabria)
Tel. 942 - 260099
Fax 942 - 260100

Laboratorio Acreditado
(EHC) (GTL) (GTC) (VSG)
(AFC) (AFH) (ACH) (AMC)

EXTRACCIONES, GRANULOMETRICOS Y MARSHALL

FECHA ENSAYO: 05-01-2011
CLIENTE: EMILIO BOLADO
PROCEDENCIA: CTRA.SANTILLANA-SUANCES
MUESTRA: AGLOMERADO PLANTA LA MADRID
TIPO DE MEZCLA: S-12 ESCORIAS
TEMPERATURA MEZCLA: 157,6 ºC
OBSERVACIONES: CODIGO 1041)

CAPA: RODADURA
DESTINO: TRAMO A.PC 1+120 M.D.
REFERENCIA: 1722/2010
PESO ESPEC. ARIDOS (GR/CM3): 3,410
PESO ESPEC. BETUN (GR/CM3): 1,030
MATRICULA CAMION: 6673-BLV
FECHA TOMA DE MUESTRA: 22-12-2010 a las 12:05

EXTRACCIONES	1ª	EN CINTA
Molde-filtro	3.030,40	
Molde-filt+aglom	5.030,40	
Molde-filt+aridos	4.947,90	
Aglomerado	2.000,00	
Aridos	1.911,50	
Betun	88,50	
Filler	80,00	
% Betun mezcla	4,43	
% Betun aridos	4,63	
Filler/betun	1,02	
Volumen de aridos	81,88	
Volumen de betun	12,55	
Volumen conjunto	94,43	
%Huecos en aridos	18,12	
%Huecos en mezcla	5,57	

MARSHALL	1-EXTRACCION			
PROBETA Nº	1	2	3	MEDIA
Peso en aire (grs)	1.496,9	1.501,7	1.496,9	-
Peso en agua (grs)	986,6	991,2	987,6	-
Peso SSS	1.500,5	1.504,5	1.499,3	-
Volumen	513,9	513,3	511,7	
Densidad (t/m3)	2,913	2,926	2,925	2,921
Lec. estabilidad	630	675	640	
Cte. anillo	2,587	2,587	2,587	
Factor de correccion	1,00	1,00	1,00	
Estabilidad (kN)	16,1	17,8	16,9	16,94
Deformacion (mm.)	2,78	3,03	2,83	2,87

GRANULOMETRICO Tamiz UNE	1-EXTRACCION Retenido	1-EXTRACCION % PASA	EN CINTA Retenido	EN CINTA % PASA	HUSO S-12 % PASA
40	0,00	100,00			100
25	0,00	100,00			100
20	0,00	100,00			100
12,5	317,00	83,42			80-95
8	553,60	72,08			60-75
4	959,20	49,82			35-50
2	1313,20	31,30			24-38
0,5	1689,60	11,61			13-23
0,25	1749,40	8,48			7-15
0,125	1789,40	6,39			5-10
0,063	1821,60	4,70			3-7

Ingeniero Técnico Industrial
Responsable del Area

Fdo.:Jesús de Paz Fauntmann
Ingeniero de Caminos
Canales y Puertos
Director del Laboratorio

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001

Acreditado por ENAC

TRIAX,S.A.

C/ Faustino Covadas, 28
39011 Peñacastillo
Santander (Cantabria)
Tel. 942 - 260099
Fax 942 - 260100

Laboratorio Acreditado
(EHC) (GTL) (GTC) (VSG)
(AFC) (AFH) (ACH) (AMC)

EXTRACCIONES, GRANULOMETRICOS Y MARSHALL

FECHA ENSAYO: 13-01-2011
CLIENTE: EMILIO BOLADO, S.L.
OBRA: CTRA LA VERDE - REVILLA
MUESTRA: AGLOMERADO
TIPO DE MEZCLA: S-12 CALIZO
TEMPERATURA MEZCLA: 156,2ºC
OBSERVACIONES: CODIGO 10618

CAPA: BASE
REFERENCIA: 002/2011
PESO ESPEC. ARIDOS (GR/CM3): 2,710
PESO ESPEC. BITUN (GR/CM3): 1,030
MATRICULA CAMIÓN: S-5398-X
FECHA TOMA DE MUESTRA: 10-01-2011

EXTRACCIONES	1ª	EN CINTA
Molde+filtro	3.031,20	
Molde+filtro+agua	5.031,20	
Molde+filtro+aridos	4.925,00	
Aglomerado	2.000,00	
Arido	1.893,80	
Betún	106,20	
Filler	96,00	
% Betún mezcla	**5,31**	
% Betún aridos	**5,61**	
Filler/Betún	0,90	
Volumen de aridos	83,23	
Volumen de betún	12,28	
Volumen conjunto	95,51	
%Huecos en aridos	**16,77**	
%Huecos en mezcla	**4,49**	

MARSHALL	1-EXTRACCION			
PROBETA Nº	1	2	3	MEDIA
Peso en aire (grs)	1.256,0	1.240,0	1.235,4	-
Peso en agua (grs)	734,0	721,4	721,4	-
Peso SSS	1.260,3	1.244,0	1.239,0	-
Volumen	526,3	522,6	517,6	
Densidad (t/m3)	2,386	2,373	2,387	**2,382**
Lec. estabilidad	610	600	575	
Cte. anillo	2,598	2,598	2,598	
Factor de correccion	0,96	0,96	1,00	
Estabilidad (kN)	15,5	15,3	15,2	**15,35**
Deformacion (mm.)	2,44	2,52	2,51	**2,49**

GRANULOMETRICO Tamiz UNE	1-EXTRACCION Retenido	% PASA	EN CINTA Retenido	% PASA	HUSO S-12 % PASA
40	0,00	100,00			100
25	0,00	100,00			100
20	0,00	100,00			100
12,5	166,40	91,21			80-95
8	410,20	78,34			60-75
4	935,00	50,63			35-50
2	1354,20	28,49			24-38
0,5	1683,20	11,12			11-21
0,25	1738,40	8,21			7-15
0,125	1771,70	6,45			5-10
0,063	1797,80	5,07			3-7

Fdo.: Pedro M. Hoyo Alfaro
Ingeniero Técnico Industrial
Responsable de area

Fdo.: Jesús de Paz Faustmann
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Consejero Delegado

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001

www.triax.es

Acreditado por ENAC

N.I.F.: A-3586383 REGISTRO MERCANTIL DE CANTABRIA, TOMO 413, SECCIÓN GENERAL, FOLIO 5, HOJA 54, INSCRIPCIÓN 1ª

TRIAX,S.A.

C/ Faustino Cavadas, 28
39011 Peñacastillo
Santander (Cantabria)
Tel. 942 - 260099
Fax 942 - 260100

Laboratorio Acreditado
(EHC) (GTL) (GTC) (VBG)
(AFC) (AFH) (ACH) (AMC)

EXTRACCIONES, GRANULOMETRICOS Y MARSHALL

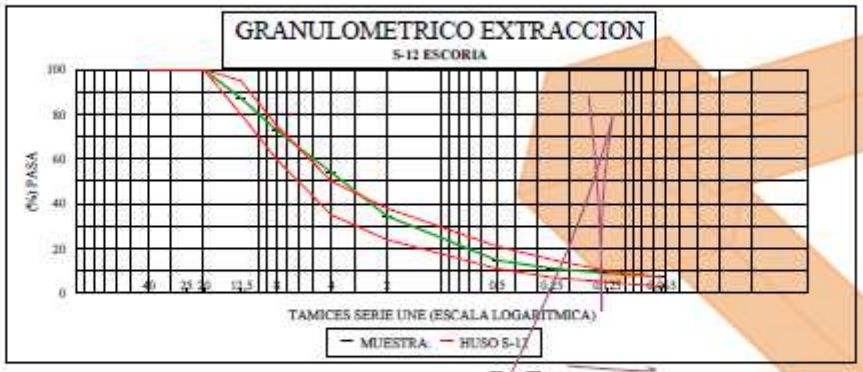
FECHA ENSAYO: 24-01-2011
CLIENTE: EMILIO BOLADO
PROCEDENCIA: CTRA LA VERDE - REVILLA
MUESTRA: AGLOMERADO
TIPO DE MEZCLA: S-12 ESCORIAS
TEMPERATURA MEZCLA: 167,3 ºC
OBSERVACIONES: CÓDIGO 10618.

CAPA:
DESTINO:
REFERENCIA: 010/2011
PESO ESPEC. ÁRIDOS (GR/CM3): 3,410
PESO ESPEC. BETUN (GR/CM3): 1,030
MATRICULA CAMIÓN: 9436-DBP
FECHA TOMA DE MUESTRA: 12-01-2011

EXTRACCIONES	1ª	EN CINTA
Molde+filtro	3.036,40	
Molde+filtro+aglom	5.036,40	
Molde+filtro+árido	4.948,80	
Aglomerado	2.000,00	
Árido	1.910,40	
Betún	89,60	
Filler	141,40	
% Betún mezcla	4,48	
% Betún áridos	4,69	
Filler/betún	1,58	
Volumen de áridos	78,95	
Volumen de betún	12,20	
Volumen conjunto	91,21	
%Huecos en áridos	21,05	
%Huecos en mezcla	8,79	

MARSHALL	I-EXTRACCION			
PROBETA Nº	1	2	3	MEDIA
Peso en aire (grs)	1.502,9	1.503,5	1.496,1	-
Peso en agua (grs)	975,2	975,9	962,3	-
Peso SSS	1.505,7	1.506,5	1.498,7	-
Volumen	530,5	530,6	536,4	
Densidad (t/m3)	2,833	2,836	2,789	2,819
Lec. estabilidad	685	640	675	
Cte. anillo	2,587	2,587	2,587	
Factor de corrección	0,96	0,96	0,93	
Estabilidad (kN)	17,4	16,2	16,8	16,72
Deformación (mm.)	2,71	3,00	2,84	2,86

GRANULOMETRICO Tamiz UNE	I-EXTRACCION Retenido	I-EXTRACCION % PASA	EN CINTA Retenido	EN CINTA % PASA	HUSO S-12 % PASA
40	0,00	100,00			100
25	0,00	100,00			100
20	0,00	100,00			100
12,5	246,40	87,21			80-95
8	518,00	72,89			60-75
4	879,00	53,99			35-50
2	1249,60	34,39			24-38
0,5	1628,40	14,76			11-21
0,25	1699,00	11,07			7-15
0,125	1739,80	8,93			5-10
0,063	1788,00	7,40			3-7



TRIAX S.A.
Ingeniero Técnico Industrial
Responsable del Area

TRIAX S.A.
Ingeniero de Caminos
Canales y Puertos
Director del Laboratorio

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001

www.triax.es

Acreditado por ENAC

TRIAX,S.A.

C/ Faustino Covadas, 28
39011 Peñacastillo
Santander (Cantabria)
Tel. 942 - 260099
Fax 942 - 260100

Laboratorio Acreditado
(EHC) (GTL) (GTC) (VSG)
(AFC) (AFH) (ACH) (AMC)

EXTRACCIONES, GRANULOMETRICOS Y MARSHALL

FECHA ENSAYO: 31-01-2011
CLIENTE: EMILIO SOLADO, S.L.
OBRA: CTRA LA VIESE - REVILLA
MUESTRA: AGLOMERADO
TIPO DE MEZCLA: AC 16 SURF 50/70 S
TEMPERATURA MEZCLA: 161,6 ºC
OBSERVACIONES:

CAPA: RODADURA
DESTINO: -
REFERENCIA: (05/2011)
PESO ESPEC. ARIDOS (GR/CM3): 2,685
PESO ESPEC. BETUN (GR/CM3): 1,030
MATRICULA CAMIÓN: 9436-DNP
FECHA TOMA DE MUESTRA: 24-01-2011
HORA TOMA DE MUESTRA: 08:50

EXTRACCIONES	P	EN CINTA
Molde+ filtro	3.035,60	
Molde+filtro+aglom	3.035,60	
Molde+filtro+arido	4.936,40	
Aglomerado	2.000,00	
Arido	1.898,80	
Betún	101,20	
Filler	137,40	
% Betún mezcla	5,06	
% Betún arido	5,33	
Filler/betún	1,36	
Volumen de arido	82,61	
Volumen de betún	11,48	
Volumen conjunto	94,08	
%Huecos en arido	17,39	
%Huecos en mezcla	8,92	

MARSHALL	1-EXTRACCION			
PROBETA Nº	1	2	3	MEDIA
Peso en aire (grs)	1.250,0	1.245,2	1.244,8	-
Peso en agua (grs)	720,7	718,3	717,2	-
Peso SSS	1.256,8	1.252,0	1.248,3	-
Volumen	536,1	533,7	531,1	
Densidad (t/m3)	2,332	2,333	2,344	2,336
Lec. estabilidad	480	530	540	
Cte. anillo	2,587	2,587	2,587	
Factor de correccion	0,96	0,93	0,96	
Estabilidad (kN)	12,2	13,0	13,7	13,0
Deformacion (mm.)	2,61	2,38	2,52	2,50

GRANULOMETRICO Tamiz UNE	1-EXTRACCION Tamizado	% PASA		HUSO AC 16 SURF % PASA
22,4	0,00	100,00		100
16	154,00	91,89		90-100
8	551,20	70,97		60-75
4	1065,60	43,88		35-50
2	1396,80	31,18		24-38
0,5	1615,20	14,94		11-21
0,25	1689,20	11,04		7-15
0,063	1761,40	7,24		3-7

Ingeniero Técnico Industrial
Responsable del Área

Ingeniero de Caminos
Canales y Puertos
Director del Laboratorio

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001

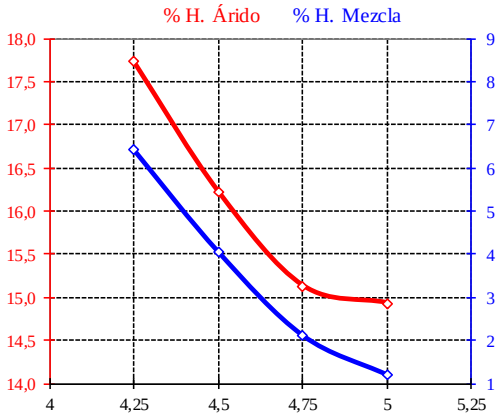
www.triax.es

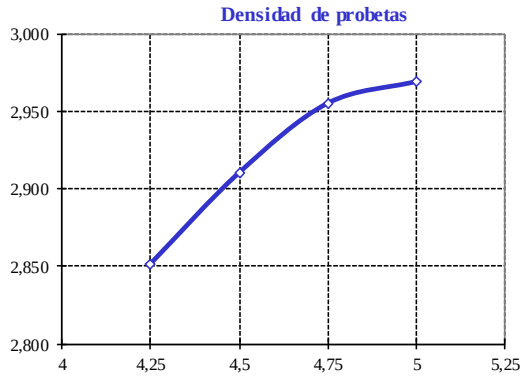
Acreditado por ENAC

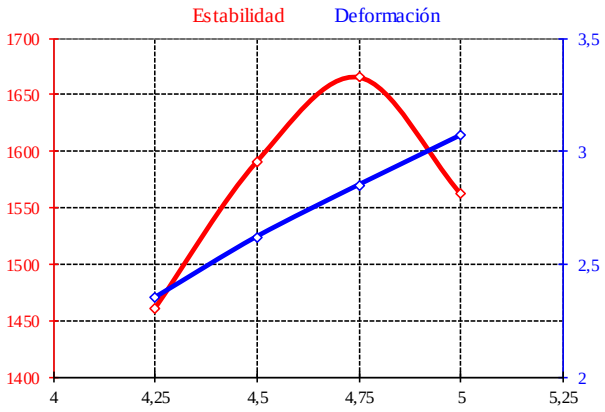
Cálculos Marshall

%L/A	Dens.	H/M	H/A	H/R	Est.	Def.
4,25	2,851	6,44	17,73	63,66	1461	2,35
4,5	2,910	4,06	16,22	74,98	1591	2,62
4,75	2,955	2,12	15,13	85,97	1666	2,85
5	2,969	1,21	14,93	91,92	1563	3,07

P.E.A	P.E.B
3,32	1,03







FECHA: 07/04/08 APARCAMIENTO OFICINAS DENOMINACION **M.B.C. S-12 ESCORIAS** MUESTRA Nº 1

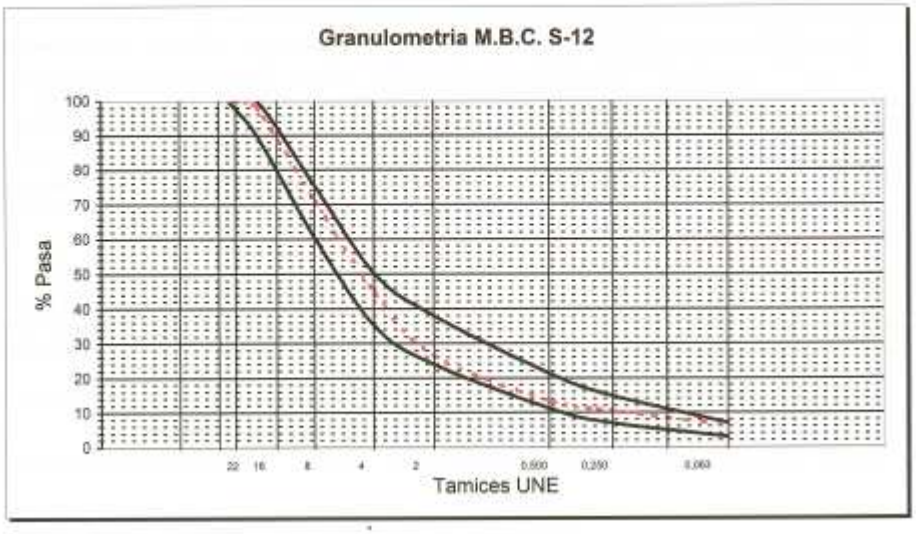
CONTENIDO DEL BETUN

Recipiente + mezcla	a	5.353,0
Recipiente + materia + mineral	b	4.985,0
Recipiente	c	0,0
Mezcla	a-c=P1	5.353,0
Materia mineral	b-c=P2	4.985,0
Tamiz + residuo	d	853,0
Tamiz	e	728,0
Residuo	d-e=P3	125,0
Volumen extracto	V	
Volumen ensayo	V'	
Cápsula + cenizas	f	0,0
Cápsula	g	0,0
Cenizas	f-g=h	0,0
Promedio cenizas	Z	
Cenizas totales	Z*V/V'=P4	
Materia mineral	P2+P3*P4=B	5.110,0
Betún	P1-B=C	243,0
% Betún mezcla	C*100/P1	4,54
% Betún áridos	C*100/B	4,76

ANALISIS GRANULOMETRICO

TAMICES	RETENIDO ENTRE TAMICES		% Pasa
	PESO	%	
22,4	0,0	0,0	100,0
16	97,0	1,9	98,1
8	1.483,0	29,0	71,0
4	2.815,0	55,1	44,9
2	3.748,0	73,3	26,7
0,5	4.429,0	86,7	13,3
0,25	4.564,0	89,3	10,7
0,063	4.787,0	93,7	6,3
Suma			
Cantidad inicial	5.110,0		

% BETUN		R-F/B
/ mezcla	/ áridos	1,3
4,54	4,76	



ENSAYO MARSHALL (NLT-159/00)

Obra: APARCAMIENTO EN LAS OFICINAS	Material: M.B.C.
Muestra Nº: 1	Denominación: S-12 ESCORIAS

CALCULO DE DENSIDADES DE PROBETAS

Nº de la Probeta	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Peso en S.S.S.	a	1.253,6	1.242,0	1.236,9						
Peso en aire	x	1.251,2	1.240,5	1.234,8						
Peso en Agua	c	823,1	808,4	827,3						
Vol. Probeta	a-c=d	430,7	433,6	409,6						
Densidad Probeta	x/d=e	**2,905**	**2,861**	**3,015**						

CALCULO DE VOLUMENES, HUECOS, ESTABILIDAD Y DEFORMACION

%Peso	Betún		-	b	4,84								
-	Aridos		100-b	r	95,46								
	Aparante		-	e	2,937								
	Pe. Bet.	**1,030**	b/Pe.Betún	q	4,41								
	Pe.Ard.	**3,324**	r/Pe.Ard.	-	28,72								
	K. anillo	**1,00**	v+q	s	33,13								
	Máxima Teórica		100/s	g	3,02								
	Peso Betún		e*b	t	13,29								
	Peso Aridos		e*r	u	279,40								
	Volumen Betún		b/Pe.Betún	h	12,90								
	Volumen Aridos		u/Pe.Ard.	i	84,06								
	Volumen Material		h+i	w	96,96								
	Volumen Huecos		100-w	j	3,04								
	Aridos		100-I	k	15,94								
	Rellenos		100*h/k	l	80,90								
	Mezcla		100-W	j	3,04								
Estab.	Media		-	n	1.107	1.107	990						
(kgf)	Corregida		-	o	1.539	1.461	1.455			1.488			
Deform.	1/100"		-	p	2,40	2,65	2,30			2,45			

FECHA 15/04/09 APARCAMIENTO OFICINAS DENOMINACION **M.B.C. S-12 ESCORIAS** MUESTRA Nº 2

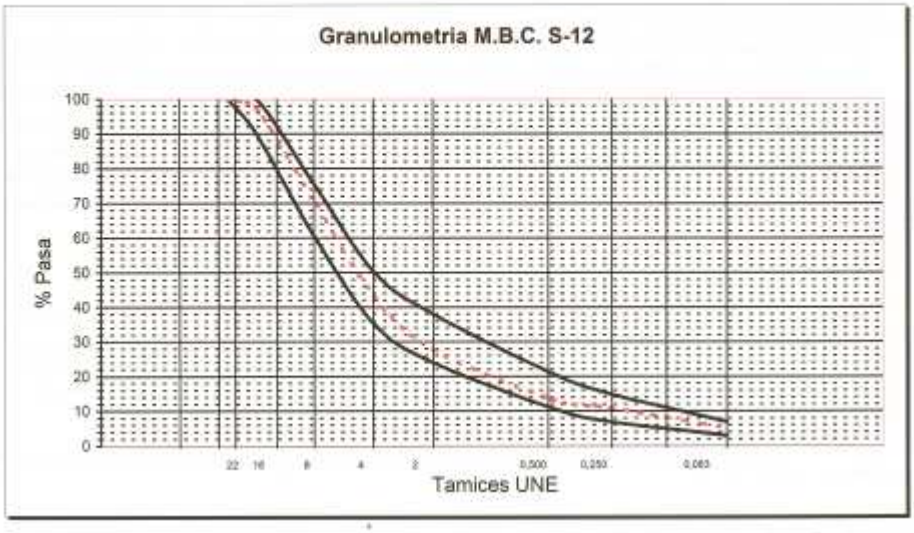
CONTENIDO DEL BETUN

Recipiente + mezcla	a	5.172,0
Recipiente + materia + mineral	b	4.826,0
Recipiente	c	0,0
Mezcla	a-c=P1	5.172,0
Materia mineral	b-c=P2	4.826,0
Tamiz + residuo	d	844,0
Tamiz	e	728,0
Residuo	d-e=P3	116,0
Volumen extracto	V	
Volumen ensayo	V'	
Cápsula + cenizas	f	0,0
Cápsula	g	0,0
Cenizas	f-g=h	0,0
Promedio cenizas	Z	
Cenizas totales	Z*V/V'=P4	
Materia mineral	P2+P3*P4=B	4.942,0
Betún	P1-B=C	230,0
% Betún mezcla	C*100/P1	4,45
% Betún áridos	C*100/B	4,65

ANALISIS GRANULOMETRICO

TAMICES	RETENIDO ENTRE TAMICES		% Pasa
	PESO	%	
22,4	0,0	0,0	100,0
16	133,0	2,7	97,3
8	1.474,0	29,8	70,2
4	2.808,0	56,8	43,2
2	3.556,0	72,0	28,0
0,5	4.270,0	86,4	13,6
0,25	4.460,0	69,0	11,0
0,063	4.678,0	94,7	5,3
Suma			
Cantidad inicial	4.942,0		

% BETUN		R F/B
/ mezcla	/ áridos	1,1
4,45	4,65	



ENSAYO MARSHALL (NLT-159/00)

Obra: APARCAMIENTO EN LAS OFICINAS	Material: M.B.C.
Muestra Nº: 2	Denominación: S-12 ESCORIAS

CALCULO DE DENSIDADES DE PROBETAS

Nº de la Probeta	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Peso en S.S.S.	a	1.270,8	1.252,2	1.281,8						
Peso en aire	x	1.267,8	1.248,6	1.278,7						
Peso en Agua	c	823,1	808,4	827,3						
Vol. Probeta	a-c=d	447,7	443,8	454,5						
Densidad Probeta	x/d=e	**2,832**	**2,813**	**2,813**						

CALCULO DE VOLUMENES, HUECOS, ESTABILIDAD Y DEFORMACION

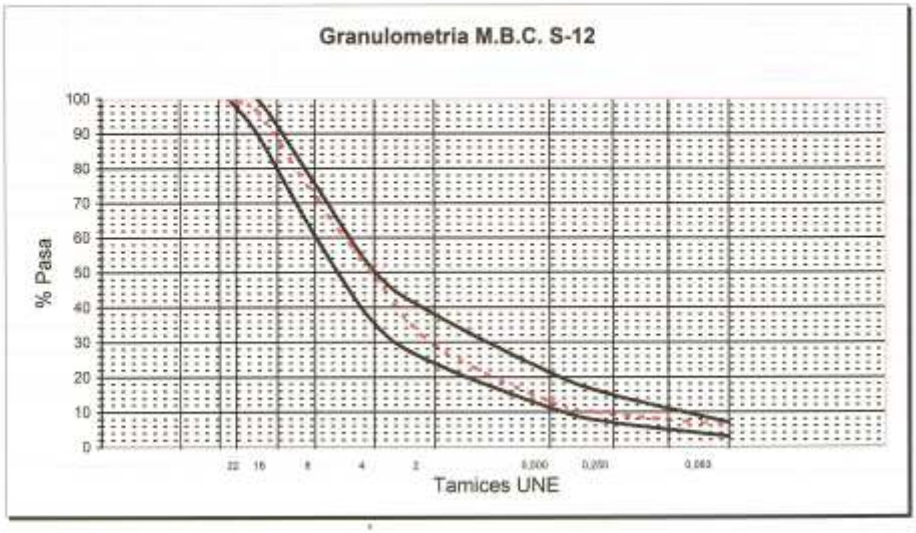
%Peso	Betún		-	b	4,45								
-	Aridos		100-b	r	95,55								
	Aparante		-	e	2,830								
	Pe. Bet.	1,030	b/Pe.Betún	q	4,32								
	Pe.Ard.	3,324	r/Pe.Ard.	-	28,75								
	K. anillo	1,00	v=q	s	33,06								
	Máxima Teórica		100/s	g	3,02								
	Peso Betún		e*b	t	12,54								
	Peso Aridos		e*r	u	269,42								
	Volumen Betún		b/Pe.Betún	h	12,17								
	Volumen Aridos		u/Pe.Ard.	i	81,05								
	Volumen Material		h+i	w	93,23								
	Volumen Huecos		100-w	j	6,77								
	Aridos		100-l	k	18,95								
	Rellenos		100*h/k	l	64,25								
	Mezcla		100-W	j	6,77								
Estab.	Media		-	n	968	1.075	1.032						
(kgf)	Corregida		-	o	1.210	1.419	1.290			1.306			
Deform.	1/100"		-	p	2,60	2,75	2,60			2,65			

FECHA: 16/04/09 APARCAMIENTO OFICINAS. DENOMINACIÓN **M.B.C. S-12 ESCORIAS** MUESTRA Nº 3

CONTENIDO DEL BETUN		
Recipiente + mezcla	a	5.221,0
Recipiente + materia + mineral	b	4.804,0
Recipiente	c	0,0
Mezcla	a-c=P1	5.221,0
Materia mineral	b-c=P2	4.804,0
Tamiz + residuo	d	811,0
Tamiz	e	728,0
Residuo	d-e=P3	83,0
Volumen extracto	V	
Volumen ensayo	V'	
Cápsula + cenizas	f	0,0
Cápsula	g	0,0
Cenizas	f-g=t	0,0
Promedio cenizas	Z	
Cenizas totales	Z*V/V'=P4	
Materia mineral	P2+P3*P4=B	4.887,0
Betún	P1-B=C	234,0
% Betún mezcla	C*100/P1	4,48
% Betún áridos	C*100/B	4,69

ANALISIS GRANULOMETRICO			
TAMICES	RETENIDO ENTRE TAMICES		% Pasa
	PESO	%	
22,4	0,0	0,0	100,0
16	169,0	3,4	96,6
8	1.411,0	28,3	71,7
4	2.563,0	51,4	48,6
2	3.524,0	70,7	29,3
0,5	4.343,0	87,1	12,9
0,25	4.510,0	90,4	9,6
0,063	4.679,0	93,8	6,2
Suma			
Cantidad inicial	4.987,0		

% BETUN		R FIS
/ mezcla	/ áridos	1,3
4,48	4,69	



Obra: APARCAMIENTO EN LAS OFICINAS	Material: M.B.C.
Muestra Nº: 3	Denominación: S-12 ESCORIAS

CALCULO DE DENSIDADES DE PROBETAS										
Nº de la Probeta	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Peso en S.S.S.	a	1.253,9	1.259,3	1.267,8						
Peso en aire	x	1.252,0	1.256,2	1.266,2						
Peso en Agua	c	817,7	821,3	832,4						
Vol. Probeta	a-c=d	436,2	438,0	435,4						
Densidad Probeta	x/d=e	2,870	2,866	2,908						

CALCULO DE VOLUMENES, HUECOS, ESTABILIDAD Y DEFORMACION												
%Peso	Betún		-	b	4,48							
-	Aridos		100-b	r	95,52							
	Aparante		-	e	2,882							
	Pe. Bet.	1,030	b/Pe.Betún	q	4,35							
	Pe.Ard.	3,324	r/Pe.Ard.	-	28,74							
	K. anillo	1,00	v+q	s	33,09							
	Máxima Teórica		100/s	g	3,02							
	Peso Betún		e*b	t	12,92							
	Peso Aridos		e*r	u	275,30							
	Volumen Betún		t/Pe.Betún	h	12,54							
	Volumen Aridos		u/Pe.Ard.	i	82,82							
	Volumen Material		h+i	w	95,36							
	Volumen Huecos		100-w	j	4,64					E		
	Aridos		100-l	k	17,18							
	Rellenos		100*h/k	l	73,00							
	Mezcla		100-W	j	4,64							
Estab.	Media		-	n	1.214	1.161	1.171					
(kgf)	Corregida		-	o	1.602	1.533	1.546			1.560		
Deform.	1/100"		-	p	2,70	2,75	3,20			2,88		

CONTENIDO DE LIGANTE EN MEZCLAS BITUMINOSAS NLT-164/90

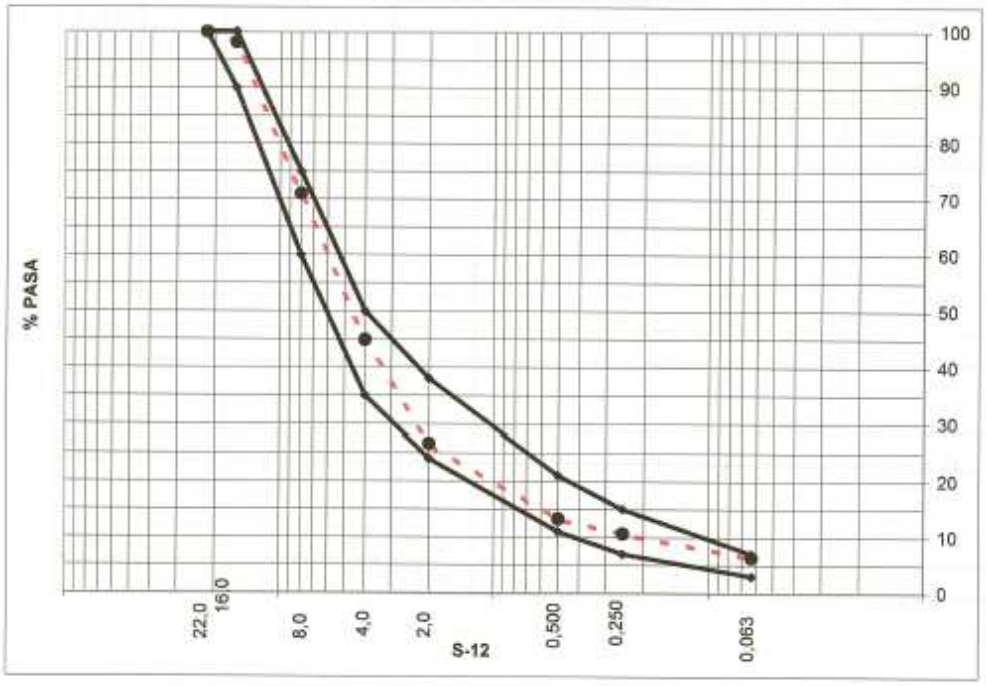
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS ÁRIDOS RECUPERADOS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS NLT-165/90

OBRA : PRUEBA **MEZCLA :** AC 16 SURF 50/70 S Escorias

CONTENIDO DE LIGANTE		
TARA + MEZCLA	a	
TARA + ÁRIDOS	b	
TARA	c	
MEZCLA	P1=a-c	5353,0
ÁRIDOS	P2=b-c	4985,0
FILTRO + RESIDUO	d	853,0
FILTRO	e	728,0
RESIDUO	P3=d-e	125,0
CENIZAS	P4	
MATERIA MINERAL	B=P2+P3+P4	5110,0
LIGANTE	C=P1-B	243,0
% LIGANTE MEZCLA	100xC/P1	4,54
% LIGANTE ÁRIDOS	100xC/B	4,76

GRANULOMÉTRICO				
TAMICES U.N.E.	RETENIDO PESO	RETENIDO %	% PASA	ESPECIF.
22,0	0	0	100	100
16,0	97	2	98	90 - 100
8,0	1483	29	71	60 - 75
4,0	2818	55	45	35 - 50
2,0	3746	73	27	24 - 38
0,500	4429	87	13	11 - 21
0,250	4564	89	11	7 - 15
0,063	4787	94	6,3	3 - 7
P. INICIAL	5110,0			

F / B = 1,4



RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE MEZCLAS BITUMINOSAS EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL

NLT-159

OBRA : PRUEBA **MEZCLA :** AC 16 SURF 50/70 S escorias

CÁLCULO DE DENSIDADES DE PROBETAS											
REFERENCIA PROBETAS		-		1	2	3	4	5	6	7	
PESO PROBETA		c		1251,2	1240,5	1234,8	1241,3	1243,4	1230	1254,6	
PESO S.S.S.		c'-c=p		1253,8	1242,0	1236,9	1243,2	1245,6	1231,5	1256,3	
PESO EN AGUA		d		824,1	819,9	813,1	817,1	819,8	812,5	826,3	
VOL. PROB.	e'-p'=e ó	c-d=e		429,7	422,1	423,8	426,1	425,8	419	430	
DENSIDAD PROBETA		c/e=f		2,912	2,939	2,914	**2,913**	2,920	2,935	2,918	2,921

CÁLCULO DE VOLÚMENES, HUECOS, ESTABILIDAD Y DEFORMACIÓN											
% PESO MEZCLA	BETÚN	-	b								4,54
	ÁRIDOS	100-b	r								95,46
P.E.B.: 1,03 P.E.A.: 3,212 DENSIDADES	APARENTE	-	f								2,921
		b/P.E.B.	q								4,408
		r/P.E.A.	v								29,720
		v+q	s								34,128
	MAX. TEOR.	100/s	g								2,930
VOLUMEN % TOTAL	PESO BETUN	f x b	t								13,23
	PESO ARIDOS	f x r	u								278,07
	V. BETUN	t/P.E.B.	h								12,84
	V. ARIDOS	u/P.E.A	i								86,57
	V. MATERIALES	h + i	w								99,41
	V. HUECOS	100 - w	j								0,59
% HUECOS	ARIDOS	100 - i	k								13,43
	RELLENOS	100 x h/k	i								95,66
	MEZCLA	100 - w	j								0,59
ESTABILIDAD EN Kgs.	PRENSA	-	l	515	515	460	490				
	correc. x anillo		m	1107	1107	990	1053,82				
	correc x vol.	-	o	**1492**	**1536**	**1364**	**1440**				1458
DEFORM.	mm		P	**2,40**	**2,65**	**2,50**	**2,30**				2,45

4/6

Inmersión-Compresión

ENSAYO DE INMERSIÓN-COMPRESIÓN NLT-162

MEZCLA : S-12 escorias - ARIDOS GRUESOS DE ESCORIAS NEGRAS DE GLOBAL STEEL WIRE Y LOS FINOS DE ESCORIAS Y CALIZA AL 50 % .

CÁLCULO DE DENSIDADES DE PROBETAS												
REFERENCIA PROBETAS		-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PESO PROBETA		b	1912,9	1919,6	1914,2	1929,3	1924,3	1914,1	1914,1	1921,6	1915,9	1919,8
PESO PROBETA S.S.S.		c	1918,9	1929,3	1923,2	1937,6	1932,7	1922,9	1926,3	1930,1	1925,9	1930,9
PESO EN AGUA		d	1247,1	1252,8	1256,2	1255,8	1260,6	1247,9	1257,5	1250,7	1254,2	1254,1
VOL. PROB.	e'-p'=e ó c-d=e		671,8	676,5	667,0	681,8	672,1	675	668,8	679,4	671,7	676,8
DENSIDAD PROBETA		b/e=f	2,847	2,838	2,870	2,830	2,863	2,836	2,862	2,828	2,852	2,837
						MEDIA	2,850				MEDIA	2,843

			AGUA						AIRE			
ESTABILIDAD	KGS.		4571	4580	4480	4719	4479	4866	5237	5295	5002	5243
Kgs.	KGS/CM		56,4	56,5	55,3	58,2	55,2	60,0	64,6	65,3	61,7	64,7
						MEDIA	56,3				MEDIA	63,3

I.R.C.EN %	89,0

CRT y Textura

CA-136 Creciente

Distancia	CRT	Textura	Incidencias	Distancia	CRT	Textura	Incidencias	Distancia	CRT	Textura	Incidencias
0	51	0,84		640	66	0,88		1280	60	0,80	
20	50	0,84	CAMBIO DE PAV.	660	63	0,83		1300	59	0,72	
40	64	0,86		680	63	0,83		1320	66	0,78	
60	69	0,88		700	63	0,84		1340	64	0,78	
80	62	0,86		720	63	0,87		1360	59	0,83	
100	59	0,79		740	65	0,84		1380	61	0,77	
120	58	0,86		760	65	0,83		1400	66	0,80	
140	64	0,92		780	66	0,84		1420	65	0,86	
160	64	0,88		800	61	0,80		1440	65	0,87	
180	65	0,87		820	65	0,72		1460	62	0,87	
200	66	0,88		840	64	0,99		1480	61	0,89	PASO INFERIOR
220	63	0,87		860	65	0,90		1500	51	1,13	
240	66	0,92		880	67	0,99		1520	42	1,17	
260	62	0,72		900	68	1,00		1540	51	0,95	PASO INFERIOR
280	62	0,77		920	69	1,01	P.K.	1560	59	0,96	
300	49	0,80	JUNTA PUENTE	940	68	0,98		1580	62	1,01	
320	54	0,80		960	68	0,90		1600	64	0,98	
340	55	0,76		980	65	0,82		1620	64	0,92	
360	53	1,72		1000	64	0,95		1640	71	0,86	
380	47	1,61		1020	66	0,91		1660	71	0,87	
400	48	0,84	ROTONDA	1040	66	0,85		1680	66	0,83	
420	50	1,00		1060	63	0,83		1700	67	0,91	
440	51	0,63	ROTONDA	1080	62	0,79		1720	63	0,89	
460	57	1,04		1100	62	0,76		1740	62	0,84	
480	50	0,73	CAMBIO DE PAV.	1120	63	0,74		1760	61	0,86	
500	62	1,03		1140	64	0,75		1780	55	0,95	BANDA RUGOSA
520	56	0,83		1160	65	0,76		1800	53	0,90	
540	57	0,84		1180	66	0,74		1820	53	0,96	
560	62	0,84		1200	68	0,85		1840	52	1,20	ROTONDA
580	63	0,90		1220	65	0,78		1860	51	0,65	
600	62	0,86		1240	61	0,74		1880	48	0,56	
620	64	0,86		1260	61	0,80		1900	53	0,63	

Distancia	CRT	Textura	Incidencias	Distancia	CRT	Textura	Incidencias	Distancia	CRT	Textura	Incidencias
1920	55	0,68	P.K.	3240	74	0,89		4560	74	0,63	
1940	68	0,93	CAMBIO DE PAV.	3260	73	0,88		4580	75	0,69	
1960	68	0,98		3280	72	0,85		4600	74	0,77	
1980	66	0,94		3300	72	0,83		4620	73	0,76	
2000	66	0,87		3320	72	0,88		4640	72	0,72	
2020	64	0,90		3340	71	0,85		4660	58	0,66	
2040	64	0,95		3360	69	0,82		4680	63	0,68	
2060	67	0,93		3380	69	0,88		4700	65	0,67	
2080	66	0,99		3400	71	0,89		4720	67	0,67	
2100	66	0,95		3420	74	0,85		4740	73	0,75	
2120	64	0,95		3440	73	0,92		4760	73	0,71	
2140	62	1,02		3460	66	0,83		4780	70	0,70	
2160	60	1,07		3480	64	0,84		4800	72	0,68	
2180	46	0,74		3500	61	0,90		4820	72	0,72	
2200	58	1,08		3520	60	0,81		4840	75	0,77	
2220	58	0,96		3540	62	0,89		4860	76	0,90	
2240	58	1,00		3560	61	0,96		4880	77	0,88	
2260	59	1,07		3580	60	0,84		4900	81	0,81	
2280	60	1,03		3600	61	0,89		4920	80	0,90	
2300	56	0,91		3620	62	0,81		4940	78	0,73	
2320	57	0,92		3640	66	0,85		4960	72	0,67	
2340	56	0,87		3660	76	0,95		4980	72	0,72	
2360	56	0,85		3680	77	0,89		5000	68	0,76	
2380	56	0,89		3700	73	0,83		5020	68	0,73	
2400	56	0,85		3720	66	0,83	BANDA RUGOSA	5040	64	0,69	P.K.
2420	54	0,80		3740	60	0,95		5060	69	0,81	
2440	54	0,87		3760	60	1,10	CAMBIO DE PAV.	5080	71	0,76	
2460	50	0,84		3780	54	0,92	ROTONDA	5100	72	0,83	
2480	52	0,88		3800	54	0,64		5120	72	0,78	
2500	50	0,96		3820	56	1,21		5140	67	0,80	
2520	56	0,89		3840	58	1,00		5160	69	0,79	
2540	55	0,90		3860	60	1,21	ROTONDA	5180	75	0,70	CAMBIO DE PAV.
2560	55	0,87		3880	61	0,76		5200	77	0,72	
2580	56	0,87		3900	56	0,64		5220	74	0,75	
2600	57	0,93		3920	65	0,66	CAMBIO DE PAV.	5240	72	0,72	
2620	56	0,92		3940	75	0,62		5260	70	0,72	
2640	56	0,90		3960	76	0,91		5280	70	0,75	
2660	56	0,92		3980	73	0,75		5300	72	0,76	
2680	56	0,98		4000	66	0,62	P.K.	5320	70	0,62	BANDA RUGOSA
2700	58	0,94		4020	64	0,59		5340	73	0,69	
2720	58	0,93		4040	71	0,59		5360	71	1,55	
2740	56	0,97		4060	70	0,58		5380	70	1,06	ROTONDA
2760	54	0,90		4080	70	0,64		5400	80	1,06	
2780	54	0,92		4100	66	0,58		5420	72	2,25	
2800	54	0,90		4120	66	0,63		5440	82	1,70	
2820	52	0,87		4140	74	0,66		5460	72	1,08	ROTONDA
2840	58	0,88		4160	74	0,62		5480	74	0,70	
2860	58	0,88		4180	69	0,71		5500	71	0,63	
2880	59	0,93		4200	68	0,66		5520	72	0,69	
2900	59	0,96		4220	72	0,61		5540	72	0,63	
2920	58	0,85	P.K.	4240	72	0,65		5560	71	0,69	
2940	60	0,91		4260	68	0,62		5580	75	0,69	
2960	56	0,98		4280	65	0,62		5600	76	0,79	
2980	57	1,05		4300	67	0,60		5620	74	0,65	
3000	60	1,00		4320	68	0,64		5640	71	0,64	
3020	58	0,93	BANDA RUGOSA	4340	66	0,61		5660	66	0,62	
3040	53	0,84		4360	61	0,57		5680	68	0,70	
3060	50	0,60	ROTONDA	4380	69	0,67		5700	64	0,69	
3080	50	1,29		4400	83	0,73		5720	68	0,61	
3100	57	0,98		4420	84	0,86		5740	68	0,73	
3120	62	1,55		4440	85	0,73		5760	72	0,76	
3140	57	0,72	ROTONDA	4460	75	0,70		5780	74	0,84	
3160	60	1,07	CAMBIO DE PAV.	4480	70	0,63		5800	73	0,70	
3180	65	1,04		4500	66	0,63		5820	75	0,82	
3200	68	0,80		4520	70	0,73		5840	76	0,67	
3220	72	0,91		4540	72	0,71		5860	72	0,68	

Distancia	CRT	Textura	Incidencias	Distancia	CRT	Textura	Incidencias	Distancia	CRT	Textura	Incidencias
5880	76	0,66		6900	72	0,71		7920	68	0,73	
5900	81	0,72		6920	78	0,77		7940	66	1,31	
5920	83	0,61		6940	70	0,70		7960	68	0,80	
5940	80	0,68		6960	66	0,79		7980	68	0,71	
5960	70	0,67	PASO INFERIOR	6980	64	0,76		8000	66	0,86	
5980	74	0,72	PASO INFERIOR	7000	71	0,70		8020	68	0,66	
6000	73	0,69		7020	72	1,27		8040	74	0,71	
6020	72	0,70		7040	74	1,40		8060	78	0,70	P.K.
6040	72	0,77		7060	73	0,97		8080	76	0,85	
6060	70	0,77	P.K.	7080	59	1,00		8100	74	0,69	
6080	71	0,74		7100	62	0,90		8120	67	0,82	
6100	77	0,72		7120	60	0,71	P.K.	8140	74	0,74	
6120	78	0,76		7140	61	0,86		8160	66	0,63	
6140	77	0,75		7160	73	1,01		8180	64	0,69	
6160	75	0,79		7180	76	1,14		8200	69	0,74	
6180	73	0,76		7200	59	0,72		8220	72	0,75	
6200	79	0,79		7220	59	1,05		8240	68	0,74	
6220	77	0,74		7240	65	0,86		8260	64	0,77	
6240	74	0,78		7260	72	1,13		8280	58	0,92	
6260	67	0,79		7280	72	0,81		8300	64	0,78	
6280	64	0,91		7300	71	1,12		8320	64	0,91	
6300	73	0,76		7320	68	0,68		8340	56	0,70	BANDA RUGOSA
6320	74	0,79		7340	60	0,70		8360	58	0,82	
6340	75	0,70		7360	64	0,79		8380	64	2,27	
6360	75	0,77		7380	67	0,79		8400	75	0,75	ROTONDA
6380	77	0,70		7400	62	0,66		8420	62	0,74	
6400	80	0,67		7420	60	0,70		8440	65	1,17	
6420	75	0,84		7440	69	0,75		8460	74	0,61	
6440	63	0,76		7460	71	0,64		8480	68	1,27	ROTONDA
6460	66	0,77		7480	63	0,70		8500	67	0,79	
6480	63	0,93		7500	58	0,73		8520	75	0,73	
6500	66	0,66		7520	61	0,91		8540	73	0,74	
6520	68	0,82		7540	67	0,69		8560	72	0,75	
6540	76	0,74		7560	67	0,81		8580	71	0,82	
6560	75	0,73		7580	56	0,94		8600	62	0,72	
6580	70	0,78		7600	56	0,72		8620	58	0,83	
6600	72	0,68		7620	59	0,71		8640	48	0,78	CAMBIO DE PAV.
6620	70	0,69		7640	64	0,85		8660	38	0,67	
6640	73	1,01		7660	64	0,63		8680	43	0,75	
6660	70	0,77		7680	66	0,83	CAMBIO DE PAV.	8700	46	0,71	
6680	66	0,70		7700	62	0,97		8720	40	0,66	
6700	66	0,89		7720	66	0,89		8740	40	0,53	CAMBIO DE PAV.
6720	59	0,68		7740	66	0,92		8760	52	0,65	CAMBIO DE PAV.
6740	66	0,76		7760	70	0,85		8780	37	0,56	
6760	73	0,96		7780	66	0,66		8800	41	0,54	
6780	75	0,95		7800	70	0,62		8820	36	0,61	
6800	72	0,79		7820	74	0,62		8840	41	0,58	
6820	74	0,68		7840	76	0,65		8860	41	0,77	
6840	75	0,74		7860	78	0,83		8880	40	2,07	CAMBIO DE PAV.
6860	74	0,79		7880	76	0,79		8900	65	2,10	
6880	70	0,86		7900	69	0,74					

CA-136 Decreciente

Distancia	CRT	Textura	Incidencias	Distancia	CRT	Textura	Incidencias	Distancia	CRT	Textura	Incidencias
0	74	0,95		860	70	0,99		1720	69	0,74	
20	58	0,83	CAMBIO DE PAV.	880	66	0,82		1740	59	0,69	
40	47	0,69		900	70	0,81		1760	58	0,69	P.K.
60	48	0,76		920	63	0,68		1780	72	0,80	
80	45	0,67		940	66	0,65		1800	75	0,73	
100	40	0,69		960	72	0,72		1820	76	0,72	
120	44	0,82		980	75	0,80		1840	80	0,72	
140	50	0,71	CAMBIO DE PAV.	1000	74	0,80		1860	74	0,68	
160	53	0,61	CAMBIO DE PAV.	1020	71	0,69		1880	63	0,73	
180	43	0,68		1040	72	0,74		1900	59	0,67	
200	42	0,68		1060	71	0,68		1920	68	0,71	
220	44	0,77		1080	68	0,73		1940	69	0,75	
240	34	0,63		1100	70	0,67		1960	71	0,71	
260	42	0,63	CAMBIO DE PAV.	1120	72	0,73		1980	72	0,73	
280	65	0,82		1140	70	0,73		2000	67	0,86	
300	69	0,80		1160	68	0,67		2020	64	0,72	
320	71	0,70		1180	74	0,75		2040	65	0,62	
340	72	0,78		1200	74	0,76	CAMBIO DE PAV.	2060	64	0,64	
360	66	0,76		1220	69	0,68		2080	65	0,69	
380	56	0,67	BANDA RUGOSA	1240	64	0,67		2100	64	0,62	
400	52	0,85		1260	61	0,67		2120	61	0,65	
420	54	0,68	ROTONDA	1280	64	0,63		2140	63	0,66	
440	74	0,59		1300	70	0,78		2160	66	0,68	
460	78	0,74		1320	62	0,77		2180	70	0,75	
480	72	0,79	ROTONDA	1340	66	0,75		2200	70	0,82	
500	64	0,80		1360	59	0,69		2220	70	0,70	
520	68	0,63		1380	56	0,68		2240	69	0,77	
540	66	0,65		1400	61	0,79		2260	74	0,74	
560	70	0,62		1420	67	0,65		2280	74	0,80	
580	69	0,57		1440	67	0,77		2300	76	0,72	
600	70	0,63		1460	68	0,72		2320	75	0,86	
620	76	0,61		1480	59	0,65		2340	70	0,73	
640	66	0,73		1500	59	0,65		2360	71	0,78	
660	62	0,71		1520	64	0,70		2380	68	0,62	
680	62	0,72		1540	71	0,73		2400	72	0,66	
700	54	0,61		1560	69	0,83		2420	76	0,70	
720	58	0,63		1580	61	0,76		2440	78	0,77	
740	57	0,74		1600	65	0,72		2460	63	0,92	
760	69	0,84		1620	68	0,86		2480	70	0,77	
780	71	0,88		1640	60	0,68		2500	74	0,77	
800	73	0,82		1660	59	0,67		2520	68	0,77	
820	77	0,77		1680	61	0,79		2540	63	0,75	
840	79	0,83	P.K.	1700	65	0,76		2560	60	0,73	
Distancia	**CRT**	**Textura**	**Incidencias**	**Distancia**	**CRT**	**Textura**	**Incidencias**	**Distancia**	**CRT**	**Textura**	**Incidencias**
2580	59	0,81		3840	68	0,67		5100	54	0,65	ROTONDA
2600	66	0,84		3860	72	0,66		5120	60	0,88	CAMBIO DE PAV.
2620	71	0,81		3880	70	0,69	P.K.	5140	70	1,02	
2640	74	0,83		3900	72	0,69		5160	67	1,25	
2660	73	0,83		3920	70	0,67		5180	65	0,80	
2680	71	0,78		3940	66	0,68		5200	67	0,87	
2700	73	0,75		3960	69	0,64		5220	66	0,87	
2720	76	0,83		3980	69	0,83		5240	65	0,80	
2740	77	0,83		4000	71	0,75		5260	64	0,97	
2760	74	0,88		4020	70	0,81		5280	64	0,89	
2780	71	0,80		4040	71	0,78		5300	67	0,90	
2800	70	0,89		4060	70	0,80		5320	70	0,91	
2820	65	0,73	P.K.	4080	68	0,68		5340	70	0,92	
2840	64	0,73		4100	68	0,71		5360	69	0,85	
2860	64	0,74		4120	68	0,77		5380	70	0,88	
2880	69	1,01		4140	76	0,68		5400	74	0,82	
2900	67	0,92		4160	75	0,74		5420	72	0,80	
2920	65	0,74	PASO INFERIOR	4180	76	0,74		5440	67	0,76	
2940	64	0,76	PASO INFERIOR	4200	67	0,79		5460	55	0,87	
2960	76	0,74		4220	68	0,64		5480	46	0,71	

2980	76	0,78		4240	66	0,78		5500	48	0,75	
3000	71	0,72		4260	65	0,76		5520	52	0,71	
3020	67	0,64		4280	65	0,68		5540	51	0,77	
3040	69	0,69		4300	54	0,71		5560	53	0,77	
3060	68	0,70		4320	54	0,75		5580	56	0,76	
3080	72	0,68		4340	53	0,76		5600	56	0,71	
3100	68	0,71		4360	53	0,67		5620	57	0,79	
3120	64	0,73		4380	53	0,69		5640	60	0,83	
3140	66	0,77		4400	56	0,65		5660	57	0,82	
3160	74	0,82		4420	53	0,67		5680	60	0,84	
3180	73	0,74		4440	57	0,65		5700	55	0,79	BANDA RUGOSA
3200	72	0,78		4460	69	0,69		5720	54	0,74	
3220	73	0,75		4480	68	0,61		5740	54	0,66	CAMBIO DE PAV.
3240	75	0,82		4500	67	0,70		5760	48	0,73	ROTONDA
3260	76	0,92		4520	73	0,77		5780	60	0,69	
3280	80	0,74		4540	75	0,78		5800	59	0,68	
3300	84	0,74		4560	72	0,87		5820	59	0,62	ROTONDA
3320	80	0,74		4580	65	0,68		5840	51	0,66	CAMBIO DE PAV.
3340	71	0,71		4600	64	0,68		5860	57	1,36	
3360	62	0,76		4620	66	0,77		5880	64	0,91	
3380	63	0,79	BANDA RUGOSA	4640	73	0,74		5900	53	0,78	
3400	61	0,87		4660	72	0,77		5920	56	0,81	
3420	64	0,83		4680	67	0,68		5940	58	0,89	
3440	67	0,89	ROTONDA	4700	64	0,79		5960	57	0,79	
3460	85	0,73		4720	69	0,73		5980	54	0,85	P.K.
3480	78	0,76		4740	68	0,75		6000	56	0,90	
3500	76	0,80		4760	71	0,79		6020	58	0,86	
3520	70	0,77		4780	70	0,72		6040	58	0,86	
3540	74	0,89	ROTONDA	4800	66	0,79		6060	57	0,81	
3560	65	0,97		4820	71	0,67		6080	59	0,75	
3580	70	0,72		4840	74	0,81		6100	60	0,78	
3600	73	0,66		4860	71	0,68		6120	59	0,84	
3620	74	0,74		4880	73	0,69		6140	56	0,80	
3640	69	0,64		4900	65	0,66	P.K.	6160	58	0,80	
3660	65	0,76		4920	65	0,67		6180	57	0,79	
3680	69	0,74		4940	63	0,72		6200	56	0,76	
3700	74	0,78		4960	70	0,71		6220	55	0,86	
3720	69	0,65		4980	73	0,75		6240	56	0,76	
3740	66	0,66		5000	53	0,58	CAMBIO DE PAV.	6260	56	0,82	
3760	63	0,65	CAMBIO DE PAV.	5020	50	0,53		6280	58	0,78	
3780	63	0,66		5040	70	0,74	ROTONDA	6300	58	0,92	
3800	61	0,62		5060	61	0,63		6320	56	0,90	
3820	62	0,62		5080	66	0,81		6340	57	0,88	

Distancia	CRT	Textura	Incidencias	Distancia	CRT	Textura	Incidencias	Distancia	CRT	Textura	Incidencias
6360	60	0,89		7220	63	0,80		8080	52	0,81	
6380	60	0,89		7240	61	0,83		8100	60	0,87	
6400	57	0,91		7260	63	0,82		8120	62	0,92	
6420	58	0,88		7280	57	0,84		8140	68	0,84	
6440	57	0,89		7300	61	0,81		8160	64	0,86	
6460	55	0,91		7320	65	0,90		8180	62	0,84	
6480	57	0,91		7340	64	0,93		8200	60	0,80	
6500	59	0,93		7360	63	0,99	PASO INFERIOR	8220	60	0,85	
6520	59	0,88		7380	54	1,16		8240	60	0,81	
6540	57	0,84		7400	41	1,18		8260	59	0,80	
6560	54	0,77		7420	59	0,96	PASO INFERIOR	8280	60	0,82	
6580	50	0,77		7440	70	0,79		8300	62	0,82	
6600	53	0,77		7460	68	0,80		8320	62	0,90	
6620	55	0,78		7480	68	0,83		8340	62	0,81	
6640	52	0,74		7500	64	0,75		8360	60	0,88	
6660	54	0,77		7520	58	0,82		8380	56	1,03	
6680	53	0,77		7540	52	0,75		8400	53	1,03	BANDA RUGOSA
6700	55	0,86		7560	54	0,77		8420	49	0,71	
6720	48	0,76		7580	58	0,77		8440	41	0,79	CAMBIO DE PAV.
6740	50	0,90		7600	61	0,69		8460	68	0,57	ROTONDA

6760	54	0,76		7620	59	0,72		8480	57	0,71	
6780	52	0,72		7640	59	0,79		8500	52	0,99	ROTONDA
6800	54	0,93		7660	58	0,81		8520	50	0,91	JUNTA DE PUENTE
6820	50	0,91		7680	58	0,85		8540	59	0,87	
6840	42	1,00		7700	54	0,86		8560	60	0,91	
6860	40	0,93		7720	56	0,77		8580	60	0,91	
6880	46	0,86		7740	48	0,74		8600	55	1,41	JUNTA DE PUENTE
6900	56	0,91		7760	45	0,75		8620	60	1,02	
6920	58	0,87		7780	49	0,78		8640	51	1,00	
6940	55	0,91	BANDA RUGOSA	7800	50	0,79		8660	54	0,84	
6960	50	0,85		7820	49	0,85		8680	63	0,90	
6980	51	0,86		7840	46	0,73		8700	61	1,02	
7000	40	0,62		7860	49	0,75		8720	58	1,00	
7020	50	0,70	P.K.	7880	53	0,78		8740	61	0,90	
7040	61	0,75		7900	59	0,94		8760	61	1,10	
7060	59	0,71		7920	60	0,86		8780	61	1,06	
7080	68	0,74	ROTONDA	7940	58	0,83		8800	58	1,12	
7100	67	1,00		7960	53	0,78		8820	57	1,01	
7120	68	0,76		7980	52	0,76	P.K.	8840	55	1,05	
7140	67	0,84		8000	50	0,73		8860	52	1,20	
7160	60	0,85		8020	48	0,71		8880	46	0,98	CAMBIO DE PAV.
7180	62	0,83		8040	48	0,75		8900	23	0,98	
7200	59	0,82		8060	47	0,77		8920	56	1,34	P.K.

CA-137 Creciente

Distancia	C.R.T.	Textura	Incidencias	Distancia	C.R.T.	Textura	Incidencias	Distancia	C.R.T.	Textura	Incidencias
0	64	1,14		840	67	0,65		1680	73	0,73	
20	75	0,78		860	66	0,65		1700	76	0,79	
40	69	1,04		880	69	0,65		1720	74	0,71	
60	62	0,74		900	68	0,78		1740	71	0,71	
80	76	0,70		920	76	0,82		1760	69	0,79	
100	69	0,64		940	78	0,77		1780	66	0,88	
120	62	0,70		960	79	0,71		1800	74	0,74	
140	65	0,63		980	75	0,72		1820	71	0,76	
160	61	0,78		1000	67	0,72		1840	73	0,75	
180	60	0,80		1020	67	0,78		1860	70	0,81	
200	64	0,62		1040	77	0,72		1880	72	0,82	
220	63	0,72	CAMBIO DE PAV.	1060	76	0,71		1900	71	0,91	
240	76	0,74		1080	79	0,73		1920	72	0,84	
260	77	0,76		1100	77	0,72		1940	71	0,84	
280	83	0,79		1120	71	0,62		1960	70	0,85	
300	78	0,99		1140	72	0,71		1980	71	0,83	
320	82	0,77		1160	80	0,69		2000	66	0,70	
340	83	0,80		1180	78	0,78		2020	66	0,80	
360	80	0,71		1200	79	0,80		2040	67	0,77	
380	80	0,86		1220	80	0,79		2060	76	0,82	
400	79	0,72		1240	80	0,80		2080	81	0,81	
420	82	0,74		1260	78	0,77	BANDA RUGOSA	2100	80	0,84	
440	80	0,67		1280	77	0,78		2120	83	0,77	
460	81	0,89		1300	68	0,74		2140	82	0,83	
480	73	0,79		1320	66	1,20	ROTONDA	2160	85	0,72	
500	66	0,76	PTO. KILOMÉTRICO	1340	72	1,31		2180	87	0,72	
520	69	0,80		1360	76	0,76		2200	86	0,86	
540	71	0,75		1380	74	1,20	ROTONDA	2220	83	0,85	
560	76	0,70		1400	72	0,89		2240	79	0,88	
580	77	0,73		1420	75	0,73		2260	78	0,73	
600	79	0,71		1440	73	0,64	PTO. KILOMÉTRICO	2280	80	0,74	
620	79	0,69		1460	71	0,81	CAMBIO DE PAV.	2300	79	0,70	
640	74	0,77		1480	70	0,86		2320	80	0,77	
660	68	0,88		1500	67	0,70		2340	76	0,74	
680	73	0,80		1520	67	0,69		2360	76	0,81	
700	66	0,75		1540	65	0,79		2380	75	0,82	
720	63	0,69		1560	64	0,76		2400	74	0,91	
740	63	0,72		1580	72	0,81		2420	68	0,78	
760	66	0,73		1600	77	0,76		2440	57	0,70	BANDA RUGOSA
780	69	0,71		1620	70	0,76		2460	52	0,99	
800	78	0,75		1640	67	0,76		2480	68	1,03	
820	77	0,65		1660	64	0,80		2500	75	0,99	

CA-137 Decreciente

Distancia	C.R.T.	Textura	Incidencias	Distancia	C.R.T.	Textura	Incidencias	Distancia	C.R.T.	Textura	Incidencias
0	78	0,91	PTO. KILOMÉTRICO	860	80	0,85		1720	78	0,67	
20	79	1,05	CAMBIO DE PAV.	880	78	0,83		1740	79	0,72	
40	83	0,89		900	69	0,84		1760	78	0,68	
60	83	0,91		920	70	0,86		1780	80	0,79	
80	77	0,96		940	75	0,91		1800	78	0,87	
100	67	0,84		960	75	0,93		1820	78	0,85	
120	72	0,90		980	81	0,79		1840	79	0,86	
140	77	0,94		1000	81	0,96		1860	79	0,86	
160	78	0,98		1020	83	0,87		1880	81	0,96	
180	78	0,92		1040	80	0,91		1900	72	0,73	
200	78	0,76		1060	78	0,95	PTO. KILOMÉTRICO	1920	72	0,85	
220	80	0,77		1080	81	0,84	BANDA RUGOSA	1940	76	0,72	
240	82	0,76		1100	81	1,00		1960	80	0,73	
260	84	0,83		1120	73	1,06		1980	77	0,74	
280	82	0,88		1140	77	1,28	ROTONDA	2000	76	0,73	
300	78	0,81		1160	85	0,72		2020	67	0,89	
320	83	0,80		1180	80	0,78		2040	65	0,80	PTO. KILOMÉTRICO
340	78	0,72		1200	81	0,80		2060	77	0,79	
360	76	0,81		1220	75	0,83	ROTONDA	2080	75	0,87	
380	74	0,90		1240	77	0,92		2100	72	0,86	
400	77	0,89		1260	68	0,81		2120	66	0,77	
420	83	0,86		1280	76	0,85		2140	70	0,73	
440	84	0,88		1300	85	0,87		2160	70	0,76	
460	77	0,91		1320	87	0,91		2180	68	0,73	
480	71	0,84		1340	84	0,73		2200	70	0,75	
500	74	0,97		1360	81	0,88		2220	70	0,66	
520	76	1,00		1380	81	0,78		2240	71	0,77	
540	77	0,98		1400	78	0,75		2260	74	0,68	
560	78	0,98		1420	69	0,77		2280	73	0,70	
580	78	0,87		1440	70	0,80		2300	72	0,79	
600	79	0,94		1460	79	0,77		2320	72	0,68	CAMBIO DE PAV.
620	76	0,96		1480	81	0,71		2340	58	0,55	
640	81	0,88		1500	76	0,70		2360	59	0,70	
660	82	0,95		1520	75	0,72		2380	58	0,75	
680	79	0,86		1540	75	0,72		2400	60	0,75	
700	78	0,90		1560	76	0,83		2420	63	0,76	
720	75	0,85		1580	78	0,73		2440	55	0,78	BANDA RUGOSA
740	77	1,06		1600	76	0,78		2460	54	0,85	
760	78	0,99		1620	80	0,82		2480	59	0,59	
780	82	0,79		1640	74	0,75		2500	59	0,66	
800	82	0,75		1660	72	0,77		2520	64	0,87	
820	81	1,00		1680	78	0,83		2540	55	0,70	
840	79	0,78		1700	78	0,87					

ANEXO A.2 ESCORIAS DE FERROSILICOMANGANESO

CARACTERIZACIÓN

Granulometría

UNE - EN 933-2 (mm)

FECHA: feb-10 **EMPRESA:** EMILIO BOLADO

Nº BANDEJA	1	Nº BANDEJA	2	Nº BANDEJA	3	Nº BANDEJA	4
PESO INICIAL	1.382,2	PESO INICIAL	2.035,9	PESO INICIAL	1.439,1	PESO INICIAL	1.149,3

TAMIZ UNE m.m.	Peso acumulado	% Retiene	% PASA	Peso acumulado	% Retiene	% PASA	Peso acumulado	% Retiene	% PASA	Peso acumulado	% Retiene	% PASA	MEDIA
45	**0,0**	0,0	100,0	**0,0**	0,0	100,0	**0,0**	0,0	100,0	**0,0**	0,0	100,0	**100,0**
32	**62,9**	4,6	95,4	**60,6**	3,0	97,0	**0,0**	0,0	100,0	**0,0**	0,0	100,0	**98,1**
22	**144,2**	10,4	89,6	**396,5**	19,5	80,5	**41,2**	2,9	97,1	**38,4**	3,3	96,7	**91,0**
16	**270,4**	19,6	80,4	**587,3**	28,8	71,2	**110,6**	7,7	92,3	**118,1**	10,3	89,7	**83,4**
12,5	**339,8**	24,6	75,4	**694,5**	34,1	65,9	**206,4**	14,3	85,7	**156,2**	13,6	86,4	**78,3**
8	**532,4**	38,5	61,5	**943,4**	46,3	53,7	**411,4**	28,6	71,4	**316,8**	27,6	72,4	**64,7**
4	**784,3**	56,7	43,3	**1.300,0**	63,9	36,1	**759,2**	52,8	47,2	**594,0**	51,7	48,3	**43,7**
2	**983,6**	71,2	28,8	**1.541,2**	75,7	24,3	**1.000,8**	69,5	30,5	**782,5**	68,1	31,9	**28,9**
0,500	**1.235,2**	89,4	10,6	**1.849,3**	90,8	9,2	**1.285,2**	89,3	10,7	**1.018,5**	88,6	11,4	**10,5**
0,250	**1.293,4**	93,6	6,4	**1.920,6**	94,3	5,7	**1.342,5**	93,3	6,7	**1.067,4**	92,9	7,1	**6,5**
0,063	**1.348,0**	97,5	2,5	**1.991,6**	97,8	2,2	**1.400,2**	97,3	2,7	**1.115,8**	97,1	2,9	**2,6**

Densidad aparente y porosidad

DENSIDAD APARENTE DE LA MUESTRA
NORMA: EN 1097-3:1998

FECHA: jueves, 18 de febrero de 2010 **ÁRIDO:** ESCORIA 12-18 MOLIDA Y CRIBADA

Masa del recipiente vacio en kilogramos	m_1 (Kg)	3,733	3,733	3,733
Masa del recipiente y de la muestra en kilogramos	m_2 (kg)	11,304	11,370	11,339
Volumen del recipiente expresado en litros	v(Litros)	5,179	5,179	5,179
Densidad aparente expresada en megagramos por metro cúbico	ρ_b $Mg_/m^3$	1,462	1,474	1,469
Densidad aparente expresada en megagramos por metro cúbico	ρ_b Mg/m^3	1,468		
Un megagramo por metro cúbico es igual a una tonelada por metro cúbico	Tn/m^3	1,468		

Densidad aparente: Cociente obtenido al dividir la masa del árido seco sin compactar contenido en un recipiente determinado por el volumen de dicho recipiente.

PORCENTAJE DE HUECOS DE LA MUESTRA
NORMA: EN 1097-3:1998

Densidad aparente expresada en megagramos por metro cúbico	ρ_b $Mg_/m^3$	1,462	1,474	1,469
Densidad de particulas tras secado en estufa (EN 1097-6)	ρ_p Mg/m^3	3,012	3,012	3,012
Porcentaje de huecos	%	51,5	51,0	51,2
Media del porcentaje de huecos (%)		51,3		

Figura 214: Densidad aparente y porosidad escoria de ferrosilicomanganeso.

Densidad relativa

FECHA: jueves, 18 de febrero de 2010	MUESTRA:	ESCORIA MOLIDA SIN CRIBAR	
Ref. del Picnómetro		1	2
Peso Picn. enrasado con agua	D	1720,6	1676,0
Peso Picn. con 400 cc. de agua	A	844,8	870,2
Peso Picn. con 400 cc. + árido	B	1450,7	1477,0
Peso Picn. enrasado + árido	E	2125,4	2081,9
Masa de muestra seca	C = B - A	605,9	606,8
Volumen ocupado por muestra	V = C + D - E	201,1	200,9
Temperatura del agua destilada	Grados	20	20
Densidad del agua destilada	X	0,9983	0,9983
Volumen real de la muestra	V.real = V/X	201,4	201,2
Densidad Relativa	D.real = C/V.real	3,008	3,015

DENSIDAD RELATIVA	3,012

Equivalente de arena

EQUIVALENTE DE ARENA
UNE-EN 933-8:2.000

Identificación de la muestra **ESCORIA SiMn MOLIDA SIN CRIBAR** **FECHA** **martes, 23 de febrero de 2010**

	1ª Submuestra	2ª Submuestra	EA
Masa de la submuestra (gramos)	**120**	**120**	
h_1 (milímetros)	**114**	**120**	
h_2 (milímetros)	**96**	**98**	
$100 \times (h_2 / h_1)$ (con una cifra decimal)	84	82	**83**
NOTA - Los valores de $100 \times (h_2 / h_1)$ de las dos submuestras de ensayo no deben diferir en más de 4.			**CUMPLE**

Valor del Equivalente de Arena **(EA)**: Media de los valores: 100 × (h2 / h1) correspondientes a los dos determinaciones.

El resultado del Equivalente de Arena se redondea al entero más próximo

Nota importante: Hay que conseguir 5 litros exactos formados por agua destilada más 125 cc de solución tipo. Para ello lo mejor es echar por ejemplo 4.850 gramos de agua destilada y luego añadir los 125 cc de la solución tipo, luego completar hasta conseguir los 5 litros.

Índice de lajas

INDICE DE LAJAS
UNE-EN 933-3:1997/A1:2003

FECHA:	22 de febrero de 2010	PROCEDENCIA DEL MATERIAL:	12-18 Molido y Cribado
Masa de la muestra M_0	1.490,2 gramos	Masa retenida por el tamiz de 80 mm =	0,0 gramos
		Masa que pasar por el tamiz de 4 mm =	15,8 gramos
		Suma de las masas rechazadas =	15,8 gramos

Tamizado con tamices de ensayo		Cribado con tamices de barras		
Fracción granulometrica d_i/D_i mm	Masa (R_i) de la fracción granulométrica retenida en cada tamiz gramos	Anchura nominal de las ranuras de los tamices de barras mm	Masa que pasa por el tamiz de barras (m_i) gramos	IL_i
63/80		40 ± 0,5		
50/63		31,5 ± 0,5		
40/50		25 ± 0,4		
31,5/40		20 ± 0,4		
25/31,5		16 ± 0,4		
20/25	23,5	12,5 ± 0,4	0,0	0,0
16/20	591,4	10 ± 0,2	56,4	9,5
12,5/16	762,9	8 ± 0,2	64,9	8,5
10/12,5	78,3	6,3 ± 0,2	11,6	14,8
80/10	6,4	5 ± 0,2	0,0	0,0
6,3/8	2,5	4 ± 0,15	0,3	12,0
5/6,3	0,6	3,15 ± 0,15	0,1	16,7
4/5	0,4	2,5 ± 0,15	0,0	0,0
$M_1 = \sum R_i =$	1.466,0	$M_2 = \sum m_i =$	133,3	9,1
			9	
			CUMPLE	< 1 %

- M_0 Masa inicial de ensayo
- m_i Es la masa de cada fracción granulometrica que pasa por cada tamiz de barras
- R_i Es la masa de cada fracción granulometrica retenida en cada tamiz
- M_1 Es el sumatorio de las masas de las fracciones granulométricas retenida en cada tam
- M_2 Es el sumatorio de las masas de las particulas que pasan por los tamices de barras
- IL_i Es el indice de lajas para cada fracción granulometrica
- IL Es el indice de lajas global

NOTA: Cuando la suma de las masas R_i junto con la masa de las fracciones descartadas difiera en más del 1 % de la masa M_0, el ensayo se repetira utilizando otra muestra de ensayo.

Coeficiente de forma

COEFICIENTE DE FORMA EN 933-4 2008

Identificacion de la muestra: 12-18 Sólo Cribado	**Fecha: miércoles 24 de febrero de 2010**
Mo: 3500 g	

Fracción granulométrica di/Di con Di ≤ 2di mm	Masa M_1 g	Masa M_2 g	Coeficiente de forma SI%= (M_2/M_1)*100
22,4/31,5			
16/22,4	572,8	175,4	31
12,5/16	1846,7	525,7	28
11,2/12,5	717,8	172,1	24
10/11,2	N/R		
8/10,0	N/R		
5,6/8	N/R		
4/5,6	N/R		
Sumatoria	3137,3	873,2	28

M_0 : Masa de la muestra de ensayo en gramos
M_1 : Masa de la fraccion granulométrica en gramos
M_2: Masa de las pratículas no cúbicas en gramos

Nota: Partículas no cúbicas se refiere a la evaluacion de cada una de las particulas que presentan una relacion L/E (Largo/Espesor) superior a 3
Nota: N/R hace referencia a No Representativo lo cual indica que la masa de la fraccion en cuestión no representa al menos el 10 % de la masa Mo de ensayo

Los Ángeles

ENSAYO DE LOS ANGELES
EN 1097 - 2 : 1998

El coeficiente de los Angeles **(LA)** es el porcentaje en masa de la muestra de ensayo que haya pasado a través del tamiz de 1,6 n a la terminación del ensayo despues de lavarla. La muestra de ensayo deberá tener una **masa inicial** lavada de **(5.000 ± 5) gram**

La carga abrasiva consiste en **11 bolas** con diámetro entre 45 y 49 mm y una masa comprendida entre 400 gr. y 445 gr.
La masa total deberá estar comprendida entre 4.690 gr. y 4.860 gr.

La masa de la muestra inicial deberá ser al menos de 15 kg, con una granulometria comprendida entre 10 mm. y 14 mm.

El ensayo se realizará con el árido que pase por el tamiz de 14 mm. y quede retenido en el tamiz de 10 mm.
Lavar cada fráccion del arido por separado, antes de meterlas en la máquina.

Debera cumplir los siguientes requisitos:

Por el tamiz de 12,5 mm deberá pasar entre el 60 % y el 70 % de árido, o sino,
Por el tamiz de 11,2 mm deberá pasar entre el 30 % y el 40 % de árido

Identificación de la muestra **ESCORIA 6-12 MOLIDA Y CRIBADA (muestra 2)** **FECHA** **12 de febrero de 2010**

Fracción granulometrica apartir de las cuales se obtuvo la muestra de ensayo **6,3 a 10** **9 BOLAS**

30%	40%	60%	70%	
1.498,5	2.002,0	2.997,0	3.503,5	
CUMPLE		3.152,8	3.142,8	
1.852,2		**3.150,4**		5.002,6
CUMPLE				

LA = 24

$$LA = \left(\frac{5.000 - m}{50}\right)$$

m = Es la masa retenida por el tamiz de 1,6 mm, expresada en gramos. m= **3.786,7**

Fracciones granulométricas mm	Tamaño del tamiz intermedio mm	Porcentaje que pasa por el tamiz intermedio %	Número de bolas
6,3 a 10	**8**	**30 a 40**	**9**

Nota: El anexo A viene dado por una granulómetria distinta de 10/14

ANEXO A

Tamaño de tamiz intermedio mm	Tamaño del tamiz intermedio mm	Porcentaje que pasa por el tamiz intermedio %	Número de bolas
4 a 6,3	**5**	**30 a 40**	**7**
4 a 8	**6,3**	**60 a 70**	**8**
6,3 a 10	**8**	**30 a 40**	**9**
8 a 11,2	**10**	**60 a 70**	**10**
11,2 a 16	**14**	**60 a 70**	**12**

ANEXO A.3 PURGAS DE CALCINACIÓN DE LA CALIZA

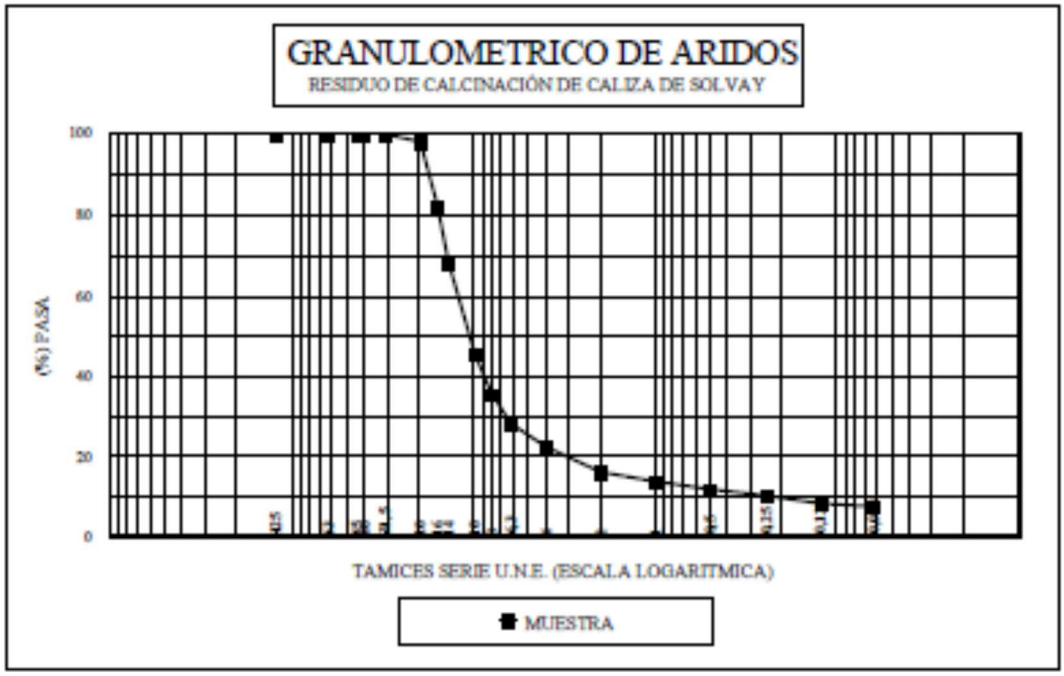
CARACTERIZACIÓN

Granulometría

CALCULOS PREVIOS	
MUESTRA TOTAL SECA AL AIRE (GRS)	
GRUESOS SIN LAVAR (GRS)	
GRUESOS LAVADOS (GRS)	
FRAC.FINA SECA AIRE (GRS)	
FRACCION FINA SECA (GRS)	
MUESTRA TOTAL SECA (GRS)	4.315,3
FRAC.FINA ENS.SECA AL AIRE (GRS)	
FRAC.FINA ENSAYADA SECA (GRS)	

HUMEDAD HIGROSCOPICA	
REFERENCIA TARA	
TARA+SUELO+AGUA (GRS)	
TARA+SUELO (GRS)	
TARA (GRS)	
SUELO (GRS)	
AGUA (GRS)	
HUDAD. HIGROSC.%	
FACTOR DE CORREC.	

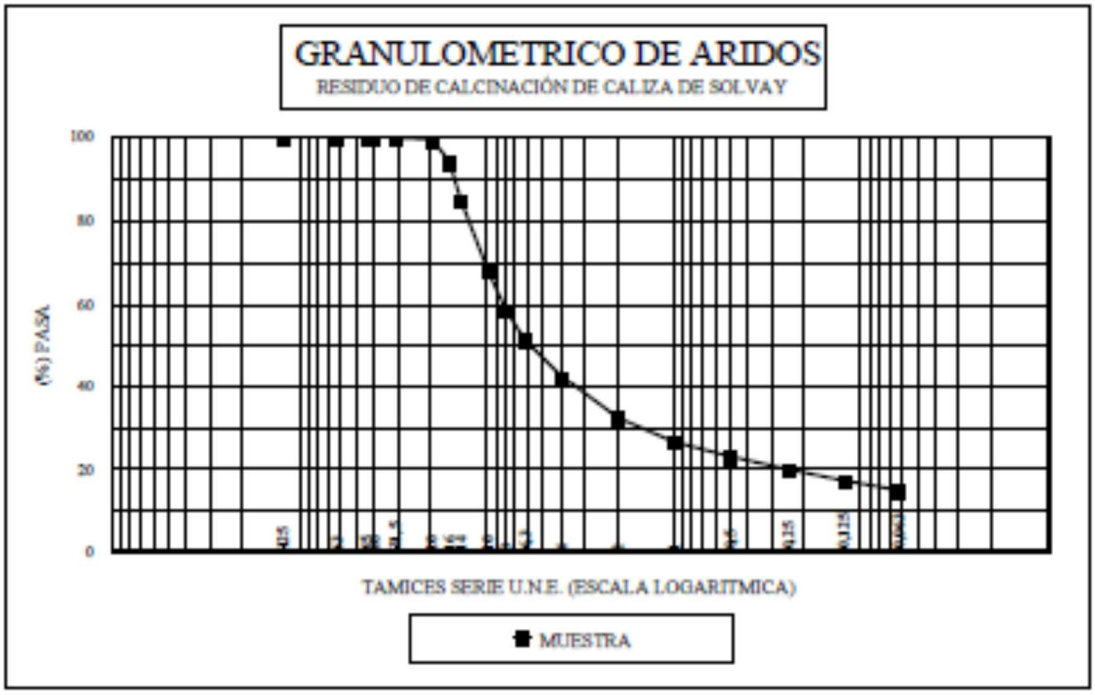
TAMIZADO (SERIE BASICA +SERIE 2 mm)			
NORMAS U.N.E.	GR. RETENIDO	EN MUESTRA TOTAL	
ABERT mm	ACUMULADO	% RETEN.	% PASA
125	0,00	0,00	100,00
63	0,00	0,00	100,00
45	0,00	0,00	100,00
40	0,00	0,00	100,00
31,5	0,00	0,00	100,00
20	80,20	1,86	98,14
16	766,20	17,76	82,24
14	1.369,20	31,73	68,27
10	2.351,20	54,49	45,51
8	2.785,20	64,54	35,46
6,3	3.102,80	71,90	28,10
4	3.361,20	77,89	22,11
2	3.621,20	83,92	16,08
1	3.726,60	86,36	13,64
0,50	3.799,40	88,04	11,96
0,25	3.873,00	89,75	10,25
0,125	3.952,00	91,58	8,42
0,063	3.995,20	92,58	7,42



CALCULOS PREVIOS	
MUESTRA TOTAL SECA AL AIRE (GRS)	
GRUESOS SIN LAVAR (GRS)	
GRUESOS LAVADOS (GRS)	
FRAC.FINA SECA AIRE (GRS)	
FRACCION FINA SECA (GRS)	
MUESTRA TOTAL SECA (GRS)	4.915,5
FRAC.FINA ENS.SECA AL AIRE (GRS)	
FRAC.FINA ENSAYADA SECA (GRS)	

HUMEDAD HIGROSCOPICA	
REFERENCIA TARA	
TARA+SUELO+AGUA (GRS)	
TARA+SUELO (GRS)	
TARA (GRS)	
SUELO (GRS)	
AGUA (GRS)	
HUDAD. HIGROSC.%	
FACTOR DE CORREC.	

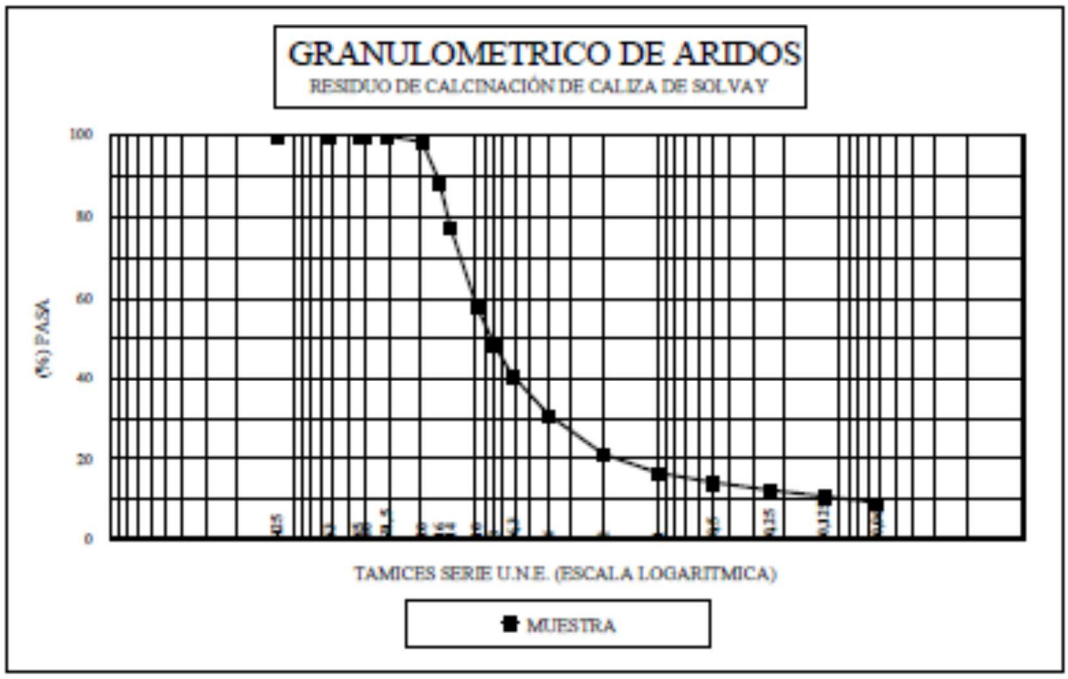
TAMIZADO (SERIE BASICA +SERIE 2 mm)			
NORMAS U.N.E. ABERT mm	GR. RETENIDO ACUMULADO	EN MUESTRA TOTAL	
		% RETEN.	% PASA
125	0,00	0,00	100,00
63	0,00	0,00	100,00
45	0,00	0,00	100,00
40	0,00	0,00	100,00
31,5	0,00	0,00	100,00
20	8,60	0,17	99,83
16	281,70	5,73	94,27
14	733,10	14,91	85,09
10	1.573,00	32,00	68,00
8	2.021,00	41,11	58,89
6,3	2.390,60	48,63	51,37
4	2.837,50	57,73	42,27
2	3.320,40	67,55	32,45
1	3.606,20	73,36	26,64
0,50	3.775,40	76,81	23,19
0,25	3.930,70	79,97	20,03
0,125	4.064,20	82,68	17,32
0,063	4.179,60	85,03	14,97



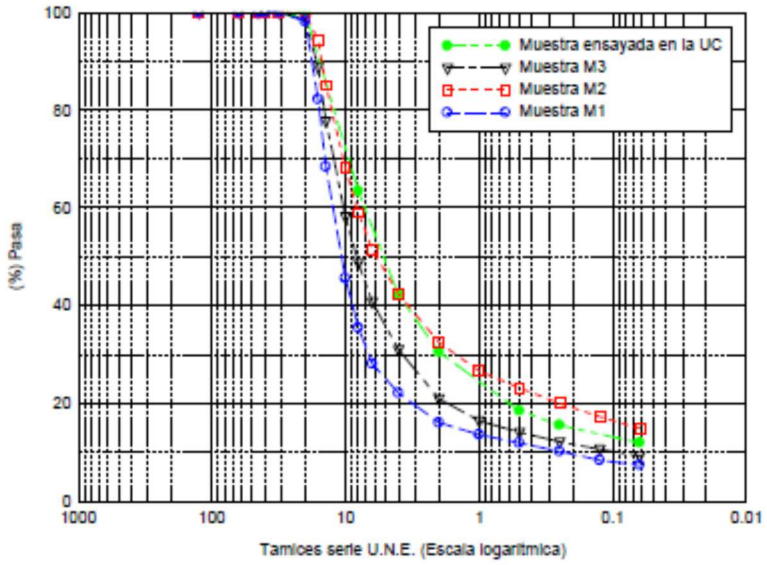
CALCULOS PREVIOS	
MUESTRA TOTAL SECA AL AIRE (GRS)	
GRUESOS SIN LAVAR (GRS)	
GRUESOS LAVADOS (GRS)	
FRAC.FINA SECA AIRE (GRS)	
FRACCION FINA SECA (GRS)	
MUESTRA TOTAL SECA (GRS)	**5.004,8**
FRAC.FINA ENS.SECA AL AIRE (GRS)	
FRAC.FINA ENSAYADA SECA (GRS)	

HUMEDAD HIGROSCOPICA	
REFERENCIA TARA	
TARA+SUELO+AGUA (GRS)	
TARA+SUELO (GRS)	
TARA (GRS)	
SUELO (GRS)	
AGUA (GRS)	
HUDAD. HIGROSC.%	
FACTOR DE CORREC.	

TAMIZADO (SERIE BASICA +SERIE 2 mm)			
NORMAS U.N.E. ABERT mm	GR. RETENIDO ACUMULADO	EN MUESTRA TOTAL	
		% RETEN.	% PASA
125	0,00	0,00	100,00
63	0,00	0,00	100,00
45	0,00	0,00	100,00
40	0,00	0,00	100,00
31,5	0,00	0,00	100,00
20	74,20	1,48	98,52
16	562,00	11,23	88,77
14	1.111,80	22,21	77,79
10	2.099,00	41,94	58,06
8	2.571,00	51,37	48,63
6,3	2.970,40	59,35	40,65
4	3.455,40	69,04	30,96
2	3.956,20	79,05	20,95
1	4.180,80	83,54	16,46
0,50	4.297,20	85,86	14,14
0,25	4.394,80	87,81	12,19
0,125	4.470,20	89,32	10,68
0,063	4.541,60	90,74	9,26



T A M I Z A D O (SERIE BASICA +SERIE 2 mm)				
NORMAS U.N.E. ABERTURA mm	% PASA MUESTRA M1	% PASA MUESTRA M2	% PASA MUESTRA M3	% PASA MUESTRA ensayada en la UC
125	100	100	100	
63	100	100	100	
45	100	100	100	
40	100	100	100	100
31.5	100	100	100	
20	98.14	99.83	98.52	100
16	82.24	94.27	88.77	
14	68.27	85.09	77.79	
10	45.51	68	58.06	
8	35.46	58.89	48.63	63.3
6.3	28.10	51.37	40.65	
4	22.11	42.27	30.96	42.1
2	16.08	32.45	20.95	30.5
1	13.64	26.64	16.46	
0.5	11.96	23.19	14.14	18.5
0.25	10.25	20.03	12.19	15.6
0.125	8.42	17.32	10.68	
0.063	7.42	14.97	9.26	12



LABORATORIO DE INGENIERÍA

TRIAX, S.A.

GRANULOMETRICO HUSO ZA -20

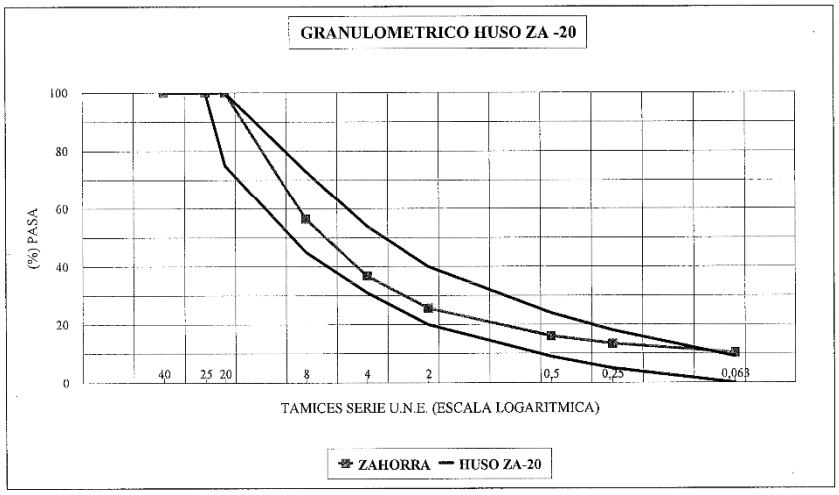
FECHA: 17-06-2009
CLIENTE: EMILIO BOLADO, S.L.
OBRA: ACOPIO SOLVAY
MUESTRA: PURGAS
REFERENCIA: 779/2009
OBSERVACIONES:

CALCULOS PREVIOS	
MUESTRA TOTAL SECA AL AIRE (GRS)	
GRUESOS SIN LAVAR (GRS)	
GRUESOS LAVADOS (GRS)	
FRAC.FINA SECA AIRE (GRS)	
FRACCION FINA SECA (GRS)	
MUESTRA TOTAL SECA (GRS)	2.850,6
FRAC.FINA ENS.SECA AL AIRE (GRS)	
FRAC.FINA ENSAYADA SECA (GRS)	

TAMIZADO			
NORMAS U.N.E. ABERT mm	GR. RETENIDO ACUMULADO	EN MUESTRA TOTAL % RETEN.	% PASA
40	0,0	0,0	100,0
25	0,0	0,0	100,0
20	0,0	0,0	100,0
8	1.242,1	43,6	56,4
4	1.801,5	63,2	36,8
2	2.119,6	74,4	25,6
0,5	2.394,7	84,0	16,0
0,25	2.468,4	86,6	13,4
0,063	2.556,2	89,7	10,3

HUMEDAD HIGROSCOPICA	
REFERENCIA TARA	
TARA+SUELO+AGUA (GRS)	
TARA+SUELO (GRS)	
TARA (GRS)	
SUELO (GRS)	
AGUA (GRS)	
HUDAD. HIGROSC.%	
FACTOR DE CORREC.	

NORMAS U.N.E. ABERT mm	HUSO ZA - 20 % PASA	% PASA
40	100	100
25	100	100
20	75	100
8	45	73
4	31	54
2	20	40
0,5	9	24
0,25	5	18
0,063	0	9



C/ Faustino Cavedas 28 • 39011 PEÑACASTILLO, SANTANDER (Cantabria) • Teléfono 942 260 099 - Fax 942 260 100

TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001
gerencia@triax.es
geotecnia@triax.es
www.triax.es
oficinatecnica@triax.es
administracion@triax.es
Acreditado por ENAC

LABORATORIO DE INGENIERÍA

TRIAX S.A.

GRANULOMETRICO HUSO ZA - 25

FECHA: 17-06-2009
CLIENTE: EMILIO BOLADO, S.L.
OBRA: ACOPIO SOLVAY
MUESTRA: PURGAS
REFERENCIA: 779/2009
OBSERVACIONES:

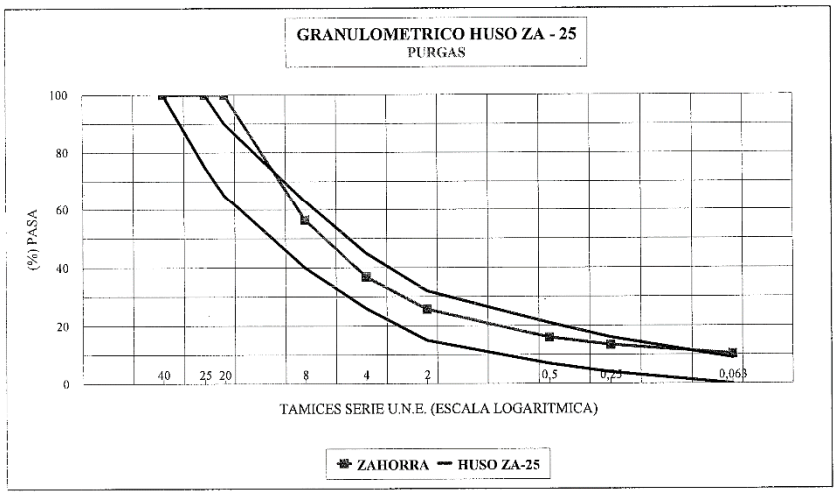
C/ Faustino Cavadas 28 • 39011 PEÑACASTILLO, SANTANDER (Cantabria) • Teléfono 942 260 099 - Fax 942 260 100

CALCULOS PREVIOS	
MUESTRA TOTAL SECA AL AIRE (GRS)	
GRUESOS SIN LAVAR (GRS)	
GRUESOS LAVADOS (GRS)	
FRAC.FINA SECA AIRE (GRS)	
FRACCION FINA SECA (GRS)	
MUESTRA TOTAL SECA (GRS)	2.850,6
FRAC.FINA ENS.SECA AL AIRE (GRS)	
FRAC.FINA ENSAYADA SECA (GRS)	

TAMIZADO			
NORMAS U.N.E.	GR. RETENIDO	EN MUESTRA TOTAL	
ABERT mm	ACUMULADO	% RETEN.	% PASA
40	0,0	0,0	100,0
25	0,0	0,0	100,0
20	0,0	0,0	100,0
8	1.242,1	43,6	56,4
4	1.801,5	63,2	36,8
2	2.119,6	74,4	25,6
0,5	2.394,7	84,0	16,0
0,25	2.468,4	86,6	13,4
0,063	2.556,2	89,7	10,3

HUMEDAD HIGROSCOPICA	
REFERENCIA TARA	
TARA+SUELO+AGUA (GRS)	
TARA+SUELO (GRS)	
TARA (GRS)	
SUELO (GRS)	
AGUA (GRS)	
HUDAD. HIGROSC.%	
FACTOR DE CORREC.	

NORMAS U.N.E.	HUSO ZA - 25	
ABERT mm	% PASA	% PASA
40	100	100
25	75	100
20	65	90
8	40	63
4	26	45
2	15	32
0,5	7	21
0,25	4	16
0,063	0	9



TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001
gerencia@triax.es
geotecnia@triax.es
www.triax.es
oficinatecnica@triax.es
administracion@triax.es
Acreditado por ENAC

LABORATORIO DE INGENIERÍA

TRIAX, S.A.

GRANULOMETRICO HUSO ZAD-20

FECHA: 17-06-2009
CLIENTE: EMILIO BOLADO, S.L.
OBRA: ACOPIO SOLVAY
MUESTRA: PURGAS
REFERENCIA: 779/2009
OBSERVACIONES:

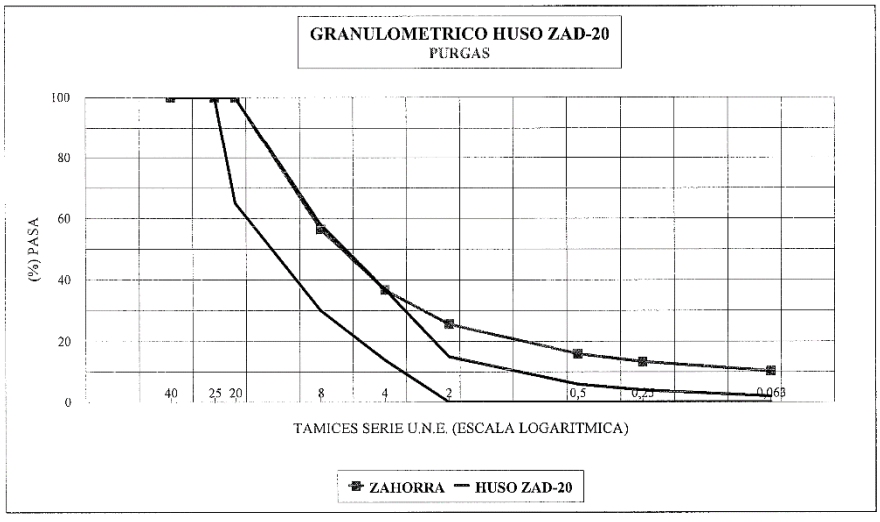
C./ Faustino Cavados 28 • 39011 PEÑACASTILLO, SANTANDER (Cantabria) • Teléfono 942 260 099 - Fax 942 260 100

CALCULOS PREVIOS	
MUESTRA TOTAL SECA AL AIRE (GRS)	
GRUESOS SIN LAVAR (GRS)	
GRUESOS LAVADOS (GRS)	
FRAC.FINA SECA AIRE (GRS)	
FRACCION FINA SECA (GRS)	
MUESTRA TOTAL SECA (GRS)	2.850,6
FRAC.FINA ENS.SECA AL AIRE (GRS)	
FRAC.FINA ENSAYADA SECA (GRS)	

TAMIZADO			
NORMAS U.N.E.	GR. RETENIDO	EN MUESTRA TOTAL	
ABERT mm	ACUMULADO	% RETEN.	% PASA
40	0,0	0,0	100,0
25	0,0	0,0	100,0
20	0,0	0,0	100,0
8	1.242,1	43,6	56,4
4	1.801,5	63,2	36,8
2	2.119,6	74,4	25,6
0,5	2.394,7	84,0	16,0
0,25	2.468,4	86,6	13,4
0,063	2.556,2	89,7	10,3

HUMEDAD HIGROSCOPICA	
REFERENCIA TARA	
TARA+SUELO+AGUA (GRS)	
TARA+SUELO (GRS)	
TARA (GRS)	
SUELO (GRS)	
AGUA (GRS)	
HUDAD. HIGROSC.%	
FACTOR DE CORREC.	

NORMAS U.N.E.	HUSO ZAD - 20	
ABERT mm	% PASA	% PASA
40	100	100
25	100	100
20	65	100
8	30	58
4	14	37
2	0	15
0,5	0	6
0,25	0	4
0,063	0	2



TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001
gerencia@triax.es
geotecnia@triax.es
www.triax.es
oficinatecnica@triax.es
administracion@triax.es
Acreditado por ENAC

Análisis Químico

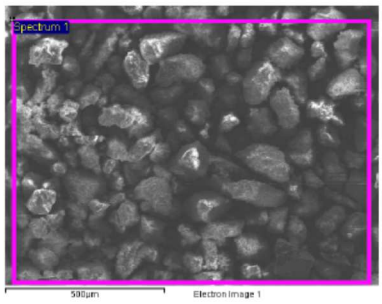
Sample: 0.063
Type: Default
ID:

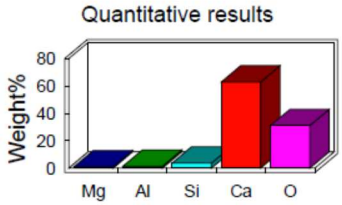
Spectrum processing :
Peaks possibly omitted : 6.400, 6.440 keV

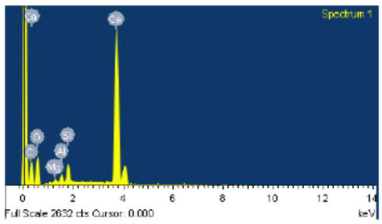
Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)
Number of iterations = 2

Standard :
Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM
Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Mg K	0.95	1.04	1.57	MgO
Al K	1.36	1.35	2.57	Al2O3
Si K	3.67	3.50	7.86	SiO2
Ca K	62.89	42.02	88.00	CaO
O	31.12	52.09		
Totals	100.00			







Comment:

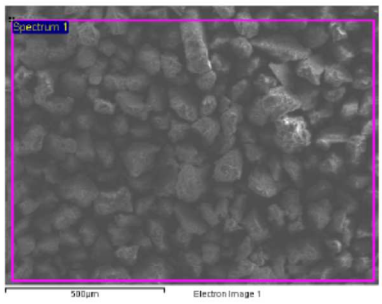
Sample: 0.063
Type: Default
ID:

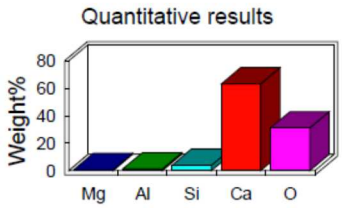
Spectrum processing :
No peaks omitted

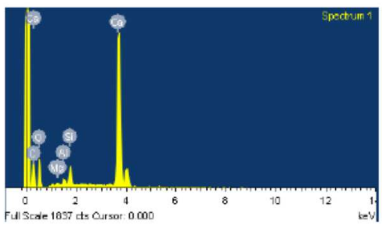
Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)
Number of iterations = 2

Standard :
Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM
Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Mg K	0.61	0.68	1.02	MgO
Al K	1.21	1.20	2.28	Al2O3
Si K	3.90	3.72	8.33	SiO2
Ca K	63.15	42.24	88.36	CaO
O	31.13	52.16		
Totals	100.00			







Comment:

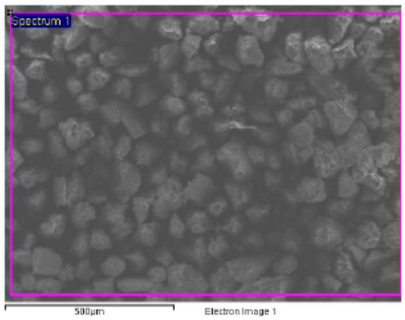
Sample: 0.063
Type: Default
ID:

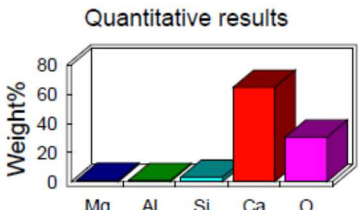
Spectrum processing :
No peaks omitted

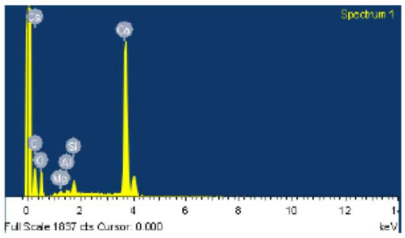
Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)
Number of iterations = 2

Standard :
Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM
Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Mg K	0.93	1.04	1.55	MgO
Al K	0.75	0.76	1.43	Al2O3
Si K	3.08	2.97	6.60	SiO2
Ca K	64.63	43.57	90.43	CaO
O	30.60	51.67		
Totals	100.00			







Comment:

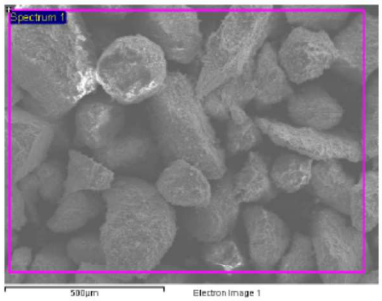
Sample: 0.125
Type: Default
ID:

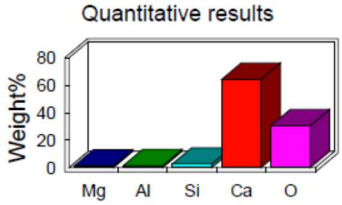
Spectrum processing :
No peaks omitted

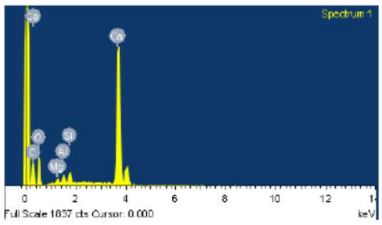
Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)
Number of iterations = 2

Standard :
Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM
Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Mg K	1.12	1.24	1.85	MgO
Al K	1.34	1.34	2.54	Al2O3
Si K	2.64	2.53	5.64	SiO2
Ca K	64.30	43.28	89.96	CaO
O	30.60	51.60		
Totals	100.00			







Comment:

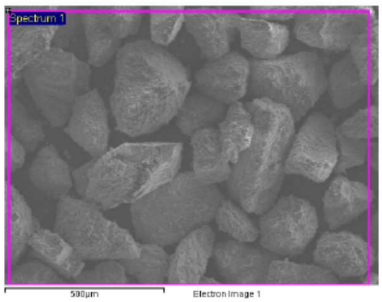
Sample: 0.125
Type: Default
ID:

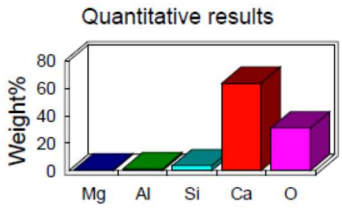
Spectrum processing :
No peaks omitted

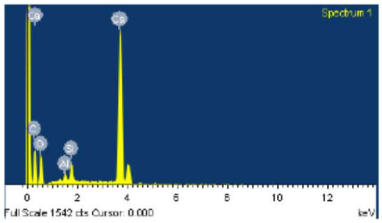
Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)
Number of iterations = 2

Standard :
Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM
Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Mg K	0.53	0.59	0.88	MgO
Al K	1.35	1.35	2.55	Al2O3
Si K	3.53	3.37	7.54	SiO2
Ca K	63.63	42.67	89.02	CaO
O	30.97	52.02		
Totals	100.00			







Comment:

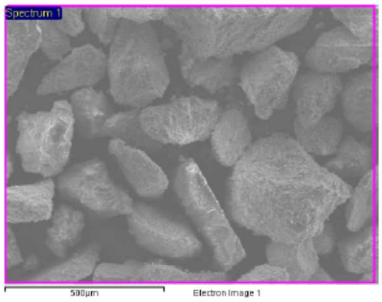
Sample: 0.125
Type: Default
ID:

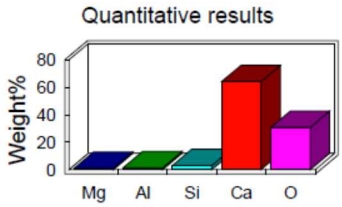
Spectrum processing :
No peaks omitted

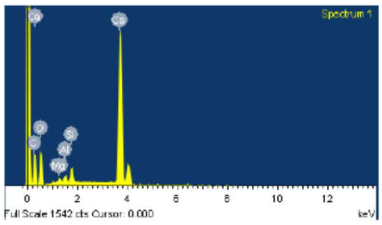
Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)
Number of iterations = 2

Standard :
Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM
Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Mg K	0.84	0.94	1.40	MgO
Al K	1.33	1.33	2.51	Al2O3
Si K	2.93	2.81	6.26	SiO2
Ca K	64.20	43.19	89.83	CaO
O	30.70	51.74		
Totals	100.00			







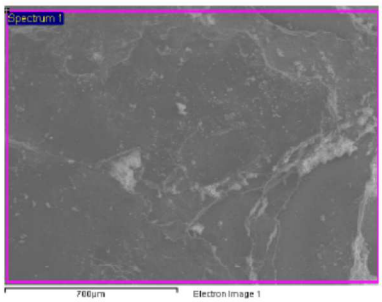
Comment:

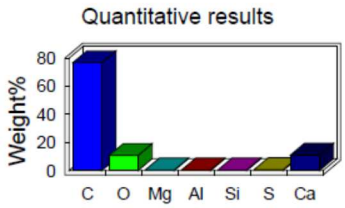
Sample: 4
Type: Default
ID:

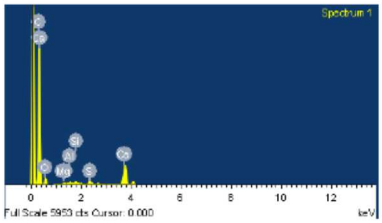
Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 4

Element	Weight%	Atomic%
C K	76.59	86.41
O K	10.67	9.04
Mg K	0.34	0.19
Al K	0.29	0.14
Si K	0.45	0.22
S K	0.65	0.27
Ca K	11.01	3.72
Totals	100.00	







Comment:

CAMINOS 24_09_09 9/25/2009 10:42:56 AM

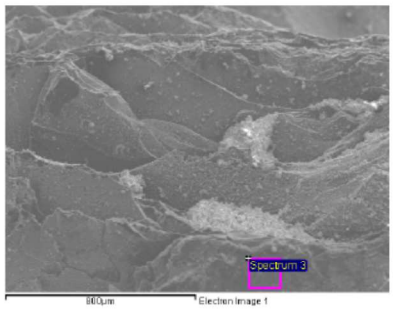
Sample: 4
Type: Default
ID:

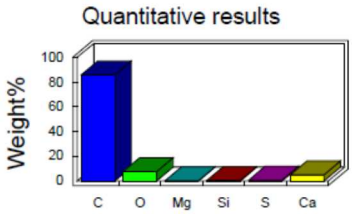
Spectrum processing :
No peaks omitted

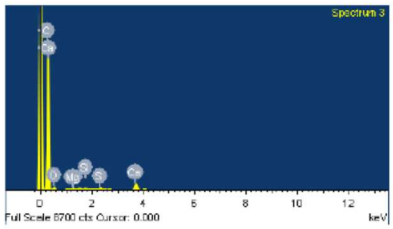
Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 4

Standard :
C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM
Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM
Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

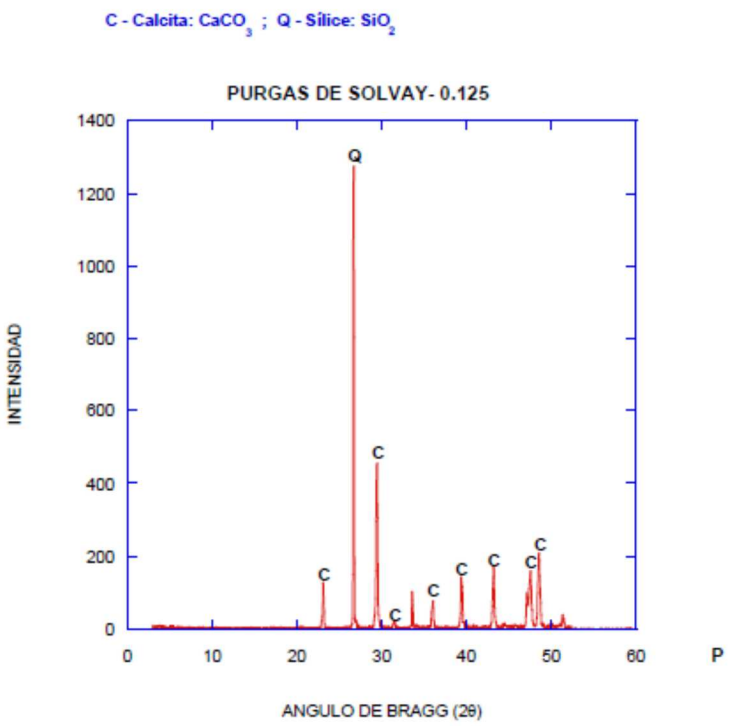
Element	Weight%	Atomic%
C K	85.87	91.62
O K	7.65	6.13
Mg K	0.33	0.17
Si K	0.40	0.18
S K	0.74	0.29
Ca K	5.01	1.60
Totals	100.00	

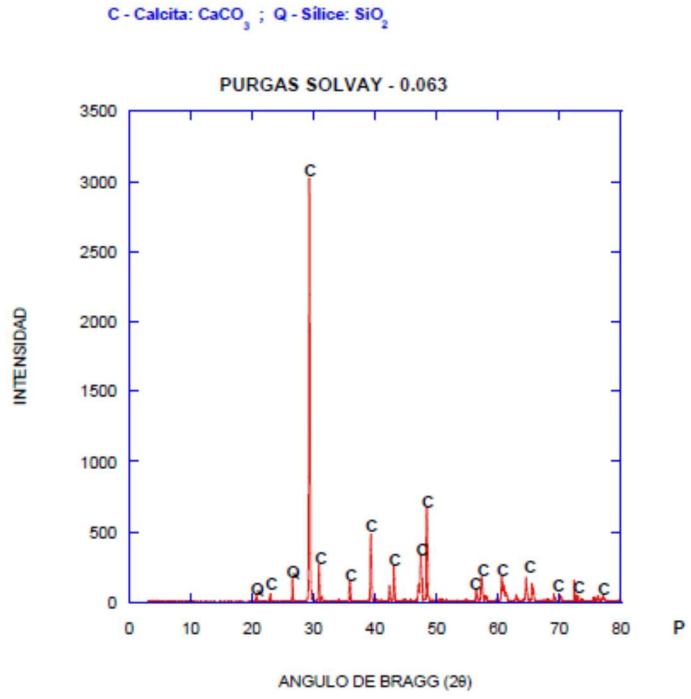






Comment:


C - Calcita: CaCO3 ; Q - Sílice: SiO2
PURGAS DE SOLVAY- 0.125
INTENSIDAD
ANGULO DE BRAGG (2θ)
P


C - Calcita: CaCO3 ; Q - Sílice: SiO2
PURGAS SOLVAY - 0.063
INTENSIDAD
ANGULO DE BRAGG (2θ)
P

Plasticidad

PLASTICIDAD			
Ensayos realizados		**Resultado de la muestra ensayada**	**Especificaciones del PG3**
Limites	Limite Líquido	**No liquido**	No plástico para zahorras artificiales
	Limite Plástico	**No plastico**	
	Indice de Plasticidad	**No tiene**	

Equivalente de arena

LIMPIEZA		
Ensayos realizados	**Resultado de la muestra ensayada**	**Especificaciones del PG3**
Equivalente Arena (SE)	**27**	EA>40 (T00 a T1) EA>35 (T2 a T4 y arcenes T00 a T2) EA>30 (Arcenes T3 a T4)

Angulosidad

ANGULOSIDAD		
Ensayos realizados	**Resultado de la muestra ensayada**	**Especificaciones del PG3**
Caras de fractura	**85 %**	100% (T00 y T0) 75% (T1 - T2 y arcenes T00 a T2) 50% para los demás casos

Proctor modificado

LABORATORIO DE INGENIERÍA

TRIAX S.A.

ENSAYO DE COMPACTACION

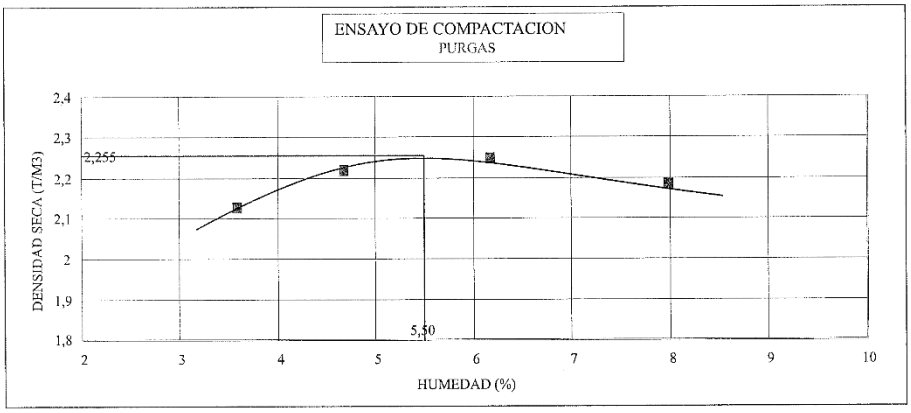
PROCTOR MODIFICADO (UNE103501.94)

FECHA: 17-06-2009
CLIENTE: EMILIO BOLADO, S.L.
OBRA: ACOPIO SOLVAY
MUESTRA: PURGAS
REFERENCIA: 779/2009
OBSERVACIONES:

C/ Faustino Cavadas 28 • 39011 PEÑACASTILLO, SANTANDER (Cantabria) • Teléfono 942 260 099 - Fax 942 260 100

VOLUMEN DEL MOLDE (Cm³) : 2.320			NUMERO DE CAPAS: 5		
PESO DE LA MAZA (kg) : 4,54			Nº DE GOLPES POR CAPA: 60		
PUNTO NUMERO	1	2	3	4	5
% AGUA AÑADIDO	3%	5%	7%	9%	
CALCULOS DE DENSIDAD					
MOLDE+SUELO+AGUA	10479,0	10753,0	10901,0	10841,0	
MOLDE	5357,0	5357,0	5357,0	5357,0	
SUELO+AGUA	5122,0	5396,0	5544,0	5484,0	
SUELO	4944,8	5155,2	5221,8	5078,7	
DENSIDAD	2,131	2,222	2,251	2,189	
CALCULOS DE HUMEDAD					
REFERENCIA TARA	C-17	B-35	B-7	D-16	
TARA+SUELO+AGUA	1012,5	1097,0	1010,2	1090,0	
TARA+SUELO	995,8	1068,4	976,5	1048,8	
TARA	529,8	456,1	430,3	532,5	
SUELO	466,0	612,3	546,2	516,3	
AGUA	16,7	28,6	33,7	41,2	
% HUMEDAD	3,58	4,67	6,17	7,98	

DENSIDAD MAXIMA (T/M3): 2,255 HUMEDAD OPTIMA (%): 5,50



TRIAX S.A. posee los Sistemas de Gestión Certificados según ISO 9001 y 14001
gerencia@triax.es
geotecnia@triax.es
www.triax.es
oficinatecnica@triax.es
administracion@triax.es
Acreditado por ENAC