



universidad
de león

ESCUELA DE INGENIERÍA AGRARIA Y FORESTAL

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA AGRARIA

**ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN Y
CALIDAD DE ÁRIDOS RECICLADOS DE LA EMPRESA
VALDEARCOS S.L Y COMPARACIÓN CON ÁRIDOS
NATURALES PARA LA EJECUCIÓN DE CAMINOS RURALES**

*Analysis of parameters of characterization and quality
of recycled aggregates of the company Valdearcos S.L.
and comparison with natural aggregates for the
execution of rural roads*

Alumno: Noelia Sandín Alonso

Tutores: Julia María Morán del Pozo
Pedro José Aguado Rodríguez

León, septiembre 2019



universidad
de león

ESCUELA DE INGENIERÍA AGRARIA Y FORESTAL

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA AGRARIA

**ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN Y
CALIDAD DE ÁRIDOS RECICLADOS DE LA EMPRESA
VALDEARCOS S.L Y COMPARACIÓN CON ÁRIDOS
NATURALES PARA LA EJECUCIÓN DE CAMINOS RURALES**

*Analysis of parameters of characterization and quality
of recycled aggregates of the company Valdearcos S.L.
and comparison with natural aggregates for the
execution of rural roads*

Alumno: Noelia Sandín Alonso

Tutores: Julia María Morán del Pozo
Pedro José Aguado Rodríguez

León, septiembre 2019

ANEXO 9. HOJA DE CONFORMIDAD

TRABAJOS DE CARÁCTER CIENTÍFICO O TÉCNICO

Título:

Autor:

ELEMENTOS DE OBLIGADA APARICIÓN

- Resumen.** De 400 palabras como máximo.
- Introducción.** Debe incluir los motivos por los que se realiza el trabajo y los antecedentes o estudios previos sobre el mismo.
- Objetivos.** Se detallarán de forma clara y concisa los objetivos que se pretenden alcanzar.
- Material y Métodos / Metodología.** Descripción de las técnicas, los materiales empleados, y los métodos de análisis de datos, de forma que se garantice la repetibilidad de los mismos.
- Resultados / Análisis / Diagnóstico.** La información obtenida con el estudio se presentará de forma sistemática, preferentemente mediante tablas y figuras que deberán ser en todo caso autoexplicativas, y deberán aparecer debidamente numeradas y referenciadas en un índice propio.
- Discusión.** Los resultados propios del trabajo deberán ser discutidos relacionándolos, en su caso, con otros de estudios precedentes.
- Conclusiones.** Deberán ser claras, concisas, y coherentes con los objetivos propuestos. En el caso planes de ordenación de recursos forestales, propuestas concretas con objetivos, líneas y medidas.
- Planos / Mapas.** Serán obligatorios en trabajos topográficos, estudios de implantación de cultivos o transformaciones de explotaciones, y en general, cualquier trabajo técnico o científico asociado a áreas, parcelas, o territorios determinados.
- Bibliografía.** Listado de las fuentes de información utilizadas debidamente referenciadas y ordenadas.

OBTENIDA LA CONFORMIDAD

DENEGADA LA CONFORMIDAD
(No se autoriza la presentación)

El tutor/es:

Fdo.:

Fdo.:

RESUMEN

Lo que se pretende lograr con la realización de este estudio es conocer la idoneidad de tres materiales de diferentes procedencias para emplearlos en la ejecución de caminos rurales. Los materiales son: una zahorra artificial, que procede de material natural de cantera al que se le realizan una serie de cribados; un material 100% reciclado, procedente de la reutilización de hormigones; y, por último, un material mixto cerámico, cuya procedencia radica en la reutilización de residuos de construcción y demolición (RCDs).

Para saber si los tres materiales que se han mencionado anteriormente se pueden emplear en la realización de caminos rurales, se han de comparar los valores que han sido obtenidos mediante una serie de ensayos realizados en laboratorio con los que se indican en la normativa existente para cada uno de los parámetros que se desean comprobar.

Para realizar la comparación de los dos valores anteriormente mencionados, se ha de consultar la norma que regula la ejecución de los caminos rurales y la normativa de cada uno de los ensayos que se pretenden llevar a cabo. Para ello, se ha de realizar una búsqueda bibliográfica de dichas normas y de los protocolos de ensayo, tanto de los que se llevarán a cabo para la realización de este trabajo, como son las normas UNE, como de otros que se podrían seguir, como son las normas NLT.

Se han realizado una serie de ensayos esenciales para estudiar la adecuación de los materiales para su uso en la construcción de caminos rurales, como son: el ensayo de granulometría, ensayo de índice de lajas, ensayo de caras de fractura, ensayo de equivalente en arena, ensayo de Los Ángeles, ensayo de límite líquido, ensayo de límite plástico y ensayo de Proctor normal. Para una completa valoración de los materiales para tal fin se habría que realizar, entre otros, el ensayo de CBR. Posteriormente se realiza la comprobación de cada uno de los parámetros escogidos para conocer la adecuación de los materiales para caminos rurales.

Los resultados que se han obtenido, en general, son que los materiales que se han ensayado son aptos para la ejecución de caminos rurales, si bien es cierto, que ninguno de ellos cumple completamente con los criterios exigidos para los ensayos realizados, por lo que se deberían tomar medidas para intentar corregir, en la medida de lo posible, dichas discrepancias entre los resultados y la normativa.

Palabras clave: áridos reciclados, zahorra artificial, caminos rurales, residuos de construcción y demolición (RCDs), hormigón reciclado.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	EL FIRME. FIRMES FLEXIBLES: SUB-BASE, BASE Y CAPA DE RODADURA	2
1.1.1	DEFINICIÓN DE FIRME.....	2
1.1.2	TIPOS DE FIRMES	2
1.1.3	FIRMES FLEXIBLES.....	3
1.2	PARÁMETROS Y MÍNIMOS EXIGIDOS	13
1.3	ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ÁRIDOS Y SUELOS PARA SU EMPLEO EN LA EJECUCIÓN DE CAMINOS RURALES	18
1.3.1	ENSAYOS PARA ÁRIDOS APORTADOS.....	18
1.3.2	ENSAYOS PARA SUELOS	21
1.3.3	ENSAYOS REALIZADOS EN ESTE TRABAJO	23
2	OBJETIVOS	25
3	METODOLOGÍA	27
3.1	MATERIAL	27
3.1.1	ZAHORRA ARTIFICIAL	28
3.1.2	ÁRIDO 100% RECICLADO DE HORMIGÓN	28
3.1.3	ÁRIDO MIXTO CERÁMICO	29
3.2	MÉTODOS	29
3.2.1	DETERMINACIÓN DE GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO (NORMA UNE EN 933-1)	30
3.2.2	DETERMINACIÓN DE GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO (NORMA NLT 104/91).....	34
3.2.3	ÍNDICE DE LAJAS (NORMA UNE EN 933-3, MARZO 2012)	39
3.2.4	ÍNDICE DE LAJAS (NORMA NLT-354/91)	41
3.2.5	DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE CARAS DE FRACTURA (NORMA UNE EN 933-5, FEBRERO 1999)	44
3.2.6	DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE CARAS DE FRACTURA (NORMA NLT- 358/90).....	47

3.2.7 ENSAYO DEL EQUIVALENTE DE ARENA (NORMA UNE EN 933-8, NOVIEMBRE 2015)	49
3.2.8 ENSAYO DEL EQUIVALENTE DE ARENA (NORMA NLT-113/87).....	58
3.2.9 ENSAYO DE LOS ÁNGELES (NORMA UNE EN 1097-2, SEPTIEMBRE 2010)	63
3.2.10 ENSAYO DE LOS ÁNGELES (NORMA NLT-149/91)	68
3.2.11 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LIQUIDO (NORMA UNE 103-103)	71
3.2.12 DETERMINACIÓN DEL LIMITE LÍQUIDO (NORMA NLT 105/98).....	77
3.2.13 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (NORMA UNE 103-104).....	81
3.2.14 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (NORMA NLT 106/98)	82
3.2.15 ENSAYO DE COMPACTACIÓN. PROCTOR NORMAL (NORMA UNE 103-500-94)	84
3.2.16 APISONADO PROCTOR NORMAL (NORMA NLT 107/98)	88
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	91
4.1 DETERMINACIÓN DE GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO (NORMA UNE EN 933-1).....	91
4.1.1 CÁLCULO Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS	91
4.1.2 RESULTADOS OBTENIDOS	93
4.2 ÍNDICE DE LAJAS (NORMA UNE EN 933-3, MARZO 2012)	96
4.2.1 CÁLCULO Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS	96
4.2.2 RESULTADOS OBTENIDOS	98
4.3 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE CARAS DE FRACTURA (NORMA UNE EN 933-5, FEBRERO 1999).....	99
4.3.1 CÁLCULO Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS	99
4.3.2 RESULTADOS OBTENIDOS	101
4.4 ENSAYO DEL EQUIVALENTE DE ARENA (NORMA UNE EN 933-8, NOVIEMBRE 2015)	103
4.4.1 CÁLCULOS Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS	103
4.4.2 RESULTADOS OBTENIDOS	104
4.5 ENSAYO DE LOS ÁNGELES (NORMA UNE EN 1097-2, SEPTIEMBRE 2010)	104
4.5.1 CÁLCULO Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS	104
4.5.2 RESULTADOS OBTENIDOS	105

4.6 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LIQUIDO (NORMA UNE 103-103)	106
4.6.1 RESULTADOS	106
4.6.2 RESULTADOS OBTENIDOS	107
4.7 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (NORMA UNE 103-104)	108
4.7.1 OBTENCIÓN Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS.....	108
4.7.2 RESULTADOS OBTENIDOS	108
4.8 ENSAYO DE COMPACTACIÓN. PROCTOR NORMAL (NORMA UNE 103-500-94)	108
4.8.1 OBTENCIÓN Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS.....	108
4.8.2 RESULTADOS OBTENIDOS	109
5 CONCLUSIONES	113
5.1 CONCLUSIONES PARTICULARES	113
5.2 CONCLUSIONES GENERALES	115
6 BIBLIOGRAFÍA	116

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN CAMINO RURAL	3
ILUSTRACIÓN 2: TIPOS DE MATERIALES	27
ILUSTRACIÓN 3: ZAHORRA ARTIFICIAL CON GRANULOMETRÍA 20/0 mm.....	28
ILUSTRACIÓN 4: ÁRIDO 100% HORMIGÓN RECICLADO CON GRANULOMETRÍA 25/0 mm.....	28
ILUSTRACIÓN 5: ÁRIDO RECICLADO MIXTO CERÁMICO CON GRANULOMETRÍA 16/0 mm.....	29
ILUSTRACIÓN 6: TAMICES DE ENSAYO	30
ILUSTRACIÓN 7: ESTUFA VENTILADA	31
ILUSTRACIÓN 8: MÁQUINA DE TAMIZAR	31
ILUSTRACIÓN 9: TAMICES DE ENSAYO	39
ILUSTRACIÓN 10: TAMICES DE BARRAS	40
ILUSTRACIÓN 11: PROBETAS DE ENSAYO	50
ILUSTRACIÓN 12: PISTÓN TARADO	51
ILUSTRACIÓN 13: FRASCO LAVADOR CON SIFÓN (IZQUIERDA) Y TUBO LAVADOR (DERECHA).....	52
ILUSTRACIÓN 14: MÁQUINA DE AGITACIÓN	53
ILUSTRACIÓN 15: DIAGRAMA DE FLUJO DESCRIBIENDO LA PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO	54
ILUSTRACIÓN 16: ESQUEMA DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.....	64
ILUSTRACIÓN 17: MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.....	64
ILUSTRACIÓN 18: CARGA ABRASIVA	65
ILUSTRACIÓN 19: CUCHARA DE CASAGRANDE.....	72
ILUSTRACIÓN 20: ACANALADOR DE LA A.S.T.M. (IZQUIERDA) Y ACANALADOR DE HOVANYI (DERECHA)	73
ILUSTRACIÓN 21: MOLDE (IZQUIERDA) Y COLLAR (DERECHA) PARA PROCTOR NORMAL.....	84
ILUSTRACIÓN 22: MOLDE Y COLLAR MONTADOS.....	85
ILUSTRACIÓN 23: MAZA PARA PROCTOR NORMAL.....	85

ILUSTRACIÓN 24: EJEMPLO DE HOJAS DE DATOS DE ENSAYO	92
ILUSTRACIÓN 25: EJEMPLO DE HOJA DE RESULTADOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE LAJAS	97
ILUSTRACIÓN 26: EJEMPLO DE HOJA DE RESULTADOS DEL ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE CARAS DE FRACTURA	100
ILUSTRACIÓN 27: EJEMPLO DE HOJA DE DATOS DEL ENSAYO	104
ILUSTRACIÓN 28: MODELO DE IMPRESO PARA EXPRESIÓN DE RESULTADOS.....	107
ILUSTRACIÓN 29: MODELO DE IMPRESO PARA EXPRESIÓN DEL RESULTADO	109
ILUSTRACIÓN 30: RESULTADOS DEL ENSAYO DE PROCTOR NORMAL EN ZAHORRA NATURAL	110
ILUSTRACIÓN 31: RESULTADOS DEL ENSAYO DE PROCTOR NORMAL PARA 100% RECICLADO	111
ILUSTRACIÓN 32: RESULTADOS DEL ENSAYO DE PROCTOR NORMAL PARA MIXTO CERÁMICO	111

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: EXIGENCIAS GRANULOMÉTRICAS DE LAS SUB-BASES GRANULARES.....	5
TABLA 2: EXIGENCIAS GRANULOMÉTRICAS DE LAS SUB-BASES DE ARENA-ARCILLA.....	6
TABLA 3: EXIGENCIAS GRANULOMÉTRICAS DE LO CERNIDO POR EL TAMIZ Nº 10	6
TABLA 4: EXIGENCIAS GRANULOMÉTRICAS DE SUB-BASES ESTABILIZADAS CON CAL.....	7
TABLA 5: GRANULOMETRÍA DE LA FRACCIÓN GRUESA	8
TABLA 6: GRANULOMETRÍA DE LA FRACCIÓN FINA.....	8
TABLA 7: EXIGENCIAS GRANULOMÉTRICAS DE LAS ZAHORRAS NATURALES	10
TABLA 8: ZAHORRAS TIPO, SEGÚN EL PG4/88.....	11
TABLA 9: CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T00 A T2	14
TABLA 10: CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T3 Y T4.....	14
TABLA 11: PROPORCIÓN DE PARTÍCULAS TOTAL Y PARCIALMENTE TRITURADAS DEL ÁRIDO GRUESO (% EN MASA)	15
TABLA 12: PROPORCIÓN DE PARTÍCULAS TOTALMENTE REDONDEADAS DEL ÁRIDO GRUESO (% EN MASA)	15
TABLA 13: VALOR MÁXIMO DEL COEFICIENTE DE LOS ÁNGELES (LA)	16
TABLA 14: EQUIVALENTE EN ARENA (SE4)	16
TABLA 15: HUSOS GRANULOMÉTRICOS CERNIDO ACUMULADO (% EN MASA).....	17
TABLA 16: DENSIDAD DE LA COMPACTACIÓN.....	17
TABLA 17: TIPO Y ESPECIFICACIONES DEL SUELO ESTABILIZADO IN SITU	18
TABLA 18: TAMAÑO MÍNIMO DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO	32
TABLA 19: ABERTURA DE LA SERIE DE TAMICES UNE Y CORRESPONDIENTES DE LA SERIE ASTM.....	35
TABLA 20: MUESTRA PRECISA PARA LOS DISTINTOS ENSAYOS.....	36
TABLA 21: TAMICES DE BARRAS	40
TABLA 22: TAMICES QUE SE DEBEN EMPLEAR PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO	42
TABLA 23: MASA MÍNIMA DEL MATERIAL PARA EL ENSAYO	43
TABLA 24: MASA MÍNIMA DE LA MUESTRA DE ENSAYO	45
TABLA 25: CANTIDAD DE MUESTRA NECESARIA PARA ENSAYO, SEGÚN TAMAÑO DE LA FRACCIÓN CONSIDERADA.....	48

TABLA 26: FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS ALTERNATIVAS PARA GRANULOMETRÍA DE 16/32 mm.....	67
TABLA 27: FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS ALTERNATIVAS	67
TABLA 28: GRANULOMETRÍAS DE LA MUESTRA DE ÁRIDO, 20/80 mm PARA EL ENSAYO DE LOS ÁNGELES.....	69
TABLA 29: NÚMERO DE ESFERAS A EMPLEAR SEGÚN LA GRANULOMETRÍA	70
TABLA 30: GRANULOMETRÍAS DE LA MUESTRA DE ÁRIDO 2,5/40 mm PARA EL ENSAYO DE LOS ÁNGELES.....	70
TABLA 31: RESULTADOS DE GRANULOMETRÍA (NORMA UNE EN 933-1).....	93
TABLA 32: COMPARACIÓN DEL TIPO DE ZAHORRA ZA 0/32	93
TABLA 33: COMPARACIÓN DEL TIPO DE ZAHORRA ZA 0/20	94
TABLA 34: COMPARACIÓN DEL TIPO DE ZAHORRA ZAD 0/20.....	95
TABLA 35: RESULTADOS DE CONTENIDO DE FINOS (NORMA UNE EN 933-1) Y COMPARACIÓN CON LA NORMATIVA	95
TABLA 36: RESULTADOS DEL ENSAYO ÍNDICE DE LAJAS Y COMPARACIÓN CON LA NORMATIVA (UNE EN 933-3)	98
TABLA 37: RESUMEN RESULTADOS DE PARTÍCULAS TOTAL Y PARCIALMENTE TRITURADAS	102
TABLA 38: RESUMEN RESULTADOS DE PARTÍCULAS TOTALMENTE REDONDEADAS ...	102
TABLA 39: RESULTADOS DEL ENSAYO DE EQUIVALENTE EN ARENA (NORMA UNE EN 933-8) Y COMPARACIÓN CON LA NORMATIVA	104
TABLA 40: RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE LOS ÁNGELES (NORMA UNE EN 1097-2) Y COMPARACIÓN CON LA NORMATIVA	105
TABLA 41: RESULTADOS DEL ENSAYO LÍMITE LÍQUIDO (NORMA UNE 103-103) Y COMPARACIÓN CON LA NORMATIVA	107
TABLA 42: PUNTOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PROCTOR NORMAL PARA ZAHORRA ARTIFICIAL	110
TABLA 43: PUNTOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PROCTOR NORMAL PARA 100% RECICLADO	111
TABLA 44: PUNTOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PROCTOR NORMAL PARA MIXTO CERÁMICO.....	112

1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia se han ejecutado caminos, carreteras, cañadas, etc., para comunicar aldeas cercanas, así como ciudades que se encontraban separadas largas distancias, para ser usadas en el transporte de mercancías que debían ser trasladadas a puntos opuestos del territorio o la trashumancia de ganado desde los pastos de verano a los de invierno y viceversa.

Referido a lo anteriormente comentado, en España han llegado hasta nuestros días recuerdos y vestigios de esos caminos que atravesaban el país, y cuya motivación principal que llevó hacia su construcción era la del comercio, como puede ser la Vía de la Plata que conectaba Astorga con Mérida o caminos de índole religiosa, como puede ser el Camino de Santiago que conecta Santiago de Compostela con diversos puntos de España y Europa dependiendo del camino que se siga, entre otros ejemplos.

Por otro lado, la ejecución de una buena red de caminos rurales mejora, entre otras cosas, la comunicación entre núcleos urbanos rurales. Teniendo en cuenta la problemática a la que se está enfrentando este país, es decir, la despoblación existente en las zonas rurales por la falta de oportunidades que se les presentan a los jóvenes para poder desarrollar tanto su vida personal como profesional en estos lugares, la construcción de dichos caminos supone un beneficio para los núcleos antes mencionados a la hora de una posible repoblación o, en su defecto, un atrayente de empresas para que decidan instalarse en dichas zonas.

A la hora de decidir construir caminos rurales, una de las opciones por las que se pueden decantar tanto el proyectista como el peticionario del camino, es la utilización de áridos reciclados, ya sean procedentes del hormigón o de residuos de construcción y demolición (RCD), para ser empleados en el firme, tanto en la base como en la sub-base.

Para saber si los áridos reciclados serán válidos para ser empleados para tal fin, se realizan ciertos ensayos que han de arrojar unos resultados que cumplan lo indicado en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG3).

1.1 El firme. Firmes flexibles: sub-base, base y capa de rodadura

Este apartado ha sido redactado con información consultada en libro “*Caminos Rurales, Proyecto y Construcción*”, reimpresión de 2015, escrito por Rafael Dal-Ré.

1.1.1 Definición de firme

Se denomina firme a la capa de un camino que descansa sobre la explanación y que es la responsable de acoger los efectos del tráfico que circula por él de manera directa.

Además, el firme posee otras funciones, como son:

- Reparto de las cargas que transmite el tráfico al firme para que no se sobrepase la capacidad de carga de la explanación.
- Mejorar y facilitar la circulación de los vehículos en el camino.
- Protección frente a humedad del cuerpo del camino.

1.1.2 Tipos de firmes

Los caminos pueden presentar dos tipos de firmes, dichos tipos son el firme rígido y el firme flexible.

En el firme rígido existe alguna capa, normalmente la capa de base-rodadura, que posee una rigidez elevada puesto que suele estar ejecutada con hormigón en masa o armado levemente. Este tipo de firme no suele ser empleado en caminos rurales.

Las losas que aportan la rigidez al firme tienen, normalmente, 5-6 m de largo por 3 m de ancho, además se suele colocar una junta de dilatación cada 5-6 losas. Se ejecutan encima de zahorra artificial o natural que posea un espesor no menor de 20 cm, no plástica y con una compactación idónea que produce que la sub-base amortigüe los movimientos que pudieran ocasionarse en la explanación y, de ese modo, eludir que la base, la estructura rígida, se asiente de manera directa sobre la explanación, la capa más deformable.

Cuando se ejecutan caminos rurales con los firmes que se han descrito anteriormente, estos suelen tener solo un sentido de circulación, es decir, un solo carril, puesto que su costo por metro cuadrado es demasiado elevado y debe construirse en una zona en la que los rendimientos obtenidos respalden dicha inversión.

El firme más empleado en caminos rurales es el firme flexible, por ello se desarrolla más en profundidad en el siguiente apartado.

1.1.3 Firmes flexibles

Se denominan firmes flexibles a aquellos que poseen una resistencia a la flexión pequeña y, como se dijo anteriormente, son los más empleados en la ejecución de caminos rurales, ya que éstos pueden ser realizados con materiales que provengan de las proximidades de la zona en la que se asiente el camino, es decir, se pueden realizar con zahorras, que previamente hayan sido tratadas o no, que posean la misma naturaleza y características del suelo que la zona aledaña al camino y por ello el coste unitario resultante será menor y la conservación resultará más fácil.

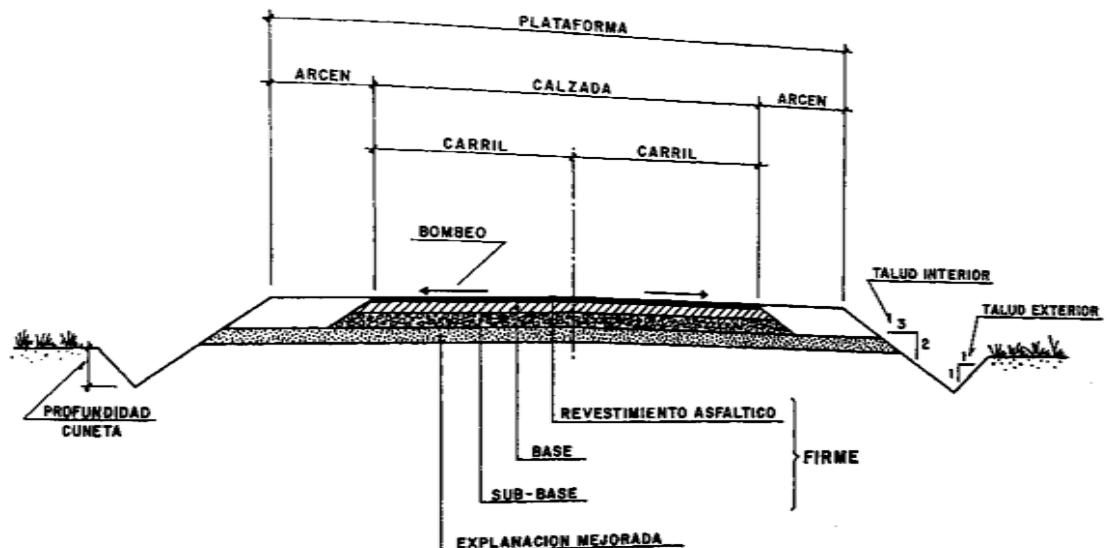


ILUSTRACIÓN 1: SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN CAMINO RURAL

(FUENTE: DAL-RÉ, 2015)

Cabe destacar que el firme flexible no es homogéneo ni resistente del mismo modo en toda su extensión, también es interesante indicar que la elasticidad que posee cada una de las capas es diferente y varía dependiendo de la humedad que presente en cada momento. Por todo ello es recomendable que, cuando se realice el cálculo del firme flexible que ha de poseer el camino en cuestión, dichos cálculos se fundamenten no solo en las características de los materiales que se empleen, sino también en las características que posean los materiales sobre los que se va a asentar el camino, puesto que pueden existir variaciones de humedad, o de otras condiciones atmosféricas o intrínsecas a los materiales, que den como resultado un colapso de la explanación produciendo con ello que el firme también se vea perjudicado.

Algunas de las capas que se van a indicar a continuación no tienen que estar, obligatoriamente, presentes en los caminos rurales, es más, se suele prescindir de ellas por no llegar a poseer el camino rural una intensidad de tráfico tan intenso lo que repercute en un menor coste de ejecución. El hecho de que no se realicen ciertas capas no significa que la calidad del camino, ni la que han de presentar los materiales, se vea reducida.

1.1.3.1 Sub-base

Corresponde a la capa del firme que se encuentra en contacto con la explanación y que nunca se encuentra directamente en contacto con los vehículos. Las características que posee son:

- Funciona como una capa que aísla la explanación, ya sea mejorada o no, de la capa superior. De este modo se evitan contaminaciones entre las capas, además de la ascensión del agua por medio de la capilaridad.
- Gracias al espesor que posee, es capaz de disminuir las tensiones que se transmiten en la base para que cuando alcancen la explanación sean lo suficientemente bajas para que las resista.
- Se produce un abaratamiento en el coste del camino, pues los materiales que se emplean en la ejecución de esta capa son de menor calidad que los empleados en las capas superiores.

Esta capa puede obviarse en ciertas circunstancias. En el caso de existir una explanación con naturaleza arcillosa, la capa de sub-base se hace imprescindible en caminos rurales que posean una intensidad de tráfico elevada.

Cabe destacar que los materiales que se empleen en la ejecución de esta capa deben aportar una correcta estabilidad frente a variaciones de volumen que pudieran ocurrir.

- **SUB-BASES GRANULARES:** se encuentran formadas por gravas procedentes de depósitos sedimentarios, como pueden ser el lecho de los ríos, o material granular seleccionado.

Las exigencias que requieren los materiales son las siguientes:

TABLA 1: EXIGENCIAS GRANULOMÉTRICAS DE LAS SUB-BASES GRANULARES

TAMIZ	% QUE PASA, EN PESO	
	HUSO B (2")	HUSO C (1 ½ ")
2 "	100	-
1 ½ "	70-100	100
1 "	55-85	70-100
¾ "	50-80	60-90
⅜ "	40-70	45-75
Nº 4	30-60	30-60
Nº 10	20-50	20-50
Nº 40	10-30	10-30
Nº 200	5-15	5-15

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS DE DAL-RÉ, 2015)

Cabe destacar que los valores presentes en esta tabla se han obtenido de las recomendaciones ofrecidas por la AASHTO (American State Highway and Transportation Officialis), dicho organismo establece unos intervalos, denominados husos, para cada tamaño máximo de árido.

En las exigencias de plasticidad hay que diferenciar si el firme poseerá revestimiento asfáltico o no, en cada caso los valores de límite líquido e índice de plasticidad serían de **LL<25** e **IP≤6**, en el caso de llevar revestimiento, y **LL≤35** y **4≤IP≤9**, en el caso de no llevar dicho revestimiento, pero en ambos casos el valor de equivalente en arena que se debe cumplir es **EA≥25**.

En cuanto a las exigencias de densidad, se pide que tras la realización del ensayo de Proctor modificado, se obtenga un valor de **PM \geq 2 kg/l** y, que tras ejecutar el ensayo de CBR después de saturado y compactado a la humedad óptima con una sobrecarga de 9 kg, se obtenga un valor **CBR \geq 20** y un **hinchamiento menor a 0,5%**.

Además, las exigencias en cuanto a desgaste, obtenido por el ensayo de Los Ángeles, deberá arrojar un valor **LA $<$ 50%** en el caso de poseer revestimiento asfáltico, y de **LA $<$ 40%** en el caso de no presentarlo.

- **SUB-BASES DE ARENA-ARCILLA:** las exigencias que se piden a los materiales que conforman este tipo de sub-base serán en cuanto a granulometría:

TABLA 2: EXIGENCIAS GRANULOMÉTRICAS DE LAS SUB-BASES DE ARENA-ARCILLA

TAMIZ	% QUE PASA, EN PESO
1 "	100
Nº 10	65-100

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS DE DAL-RÉ, 2015)

Donde el porcentaje que pasa por el tamiz Nº 10 deberá cumplir:

TABLA 3: EXIGENCIAS GRANULOMÉTRICAS DE LO CERNIDO POR EL TAMIZ Nº 10

TAMIZ	% QUE PASA, EN PESO
Nº 10	100
Nº 20	55-90
Nº 40	37-90
Nº 200	8-25

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS DE DAL-RÉ, 2015)

Las exigencias pedidas a los materiales en tema de plasticidad son **IP \leq 10** y **LL \leq 30**.

Cabe destacar que no se debe confundir la ejecución de una sub-base por este medio con la explanación mejorada empleando también arena y arcilla pues la estabilización que se produce en el caso de la explanación alcanza solamente 15 cm, mientras que en el caso de la base ese espesor puede ser mayor.

También es cierto que cuando se da el caso de tener poseer la capa un espesor igual o inferior a 15 cm, se asume como sub-base la explanación admitiendo que las exigencias en algunos aspectos, como son plasticidad y CBR, son diferentes para ambos casos.

- **SUB-BASES ESTABILIZADAS CON CAL:** las exigencias para plasticidad son **17 ≤ IP ≤ 40**; en cuanto a las exigencias para la granulometría que deben poseer los suelos en este caso son:

TABLA 4: EXIGENCIAS GRANULOMÉTRICAS DE SUB-BASES ESTABILIZADAS CON CAL

TAMIZ	% QUE PASA, EN PESO
Nº40	≤75
Nº 200	≥35

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS DE DAL-RÉ, 2015)

Cuando la naturaleza que posee la explanación es arcillosa se procede a la estabilización de la misma con ayuda de cal; en este caso la mezcla formada por el espesor de la explanación que resulte una vez realizados los cálculos pertinentes y la cal necesaria será la sub-base propiamente dicha.

Como ya se dijo en el caso anterior, no se debe confundir la estabilización realizada con la ejecución de la explanación mejorada, pues, además de que las exigencias de plasticidad y CBR que se deben alcanzar en cada uno de los casos es diferente, el espesor que presentarían ambas capas serían de 20 cm como máximo para las explanaciones y valores superiores a ese en el caso de la sub-base.

1.1.3.2 BASE

Corresponde a la capa principal del firme de un camino, sobre dicha capa es por la que circulan los vehículos cuando la capa de rodadura no aparece, en estos casos a esta capa se la denomina capa de base-rodadura.

La base es la responsable de recibir gran parte de las acciones producidas por el paso de los vehículos que llegan ya reducidas a las capas inferiores.

Los materiales que se emplean para la ejecución de la base presentarán una calidad excelente para conseguir que la capa posea una resistencia a la humedad y una no deformación elevadas.

Por este motivo, el coste unitario que posee es elevado por lo que los espesores que tiene esta capa suele estar entre 15 y 20 cm.

- **BASES DE MACADAM:** se denomina macadam a un material que posee áridos de granulometría discontinua que se extienden y compactan, la fracción más gruesa, rellenando los huecos existentes con la fracción fina, denominada recebo.

La ejecución de este tipo de bases se encuentra en apogeo puesto que ofrece unos valores de resistencia específica aceptables. Además, estas capas suelen no llevar revestimiento asfáltico, por lo que serían capas de base-rodadura.

Cabe destacar que estas bases no soportan correctamente las cargas puntuales, por lo que deberán estar asentadas sobre una explanación con una correcta capacidad portante o una sub-base que reparta las cargas de manera eficaz.

Se consiguen unos resultados bastante aceptables con la siguiente granulometría de gruesos:

TABLA 5: GRANULOMETRÍA DE LA FRACCIÓN GRUESA

TAMIZ UNE	TAMIZ ASTM	% QUE PASA, EN PESO
80	3 ½ "	100
63	2 ½ "	90-100
40	1 ½ "	0-10
20	¾ "	0-5

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS DE DAL-RÉ, 2015)

La parte de recebo que se debe emplear proviene de detritus de machaqueo, arena natural, etc., no ha poseer plasticidad y presentar un valor de equivalente en arena de **EA>30**. Las exigencias de granulometría son las siguientes:

TABLA 6: GRANULOMETRÍA DE LA FRACCIÓN FINA

TAMIZ UNE	TAMIZ ASTM	% QUE PASA, EN PESO
10	⅜ "	100
5	Nº 4	85-100
0,080	Nº 200	10-25

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS DE DAL-RÉ, 2015)

Esta capa poseerá un espesor de 15 cm, pudiendo llegar a los 20 cm y, en raras ocasiones, superando dicho valor. Estos valores son en el caso de existir revestimiento asfáltico, siendo esta casuística la más normal de encontrar. Si dicho revestimiento no se ejecutara se ha de exigir la presencia de un recebo que posea un tamaño máximo de árido igual a 1/6 del tamaño medio que presente la fracción gruesa del macadam, además de tener unos valores de plasticidad de **LL<35** y **4<IP<10**.

- **BASES GRANULARES:** del mismo modo que se dijo para las sub-bases granulares, este tipo de capas se encuentra constituido por áridos naturales o material seleccionado. Teniendo en cuenta las exigencias que se piden a los materiales con los que se ejecute esta capa, dichos materiales se podrán estabilizar de los siguientes modos:

- ESTABILIZACIÓN A 1": de los sub-apartados que se van a indicar, este es el que de forma más extendida se emplea para la ejecución de bases, tanto si estas poseen revestimiento asfáltico o no; en el caso de que no lo presenten, las condiciones de plasticidad que se les exige son **LL<35**, **EA≥30**, **8≤IP≤10**, cuando el camino se ejecute en regiones secas, y **6≤IP≤9**, cuando se ejecute en regiones húmedas, con un espesor de, como mínimo, 15 cm, pudiendo ser mayor si las necesidades al dimensionar el firme así lo requieren.
- ESTABILIZACIÓN A 1 ½ ": este tipo se puede ejecutar tanto como capa de base-rodadura como capa de base que si presente revestimiento asfáltico. En este caso el espesor que suele poseer suele ser de 15 cm o superior.
- ESTABILIZACIÓN A ¾ ": en este caso se precisa que aparezca siempre un revestimiento asfáltico. En cuanto al espesor que suelen poseer, como en el caso anterior, es de 15 cm o más.
- ESTABILIZACIÓN A 2 ": este tipo de bases pueden realizarse como capa de base-rodadura, si bien es cierto que es recomendable que lleven un revestimiento asfáltico como base de rodadura. El espesor que posee este tipo de base es de 20 cm, como mínimo.

- ESTABILIZACIÓN ARENA-ARCILLA: realizar este tipo de estabilización para ejecutar la capa base precisa de ciertas aclaraciones. En el caso de encontrarse sin revestimiento asfáltico se ha de garantizar un correcto saneamiento, pues se deben prevenir aumentos de humedad que produzcan una disminución de la estabilidad; por otro lado la compactación a conseguir será del **100% del Proctor normal**.
- ZAHORRAS NATURALES O ARTIFICIALES: realmente no es una estabilización granulométrica pero no se debe eludir por ser un procedimiento empleado ampliamente para la ejecución de bases.

Es necesario diferenciar entre zavorras naturales y artificiales, pues en las primeras no se considera que se realice una estabilización granulométrica aunque sí es cierto que guarda similitudes con las bases granulares.

En el caso de las zavorras naturales las exigencias que han de cumplir son, para el caso de plasticidad **4<IP≤9** y **LL<35** con un **EA>30**; en el caso del CBR el valor, después de la saturación, será siempre **CBR>20**, siendo además estables a la humedad y resistentes a heladas y en el caso de la granulometría será:

TABLA 7: EXIGENCIAS GRANULOMÉTRICAS DE LAS ZAHORRAS NATURALES

TAMICES	% QUE PASA, EN PESO
2 "	<100
¾ "	>50
Nº 200	<25

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS DE DAL-RÉ, 2015)

Por otro lado, el espesor que suelen presentar este tipo de bases es, como mínimo, de 20 cm.

Cabe destacar que, tras una compactación de la capa al 100% del Proctor normal, los caminos rurales cuya intensidad de tráfico sea media o baja no precisan revestimiento asfáltico, mientras que para caminos en los cuales la intensidad sea elevada sí que es necesario realizar una capa de rodadura adecuada.

En el caso de las zahorras artificiales, éstas serán del tipo Z_1 o Z_2 . Este tipo de material se encuentra constituido por un conjunto de áridos machacados, de manera total o parcial, y que dan como resultado una granulometría continua. Cuando se les realiza el ensayo de equivalente en arena arrojan un valor de **EA>30**, del mismo modo, cuando el ensayo a realizar es el de desgaste de Los Ángeles, el valor obtenido es **LA<35**. Este tipo de materiales **no poseen plasticidad**.

TABLA 8: ZAHORRAS TIPO, SEGÚN EL PG4/88

TAMICES		% QUE PASA, EN PESO		
UNE	ASTM	Z_1	Z_2	Z_3
50	2 "	100	-	-
40	1 ½ "	70-100	100	-
25	1 "	55-85	70-100	100
20	¾ "	50-80	60-90	70-100
10	⅜ "	40-70	45-75	50-80
5	Nº 4	30-60	30-60	35-65
2	Nº 10	20-45	20-45	20-45
0,400	Nº 40	10-30	10-30	10-30
0,080	Nº 200	5-15	5-15	5-15

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS DE DAL-RÉ, 2015)

La granulometría que presenta la zahorra del tipo Z_1 corresponde con la que presenta el huso B (2") presente en la Tabla 1, mientras que la granulometría del tipo de zahorra Z_2 , es la presentada por el huso C (1 ½ ") reflejado también en la tabla antes citada.

Al carecer las zahorras artificiales, empleadas en la ejecución de este tipo de bases, de plasticidad y, aunque la compactación alcanzada sea del 98% del Proctor normal, no pueden llegar a formar una capa de base sin que posea una capa de rodadura asfáltica asociada a ella, si bien es cierto que se pueden considerar estabilizadas.

Por el motivo mencionado en el anterior párrafo, este tipo de bases, ejecutadas con zahorras artificiales, siempre han de llevar un revestimiento asfáltico a modo de capa de rodadura, que aporte estabilidad al conjunto. El espesor, como mínimo, que alcanzará la capa será de 15 cm.

- **BASES DE SUELO-CEMENTO:** este tipo de bases se ejecutan en zonas en las cuales la intensidad de tráfico es elevada y, por tanto, se ve respaldado el coste unitario que poseen.

Los espesores que pueden poseer se encuentran entre 10 cm, en casos excepcionales, y 15 cm, pudiendo alcanzarse los 20 cm en contadas ocasiones por elevado coste.

Este tipo de bases presentan una calidad excelente; son ejecutadas con materiales que proceden de cantera. Además, en raras ocasiones se pueden observar sin capa de rodadura de naturaleza bituminosa.

- **BASES DE GRAVA-CEMENTO Y BASES ESTABILIZADAS CON PRODUCTOS BITUMINOSOS:** estas bases no suelen ejecutarse en caminos rurales debido a su alto coste unitario. Una consideración a tener es que el espesor que suelen poseer dichas bases es de 15 cm aproximadamente.

1.1.3.3 CAPA DE RODADURA

Se asienta sobre la capa base, en los caminos en los cuales se ejecuta; esta capa es la responsable de soportar el tráfico de los vehículos, así como las acciones que se derivan de ellos y de los agentes atmosféricos que puedan existir. Además, una de las funciones principales que posee esta capa es la de mejorar la circulación.

Los materiales que se han de emplear para la ejecución de esta capa han de ser de excelente calidad, por ello se debe realizar un análisis de precios minucioso para evitar, en la medida de lo posible, el aumento del coste del camino.

Las formas en las que los productos asfálticos más se emplean en la construcción de caminos rurales son las siguientes:

- **RIEGOS ASFÁLTICOS SIN GRAVILLA:** los riegos que se nombran a continuación por sí solos no constituyen una capa de rodadura.

- ANTIPOLVO
- CURADO
- IMPRIMACIÓN
- ADHERENCIA

- **RIEGOS ASFÁLTICOS CON GRAVILLA**
 - TRATAMIENTO SUPERFICIAL MONOCAPA
 - TRATAMIENTO SUPERFICIAL BICAPA
 - DE PENETRACIÓN
- **AGLOMERADOS ASFÁLTICOS EN FRÍO**
- **LECHADAS BITUMINOSAS**

1.2 Parámetros y mínimos exigidos

Como se dijo anteriormente, para saber si los materiales a emplear en la construcción de caminos rurales son adecuados, independientemente de su procedencia, se han de cumplir ciertos requisitos que vienen indicados en el PG3.

Antes de proceder a la exposición de los requisitos y de los mínimos que han de poseer dichos materiales para poder emplearse en la ejecución de caminos rurales, se realizará la definición de algunos conceptos.

- **ÁRIDO FINO (España, 2015):** fracción del material granular que atraviesa el tamiz de 4 mm, dicho tamiz ha de cumplir con lo especificado en la norma UNE-EN 933-2.
- **ÁRIDO GRUESO (España, 2015):** fracción del material granular que queda retenido en el tamiz de 4 mm, dicho tamiz, como en el caso anterior, ha de cumplir con lo especificado en la norma UNE-EN 933-2.
- **SUELO (aeice, 2018):** material que se produce de la alteración natural que sufre la roca madre y la evolución de material vegetal existente sobre ella.
- **SUELO GRANULAR (aeice, 2018):** material que se compone, en su gran mayoría, de gravas y arenas.
- **ZAHORRA (aeice, 2018):** árido que posee una granulometría continua y es empleado en la ejecución de firmes.
- **ZAHORRA ARTIFICIAL (aeice, 2018):** árido que está compuesto por partículas parcial o totalmente trituradas.
- **ZAHORRA NATURAL (aeice, 2018):** árido que está compuesto, en su gran mayoría, por partículas que no se encuentran trituradas.

- **ZAHORRA ARTIFICIAL RECICLADA DE HORMIGÓN (aeice, 2018):** árido que posee una granulometría continua y cuya procedencia es del machaqueo de residuos de hormigón en su totalidad, sin que posea otras procedencias.
- **ZAHORRA ARTIFICIAL RECICLADA MIXTA DE RCD (aeice, 2018):** árido que posee una granulometría continua y cuya procedencia la tiene en la trituración, de un modo controlado, de residuos de construcción y demolición (RCDs).

A continuación se indican cuales son los mínimos que deben de poseer los diferentes tipos de áridos para que puedan ser empleados en la construcción de caminos. Todos los requisitos que se indicaran seguidamente se pueden observar en la parte 5ª del PG3, denominada Firmes, a su vez se encuadran en el Capítulo I. Capas granulares, y, por último, en el punto 510 Zahorras. Si bien es cierto que existe un apartado que se encuentra en el punto 512 Suelos Estabilizados In Situ.

Primeramente, antes de indicar los mínimos que han de alcanzar los diferentes parámetros, se procede a determinar cuáles son las diferentes categorías de tráfico pesado.

Para saber cuál es la categoría de tráfico pesado que presenta el camino rural que se desee ejecutar, se ha de saber la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp) que se prevea que exista en el carril que se está proyectando durante el primer año de puesta en servicio.

TABLA 9: CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T00 A T2

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	T00	T0	T1	T2
IMDp (VEHÍCULOS PESADOS/DÍA)	$IMDp \geq 4000$	$2000 \leq IMDp < 4000$	$800 \leq IMDp < 2000$	$200 \leq IMDp < 800$

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS OBTENIDOS DE LA ORDEN FOM/3460/2003)

TABLA 10: CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T3 Y T4

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	T31	T32	T41	T42
IMDp (VEHÍCULOS PESADOS/DÍA)	$100 \leq IMDp < 200$	$50 \leq IMDp < 100$	$25 \leq IMDp < 50$	$IMDp < 25$

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS OBTENIDOS DE LA ORDEN FOM/3460/2003)

Para, en caso de quererse consultar en el documento original los valores que se indicarán seguidamente, se añadirá el punto en el que se encuentran.

- **PUNTO 510.2.2.3.2 ANGULOSIDAD (PORCENTAJE DE CARAS DE FRACTURA):** la norma que se seguirá para la determinación de este parámetro será la norma UNE-EN 933-5. Dicha norma se basa en el porcentaje de partículas que presentan caras total o parcialmente trituradas o redondeadas de la muestra de árido que se ensaya. Dependiendo de si se toma una u otra proporción los valores que se han de cumplir son:

TABLA 11: PROPORCIÓN DE PARTÍCULAS TOTAL Y PARCIALMENTE TRITURADAS DEL ÁRIDO GRUESO (% EN MASA)

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
T00 a T0	T1 a T2 y ARCENES T00 a T0	T3 a T4 y RESTO de ARCENES
100	≥70	≥50

(FUENTE: PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES, PG-3)

TABLA 12: PROPORCIÓN DE PARTÍCULAS TOTALMENTE REDONDEADAS DEL ÁRIDO GRUESO (% EN MASA)

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
T00 a T0	T1 a T2 y ARCENES T00 a T0	T3 a T4 y RESTO de ARCENES
0	≤10	≤10

(FUENTE: PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES, PG-3)

- **PUNTO 510.2.2.3.3 FORMA (ÍNDICE DE LAJAS):** la norma que se seguirá para la determinación de este parámetro será la norma UNE-EN 933-3. Dicha norma se basa en la determinación del índice de lajas que presenta la muestra de árido que se ensaya después de realizarle dos series de tamizados. El valor que deben presentar cada una de las fracciones en las que se divide la muestra tras su ensayo debe ser inferior a **FI<35**.

- **PUNTO 510.2.2.3.4 RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN (COEFICIENTE DE LOS ÁNGELES):** la norma que se seguirá para la determinación de este parámetro será la norma UNE-EN 1097-2.

Dicha norma se basa en determinar cuál sería la degradación que presenta el árido a una acción de machaqueo combinada con abrasión e impacto. El valor que deben poseer los áridos a emplear no será superior al indicado en la tabla siguiente:

TABLA 13: VALOR MÁXIMO DEL COEFICIENTE DE LOS ÁNGELES (LA)

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	
T00 a T2	T3, T4 y ARCENES
30	35

(FUENTE: PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES, PG-3)

- **PUNTO 510.2.2.3.5 LIMPIEZA (CONTENIDO DE IMPUREZAS):** además de comprobar que el material que se emplea en la ejecución de los firmes no posea ningún tipo de material que interfiera con la durabilidad de la capa, se ha de determinar que el contenido de finos que posee el material en la fracción gruesa, empleando para ello la norma UNE-EN 933-1, expresado dicho contenido como **porcentaje que atraviesa el tamiz de abertura 0,063 mm, es menor del 1% en masa.**
- **PUNTO 510.2.2.4.2 CALIDAD DE LOS FINOS:** la norma que se seguirá para la determinación de este parámetro será la norma UNE-EN 933-8. Dicha norma se basa en la determinación del porcentaje de finos que posee la muestra de árido que se ensaya. El valor del equivalente en arena (SE_4) que deben presentar los áridos ha de ser el que aparece en la tabla presente a continuación:

TABLA 14: EQUIVALENTE EN ARENA (SE_4)

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
T00 a T0	T1 a T2 y ARCENES T00 a T0	T3 a T4 y RESTO de ARCENES
>40	>35	>30

(FUENTE: PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES, PG-3)

Además, se puede exigir que el material que se emplee en la ejecución de caminos rurales sea **No Plástico**, según las normas UNE 103-103 y UNE 103-104. En la casuística de emplearse los materiales en la ejecución de arcenes que no se encuentren pavimentados y que estén dentro de las categorías de tráfico pesado correspondientes a T32 y T4, se puede admitir que los materiales posean **un índice de plasticidad**, calculado a partir de los resultados obtenidos en los ensayos UNE 103-103 y UNE 103-104, **menor a 10**, así como poseer un **límite líquido**, calculado por la norma UNE 103-103, **menor a 30**.

- **PUNTO 510.3 TIPO Y COMPOSICIÓN DEL MATERIAL:** la norma que se seguirá para la determinación de este parámetro será la norma UNE-EN 933-1. Dicha norma se basa en la determinación de la granulometría que presentan las muestras de árido que se ensayan cuando se realiza un tamizado por los tamices que se indican en la norma.

Cabe destacar, además, que lo retenido en el tamiz de 0,063 mm ha de ser 2/3 inferior a lo que quede retenido en el tamiz de 0,250 mm. Dependiendo de lo retenido en cada tamiz, los áridos que se estén ensayando pertenecerán a un tipo de zahorra presente en la tabla siguiente:

TABLA 15: HUSOS GRANULOMÉTRICOS CERNIDO ACUMULADO (% EN MASA)

TIPO DE ZAHORRA	ABERTURA DE LOS TAMICES UNE-EN 933-2 (mm)									
	40	32	20	12,5	8	4	2	0,500	0,250	0,063
ZA 0/32	100	88-100	65-90	52-76	40-63	26-45	15-32	7-21	4-16	0-9
ZA 0/20		100	75-100	60-86	45-73	31-54	20-40	9-24	5-18	0-9
ZAD 0/20		100	65-100	47-78	30-58	14-37	0-15	0-6	0-4	0-2

(FUENTE: PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES, PG-3)

- **PUNTO 510.7 DENSIDAD:** dependiendo de la categoría de tráfico pesado que posea el camino que se pretende ejecutar se han de conseguir diferentes valores de densidad realizando para ello el ensayo de Proctor modificado, siguiendo la norma UNE-EN 13286-2, dichos valores son referidos a la densidad máxima que se obtiene al realizar el ensayo antes mencionado. Los valores son:

TABLA 16: DENSIDAD DE LA COMPACTACIÓN

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	
T00 a T2	T3, T4 y ARCENES
≤100%	≤98%

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS OBTENIDOS DEL PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES, PG-3)

- **PUNTO 512.3.1 CONSIDERACIONES GENERALES (PUNTO 512.3 TIPO Y COMPOSICIÓN DEL SUELO ESTABILIZADO):** en los Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares se precisará la comparación y el tipo de suelo a estabilizar. Los valores de índice C.B.R. y densidad son los que se especifican en la siguiente tabla:

TABLA 17: TIPO Y ESPECIFICACIONES DEL SUELO ESTABILIZADO IN SITU

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	NORMA	TIPO DE SUELO ESTABILIZADO		
			S-EST1	S-EST2	S-EST3
ÍNDICE C.B.R, A 7 DÍAS		UNE 103-502	≥6	≥12	-
DENSIDAD (PROCTOR MODIFICADO)	% DE LA DENSIDAD MÁXIMA	UNE 103-501	≥95	≥97	≥98

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS OBTENIDOS DEL PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES, PG-3)

1.3 Ensayos para la caracterización de áridos y suelos para su empleo en la ejecución de caminos rurales

Dependiendo de si el material que se esté ensayando corresponde a un árido aportado o a un suelo, los ensayos que se le debe realizar para conseguir una caracterización que permita determinar su idoneidad para el empleo en la ejecución de caminos rurales, serán diferentes. Por ello, seguidamente se realizará una pequeña explicación de los ensayos que se deberían realizar.

1.3.1 Ensayos para áridos aportados

- **DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS. MÉTODO DEL TAMIZADO (UNE EN 933-1):** el ensayo de granulometría se basa en la división y separación de un material por medio de una serie de tamices, que fraccionan el material de manera decreciente.

Dependiendo de la precisión que se quiera alcanzar y de la geometría de los áridos que presente la muestra a ensayar se escogerá el número de tamices a emplear y los tamaños de abertura de los mismos.

El método que se va a seguir se fundamenta en el lavado y tamizado en vía seca del material. Cuando el lavado interfiera en las propiedades físicas de los áridos ligeros se debe realizar el tamizado en vía seca sin el lavado anterior, descrito en el apartado de Lavado.

Para la expresión de las masas que se quedan retenidas en cada tamiz, ésta se realiza en función de la masa inicial de muestra.

El porcentaje, de manera acumulativa, que atraviesa cada tamiz se registra de manera numérica y, en caso de ser necesario, de manera gráfica.

- **DETERMINACIÓN DE LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS. ÍNDICE DE LAJAS (UNE EN 933-3):** para la realización de este ensayo se deben hacer dos tamizados diferentes. Primeramente, se realiza la división de la muestra a ensayar en las diversas fracciones granulométricas por medio de los tamices. Todas las fracciones granulométricas que se han obtenido anteriormente se criban por tamices de barras paralelas y con una separación la mitad de la abertura del mayor de los tamices que atraviesa el material.

Para calcular el valor que presenta el índice de lajas global se debe atender a la masa inicial ensayada que pasa por los tamices de barras; se ha de expresar dicha masa como porcentaje del total del peso total que se emplea para la realización del ensayo.

En caso de que fuera necesario, se calcularía el índice de lajas para cada una de las fracciones granulométricas obtenidas, dicho índice sería igual a las masas de material que pasan por cada uno de los tamices referenciados a los porcentajes de las masas de dicha fracción granulométricas.

- **DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE CARAS DE FRACTURA DE LAS PARTÍCULAS DE ÁRIDO GRUESO (UNE EN 933-5):** el ensayo que se va a describir se basa en la separación de manera manual de las porciones de la muestra sobre la que se realice el ensayo en los siguientes grupos:

- Partículas trituradas, incluidas las partículas totalmente trituradas.
- Partículas redondeadas, incluidas las partículas totalmente redondeadas.

Una vez realizada la separación de los dos grupos, se ha de precisar la masa de cada uno de los grupos expresándola sobre el porcentaje del total del material ensayado.

Finalmente, se realiza la separación del material que se encuentre totalmente triturado y totalmente redondeado de los grupos de partículas trituradas y redondeadas, respectivamente. Se fija el peso de cada uno de los grupos que se han realizado y se indican los mismos como porcentaje sobre el total del material ensayado.

- **EVALUACIÓN DE LOS FINOS. ENSAYO DEL EQUIVALENTE EN ARENA (UNE EN 933-8):** para la realización de este ensayo se toma una muestra de ensayo, con un rango de granulometría de 0/2 mm, de árido que presente una concentración de finos de menos del 10%, dicha muestra puede ser natural o bien la obtenida después del ajuste de la curva granulométrica, y se vierte, junto con una cantidad determinada de la solución de lavado y floculante, en una probeta cilíndrica que posea graduación; a continuación se agita la mezcla para provocar que el recubrimiento arcilloso que pueda contener el árido se desprenda.

Seguidamente, se empapa el árido empleando una cantidad adicional de la solución de lavado y floculante para que, de esta manera, se favorezca la suspensión de las partículas finas. Después de transcurrido el tiempo necesario, se realiza el cálculo del valor del equivalente de arena (SE (10)) a partir de la altura que presenta el sedimento, dicho valor se expresa como un porcentaje de la altura total que presenta el sedimento y la suspensión en la probeta.

En caso de necesitarse el valor de equivalente en arena para el rango de granulometría de 0/4 mm, el ensayo se realizaría de la misma manera pero tomando como muestra de ensayo la que posea dicho rango de granulometría.

- **MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN. ENSAYO DE LOS ÁNGELES (UNE EN 1097-2):** se introduce la muestra objeto de ensayo y las bolas de acero dentro del tambor. Después de haberse dado las vueltas necesarias se ha de determinar qué cantidad de material queda retenido en el tamiz de 1.6 mm.

1.3.2 *Ensayos para suelos*

- **ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO (UNE 103-101):** el objetivo que persigue esta norma es la de establecer, como tanto por ciento en masa, cual es la cantidad de partículas que se encuentran en una fracción granulométrica determinada entre el tamiz de mayor abertura, por el que pasan, y el de menor abertura, en el que se quedan retenidas. Para ello se han de emplear los tamices de ensayo que se describen en la norma UNE 7050-2 hasta llegar al tamiz de abertura 0,080 mm.

Cuando se pretenda determinar cuál es la distribución que poseen las fracciones menores a 0,080 mm, se debe complementar este ensayo con el ensayo de sedimentación, que se describe en la norma UNE 103 102.

- **DETERMINACIÓN DEL LIMITE LIQUIDO DE UN SUELO POR EL MÉTODO DEL APARATO DE CASAGRANDE (UNE 103-103):** el objetivo que persigue esta norma es la de realizar la determinación del límite líquido que posee un suelo con ayuda del aparato de Casagrande.

El límite líquido es, atendiendo a lo especificado en esta norma, la humedad que posee un suelo que se amasa con agua y se deposita sobre una cuchara, que se encuentra normalizada para este ensayo, cuando se realiza un surco, que se ejecuta con un acanalador también normalizado.

Este acanalador parte a la mitad el suelo anteriormente depositado y se junta a lo largo de la cuchara, en una longitud de 13 mm, después de haber realizado la caída de la cuchara 25 veces desde una altura de 10 mm sobre una base, también normalizada. La caída que se debe imprimir ha de ser de dos golpes por segundo.

- **DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO DE UN SUELO (UNE 103-104):** el objetivo que pretende este ensayo es precisar cuál es el límite plástico que presenta cierto suelo.

El límite plástico, según la norma por la que se va a realizar este ensayo, corresponde a la humedad más baja a la que se pueden realizar, con el suelo objeto de ensayo, cilindros con un diámetro de 3 mm que se han de hacer rodar entre los dedos y una superficie lisa hasta que en dichos cilindros comiencen a formarse grietas.

- **DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE UN SUELO MEDIANTE SECADO EN ESTUFA (UNE 103-300):** el objetivo de este ensayo es explicar un método para realizarse una precisión de la humedad que presenta la muestra de ensayo empleando, para ello, una estufa ventilada.

La humedad de la muestra se calcula como la división del agua que se pierde al secar la muestra en estufa entre la masa del suelo seco, expresado dicho valor en tanto por ciento.

- **ENSAYO DE COMPACTACIÓN. PROCTOR NORMAL (UNE 103-500):** el objetivo que persigue este ensayo es precisar, en un suelo determinado, la relación existente entre la humedad y la densidad seca, cuando se le aplica una energía de compactación igual a $0,583 \text{ J/cm}^3$; además de delimitar cual es, para la densidad seca máxima, la humedad óptima que le corresponde y que se logra conseguir en laboratorio.

Para ejecutar este ensayo se han de compactar cierta cantidad de probetas para, de este modo, conseguir obtener la densidad seca y su correspondiente humedad óptima. Para conseguir las diferentes densidades y humedades se debe variar la cantidad de agua que se adiciona al suelo que se desee ensayar.

- **MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EN LABORATORIO EL ÍNDICE C.B.R. DE UN SUELO (UNE 103-502):** el objetivo que pretende conseguir esta norma es reseñar el método que se emplea para precisar el índice C.B.R. de ciertos suelos, C.B.R significa California Bearing Ratio y es un índice de resistencia de los suelos.

El índice antes mencionado no presenta un valor único en el suelo, pues depende de unas determinadas condiciones de densidad, humedad y estado y también de otras condiciones como pueden ser la sobrecarga que se le aplique, por lo que el ensayo se ha de realizar sobre suelo que se encuentre ya compactado en laboratorio y posea unos valores establecidos de densidad y humedad, aunque también puede realizarse, de forma parecida, sobre muestras de suelo que provengan de manera inalterada del terreno.

Este ensayo puede emplearse para la determinación de la capacidad de soporte que presenta un suelo para su empleo en rellenos compactados.

- **EVALUACIÓN DE LOS FINOS. ENSAYO DEL EQUIVALENTE EN ARENA (UNE EN 933-8):** ya se ha determinado el fundamento de este ensayo en el apartado anterior.

1.3.3 Ensayos realizados en este trabajo

Como el material que se va a ensayar para la ejecución de este trabajo es, en los tres casos, árido, ya sea procedente de material natural, procedente de hormigón o procedente de residuos de construcción y demolición, los ensayos que se van a llevar a cabo son los correspondientes al apartado de ensayos para áridos, es decir:

- **DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS. MÉTODO DEL TAMIZADO (UNE EN 933-1)**
- **DETERMINACIÓN DE LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS. ÍNDICE DE LAJAS (UNE EN 933-3)**
- **DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE CARAS DE FRACTURA DE LAS PARTÍCULAS DE ÁRIDO GRUESO (UNE EN 933-5)**
- **EVALUACIÓN DE LOS FINOS. ENSAYO DEL EQUIVALENTE EN ARENA (UNE EN 933-8)**
- **MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN. ENSAYO DE LOS ÁNGELES (UNE EN 1097-2)**

Por otro lado, se van a realizar también ensayos en los materiales suponiendo que estos son suelos en vez de áridos, dichos ensayos serán:

- **DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE UN SUELO POR EL MÉTODO DEL APARATO DE CASAGRANDE (UNE 103-103)**
- **DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO DE UN SUELO (UNE 103-104)**
- **ENSAYO DE COMPACTACIÓN. PROCTOR NORMAL (UNE 103-500)**

2 OBJETIVOS

En los últimos años se ha priorizado el empleo de materiales reciclados frente al de los materiales “nuevos”, pues de este modo se reduce la contaminación que provoca la fabricación de dichos materiales, así como la acumulación de residuos cuando éstos acababan su vida útil.

Este pensamiento también ha calado en el mundo rural, más concretamente, y que más interesa para el desarrollo de este trabajo, a la hora de ejecutar caminos rurales.

Para la construcción de ciertas capas del camino rural se sustituyen los materiales “nuevos” por materiales reciclados que, a priori, ofrecen las mismas características constructivas. Para determinar si eso es correcto se han realizado diversos estudios y se han ejecutado caminos rurales con dichos materiales obteniéndose resultados aceptables.

Para la ejecución de este trabajo se eligen, como material de ensayo, tres áridos que poseen diversas procedencias, en concreto una zahorra artificial procedente del material natural obtenido en cantera, un árido reciclado, que se denominará 100% reciclado, procedente de la reutilización del hormigón y, por último, un árido reciclado, que se denominará mixto cerámico, procedente de residuos de construcción y demolición (RCDs).

Los objetivos que se pretenden conseguir con este trabajo son:

- Consultando la normativa de referencia en tema de caminos rurales, que en este caso es el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, PG3, se determinan los valores que han de cumplir los materiales que se deseen emplear en la ejecución de caminos rurales.
- Con ayuda de los ensayos que se indican en el PG3 para cada uno de los parámetros exigidos, y que además aparecen indicados en el apartado anterior, se determinan los valores que alcanzan cada uno de los materiales que se desean emplear para la construcción de los caminos rurales. Como ya se dijo, esos materiales son: zahorra artificial, material 100% y material mixto cerámico.

- Después de conocer las exigencias que aparecen en el PG3 y los resultados obtenidos de los ensayos, se realiza la comparación de ambos valores, con el fin de saber si los materiales ensayados serían aptos para emplearlos en la ejecución de caminos rurales.

3 METODOLOGÍA

3.1 Material

Los materiales a emplear en la ejecución de caminos rurales puede provenir de dos fuentes: ser un árido natural, es decir, producido a partir de materiales granulares según se encuentran en la naturaleza a los que se les realiza algún tratamiento previo, o ser un árido reciclado, es decir, producidos a partir de la reutilización de residuos de obras, es decir, Residuos de Construcción y Demolición (RDC); estos residuos, que serán transformados en áridos reciclados, pueden provenir de restos de hormigón, cerámicos o mixtos.

Un pequeño esquema sobre los dos grandes tipos de áridos que se pueden aportar a la hora de ejecutar un camino puede ser el siguiente:

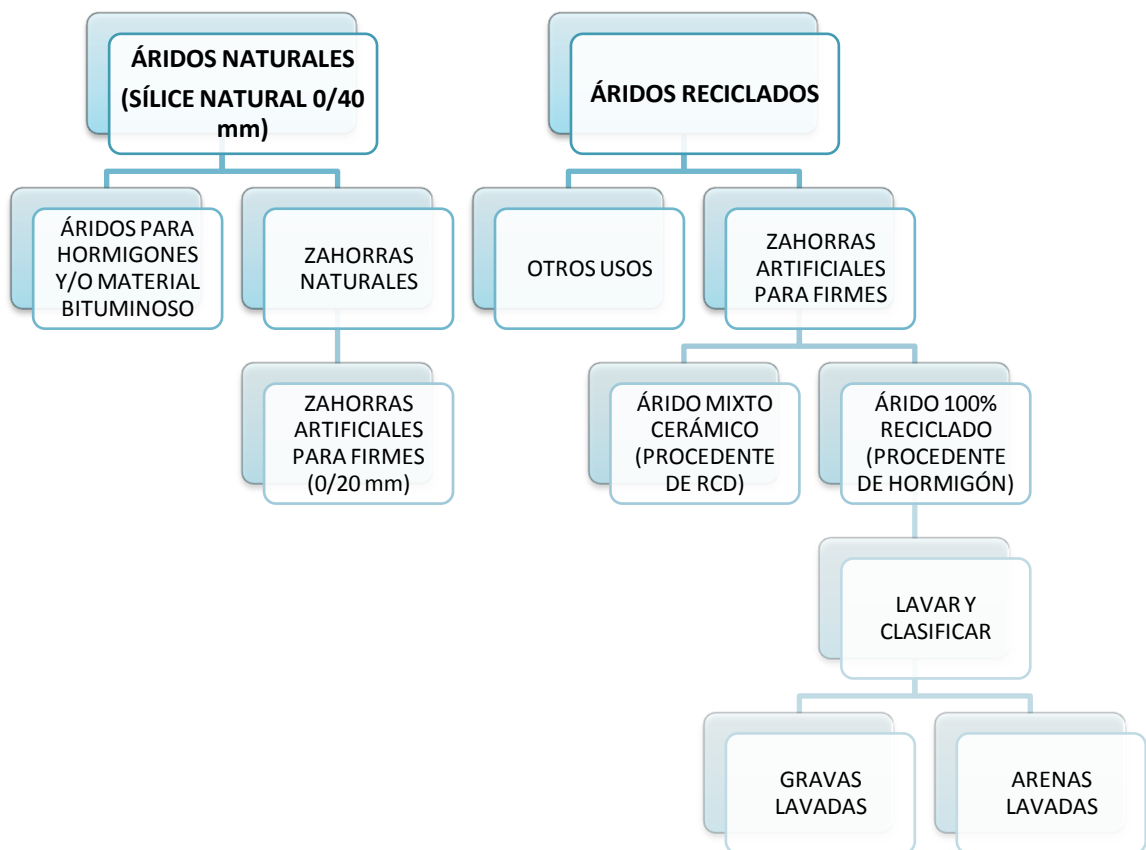


ILUSTRACIÓN 2: TIPOS DE MATERIALES

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS FACILITADOS EN ÁRIDOS VALDEARCOS S.L.)

3.1.1 Zahorra artificial

La zahorra artificial, como se ha dicho anteriormente, se produce a partir del material natural que se obtiene en cantera. A este material se le realiza una serie de cribados, para retirar el material más grueso y que no puede ser empleado para la ejecución de caminos rurales, además se les somete a varios triturados para conseguir que el material posea más caras de fractura que las que posee en estado natural.

La zahorra que se va a emplear en la ejecución de los ensayos será zahorra artificial con una granulometría comprendida entre 20/0 mm.



ILUSTRACIÓN 3: ZAHORRA ARTIFICIAL CON GRANULOMETRÍA 20/0 mm

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

3.1.2 Árido 100% reciclado de hormigón

El árido 100% reciclado de hormigón procede de, como bien indica su nombre, la reutilización de hormigones. A este tipo de áridos se les hace pasar por una serie de procedimientos mecánicos de machaqueo para disminuir, de este modo, su granulometría y, que puedan ser empleados en la ejecución de caminos rurales.

El árido 100% reciclado de hormigón que se va a emplear en la ejecución de los ensayos poseerá una granulometría comprendida entre 25/0 mm.



ILUSTRACIÓN 4: ÁRIDO 100% HORMIGÓN RECICLADO CON GRANULOMETRÍA 25/0 mm

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

3.1.3 Árido mixto cerámico

El árido mixto cerámico tiene su procedencia en la reutilización de residuos de construcción y demolición. Para poder emplearse estos áridos, deben pasar por una serie de tratamientos, que serán tanto mecánicos como de clasificación y eliminación de materiales peligrosos, nocivos y/o indeseables, ya sea para el medio ambiente o para la ejecución de caminos rurales por afectar a la durabilidad del mismo.

El árido mixto cerámico que se va a emplear en la ejecución de los ensayos poseerá una granulometría comprendida entre 16/0 mm.



ILUSTRACIÓN 5: ÁRIDO RECICLADO MIXTO CERÁMICO CON GRANULOMETRÍA 16/0 mm

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

3.2 Métodos

En este apartado se va a proceder a describir cuales serán los ensayos que se llevarán a cabo en los materiales que se han comentado anteriormente.

Se realizará el resumen tanto de las normas UNE como de las normas NLT para cada uno de los ensayos.

Las normas UNE, cuyo acrónimo significa Una Norma Española, constituyen un grupo de normativas, normas experimentales e informes que son redactados por los Comités Técnicos de Normalización (CTN) perteneciente a la Asociación Española de Normalización (UNE), que anteriormente se llamaba AENOR. Por otro lado, las normas NLT, cuyo acrónimo significa Normas de Laboratorio de Transportes, constituyen otro grupo de normas que fueron redactadas por el CEDEX, Centro de Estudios y experimentaciones, pertenecientes al MOPU, antiguo Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, que en la actualidad corresponde al Ministerio de Fomento.

Aunque las normas que se van a seguir para la ejecución de los ensayos sean las normas UNE, se realizará también el resumen de las normas NLT para que, en caso de quererse repetir este trabajo siguiendo dichas normas, pueda hacerse y, de este modo, comparar los resultados obtenidos por cada una ellas y observarse las diferencias existentes entre las dos, así como también poder comprobar si el cambio de norma influye, y en qué grado lo hace, en los resultados y conclusiones que se obtengan.

3.2.1 Determinación de granulometría por tamizado (Norma UNE EN 933-1)

La norma a la que se refiere este apartado es la norma UNE EN 933-1, Junio 2012, cuyo nombre completo es *“Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado”*.

3.2.1.1 Equipo

Todo el equipamiento necesario para la realización de este ensayo debe cumplir la Norma EN 932-5.

El equipo que se precisa para llevar a cabo el ensayo de granulometría es el siguiente:

- **TAMICES DE ENSAYO:** las aberturas de los tamices a emplear vienen reflejadas en la Norma EN 933-2 y cumplen los requisitos prescritos en las Normas ISO 3310-1 e ISO 3310-2. Las aberturas de los tamices que se emplearán, y que se indican en la norma UNE anteriormente mencionada, serán: 0,063 mm, 0,125 mm, 0,250 mm, 0,500 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm, 63 mm y 125 mm.



ILUSTRACIÓN 6: TAMICES DE ENSAYO
(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

- **TAPA Y FONDO HERMÉTICOS:** necesarios para los tamices.
- **ESTUFA VENTILADA:** debe estar regulada por un termostato que confiera una temperatura de $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$, también se puede emplear otro equipo que posibilite que los áridos se sequen sin que se produzca la rotura de algún tamaño de las partículas.



ILUSTRACIÓN 7: ESTUFA VENTILADA
(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

- **EQUIPO DE LAVADO**
- **BALANZAS O ESCALAS:** deben realizar las mediciones con una exactitud de $\pm 0,1\%$ de la masa de la proporción que se esté ensayando.
- **BANDEJAS Y CEPILLOS**
- **MAQUINA DE TAMIZAR:** este equipamiento es opcional.



ILUSTRACIÓN 8: MÁQUINA DE TAMIZAR
(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

3.2.1.2 Preparación de las proporciones de ensayo

Para la reducción de las muestras que serán precisas en la realización del ensayo se debe observar la norma EN 933-2.

En la siguiente tabla, que corresponde con la Tabla 1 de la norma, se puede ver el tamaño que debe poseer cada porción de material que se desee ensayar.

TABLA 18: TAMAÑO MÍNIMO DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO

Tamaño del árido <i>D</i> (máximo) mm	Masa del árido kg	Volumen de áridos ligeros (litros)
90	80	–
32	10	2,1
16	2,6	1,7
8	0,6	0,8
≤ 4	0,2	0,3

(FUENTE: NORMA UNE EN 933-1)

La reducción de la muestra que se ha de realizar debe posibilitar la obtención de una masa a ensayar con un tamaño mayor a la mínima exigida, pero no tiene que poseer un valor exacto.

La muestra a ensayar se debe secar a una temperatura que debe rondar los $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ hasta que se consiga una medición de masa constante, a continuación se deja que la muestra se enfríe, se pesa y se anota el peso obtenido como M_1 .

Existen ciertos áridos que no se pueden secar con las temperaturas antes definidas, puesto que se produce una aglomeración de las partículas individuales cuando se realiza el proceso de lavado o los tamizados que se ejecutan seguidamente, por ello, esos áridos se deben ensayar por otros métodos diferentes a los que se describirán a continuación. Así mismo, los áridos que presenten un tamaño máximo de árido igual o superior a 31.5 mm tampoco se podrán ensayar por el método descrito posteriormente.

Cabe destacar que los materiales que se emplearán para este trabajo no concuerdan con ninguno de los casos indicados en este apartado.

3.2.1.3 Procedimiento operatorio

- **LAVADO:** se introduce la porción de muestra a ensayar en un recipiente y se adiciona el agua que se precise hasta que quede cubierta.

A continuación se agita la porción de ensayo con la fuerza que se precise hasta conseguir la suspensión y separación de los finos.

Se emplea el tamiz de 0.063 mm, previamente mojado por ambos lados, y se coloca por encima de él un tamiz de abertura 1 o 2 mm. Los tamices deben colocarse de tal manera que, en caso de ser necesario, la suspensión pueda ser recogida en un recipiente adecuado. Se vierte la solución anteriormente obtenida en el tamiz superior y se sigue añadiendo agua hasta que se aprecie que ésta, al atravesar el tamiz 0.063 mm, sea clara.

El material que ha quedado retenido en el tamiz 0.063 mm se seca a una temperatura de (110 ± 5) °C hasta que se consiga un peso constante, se deja enfriar, se pesa y se anota la masa como M_2 .

- **TAMIZADO:** una vez que el material a ensayar se encuentra lavado y secado, o en su defecto solo seco, se vierte en la columna de tamizado, dicha columna se encontrará ensamblada de tal manera que los tamices con aberturas mayores se encontrarán en las posiciones más elevadas y se irá reduciendo la abertura a medida que se baje de tamiz, además se colocará una tapa en la parte superior de la columna y un fondo en la parte inferior.

Una vez realizada la columna de tamices y vertido el material en los mismos, se realiza el tamizado de manera manual o mecánica, con ayuda de una máquina de tamizado; seguidamente se separan los tamices comenzando por el que posea mayor abertura y de uno en uno, se realiza un último agitado para asegurar que no permanezca en el tamiz material que pudiera atravesarlo, empleando para ello una tapa y un fondo.

Las partículas que atraviesan cada tamiz se trasvasan al siguiente presente en la columna de tamices antes de seguir con la tamización. Se debe prevenir la sobrecarga de los tamices.

En caso de producirse la sobrecarga del tamiz, se debe seguir alguno de los siguientes procedimientos:

- Dividir la fracción a ensayar en porciones más pequeñas y ensayarlas seguidamente.

- Se realiza la división de la muestra que atraviesa el tamiz inmediatamente superior por medio de cuarteo o un divisor de muestras, posteriormente se realiza el análisis granulométrico sobre la porción que ha sido dividida teniendo en cuenta las reducciones que se han efectuado cuando se realicen los cálculos necesarios.

El tamizado se dará por finalizado cuando, al realizarse un tamizado a mayores, éste no arroje una diferencia de masa retenida en alguno de los tamices superior al 1,01% en masa.

- **PESADA:** las porciones retenidas en cada uno de los tamices se anotan como R_1 , R_2 , R_n , empezando por el tamiz con mayor abertura.

En caso de haber quedado algo en el tamiz del fondo, la masa se pesa y se registra como P.

3.2.2 Determinación de granulometría por tamizado (Norma NLT 104/91)

La norma a la que se refiere esta apartado es la norma NLT-104/91, cuyo nombre completo es "*Granulometría de suelos por tamizado*".

3.2.2.1 Aparatos y material necesario

- **SERIE DE TAMICES** que presenten malla cuadrada y tejido de alambre y que cumplan con lo descrito en la norma UNE 7050. En la siguiente tabla se indican las aberturas de los tamices en mm y su correspondencia con los tamices de la serie ASTM:

TABLA 19: ABERTURA DE LA SERIE DE TAMICES UNE Y CORRESPONDIENTES DE LA SERIE ASTM

DESIGNACION Y ABERTURA EN mm UNE	DESIGNACION DEL TAMIZ ASTM	ABERTURA EN mm ASTM
125	5	127
100	4	101,6
80	3	76,2
63	2,5	63,5
50	2	50,8
40	1,5	38,1
32	1,25	31,7
25	1	25,4
20	3/4	19,1
16	5/8	15,9
12,5	1/2	12,7
10	3/8	9,52
8	5/16	7,93
6,3	1/4	6,35
5	N.º 4	4,75
4	N.º 5	4,00
3,2	N.º 6	3,36
2,5	N.º 8	2,38
2	N.º 10	2,00
1,6	N.º 12	1,68
1,25	N.º 16	1,19
1	N.º 18	1,00
0,8	N.º 20	0,84
0,63	N.º 30	0,59
0,50	N.º 35	0,50
0,40	N.º 40	0,42
0,32	N.º 50	0,297
0,25	N.º 60	0,250
0,20	N.º 70	0,210
0,16	N.º 80	0,177
0,125	N.º 120	0,125
0,100	N.º 140	0,105
0,080	N.º 200	0,074
0,063	N.º 230	0,062
0,050	N.º 270	0,053
0,040	N.º 325	0,044

(FUENTE: NORMA NLT 104/91)

- **BALANZA** con sensibilidad de 1 g y capacidad de 10 kg y otra de una sensibilidad de 0,01 g y capacidad de 200 g.
- **APARATO PARA AGITAR**, con una hélice de agitación que pueda ser reemplazado, dicha hélice será movida con un motor eléctrico; además también se necesitará un vaso de precipitados.
- **ESTUFA** que pueda ser regulada a una temperatura de 105-110°C.
- **MAZO DE GOMA**, para poder desmenuzar los terrones de material, y mortero con manilla, también de goma.
- **VASO DE PRECIPITADOS** con una capacidad de, aproximadamente, 600 cm³.
- **CEPILLO Y BROCHA** para limpiar los tamices.

- **MATERIAL GENERAL DE LABORATORIO**, como puede ser pesasustancias, probetas, etc.
- **AGUA DESTILADA Y SOLUCIÓN DE HEXAMETAFOSFATO SÓDICO AL 4%.**

3.2.2.2 Procedimiento

- **PREPARACIÓN DE LA MUESTRA:** para la realización del ensayo se debe separar de la muestra inicial, la porción necesaria según la norma NTL-101/72, preparación de muestras para los ensayos de suelos. Para conocer la cantidad exacta para la realización del ensayo se debe observar la tabla presente en el apartado 3.4.1 de la norma anteriormente citada.

TABLA 20: MUESTRA PRECISA PARA LOS DISTINTOS ENSAYOS

TAMAÑO MÁXIMO (mm)	CANTIDAD MÍNIMA RETENIDA EN EL TAMIZ DE 2 mm (ASTM núm. 10)
10 (3/8 pulgada)	500 g
20 (3/4 pulgada)	1.000 g
25 (1 pulgada)	2.000 g
40 (1 1/2 pulgada)	3.000 g
50 (2 pulgadas)	4.000 g
60 (2 1/2 pulgadas)	5.000 g

(FUENTE: NORMA NLT 104/91)

La muestra a ensayar se debe secar al aire, en caso de que este paso fuera necesario, y pesar y anotar la masa que presente. En ese momento el suelo habrá alcanzado una humedad de equilibrio, la humedad higroscópica.

- **FRACCIÓN GRUESA:** la porción de material a ensayar se tamiza por el tamiz de 2 mm, siguiendo lo descrito en el apartado 3.3.1 de la norma NTL 101-72; lo que se dice en el apartado antes citado es lo siguiente: la muestra a ensayar se hace pasar por el tamiz correspondiente, se separan los terrones que hubieran quedado y se tamiza de nuevo sobre el mismo tamiz, juntando el material obtenido de los dos tamizados, este procedimiento se repite tantas veces como sea necesario hasta que el material que quede retenido en el tamiz se encuentre libre de finos.

Posteriormente se procede a lavar todo el material grueso que ha quedado retenido en el tamiz. Se seca el material en la estufa.

Una vez seco el material, se tamiza sobre los tamices superiores a 2 mm y se anotan los pesos obtenidos en cada tamiz.

- **HUMEDAD HIGROSCÓPICA:** mediante cuarteo se separan 120 g de muestra de la fracción que atraviesa el tamiz de 2 mm; en caso de que el suelo sea limo o arcilla, si el suelo es arena el material que se debe separa es 60 g.

Se realiza una pesada de aproximadamente 10 o 20 g, con ayuda de un pesasustancias tarado.

Se realiza el secado en estufa y se vuelve a pesar el material.

- **FRACCIÓN FINA:** se realiza una pesada, con la mayor exactitud posible, de 100 g del material que se ha separado según el apartado 3.3.1, anteriormente descrito, en el caso de que el suelo que se esté ensayando sea arenoso; si se trata de un suelo que solo posee materiales finos el peso a obtener será de 50 g. Se coloca el material en un vaso de precipitados y se añade de manera muy lenta, y al mismo tiempo que se agita, una cantidad aproximada de 125 cm³ de solución de hexametáfosfato sódico al 4%. La mezcla se deja reposar durante 18 horas. A la mezcla anterior se le adiciona agua destilada hasta 5 cm del borde, seguidamente se agita con ayuda del agitador durante un minuto.

Se lava todo el contenido del vaso de precipitados sobre el tamiz de 0,08 mm hasta que el agua que se obtenga sea clara. Se vierte el material retenido a un pocillo ayudándose de un chorro y con cuidado de no perder material en el trasvase.

Se realiza el secado del material en la estufa a una temperatura de 110 °C y se hace pasar por los tamices con malla inferior a 2 mm.

Se pesa lo retenido en cada uno de los tamices.

3.2.2.3 Observaciones

Además de los tamices necesarios para la realización del ensayo, es conveniente poseer un tamiz de 0,08 mm para destinarlo para la operación de lavado.

El aparato agitador solo es necesario cuando se realice el ensayo granulométrico por sedimentación; éste puede ser cambiado por un frasco de cristal, de 1 litro de capacidad, que tenga un tapón de goma, y que en el interior del mismo se pueda realizar la agitación manual de la suspensión del suelo.

El agua destilada solo es necesaria, como en el caso del agitador, cuando se realice el ensayo de granulometría por sedimentación. La solución de hexametáfosfato sódico no permanece inalterable con el tiempo, por lo que debe ser renovada al transcurrir un mes desde su preparación.

Cuando se realice el análisis granulométrico por tamizado, puede eliminarse el paso de dejar durante 18 horas el material en el vaso de precipitados con hexametáfosfato sódico, cuando se observe que el material por su naturaleza disperse con facilidad; así mismo en este caso también puede eliminarse el paso de emplear hexametáfosfato sódico.

Cuando se efectuó el tamizado de la muestra se deben realizar movimientos circulares para que el material se encuentre en contacto con la malla del tamiz. Para saber que el tamizado se puede dar por finalizado, debe desmontarse por separado cada tamiz y comprobarse que al realizar un tamizado de un minuto no ha pasado a través de él más de un 1% del material. En caso de quedarse alguna partícula retenida entre la malla del tamiz se debe retirar y colocar junto con lo retenido en el tamiz.

Cuando se quiera realizar el ensayo de lo que atraviesa el tamiz de 0,08 mm, se debe disponer de una suspensión de finos en un litro de agua, se realizan los pasos que fueron descritos en el punto de procedimiento, variando solo que después de añadir agua destilada hasta 5 cm del borde del vaso de precipitados se trasvasa la suspensión de material a una probeta, con una capacidad de 1000 cm^3 , y se realiza el ensayo de sedimentación según se ha descrito anteriormente. Después de la realización del ensayo de sedimentación se continúa el ensayo de granulometría como se describe en la norma.

3.2.3 Índice de lajas (Norma UNE EN 933-3, Marzo 2012)

La norma a la que se refiere esta apartado es la norma UNE EN 933-3, Marzo 2012, cuyo nombre completo es “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas”.

3.2.3.1 Equipo de ensayo

Los aparatos que se indican a continuación deben cumplir con la norma UNE EN 933-5.

- **TAMICES DE ENSAYO:** las aberturas de dichos tamices deberán cumplir con la norma UNE EN 933-2, y serán las siguientes: 100 mm, 80 mm, 63 mm, 50mm, 40 mm, 31.5 mm, 25 mm, 20 mm, 16 mm, 12,5 mm, 10 mm, 8 mm, 6,3 mm, 5 mm y 4 mm.



ILUSTRACIÓN 9: TAMICES DE ENSAYO

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

- **TAMICES DE BARRAS:** estos tamices presentan barras cilíndricas paralelas que presentan las características que aparecen en la tabla siguiente. Las tolerancias que se permiten en las anchuras de las ranuras que presentan los tamices se deben atribuir a toda la longitud de las mismas.

TABLA 21: TAMICES DE BARRAS

Fracción granulométrica d_i/D_i mm	Anchura de la ranura del tamiz de barras mm
80/100	50 ± 0,5
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	12,5 ± 0,4
16/20	10 ± 0,2
12,5/16	8 ± 0,2
10/12,5	6,3 ± 0,2
8/10	5 ± 0,2
6,3/8	4 ± 0,15
5/6,3	3,15 ± 0,15
4/5	2,5 ± 0,15

(FUENTE: NORMA UNE EN 933-3)



ILUSTRACIÓN 10: TAMICES DE BARRAS

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

- **BALANZA:** debe presentar una precisión de $\pm 0,1\%$ del peso de la parte del ensayo que se esté ensayando.
- **ESTUFA VENTILADA:** debe estar regulada por un termostato que confiera una temperatura de $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$, también se puede emplear otro equipo que posibilite que los áridos se sequen sin que se produzca la rotura de algún tamaño de las partículas.

3.2.3.2 Preparación de las porciones de ensayo

Para la reducción de las muestras que serán precisas en la realización del ensayo se debe observar la norma EN 933-2. Para saber el tamaño que debe poseer cada porción de material que se desee ensayar, se debe observar la tabla 1 presente en la norma UNE EN 933-1.

La muestra a ensayar se debe secar a una temperatura que debe rondar los $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$ hasta que se consiga una medición de masa constante, a continuación se deja que la muestra se enfríe, se pesa y se anota el peso obtenido como M_0 .

- **PROCEDIMIENTO OPERATORIO:**

- **TAMIZADO CON LOS TAMICES DE ENSAYO:** la parte a ensayar se ha de tamizar siguiendo la norma UNE EN 933-1 y con los tamices que se indican en dicha norma.

Se realiza el pesado y descarte del material que atraviese el tamiz de 4 mm y el que quede retenido en el tamiz de 100 mm.

Se realiza el pesado y se conservan todas las fracciones granulométricas obtenidas.

- **CRIBADO CON TAMICES DE BARRAS:** se realiza el cribado de cada una de las fracciones granulométricas que se han obtenido en el apartado anterior a través de los tamices de barras que se indican en la tabla anterior. El cribado puede realizarse de manera manual o de forma mecánica garantizando, en ambos casos, una correcta separación.

Se pesan las cantidades de material que se obtienen al pasar por los tamices de barras correspondientes de cada fracción granulométrica.

3.2.4 Índice de lajas (Norma NLT-354/91)

La norma a la que se refiere este apartado es la norma NLT-354/91, cuyo nombre completo es “Índice de lajas y agujas de los áridos para carreteras”.

3.2.4.1 Aparatos y material necesario

- **CALIBRADORES:** se emplean dos tipos de calibradores metálicos, uno de ellos será un calibrador de ranuras, para calibrar grosores o espesores, y otro de barras, para calibrar longitudes.

En este caso el calibrador que se va a emplear únicamente será el calibrador de ranuras, por ser el que se emplea para la determinación del índice de lajas.

- **TAMICES:** se emplearán los tamices que se pueden observar en la siguiente tabla y obedecen a lo especificado en la norma UNE 7050.

TABLA 22: TAMICES QUE SE DEBEN EMPLEAR PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO

DIMENSIONES DE LOS CALIBRADORES DE GROSOR Y LONGITUD Y MASA MINIMA PARA SUBDIVISION DE LA FRACCION				
FRACCIONES DEL ARIDO TAMICES UNE (mm)		CALIBRADORES		MASA MINIMA PARA SUBDIVISION (kg)
PASA	RETIENE	GROSOR (*) ABERTURA DE LA RANURA (mm)	LONGITUD (**) SEPARACION DE LAS BARRAS (mm)	
63	50	33,9 ± 0,3	—	50
50	40	27,0 ± 0,3	81,0 ± 0,5	35
40	25	19,5 ± 0,3	58,5 ± 0,5	15
25	20	13,5 ± 0,2	40,5 ± 0,3	5
20	12,5	9,7 ± 0,2	29,2 ± 0,3	2
12,5	10	6,7 ± 0,1	20,2 ± 0,3	1
10	6,3	4,9 ± 0,1	14,7 ± 0,2	0,5

(FUENTE: NORMA NLT 354/91)

- **BALANZA:** deberá presentar una sensibilidad del 0,1% de la masa que se esté ensayando.
- **CUARTEADOR:** será del tamaño necesario según el tamaño máximo de árido que presente la muestra a ensayar.
- **ESTUFA:** debe estar regulada por un termostato que confiera una temperatura de (110±5)°C, también se puede emplear otro equipo que posibilite que los áridos se sequen sin que se produzca la rotura de algún tamaño de las partículas.
- **MATERIAL AUXILIAR:** como pueden ser bandejas, cogedores metálicos, etc.

3.2.4.2 Procedimiento

- **PREPARACIÓN DE LA MUESTRA:** se realiza la separación de las muestras que se necesiten para la elaboración del ensayo por medio del cuarteador. Las masas que se han de conseguir se pueden consultar en la tabla siguiente, dichas masas ya deben tener eliminadas las fracciones mayores de 63 mm y menor de 6,3 mm.

TABLA 23: MASA MÍNIMA DEL MATERIAL PARA EL ENSAYO

TAMAÑO NOMINAL DEL ARIDO (mm)	MASA MINIMA DE MATERIAL (*) PARA ENSAYO; TAMAÑO DEL ARIDO ENTRE 63,0 Y 6,3 mm (kg)
50	35
40	15
25	5
20	2
12,5	1
10	0,5

(FUENTE: NORMA NLT 354/91)

Después de realizar la separación de las muestras de ensayo, éstas se deben secar en la estufa a una temperatura de $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ hasta que se obtenga un peso constante para posteriormente realizarse el análisis granulométrico siguiendo lo descrito en la norma NLT-150/89 y con los tamices que se pueden consultar en la tabla que aparece en la parte de aparatos y material necesarios de esta norma. Se ha de eliminar el material que se quede retenido en el tamiz de 63 mm y el que atraviese el tamiz de 6,3 mm. Se pesa el material, M_i , con una aproximación del 0,1% de cada una de las fracciones granulométricas retenidas en cada uno de los tamices y se depositan en bandejas individuales e identificadas con el mayor de los tamaños que la definen.

A la cantidad que queda retenida entre dos tamices consecutivos de los empleados en la ejecución del ensayo se le llama R_i , siendo i la luz del menor de los tamices que se ha empleado para la caracterización de dicha fracción granulométrica. Cuando las fracciones que se obtengan sean menores del 10% de la masa total del ensayo, esas fracciones no se ensayan.

- **EJECUCIÓN DEL ENSAYO:** la separación del material se realiza pasando cada partícula por el calibrador de grosores que poseerá una abertura que concuerde con la fracción que se esté ensayando.

A la masa total de cada una de las fracciones granulométricas que pasan por las ranuras de los calibradores se le denomina M_{1i} , y debe presentar una aproximación del 0,1% de la masa total que se esté ensayando.

3.2.5 Determinación del porcentaje de caras de fractura (Norma UNE EN 933-5, Febrero 1999)

La norma a la que se refiere esta apartado es la norma UNE EN 933-5, Febrero 1999, cuyo nombre completo es “*Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 5: Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso*”.

3.2.5.1 Aparatos

- **TAMICES DE ENSAYO:** las aberturas de los tamices a emplear vienen reflejadas en la Norma EN 933-2. Las aberturas de los tamices que se emplearán, y que se indican en la norma UNE anteriormente mencionada, serán: 0,063 mm, 0,125 mm, 0,250 mm, 0,500 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm, 63 mm y 125 mm.
- **RECIPIENTE DE AJUSTE HERMÉTICO:** necesarios para los tamices.
- **ESTUFA VENTILADA:** debe estar regulada por un termostato que confiera una temperatura de $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$, también se puede emplear otro equipo que posibilite que los áridos se sequen sin que se produzca la rotura de algún tamaño de las partículas.
- **BALANZA O BÁSCULA:** deben realizar las mediciones con una exactitud de $\pm 0,1\%$ de la masa de la proporción que se esté ensayando.
- **BANDEJAS**
- **CEPILLOS**
- **MAQUINA DE TAMIZADO:** este equipamiento es opcional.

3.2.5.2 Preparación de la muestra de ensayo

La reducción del material a ensayar se debe realizar conforme a lo indicado en la norma UNEEN 932-2.

Se introduce la muestra a ensayar en la estufa, a una temperatura de $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$, hasta que se consigue una masa constante. Se pesa el material y se apunta dicho peso como M_0 .

Se realiza el tamizado de la muestra con ayuda de los tamices que sean necesarios para el tipo de material a ensayar, se ha de conseguir que las partículas mayores de 4 mm se separen correctamente, para ello se ha de realizar la operación con una energía suficiente. Se deben rechazar las fracciones mayores de 63 mm, es decir las que quedan retenidas en el tamiz de 63 m, y las menores de 4 mm, es decir, las que atraviesan el tamiz de 4 mm.

Cuando sea necesario, se efectuará la reducción de la muestra de ensayo conforme a lo indicado en la norma EN 932-2 hasta que se consiga la muestra de ensayo necesaria. Se apunta la masa de ensayo como M_1 . Para saber la masa que debe ser ensayada se debe consultar la siguiente tabla:

TABLA 24: MASA MÍNIMA DE LA MUESTRA DE ENSAYO

Tamaño máximo del árido <i>D</i> mm	Masa mínima de la muestra de ensayo kg
63	45
32	6
16	1
8	0,1

(FUENTE: NORMA UNE EN 933-5)

La reducción de la masa a ensayar debe ser superior al mínimo permitido, pero no tiene porqué tener un valor exacto.

Se ejecuta el ensayo para cada una de las fracciones granulométricas que presenten tamaños de áridos en los cuales la dimensión de las partículas que es retenida por un tamiz es menor al doble del tamaño que es atravesado por el mismo tamiz.

Para realizar dicho paso se separan las muestras en las que el tamaño de árido retenido en un tamiz es superior al doble del tamaño que atraviesa el mismo tamiz en grupos en los que se cumple lo indicado en el apartado anterior.

3.2.5.3 Procedimiento operatorio

- **MUESTRAS DE ENSAYO CON $D \leq 2d$** : se tiende el material a ensayar sobre una superficie plana y se realiza la separación manual de las partículas en dos grupos:

- Partículas que se encuentran trituradas (c), dentro de las que se incluyen las que se encuentran totalmente trituradas (tc).

- Partículas que se encuentran redondeadas (r), dentro de las que se incluyen las que se encuentran totalmente redondeadas (tr).

Se determina el peso de cada uno de los grupos y se apuntan dichos pesos como M_c y M_r .

Se vuelven a tender las partículas de grupo de las partículas trituradas sobre una superficie plana y se realiza la separación manual de las partículas que se encuentran totalmente trituradas. Se determina la masa de dicho grupo y se apunta como M_{tc} .

Se realiza el mismo procedimiento con el grupo de las partículas redondeadas, anotando, en este caso, la masa como M_{tr} .

- **MUESTRAS DE ENSAYO CON $D > 2d$** : se realiza la división de la muestra a ensayar en las fracciones granulométricas con una dimensión de árido que atraviesa un tamiz menor al doble de la dimensión del árido que atraviesa dicho tamiz realizando el tamizado de la muestra siguiendo lo especificado en la norma UNE EN 933-1

Se apunta la masa obtenida de cada fracción granulométrica como M_i y posteriormente se calcula y se apunta como V_i el porcentaje obtenido de la masa de cada fracción granulométrica con respecto a la masa total de ensayo M_1 .

Se elimina cualquier fracción granulométrica que presente un porcentaje inferior al 10% de la masa total del ensayo.

Se apunta el peso del material a ensayar en cada fracción granulométrica como M_{1i} , y se clasifican las partículas existentes en cada fracción granulométrica individualmente de la misma manera que se indica en el apartado anterior.

Se apuntan las masas de los grupos de partículas trituradas, redondeadas, totalmente trituradas y totalmente redondeadas de cada una de las fracciones granulométricas como M_{ci} , M_{ri} , M_{tci} y M_{tri} , respectivamente.

3.2.6 Determinación del porcentaje de caras de fractura (Norma NLT-358/90)

La norma a la que se refiere esta apartado es la norma NLT-358/90, cuyo nombre completo es “Proporción del árido grueso que presenta dos o más caras de fractura por machaqueo”.

3.2.6.1 Aparatos y material necesarios

- **BALANZA:** deberá presentar una sensibilidad del 0,1% de la masa que se esté ensayando.
- **TAMICES:** que posean malla metálica y aberturas cuadradas, cumpliendo por ello la norma UNE 7050.
- **CUARTEADOR:** empleado para la división de la muestra inicial en porciones representativas de menor tamaño.
- **ESPÁTULA:** empleada para la separación de áridos.
- **BANDEJAS METÁLICAS:** deberán poseer fondo plano y presentar diversos tamaños.

3.2.6.2 Procedimiento

- **PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS:** dependiendo del tamaño que presente el árido que se ha de ensayar se tomará como muestra de ensayo unas cantidades específicas de cada una de las fracciones, con una tolerancia del 10%, que serán empleadas para cada ensayo individual. Serán objeto de ensayo únicamente las fracciones que posean una masa con un porcentaje superior al 5% sobre la masa total a ensayar.

Las cantidades necesarias para cada fracción se logran, después de la realización del cuarteo, tamizando a partir de muestras que sean representativas cogidas de cada una de las fracciones a ensayar.

TABLA 25: CANTIDAD DE MUESTRA NECESARIA PARA ENSAYO, SEGÚN TAMAÑO DE LA FRACCIÓN CONSIDERADA

FRACCIONES SEGUN TAMICES UNE (mm)	MUESTRA DE ARIDOS DE CADA FRACCION ($\pm 10\%$) EN GRAMOS
100-90	50.000
90-80	30.000
80-63	18.000
63-50	10.000
50-40	6.000
40-25	3.000
25-20	1.500
20-12,5	1.000
12,5-10	500
10-5	350
5-2,5	100

(FUENTE: NORMA NLT 358/90)

- **REALIZACIÓN DEL ENSAYO:** el ensayo se realizará con las fracciones cuya masa sea superior al 5% de la masa total del ensayo.

La masa que presente cada una de las fracciones deberá estar comprendida entre los valores que se observan en la tabla anterior, con una tolerancia de $\pm 10\%$.

Se anota el peso de una de las fracciones a ensayar como A.

Ayudándose de una espátula se esparcen sobre una bandeja los áridos, de manera que puedan ser observados de manera individual.

Se separan, de forma manual, todas las partículas que no posean ninguna cara de fractura o que solo presenten una y se colocan en otra bandeja.

Las partículas que presenten dos o más caras de fractura se pesan y se apunta dicho peso como B.

El ensayo se repite de la misma manera tantas veces como fracciones a ensayar existan.

3.2.7 Ensayo del equivalente de arena (Norma UNE EN 933-8, Noviembre 2015)

La norma a la que se refiere esta apartado es la norma UNE EN 933-8, Noviembre, 20015, cuyo nombre completo es “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena”.

3.2.7.1 Reactivos

- **SOLUCIÓN CONCENTRADA:** la solución concentrada se encuentra compuesta de:

- Cloruro de calcio cristalino, $\text{CaCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$, o cloruro de calcio anhidro, CaCl_2 .
- Glicerina, 99% de glicerol, calidad de reactivo de laboratorio.
- Solución de formaldehído, 40% en volumen, calidad de reactivo de laboratorio.
- Agua destilada o desmineralizada.

Se deben disolver (219 ± 2) g de cloruro de calcio cristalino en (350 ± 50) ml de agua destilada o desmineralizada, seguidamente se deja enfriar, a temperatura ambiente, y, en caso de ser necesario, se realiza el filtrado de la mezcla con ayuda de un papel de filtro que presente espesor medio o grueso. A continuación, se adicionan (480 ± 5) g de glicerina y $(12,5 \pm 0,5)$ g de solución de formaldehído y se diluye hasta un volumen de un litro añadiendo agua destilada o desmineralizada, al mismo tiempo de la adición del agua destilada se debe mezclar de forma enérgica.

- **SOLUCIÓN DE LAVADO Y FLOCULANTE:** la solución de lavado y floculante es preparada por la dilución de (125 ± 1) ml de la solución concentrada, realizada conforme a lo explicado en el apartado anterior, en agua destilada o desmineralizada, hasta conseguir un volumen de mezcla de $(5,00 \pm 0,01)$ litros.

La solución que se ha realizado, conforme lo explicado en este apartado, no se ha de emplear después de haber pasado 28 días desde su preparación, en caso de ponerse turbia o si se observa la formación de precipitado o moho.

3.2.7.2 Equipos

- **DOS PROBETAS CILÍNDRICAS GRADUADAS:** el material del que han de estar fabricadas será vidrio o plástico transparente y tienen que poseer tapones de caucho. Las dimensiones de las probetas serán:
 - ESPESOR DE PARED: de unos 3 mm.
 - DIÁMETRO INTERIOR: $(32,00 \pm 0,5)$ mm.
 - ALTURA: $(430,00 \pm 0,25)$ mm.
 - MARCAS CLARAMENTE VISIBLES: las dos probetas han de presentar dos marcas a $(100,00 \pm 0,25)$ mm desde la base y a $(380,00 \pm 0,25)$ mm desde la base.



ILUSTRACIÓN 11: PROBETAS DE ENSAYO

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

- **PISTÓN TARADO PARA EL ENSAYO:** el material de todas las piezas que se indicarán a continuación será de un metal inoxidable; el pistón se encuentra compuesto por:
 - VARILLA: con una longitud de $(440,00 \pm 0,25)$ mm.
 - PIE: con un diámetro de $(25,0 \pm 0,1)$ mm y una superficie plana y lisa, posee tres guías en el lateral para que el pistón se sitúe centrado en la probeta lo que permite una pequeña holgura.

- DISCO: presenta un espesor de $(10,0\pm 0,1)$ mm, se debe ajustar a la boca de la probeta pues ha de servir para guiar la varilla y señalar el intervalo en el que se introduce en la probeta, además ha de poseer un tornillo que permita que el disco se bloquee en la varilla del pistón y una abertura para poder introducir la regla.
- CABEZA DEL PISTÓN: se encuentra anclada en la parte superior de la varilla; el peso que presenta todo el conjunto, sin contar el disco, será de $(1,00\pm 0,01)$ kg.



ILUSTRACIÓN 12: PISTÓN TARADO
(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

- **CRONOMETRO**: deberá expresar la lectura con una precisión de 1 segundo.
- **REGLA DE 500 mm**: la graduación debe ser en mm.
- **TAMICES DE ENSAYO**: los tamices que se han de emplear serán el tamiz de 0,063 mm y el de 2 mm, ambos tamices cumplirán con lo dispuesto en la norma UNE EN 933-2; además en caso de ser necesario se empleará también un tamiz de guarda.
- **CEPILLO PARA LIMPIEZA DE TAMICES**
- **ESPÁTULA**
- **TUBO LAVADOR**: el material del que estará fabricado el tubo lavador será de un metal inoxidable. Las medidas que presenta son las siguientes:
 - DIÁMETRO EXTERIOR: comprendido entre $(6,0\pm 0,5)$ mm.
 - DIÁMETRO INTERIOR: comprendido entre $(4,0\pm 0,2)$ mm.

- LONGITUD: aproximadamente de 500 mm.

El tubo lavador poseerá un grifo en su extremo superior. El extremo presentará una forma de cuña o cónico, estará realizado también por un metal inoxidable con una unión roscada. Se realizará un agujero de un diámetro de $(1,0\pm 0,1)$ mm en dos puntos diametralmente opuestos situados en la parte biselada del cono.



ILUSTRACIÓN 13: FRASCO LAVADOR CON SIFÓN (IZQUIERDA) Y TUBO LAVADOR (DERECHA)

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

- **MATRAZ**: será de material plástico transparente o de vidrio con una capacidad de 5 l, deberá estar equipado con un sifón que se situará a una altura de un metro por encima de la mesa de trabajo donde se realice el ensayo.
- **TUBO DE PLÁSTICO O DE CAUCHO**: presentará un diámetro interior de 5 mm, que se empleará para la unión del tubo lavador al sifón, y una longitud de 1,50 m.
- **EMBUDO**: será utilizado para el trasvase de la porción de ensayo a la probeta cilíndrica graduada.
- **MAQUINA DE AGITACIÓN**: deberá ser capaz de aplicar a la probeta un movimiento periódico, sinusoidal con una amplitud de (200 ± 10) mm y una frecuencia de $1/3$ de segundo, horizontal y rectilíneo.



ILUSTRACIÓN 14: MÁQUINA DE AGITACIÓN

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

- **TERMÓMETRO:** tendrá que poseer una precisión de 1°C.
- **BALANZA:** deberá presentar una sensibilidad del 0,1% de la masa que se esté ensayando.
- **PAPEL DE FILTRO:** presentará un espesor medio o grueso.

3.2.7.3 Preparación de las muestras de ensayo

- **GENERALIDADES:** la muestra inicial se ha de reducir conforme la norma UNE EN 932-2 para, de este modo, obtener dos submuestras. La primera submuestra será empleada para la determinación del contenido de finos y agua de la fracción del laboratorio y realizar un árido fino de corrección. Con la segunda submuestra se realizará la determinación del valor de equivalente de arena.

Para la ejecución de este ensayo se debe emplear la fracción granulométrica de 0/2 mm. La submuestra que sea empleada para la determinación del valor del equivalente de arena no puede ser secada de manera artificial.

La siguiente figura resume los pasos que se van a describir a continuación:

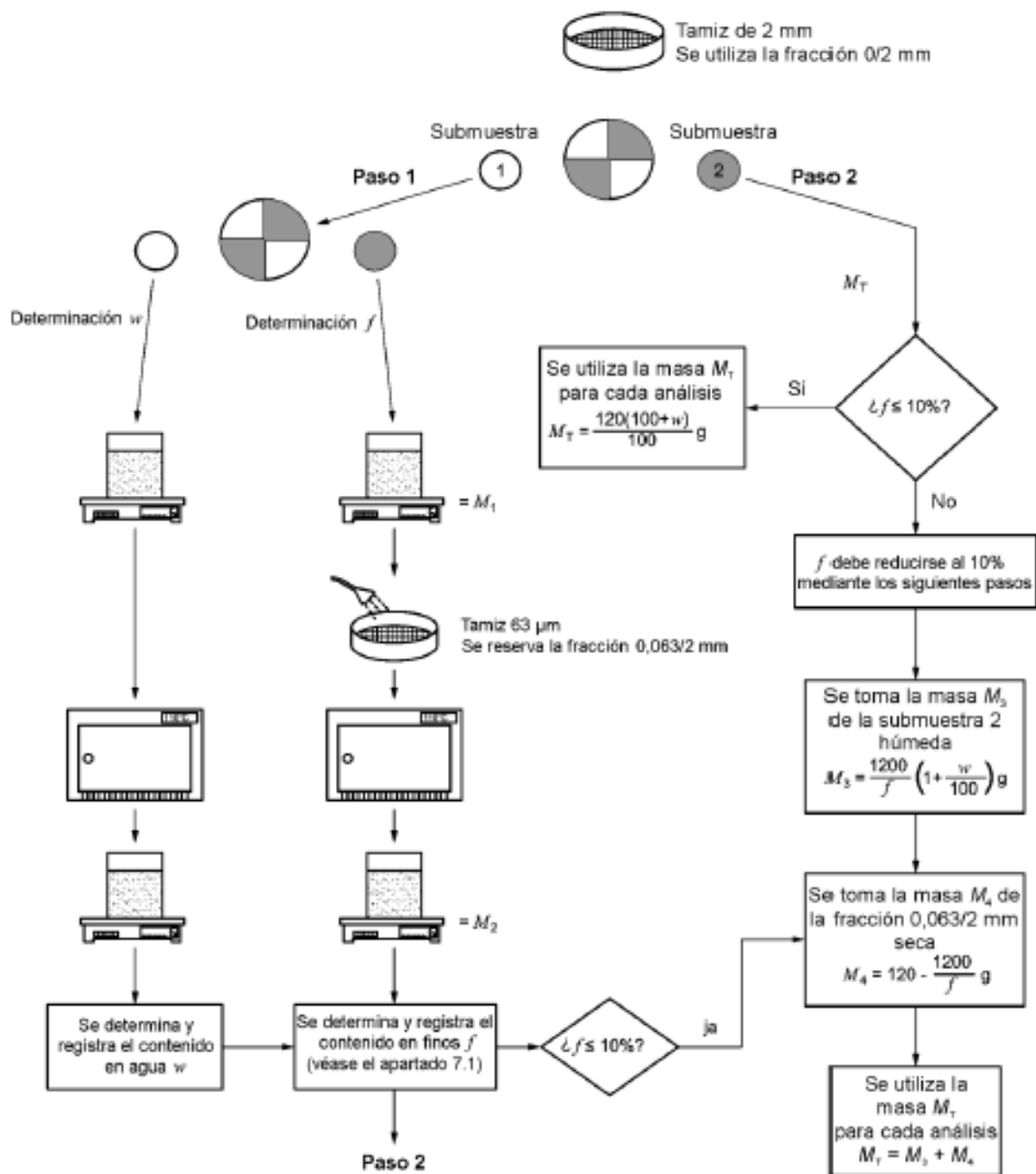


ILUSTRACIÓN 15: DIAGRAMA DE FLUJO DESCRIBIENDO LA PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO
(FUENTE: NORMA UNE EN 933-8)

- **PRIMERA SUBMUESTRA:** a esta muestra se le realiza una reducción, siguiendo como en el caso anterior la norma UNE EN 932-2, de este modo se obtienen dos muestras sobre las que ensayar. La primera de ellas se introduce en la estufa y se seca a una temperatura de $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$, siguiendo la norma UNE EN 1097-5, así se obtendrá y anotarla el contenido en agua w (porcentaje de masa seca).

Se segunda porción obtenida de esta muestra se pesa y se anota dicho peso como M_1 , seguidamente se lava la muestra sobre el tamiz de 0,063 mm, se pesa y se anota como M_2 .

Para calcular el contenido de finos f presente en la muestra se realiza la siguiente expresión:

$$f = 100 - \left(\frac{M_2(100 + w)}{M_1} \right) (\%)$$

En caso de que el contenido de finos presente en esta muestra sea superior del 10% de las partículas que fueron lavadas sobre el tamiz de 0,063 mm, esta muestra se emplea como árido fino seco de corrección.

- **SEGUNDA SUBMUESTRA:** a esta muestra se le realiza una reducción, siguiendo como en el caso anterior la norma UNE EN 932-2, de este modo se obtienen dos muestras sobre las que ensayar.

Atendiendo a la cantidad de finos que presente la muestra a ensayar, el valor de M_T , se determinará de forma diferente, dichas formas son:

- CONTENIDO DE FINOS INFERIOR O IGUAL AL 10%:

$$M_T = \frac{120 * (100 + w)}{100} \text{ g, redondeando a número entero.}$$

- CONTENIDO DE FINOS SUPERIOR AL 10%:

$$M_T = M_3 + M_4$$

Donde:

M_3 : corresponde a la masa de los áridos húmedos, cogida de la segunda submuestra; dicha masa se calcula con la siguiente expresión:

$$M_3 = \frac{1200}{f} * \left(1 + \frac{w}{100} \right)$$

M_4 : corresponde a la masa de árido fino de corrección, obtenida de la primera submuestra; dicha masa se calcula con la siguiente expresión:

$$M_4 = 120 - \frac{1200}{f}$$

Las masas M_3 y M_4 se han de combinar y mezclar.

3.2.7.4 *Procedimiento operatorio*

- **GENERALIDADES:** este ensayo se ha de realizar a una temperatura de $(23\pm 3)^{\circ}\text{C}$ y sobre dos muestras de material.

- **LLENADO DE LAS PROBETAS CILÍNDRICAS GRADUADAS:** se realiza el sifonado, en cada probeta graduada, de la solución de lavado hasta la marca inferior de las mismas.

Se añade en cada probeta una de las muestras sobre las que se va a realizar el ensayo, esta operación se realizará con ayuda del embudo y manteniendo en todo momento la probeta en posición vertical.

Una vez añadido el material, se dan varios golpes en la base de las probetas con la palma de la mano para eliminar las posibles burbujas de aire que pudieran existir en el interior y, de este modo, ayudar a la interacción del material con la solución de lavado.

Se dejan las probetas, durante un tiempo de (10 ± 1) minutos, reposando para que el material se embeba de la solución.

- **AGITACIÓN DE LAS PROBETAS CILÍNDRICAS GRADUADAS:** una vez transcurridos los 10 minutos, aproximadamente, se realiza el sellado de las probetas, con ayuda de los tapones de caucho y se acoplan en la máquina de agitación.

Se agita la probeta un tiempo aproximado de (30 ± 1) segundo para, a continuación, colocarla de nuevo sobre la mesa en la que se realice el ensayo verticalmente y hacia arriba.

Este paso se realiza con las dos probetas en las que se está llevando a cabo el ensayo.

- **LAVADO:** se retira el tapón de caucho de una de las probetas y se lava sobre la misma con ayuda de la solución de lavado, teniendo cuidado de que el material que se esté lavando caiga dentro de la probeta.

Se inserta el tubo lavador en la probeta, realizando primeramente el enjuague de las paredes para seguidamente introducir el tubo hacia abajo, a través del sedimento, hasta llegar al fondo de la probeta.

Con la probeta fija en posición vertical, se deja que, con ayuda de la solución de lavado, se agite el contenido favoreciendo con ello el ascenso de los finos y componentes arcillosos de la mezcla.

Seguidamente se realiza a la probeta un movimiento de rotación de manera lenta al mismo tiempo que el tubo lavador se mueve de manera lenta y regular hacia arriba.

Cuando se observe que el nivel alcanzado por el líquido se acerque a la marca superior existente en la probeta, se levanta, muy lentamente, el tubo lavador y se gradúa el caudal para que el nivel que presente el líquido dentro de la probeta se mantenga constante hasta que se retire completamente el tubo y se elimine el aporte de líquido.

Se empieza a registrar el tiempo que tarda en sedimentar en el mismo instante que se ha retirado el tubo lavador.

El mismo proceso que se ha realizado con una probeta se repite con la otra.

- **MEDICIONES:** la probeta cilíndrica se deja reposar un tiempo aproximado de $(20,00 \pm 0,25)$ minutos en un lugar que no presente vibraciones ni perturbaciones.

Una vez consumido el tiempo de espera se realiza la medición, ayudándose de la regla, de la altura h_1 , dicha altura corresponde con la distancia que presenta el nivel superior de la suspensión con respecto a la base de la probeta.

Se desciende muy lentamente el pistón en la probeta, hasta que el pie de éste descansa sobre el sedimento.

Se realiza la colocación del disco en la parte superior de la probeta para, seguidamente bloquear la varilla del pistón.

La altura del sedimento, h_2 , se realiza mediante la medición de la distancia existente entre la parte inferior de la cabeza del pistón y la parte superior del disco metiendo la regla en la abertura existente en el mismo.

Los valores de h_1 y h_2 se apuntan aproximándose, para los dos casos, al milímetro más próximo.

Las mediciones de las alturas h_1 y h_2 de la segunda probeta se realizan del mismo modo que para la primera probeta.

3.2.8 Ensayo del equivalente de arena (Norma NLT-113/87)

La norma a la que se refiere esta apartado es la norma NLT-113/87, cuyo nombre completo es "Equivalente en arena".

3.2.8.1 Aparatos y material necesarios

- **PROBETA TRANSPARENTE**, que presente un diámetro interior de 32 mm y una altura de 430 mm; ha de estar graduada hasta 380 mm en tramos de 2 mm; además deberá estar en posesión de un tapón de goma que se encaje en la boca de la probeta.
- **TUBO IRRIGADOR DE LATÓN O COBRE**, que presente un diámetro exterior de 6 mm y se encuentre cerrado en la parte inferior por una achatadura en forma de cuña. Poseerá, además, dos perforaciones, situadas de forma opuesta entre ellas en la parte de la cuña, con un diámetro de 1 mm.
- **FRASCO TRANSPARENTE DE VIDRIO O PLÁSTICO**, que posea una capacidad de 4 litros, asimismo deberá tener un sifón acoplado que consistirá en un tapón con dos tubos que lo cruzan, uno de ellos se encontrará introducido en el líquido y el otro estará sobre su nivel para permitir la entrada de aire. El frasco se ha de situar a una distancia de un metro por encima de la mesa de trabajo. Se empleará para encerrar en su interior la solución con la que se trabajará.
- **UN TROZO DE TUBO DE GOMA**, que presente un diámetro aproximado de 5 mm, deberá tener también una pinza que consiga frenar el paso de líquidos por su interior. Se empleará para la unión de tubo irrigador con el sifón.

- **UNA PIEZA DE METAL**, que es una varilla con una longitud de 445 mm y un diámetro de 6 mm; en la zona inferior posee un pie en forma de cono que tiene una base con un diámetro de 25,4 mm, siguiendo su base presenta un cilindro de igual diámetro y con una altura de 5 mm; hay tres tornillos presentes en la superficie de dicho cilindro que se emplean para el centrado del mismo dentro de la probeta. En la zona superior se encuentra un lastre cilíndrico, de aproximadamente 50 mm de diámetro y con una longitud que confiera al conjunto un peso total de 1 kg. Además de lo indicado anteriormente, la varilla posee un disco que se amolda a la boca de la probeta, posee una abertura en el centro por la cual se introduce la varilla para hacer que esta se encuentre centrada.
- **UNA MEDIDA DE $85 \pm 5 \text{ cm}^3$** .
- **UN EMBUDO**, con el cual se introducirá el material dentro de la probeta.
- **UN CRONÓMETRO O RELOJ**.
- **SOLUCIÓN:**
 - o **SOLUCIÓN TIPO:** la solución está compuesta por: 480 g de cloruro cálcico anhidro, 2170 g de glicerina pura, 50 g de solución de formaldehído al 40% en volumen.

Para la realización de la solución se han de diluir los 480g de cloruro cálcico anhidro en 2000 cm^3 de agua, seguidamente se deja reposar y se filtra. A continuación se adicionan los 2170 g de glicerina y los 50 g de formaldehído a la solución anterior para después mezclar correctamente y diluirla en agua hasta alcanzar un volumen de 4000 cm^3 . El agua que se debe emplear ha de ser destilada o natural de buena calidad.

- o **SOLUCIÓN DE TRABAJO:** se disuelven 85 cm^3 de la solución antes descrita en agua hasta alcanzar un volumen de 4000 cm^3 .

3.2.8.2 Procedimiento

- **PREPARACIÓN DE LA MUESTRA:** se realiza la separación del material necesario para la ejecución del ensayo a partir de la muestra original, siguiendo para ello lo indicado en la norma NTL-101/72.

El secado inicial de la muestra a ensayar no se realizará de manera completa para evitar, de esta manera, que se pueda producir pérdida de finos, en caso de ser necesario se humedecerá de manera ligera la muestra antes de proceder al cuarteo y tamizado de la misma. Se llena la medida de 85 cm³ de muestra que esté ya cuarteada y tamizada. Es recomendable compactar ligeramente el material con el fin de obtener un mejor enrase.

Se introduce la muestra a ensayar en la estufa a una temperatura comprendida entre 105-110 °C hasta que se obtenga un peso constante para, seguidamente, dejarla enfriar. Cabe destacar que este ensayo se ha de realizar sobre suelos o áridos que hayan sido desecados al rango de temperaturas anteriormente mencionadas, si bien es cierto que se puede ejecutar sobre suelos húmedos, pero en este caso el valor de equivalente en arena que se obtendría sería superior al que se conseguiría realizándolo después de desecar la muestra. Esto sería admisible si los valores que se alcancen se encuentran dentro de los límites que fijan las especificaciones, en caso de no cumplirse se ha de realizar el ensayo desecando anteriormente la muestra.

- **EJECUCIÓN DEL ENSAYO:** se realiza el llenado del sifón soplando en el recipiente donde se encuentra la solución a través del tubo necesario y con la pinza presente en el tubo de goma abierta. Se llena la probeta con la solución de trabajo, dicha solución se explicó anteriormente como se debe realizar, hasta alcanzar una altura de 10 cm.

Se introduce en la probeta la medida de 85 cm³ de material. Después se golpea la base de la probeta para eliminar posibles burbujas de aire que pudieran haber quedado y facilitar, de este modo, que todo el material quede embebido. Posteriormente se deja reposar la probeta 10 minutos.

Después de transcurrido ese tiempo, se procede a tapar la probeta y, de manera enérgica, se agita manteniéndola siempre en posición horizontal. Se deben realizar 90 ciclos en un tiempo aproximado de 30 segundos, los ciclos consistirán en mover la probeta de derecha a izquierda realizando un recorrido aproximado de 20 cm.

Retirar el tapón y meter el tubo irrigador. El tapón y los lados de la probeta se lavan con ayuda de la solución de trabajo en el interior de la probeta, seguidamente se introduce totalmente el tubo irrigador en el interior de la misma. Se realiza el lavado del material arcilloso de manera que ascienda hacia la parte superior de la arena a través del líquido que se evacúa por el tubo irrigador, este paso se debe realizar manteniendo la probeta en todo momento en posición vertical. Se le adjudica al tubo irrigador un movimiento descendente de manera suave mientras se gira entre los dedos de una mano, a la vez se gira la probeta con la otra mano. Cuando se ha alcanzado un nivel de líquido de 38 cm, se sube el tubo irrigador de manera muy lenta sin que se corte el paso del líquido a través de él y manteniendo en todo momento el mismo nivel. Se ha de regular el paso de líquido para que, en el momento que el tubo se encuentre completamente fuera de la probeta, el nivel existente de líquido sea de 38 cm. A continuación se deja reposar la probeta un tiempo aproximado de 20 minutos (1200 ± 15 segundos).

Después de transcurrido ese tiempo, se realiza la lectura del nivel que presenta la parte superior de la suspensión de arcilla y se apunta dicho valor.

Se desciende la varilla en el interior de la probeta hasta que ésta descansa sobre la arena, se vuelve a leer la superficie de arena del siguiente modo:

- En caso de ser una varilla que posea tornillos, se gira de manera lenta y sin empujarla hasta que uno de los tornillos pueda ser observados, seguidamente se mira el nivel del centro del mismo y se apunta.
- En caso de ser una varilla que posea un disco indicador de lectura de arena, se inclina suavemente hasta que el disco esté en contacto con las graduaciones de la probeta, en ese momento se procede a la lectura del borde superior del disco y se resta, de dicha lectura, 250 mm, apuntando a continuación el resultado.

Cuando se esté realizando la lectura de las superficies de arena y arcilla, la aproximación que se debe hacer será de 2 mm. En caso de encontrarse la lectura entre dos trazos de graduación se tomará como lectura el superior de los dos.

3.2.8.3 Observaciones

Cuando el material de las probetas que se empleen sea plástico, estas no deberán estar al sol directo más tiempo del que sea necesario.

En el caso de que el cloruro cálcico se embeba de agua, se ha de preparar una disolución en agua, a una densidad de 1177 (20% de cloruro cálcico anhidro). De ella se toman 2400 g y se añaden a ella la glicerina, el formaldehído y el agua hasta completar un volumen de 4000 cm³.

Para realizar la comparación con el empleo de un agua que presente una calidad dudosa se realizarán ensayos con diferentes muestras del mismo tipo de suelo que se esté ensayando y se emplearan soluciones ejecutadas con agua destilada y el agua de calidad dudosa.

La vida media que presenta la solución de trabajo es de 15 días. Debe ser cambiada transcurrido un mes desde su elaboración, o cuando se tengan dudas sobre el correcto estado de conservación, lavando y enjugando el recipiente en el que se ha encontrado la solución con agua destilada.

Cuando el árido que es objeto de ensayo se vaya a emplear en planta de hormigón asfáltico, para realizar revestimientos bituminosos, el ensayo de equivalente en arena se ha de realizar después de que el árido haya recibido los tratamientos necesarios para tal fin, exceptuando el tratamiento con aglomerante bituminoso; en ese caso el resultado obtenido se comparable con el que se obtendría en caso de realizarse el ensayo de la forma que dicta la norma.

En caso de tenerse que hacer el control en el material que se encuentre acopiado, es decir, el árido se encontraría sin secar, habría que tener en cuenta lo descrito en la parte de preparación de la muestra de esta norma.

De manera normal se observa correctamente la línea que separa el sedimento arcilloso de la solución clara. En caso de no observarse correctamente, se recomienda aumentar el tiempo a esperar en el reposo hasta que dicha línea sea más clara, para facilitar de esta manera la lectura. En el caso de que el tiempo de espera supere los 30 minutos, sería recomendable realizar el ensayo con tres muestras del mismo suelo y tomar la lectura de la muestra que más rápidamente presente la línea de separación.

3.2.9 Ensayo de Los Ángeles (Norma UNE EN 1097-2, Septiembre 2010)

La norma a la que se refiere esta apartado es la norma UNE EN 1097-2, Septiembre 2010, cuyo nombre completo es *“Ensayo para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación”*.

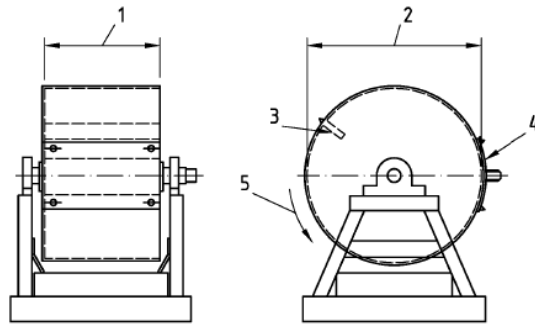
3.2.9.1 Equipos

- **EQUIPOS GENERALES:**

- TAMICES DE ENSAYO: cumplirán la norma UNE EN 933-2 y presentarán los siguientes tamaños de abertura: 1,6 mm, 10 mm, 11,2 ó 12,5 mm y 14 mm.
- BALANZA: deberá presentar una sensibilidad del 0,1% de la masa que se esté ensayando.
- ESTUFA VENTILADA: debe estar regulada por un termostato que confiera una temperatura de $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$, también se puede emplear otro equipo que permita que los áridos se sequen sin que se produzca la rotura de algún tamaño de las partículas.

- **EQUIPOS ADICIONALES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE ENSAYO DE LOS ÁNGELES:**

- EQUIPO DE REDUCCIÓN DE LA MUESTRA: deberá cumplir lo especificado en la norma UNE EN 932-2.
- MÁQUINA PARA EL ENSAYO DE LOS ÁNGELES: presentará las siguientes partes principales:



Leyenda

- 1 Longitud interior (508 ± 5) mm
- 2 Diámetro interior (711 ± 5) mm
- 3 Placa
- 4 Cubierta y abertura
- 5 Sentido de giro

ILUSTRACIÓN 16: ESQUEMA DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES

(FUENTE: NORMA UNE EN 1097-2)



ILUSTRACIÓN 17: MÁQUINA DE LOS ÁNGELES

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

CILINDRO: se encuentra construido con una chapa de acero estructural con un espesor variable entre 11,5 y 13 mm. El cilindro se ha de encontrar cerrado por los dos extremos y poseer un diámetro interior aproximado de (711 ± 5) mm y una longitud interior aproximada de (508 ± 5) mm. El apoyo que posee el cilindro reside en dos bulones horizontales que se encuentran montados de manera fija en sus dos paredes laterales pero que no se introducen en el interior del mismo; el montaje del cilindro debe permitir el giro alrededor de un eje horizontal.

Tiene que presentar una abertura que posea una anchura de (150 ± 3) mm y siempre que sea posible se encontrará a lo largo del tambor para que, de este modo, sea más fácil meter el material en su interior, así como para retirar el material cuando el ensayo ha finalizado. Cuando se esté realizando el ensayo la abertura debe permanecer cerrada de manera hermética para que no deje salir polvo del interior por lo que se empleara una tapa que no influya en la forma cilíndrica del interior.

En el interior del cilindro se debe colocar una placa a una distancia comprendida entre 380 mm y 820 mm del borde que se encuentre más cerca de la abertura. Dicha distancia se debe medir en toda la extensión longitudinal del tambor siguiendo el sentido de giro. La placa deberá poseer una sección transversal rectangular que será igual a la del cilindro, con una anchura de (90 ± 2) mm y un espesor de (25 ± 1) mm, además deberá fijarse de manera rígida en un plano diametral siguiendo la generatriz del cilindro.

Cuando la anchura que presente la placa sea menor de 86 mm o el espesor menor de 23 mm, ésta se deberá cambiar por una nueva.

La maquina deberá estar apoyada directamente sobre un pavimento de hormigón o sobre unos bloques de roca que le confieran una correcta nivelación.

CARGA ABRASIVA: se basa en 11 bolas de acero con forma esférica; presentan un diámetro de 45-49 mm y un peso de 400-445 g. La masa total ha de estar entre 4690 g y 4860 g.



ILUSTRACIÓN 18: CARGA ABRASIVA
(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

MOTOR: se emplea conferir una velocidad de rotación de 31-33 r/m al tambor.

BANDEJA: necesaria para la recogida del material y carga abrasiva una vez que ha finalizado el ensayo.

CONTADOR DE REVOLUCIONES: cuando se hayan alcanzado las vueltas necesarias para el ensayo el contador apagará el motor de manera automática.

3.2.9.2 Determinación de la resistencia a la fragmentación por el método del ensayo de Los Ángeles

- **PREPARACIÓN DE LA PORCIÓN DE ENSAYO**: el peso que debe poseer la muestra objeto de ensayo debe ser, como mínimo, de 15 kg y presentar una granulometría que se encuentre comprendida entre 10 mm y 14 mm.

El ensayo se ha de ejecutar con el material que atraviese el tamiz de 14 mm y quede retenido en el tamiz de 10 mm. Asimismo, la curva granulométrica de la muestra tiene que cumplir uno de los requisitos que se indican a continuación:

- Entre el 60% y el 70% del árido pasa por el tamiz de 12,5 mm.
- Entre el 30% y el 40% del árido pasa por el tamiz de 11,2 mm.

Se realiza el tamizado de la muestra de ensayo usando los tamices de 10 mm, 11,2 ó 12,5 mm y 14 mm para, de esta manera obtener las fracciones granulométricas individuales de los intervalos de 10 mm a 11,2 mm ó 12,5 mm y de 11,2 mm ó 12,5 mm a 14 mm. Seguidamente se lava cada fracción individualmente, según dicta la norma UNE EN 933-1 y se secan hasta que se consiga una masa constante.

Una vez enfriadas las muestras se juntan para conseguir, de esta manera, una muestra de ensayo modificada que presenta una granulometría que está comprendida entre 10 mm y 14 mm y que sigue los parámetros granulométricos que se indicaron anteriormente.

La muestra que se ha obtenido en el paso anterior se debe reducir, siguiendo la norma UNE EN 932-2, hasta conseguir una muestra de ensayo que presente una masa de (5000±5) g.

En caso de tener que ensayar áridos reciclados, que presenten una granulometría de 16/32 mm, sería conveniente seguir lo indicado en la norma para el caso de áridos naturales, pero teniendo en cuenta lo indicado en la siguiente tabla:

TABLA 26: FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS ALTERNATIVAS PARA GRANULOMETRÍA DE 16/32 mm

Fracción granulométrica mm	Tamaño del tamiz intermedio mm	Porcentaje que pasa por el tamiz intermedio %	Número de bolas	Masa de la carga abrasiva g
16 a 31,5	22,4	45 a 55	14	5 810 a 6 010

(FUENTE: NORMA UNE EN 1097-2)

En caso de emplearse para la realización del ensayo fracciones granulométricas que difieran de las indicadas anteriormente, es decir, diferentes a 10/14 mm, se ha de un número diferente de bolas para la carga abrasiva, para ello se observa lo dispuesto en la tabla siguiente:

TABLA 27: FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS ALTERNATIVAS

Fracciones granulométricas mm	Tamaño del tamiz intermedio mm	Porcentaje que pasa por el tamiz intermedio %	Número de bolas	Masa de la carga abrasiva g
4 a 6,3	5	30 a 40	7	2 930 a 3 100
4 a 8	6,3	60 a 70	8	3 410 a 3 540
6,3 a 10	8	30 a 40	9	3 840 a 3 980
8 a 11,2	10	60 a 70	10	4 250 a 4 420
11,2 a 16	14	60 a 70	12	5 120 a 5 300

(FUENTE: NORMA UNE EN 1097-2)

Además del cambio en la carga abrasiva, también existe un cambio de tamices que se han de emplear dependiendo de las fracciones granulométricas que se empleen.

- **PROCEDIMIENTO DE ENSAYO:** se realiza la comprobación de que el tambor se encuentre limpio con anterioridad a la introducción de la muestra. Se colocan de manera cuidadosa las bolas dentro de la maquina y seguidamente se introduce el material a ensayar.

Se coloca la cubierta en su posición inicial y se deja girar la maquina durante 500 vueltas con una velocidad que puede variar desde 31 r/min a 33 r/min.

Una vez finalizadas las vueltas, se vuelca el material sobre una bandeja, que se encuentre situada debajo de la máquina, prestando atención a que se encuentre a la misma altura que la abertura del tambor para evitar que se pierda material en el proceso. El tambor se limpia, sacando los finos y haciendo hincapié en las zonas que se encuentran cerca de la placa saliente. Se elimina, con precaución la carga abrasiva de la bandeja evitando, también en este paso, la perdida de material.

El material presente en la bandeja se lava y tamiza por el tamiz de 1,6 mm, según se indica en la norma UNE EN 933-1. Se realiza el secado de la muestra que quede retenida en el tamiz de 1,6 mm, hasta conseguir una masa constante, a una temperatura de $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$.

3.2.10 Ensayo de Los Ángeles (Norma NLT-149/91)

La norma a la que se refiere esta apartado es la norma NLT-149/91, cuyo nombre completo es “*Resistencia al desgaste de los áridos por medio de la máquina de Los Ángeles*”.

3.2.10.1 Aparatos y material necesario

- **MÁQUINA DE LOS ÁNGELES:** es un cilindro hueco de acero que posee un diámetro de (711 ± 5) mm y generatriz de (508 ± 5) mm. El cilindro se encuentra cerrado en sus bases, en el centro del tambor se insertan, sin entrar en el interior del mismo, los semiejes que le confieren el movimiento de rotación. El cilindro presenta una abertura, por la que se mete el material, y un entrepaño fijo, que confiere a la muestra y a la carga abrasiva un movimiento de volteo. Dicha abertura podrá cerrarse con ayuda de una tapa, que evitará la salida de polvo al exterior cuando se esté realizando el ensayo, y se anclará con ayuda de pernos. El diseño de la tapa asegurará que el interior del tambor sigue siendo cilíndrico.

El entrepaño se encuentra ubicado de tal manera que al realizarse el proceso de volteo el conjunto de material y carga abrasiva no caiga directamente sobre la tapa. El material del que estará fabricado el entrepaño será acero y ocupará toda la generatriz del tambor con una proyección radial hacia el centro de longitud igual a 89 mm. La distancia existente entre el entrepaño y la abertura será mayor de 1,27 m, midiendo dicha distancia a lo largo de la circunferencia del tambor y en sentido de rotación.

- **TAMICES:** los tamices que se empleen para la realización de este ensayo han de cumplir lo especificado en la norma UNE 7050.

- **CARGA ABRASIVA:** son esferas de acero que presentan un diámetro aproximado de 46,8 mm y una masa de 390-455 g. El número de esferas, y por consiguiente la masa total que presentarán, dependerá de la granulometría de los áridos que se estén ensayando, además del tamaño máximo de árido que posea la muestra.

- CARGA ABRASIVA PARA ÁRIDO CON TAMAÑO COMPRENDIDO ENTRE 20 Y 80 mm: se emplearán 12 esferas que presentan una masa total de (5000±25) g y se utilizarán en las tres granulometrías presentes en la siguiente tabla:

TABLA 28: GRANULOMETRÍAS DE LA MUESTRA DE ÁRIDO, 20/80 mm, PARA EL ENSAYO DE LOS ÁNGELES

GRANULOMETRIAS DE LA MUESTRA DE ARIDO, 20/80 mm, PARA ENSAYO				
TAMICES UNE (mm)		GRANULOMETRIAS Y MASAS DE LA MUESTRA PARA ENSAYO (g)		
PASA	RETIENE	E	F	G
80	63	2.500 ± 50	—	—
63	50	2.500 ± 50	—	—
50	40	5.000 ± 50	5.000 ± 50	—
40	25	—	5.000 ± 50	5.000 ± 25
25	20	—	—	5.000 ± 25
Totales:		10.000 ± 100	10.000 ± 75	10.000 ± 50

(FUENTE: NORMA NLT 149/91)

- CARGA ABRASIVA PARA ÁRIDO CON TAMAÑO COMPRENDIDO ENTRE 2,5 Y 40 mm: se emplearán diferentes números de esferas dependiendo de la granulometría que se posea en la muestra a ensayar.

TABLA 29: NÚMERO DE ESFERAS A EMPLEAR SEGÚN LA GRANULOMETRÍA

GRANULOMETRIA DE LA MUESTRA DE ENSAYO	NUMERO DE ESFERAS	MASA TOTAL DE LAS ESFERAS (g)
A	12	5.000 ± 25
B	11	4.585 ± 25
C	8	3.330 ± 20
D	6	2.500 ± 15

(FUENTE: NORMA NLT 149/91)

TABLA 30: GRANULOMETRÍAS DE LA MUESTRA DE ÁRIDO 2,5/40 mm, PARA EL ENSAYO DE LOS ÁNGELES

GRANULOMETRIAS DE LA MUESTRA DE ARIDO, 2,5/40 mm, PARA ENSAYO					
TAMICES UNE (mm)		GRANULOMETRIAS Y MASAS DE LA MUESTRA PARA ENSAYO (g)			
PASA	RETIENE	A	B	C	D
40	25	1.250 ± 25	—	—	—
25	20	1.250 ± 25	—	—	—
20	12,5	1.250 ± 10	2.500 ± 10	—	—
12,5	10	1.250 ± 10	2.500 ± 10	—	—
10	6,3	—	—	2.500 ± 10	—
6,3	5	—	—	2.500 ± 10	—
5	2,5	—	—	—	5.000 ± 10
Totales:		5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10

(FUENTE: NORMA NLT 149/91)

3.2.10.2 Preparación de la muestra

La muestra que se ha de emplear para la realización del ensayo se obtiene, siguiendo lo dispuesto en la norma NLT-148/91, a partir de la obtenida en campo.

La masa de árido a ensayar se lava y seca en estufa, a una temperatura de 105-110°C hasta que se posea una masa constante; seguidamente se separan las fracciones presentes en ella y se mezclan para poseer una granulometría que cumpla con alguna de las dos tablas anteriormente indicadas, bien de 2,5 mm a 40 mm o de 20 mm a 80 mm.

La elección de la granulometría a emplear se realiza atendiendo a cuál será la que se observará cuando se utilice el árido, sobre el que se realiza el ensayo, en la obra.

En caso de realizarse el machaqueo de la muestra en el laboratorio, se hará constar en el informe que se realice al finalizar el ensayo, indicando cual será la influencia que este paso posee en las partículas que obtienen al fin del ensayo.

3.2.10.3 Procedimiento

Se indica cual es la masa que posee la muestra de ensayo al inicio del ensayo, con una precisión de ± 1 g.

La muestra y la carga abrasiva, que se habrá escogido observando las tablas presentes en el apartado en el que se explican dichas cargas, se añaden en la máquina de ensayo de Los Ángeles y se comienza a girar el cilindro, con una velocidad de 3,1-3,5 rad/s, o lo que es lo mismo, de 30 a 33 rpm.

Para las granulometrías correspondientes a E, F y G se aplican 1000 rotaciones de cilindro, mientras que para las granulometrías correspondientes a A, B, C y D se aplican 500 rotaciones de cilindro.

Una vez realizadas las rotaciones indicadas, se retira el material del cilindro y se ejecuta una separación inicial de la muestra empleando para ello un tamiz que posea una abertura superior a 1,6 mm; lo que atraviese dicho tamiz se tamiza con el tamiz de 1,6 mm, siguiendo para ello lo que se indica en la norma NTL-150/89. El material que sea más grueso que 1,6 mm se lava y se seca hasta conseguir masa contante, indicando a continuación su masa con una precisión de ± 1 g.

3.2.11 Determinación del límite líquido (Norma UNE 103-103)

La norma a la que se refiere esta apartado es la norma UNE 103-103-94, Febrero 1994, cuyo nombre completo es “*Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande*”.

3.2.11.1 Aparatos y material necesario

- **APARATO DE CASAGRANDE:** máquina consistente en una cuchara que se encuentra suspendida a una cierta distancia de la base para que, de este modo, se controle la caída que se produce. El método de accionamiento para realizar la caída, puede ser por medios manuales o con ayuda de un motor eléctrico.

La base sobre la que cae la cuchara es de un material que posee una dureza durométrica D de 80-90. La cuchara con la que se realiza el ensayo está fabricada con una aleación de cobre y posee una masa de 185-215 g.

Al efectuar el giro de la leva, ésta debe llegar a hacer un giro de mínimo 180° sobre la base. La leva y el mecanismo de alzado deben fabricarse de tal manera que permitan que se realice un movimiento parabólico uniformemente acelerado cuando se eleve la cuchara, además de impedir el movimiento de la misma cuando se inicie el descenso.

La parte que permite la elevación de la cuchara debe posibilitar que se regule la distancia desde la que se produce la caída a 10 mm.

De manera opcional, la leva se puede accionar por medio de un motor eléctrico que deberá encontrarse equipado con almohadillas o protecciones para evitar que se transmitan vibraciones a la cuchara además de poseer un interruptor de encendido y apagado. Las revoluciones por segundo a las que debe hacer girar la leva son de $(2 \pm 0,1)$ rps.



ILUSTRACIÓN 19: CUCHARA DE CASAGRANDE

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

- **ACANALADOR NORMALIZADO:** se puede llamar, también, plano o de Casagrande. Además de poseer el acanalador, propiamente dicho, el instrumento cuenta con un calibre para comprobar que la caída de la cuchara, que como ya se dijo ha de ser de 10 mm, sea la correcta.

El material con el que este ejecutado el acanalador ha de evitar que se pueda corroer, así como tener una dureza inferior a la poseída por la cuchara para, que de esta manera, se retrase lo más posible el deterioro de los dos elementos. Cabe destacar, también, que el material ha de presentar una rigidez tal que permita la obtención de un surco uniforme en la cuchara.



ILUSTRACIÓN 20: ACANALADOR DE LA A.S.T.M. (IZQUIERDA) Y ACANALADOR DE HOVANYI (DERECHA)
(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

- **ESPÁTULAS QUE POSEAN VARIOS TAMAÑOS**
- **PESASUSTANCIAS**
- **BALANZA:** que pese 100 g con una precisión de 0,01 g
- **TAMIZ CON ABERTURA DE 400 μm**
- **SUPERFICIE LISA:** será un cristal con unas dimensiones de 300 mm por 300 mm y espesor de 10 mm.
- **ESTUFA DE DESECACIÓN**
- **MORTERO O MOLINO DE GOMA**
- **CÁMARA HÚMEDA:** deberá mantener una humedad relativa comprendida ente el 90% y el 100%, así como una temperatura entre 17°C y 23°C.
- **CALIBRE, PINZAS, FRASCO LAVADOR Y AGUA DESTILADA.**

3.2.11.2 Preparación de la muestra

- **POR SECADO Y DESMENUZADO:** se realiza la preparación de la muestra de la forma que se describe a continuación cuando en el material a ensayar no se pueda realizar de forma manual la separación de sus partículas.

Se realiza el secado una proporción de material al aire libre o por medio de una estufa que no alcance una temperatura superior a 60°C hasta que se consiga disgregar los terrones, dicha proporción será la necesaria para que de ella se obtenga una muestra de ensayo de 150-200 g que atraviese el tamiz de abertura 400 µm. La muestra se machaca con un mortero con extremo de goma evitando que se rompan, de esta manera, los granos individuales, hasta conseguir que todos los terrones se encuentren disgregados.

En el caso de encontrarse antes del machaqueo partículas frágiles se han de eliminar dichas partículas de forma manual o por medio del lavado del material.

La porción de ensayo que atraviesa el tamiz de 400 µm y que poseerá una cantidad, como mínimo, de 150 g se amasa, encima de un cristal y con ayuda de las espátulas, añadiendo una cantidad de agua a juicio del ensayador que tenga como resultado que se precisen de 30 a 35 golpes para que se logre cerrar el surco de 13 mm presente en la cuchara. La muestra húmeda se deja reposar en una cámara húmeda un periodo de 2 horas. Después de ese periodo de tiempo se realiza otro amasado, adicionando agua en caso de ser necesario.

- **EN SUELO NATURAL. VÍA DIRECTA:** se realiza la preparación de la muestra de la forma que se describe seguidamente cuando los suelos que se pretenden ensayar son orgánicos o inorgánicos con un contenido elevado de limo o arcilla y el secado previo afecta, significativamente, a los resultados obtenidos en este ensayo.

Se coge como muestra de ensayo una muestra de 200 g y se realiza su división en varias partes encima del cristal. En caso de contener partículas con una granulometría superior a 400 µm se deben retirar con ayuda de unas pinzas y pesarlas para determinar, de este modo, cuál sería su representación sobre la muestra total

Se adiciona agua destilada y se realiza el amasado de la mezcla hasta que se llegue a una masa homogénea.

Al acabar de homogeneizar la mezcla se deja reposar en la cámara húmeda un día par que se establezca la humedad que contiene.

- **EN SUELO NATURAL. VÍA HÚMEDA:** se realiza la preparación de la muestra de la forma que se describe a continuación cuando los suelos que se pretendan ensayar posean una proporción de granos gruesos de otro material en un porcentaje elevado.

Se coge una muestra de suelo suficiente para poder obtener de ella una masa de 300 g que atraviese el tamiz de abertura 400 μm . Se deposita en un recipiente al cual se le adiciona agua destilada hasta que se cubra completamente la muestra y se realiza la agitación de la mezcla con ayuda de una varilla de vidrio hasta lograr una pasta densa.

Se echa la mezcla en el tamiz de 400 μm , el cual se encontrará sobre un recipiente adecuado para recoger lo que le atraviese, se realiza el lavado del material con agua destilada hasta lograr que todas las partículas que posean un tamaño inferior a la abertura del tamiz lo pasen.

Se permite que sedimenten las partículas y se retira el agua limpia que queda sobre dicha sedimentación. Se deja secar al aire o con ayuda de una corriente de aire, que no posea una temperatura superior a 60°C agitando para homogeneizar la humedad, hasta que se logre una consistencia adecuada para iniciar el amasado. Después se sigue lo descrito en el apartado de preparación de la muestra por secado y desmenuzado.

3.2.11.3 Procedimiento operatorio

Se retira la cuchara de la base, seguidamente se sostiene en la palma de la mano con firmeza y se procede a colocar en la zona inferior de la misma, con ayuda de una espátula, una porción de suelo, se ha de realizar un aplastamiento hacia abajo y hacia los lados para que el material posea una altura de 10 mm, aproximadamente, en la zona con más espesor, además se debe dejar la superficie lisa.

Se vigila que no existan burbujas de aire en el suelo que se pretende ensayar, y, en caso de observarse, se ha de realizar de nuevo todo el procedimiento de depositar el material en la cuchara. La porción de ensayo que no se encuentre en la cuchara se ha de preservar para evitar que pierda humedad.

Sujetando todavía la cuchara en la mano, se realiza, con ayuda del acanalador, un surco desde arriba hacia abajo, presentando el borde que posee un bisel hacia adelante; durante todo el proceso el acanalador se debe encontrar en sentido perpendicular a la superficie y realizar un arco.

Cuando se ejecute el ensayo sobre suelos que presenten poca plasticidad, se puede realizar el surco de varias pasadas que sean más profundas cada vez, para evitar de este modo que se desgarre el material. En los casos en los que el acanalador de Casagrande provoca que una porción de material salga de la cuchara se puede emplear el acanalador hueco en su lugar, para evitar que se realicen surcos irregulares.

En suelos turbosos, el acanalador a emplear sería el correspondiente a la norma A.S.T.M., es decir, un acanalador curvo.

A continuación de la realización del surco, se vuelve a colocar la cuchara en su lugar en la base, observando que no existan restos de material en la parte inferior de ella. Se realiza el giro de la manivela con una cadencia de dos vueltas por segundo. Se contabilizan los golpes que han sido necesarios para que se juntaran las dos mitades del material en el fondo de la cuchara una distancia de 13 mm.

En el caso de que el número de golpes obtenido se encuentre entre 15 y 35, ambos valores incluidos, se toma una porción de 10-15 g de material de la zona en la que se produjo la unión y se determina la humedad siguiendo la norma UNE 103-300. En el caso de que el número de golpes no se encontrara dentro de esos límites el ensayo no es válido y se deberá proceder a su repetición.

Se realiza la repetición del ensayo hasta conseguir que en un caso los golpes necesarios para la unión de las partes se encuentren entre 15 y 25 y en otro caso que se encuentren entre 25 y 35. Se ha de tener presente que el número de golpes que se necesitan para dicha unión será inferior cuando se aumente la cantidad de agua en el suelo.

En el caso de que, tras pasadas varias repeticiones del ensayo, no se haya conseguido que el número de golpes necesarios para cerrar el surco sea superior a 25 golpes, se puede llegar a la conclusión que se está frente a un suelo en el que no se puede determinar el límite líquido, por lo que se ha de indicar que el suelo es no plástico y por ello no sería necesaria la realización del ensayo de límite plástico.

3.2.12 Determinación del Límite líquido (Norma NLT 105/98)

La norma a la que se refiere esta apartado es la norma NLT 105/98, cuyo nombre completo es “*Límite líquido por el método de la Cuchara de Casagrande*”.

3.2.12.1 Aparatos y material necesario

- **APARATO DE CASAGRANDE:** máquina formada por una cuchara, fabricada en una aleación de cobre, que se encuentra sobre una base en la que se controla la altura desde la que se produce la caída. El accionamiento por el cual realiza la caída puede ser manual o por medio de un motor eléctrico.

La base es de un material que posee una dureza durométrica D de 80-90. La cuchara está fabricada en una aleación de cobre y posee un peso de 185-215 g.

El movimiento de la leva debe permitir que la cuchara realice un arco de mínimo 180° a una altura máxima. La leva y el dispositivo de arrastre deben de poseer un diseño que permita ejecutar un movimiento parabólico uniformemente acelerado a la cuchara y que esta permanezca en reposo cuando se realice el descenso de la misma. La altura de caída de la cuchara será de 10 mm.

De manera opcional, puede acoplarse al aparato un motor eléctrico con almohadillas o protecciones que impidan que las vibraciones afecten a la cuchara. La cadencia que debe aportar dicho motor a la cuchara será de 2 revoluciones por segundo, además de poseer un interruptor de encendido y apagado.

- **ACANALADOR NORMALIZADO:** el acanalador plano o de Casagrande posee un calibrador para ajustar la caída de la cuchara de manera correcta.

Además del citado anteriormente, hay otros dos acanaladores, denominados curvo de la A.S.T.M. y hueco o de Hovanyi.

El material del que han de estar ejecutados los acanaladores deberá soportar la corrosión además de poseer una rigidez que impida dañar la cuchara pero que permita la obtención de un surco uniforme de material.

- **ESPÁTULA:** deberá poseer una hoja con unas dimensiones de 8 cm de longitud y 2 cm de anchura; también se empleará otra con unas dimensiones superiores a las indicadas.

- **APARATOS Y MATERIAL NECESARIO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD**

- **BALANZA:** con una capacidad de 200 g y una sensibilidad de 0,01 g.

- **ESTUFA DE DESECACIÓN:** que pueda ser regulada a una temperatura de 105-110°C.

- **TAMIZ DE 400 μm**

- **AGUA DESTILADA:** se puede agua normal cuando se compruebe que el empleo de esta no altera los resultados del ensayo.

- **SUPERFICIE LISA:** se empleará para el amasado del suelo.

- **MORTERO O MAZO DE GOMA**

- **CÁMARA HÚMEDA:** deberá mantener una humedad relativa de 90-95% y una temperatura de 17-23°C.

- **CALIBRE O PIE DE REY**

3.2.12.2 Preparación de la muestra

- **VÍA HÚMEDA CON SUELO NATURAL:** se realiza la preparación de la muestra siguiendo este método cuando el suelo que se pretenda ensayar sea de grano fino pero posea una proporción de grano grueso. En ese caso se ha de realizar la separación de la fracción que se necesite para la ejecución del ensayo evitando el secado previo de la muestra total.

Se coge una porción de muestra suficiente para poder obtener, después de tamizar por el tamiz de abertura 400 μm , una masa de ensayo de 200 g.

Se deposita en un recipiente y se cubre totalmente de agua removiendo con ayuda de una varilla de vidrio.

Se echa la mezcla sobre el tamiz de 400 μm , dicho tamiz se encuentra sobre un recipiente que recoja lo que le atraviese. Seguidamente se procede a lavar la muestra hasta que todas las partículas inferiores a la abertura del tamiz lo hayan pasado.

Se deja reposar lo atravesado por el tamiz para que sedimente el material, eliminando el agua limpia que se encuentra por encima de él. A continuación se seca la muestra de ensayo por medio de estufa, a no más de 50°C o al aire libre. Se retira de secar cuando se consiga en la muestra una consistencia que permita realizar el ensayo con un número de golpes comprendido entre 25 y 35. Se introduce el suelo en la cámara húmeda durante 24 horas para que se homogenice la humedad.

- **VÍA DIRECTA CON EL SUELO NATURAL:** se realiza la preparación de la muestra de ensayo por este método cuando el suelo que se pretenda ensayar sea suelo inorgánico con una porción de arcillas elevadas o un suelo orgánico. Para este tipo de suelos se ha de evitar el proceso de secado pues puede afectar negativamente a los resultados finales.

Se cogen 200 g de suelo y se divide en varias partes sobre la superficie lisa. Se amasa con agua destilada hasta lograr que la mezcla posea una consistencia que permita realizar el ensayo con 25-35 golpes.

Se introduce el suelo en la cámara húmeda durante 24 horas para que se homogenice la humedad.

En el caso de observarse partículas superiores a 400 μm , estas se deben retirar con ayuda de unas pinzas y determinar su masa para saber cuál es su proporción en la muestra total.

- **POR SECADO Y DESMENUZADO:** se realiza la preparación de la muestra de ensayo por este método cuando el suelo que se pretenda ensayar posea la humedad alterada o que fuera imposible la separación manual de las partículas.

Se realiza el secado de la muestra de ensayo al aire libre o por medio de una estufa que no alcance una temperatura superior a 50°C, la muestra de ensayo será lo suficientemente grande como para obtener de ella una porción de 200 g que atraviese el tamiz de abertura de 400 µm. Se machaca la muestra con ayuda de un mortero de goma hasta destruir la totalidad de los terrones que pudieran existir pero evitando romper los granos individuales. Se realiza este procedimiento hasta que todas las partículas inferiores a la abertura del tamiz lo atraviesen.

La porción de muestra que pasa por el tamiz se mezcla con agua destilada hasta conseguir una pasta con una consistencia con la que se pueda conseguir realizar el ensayo que se obtengan ente 25 y 35 golpes. Se introduce el suelo en la cámara húmeda durante 24 horas para que se homogenice la humedad.

3.2.12.3 Procedimiento

Se toma la cuchara de Casagrande en la palma de la mano de manera firme y, con ayuda de la espátula, se deposita sobre ella, en la zona inferior, el suelo anteriormente amasado; el suelo se ha de depositar de tal manera que en la zona más espesa posea 10 mm, además de presentar una superficie lisa.

En el caso de tener sospechas de la existencia de burbujas de aire se debe realizar de nuevo el depósito del material en la cuchara. El resto de material mezclado con agua se debe proteger para evitar que se pierda la humedad.

Con la cuchara todavía en la mano, se realiza un surco, con ayuda del acanalador, desde arriba hacia abajo y con el borde que presenta un bisel hacia adelante. El acanalador deberá estar de manera perpendicular a la cuchara y describir un arco.

En el caso de ensayarse un suelo que presente poca plasticidad, se puede realizar el surco con varias pasadas, a cada cual más profunda. Cuando al realizar el surco, el acanalador saca fuera de la cuchara una porción de muestra, se ha de cambiar de acanalador por el acanalador hueco. En el caso de ser suelo turboso se ha de emplear el acanalador curvo.

Seguidamente a la realización del surco, se coloca la cuchara en la base, observando que no haya material adherido al fondo de la cuchara. Se comienza a girar la manivela con una cadencia de dos vueltas por segundo mientras que se contabilizan los golpes que hacen falta para que se junten las dos mitades de material una distancia de 13 mm.

En el caso de que el número de golpes que se consigue se encuentre ente 15 y 35 golpes, ambos valores incluidos, se toma una muestra de la zona que antes se unió para determinar la humedad de 10-15 g. En el caso de que los golpes no se encuentren dentro de los límites antes mencionados, el ensayo no es válido.

Se realiza el ensayo, del mismo modo que se ha descrito, hasta conseguir un ensayo con 15-25 golpes y otro ensayo con 25-35 golpes. Se ha de tener en cuenta que cuantos menos golpes se necesiten más cantidad de agua poseerá la mezcla.

En el caso de haberse realizado el ensayo varias veces sin conseguir que los golpes necesarios para unir las dos mitades sean superiores a 25 golpes, significa que en el suelo que se está ensayando no se puede calcular el limite líquido, por lo que se ha de apuntar que es un suelo no plástico y no se realiza el ensayo de determinación del límite plástico.

3.2.13 Determinación del límite plástico (Norma UNE 103-104)

La norma a la que se refiere esta apartado es la norma UNE 103-104, Febrero 1993, cuyo nombre completo es "*Determinación del límite plástico de un suelo*".

3.2.13.1 Aparatos y material necesarios

- **ESPÁTULA:** poseerá la hoja flexible
- **PESASUSTANCIAS.**
- **BALANZA:** que pese 100 g con una precisión de 0,01 g
- **ESTUFA DE DESECACIÓN:** con una temperatura regulable hasta 115°C.
- **PINZAS.**
- **TAMIZ DE 400 µm DE ABERTURA.**
- **FRASCO LAVADOR Y AGUA DESTILADA.**

- **SUPERFICIE LISA:** será un cristal con unas dimensiones de 300 mm por 300 mm y espesor de 10 mm.
- **VARILLA DE 3 mm DE DIÁMETRO.**

3.2.13.2 Preparación de la muestra para ensayo

Se toma como muestra de ensayo una masa de 20 g de suelo que atraviese el tamiz de 400 μm , siguiendo para ello el método descrito en la norma UNE 103-103-94. Seguidamente se adiciona agua y se realiza con el material una bola; de dicha bola se cogen 15 g como muestra final de ensayo.

3.2.13.3 Método operatorio

Se toma la mitad de la bola y con ella se forma un elipsoide que se hace pasar entre los dedos y la superficie lisa imprimiendo una presión que produzca que se forme un cilindro. La cadencia de movimiento que se debe realizar es de 80-90 movimientos hacia delante y hacia atrás por minuto.

En el caso de formarse un cilindro de 3 mm sin que se produzcan grietas, se divide en 6-8 partes que se amasan conjuntamente entre los dedos de las dos manos hasta lograr una masa en forma de elipsoide. Se realiza el proceso descrito anteriormente un número de veces determinado hasta lograr que el cilindro se agriete. En el caso de producirse el agrietamiento cuando el cilindro posee un diámetro superior a 3 mm el ensayo se considerará finalizado siempre que se haya logrado realizar, de la misma manera, cilindros de 3 mm.

Se depositan las muestras de suelo que se obtienen del párrafo anterior sobre un pesasustancias que posea tapa y se realiza la determinación de la humedad del mismo modo que se describe en la norma UNE 103-300.

Se realiza con la otra mitad de la bola el ensayo completo.

3.2.14 Determinación del límite plástico (Norma NLT 106/98)

La norma a la que se refiere esta apartado es la norma NLT 106/98, cuyo nombre completo es "*Límite plástico de un suelo*".

3.2.14.1 Aparatos y material necesario

- **ESPÁTULA:** con una hoja de dimensiones de 8 cm de longitud y 2 cm de anchura.
- **PESASUSTANCIAS CON TAPA**
- **BALANZA:** que pese 200g con una precisión de 0,01 g
- **ESTUFA DE DESECACIÓN:** con una temperatura regulable hasta 115°C.
- **TAMIZ DE 400 μm DE ABERTURA**
- **AGUA DESTILADA Y FRASCO LAVADOR**
- **SUPERFICIE LISA:** será un cristal con unas dimensiones de 300 mm por 300 mm y espesor de 10 mm.
- **VARILLA DE 3 mm DE DIÁMETRO**

3.2.14.2 Preparación de la muestra

Se toma una porción de ensayo de, aproximadamente, 20 g que atraviese el tamiz de 400 μm siguiendo para ello uno de los métodos descritos en la norma NLT 105/98.

3.2.14.3 Procedimiento

Se realiza la división de la muestra en 8-10 partes. Se toma una de las partes y se realiza un elipsoide. Se mueve entre la superficie lisa y las dos primeras falanges o, en su defecto, de la palma de la mano, imprimiendo la presión necesaria y realizando un movimiento hacia atrás y adelante un número de 80-90 veces por minuto. Se debe conseguir un diámetro de 3 mm en aproximadamente 2 minutos de tiempo.

En el caso de que, tras el tiempo indicado, el cilindro no presente grietas, se repite el elipsoide y el cilindro un número determinado de veces hasta lograr que se agriete con 3 mm de diámetro. En el momento que se obtenga un cilindro con dicho diámetro agrietado se introduce en un pesasustancias tarado y se tapa a continuación.

Si se produce el agrietado antes de lograr llegar a los 3 mm de diámetro, se puede emplear dicha porción, siempre que en intentos anteriores si se lograra llegar a cilindros de 3 mm.

Se repite el ensayo las veces necesarias hasta lograr poseer dentro del pesasustancias una masa de 6 g, aproximadamente. Se realiza la determinación de la humedad siguiendo para ello lo descrito en la norma NLT 102/98.

Se repite el ensayo otra vez, tantas veces como sea necesario, hasta lograr que en otro pesasustancias se posean 6 g, aproximadamente, de suelo ensayado. Se realiza la determinación de la humedad del mismo modo que en el apartado anterior.

3.2.15 Ensayo de compactación. Proctor normal (Norma UNE 103-500-94)

3.2.15.1 Aparatos y material necesario

- **MOLDE CILÍNDRICO DE METAL:** con unas dimensiones de $(102\pm 0,4)$ mm de diámetro interior y $(122,4\pm 0,1)$ mm de altura, lo que se traduce a un volumen de, aproximadamente, 1000 cm^3 . Se ha de poseer también un collar con el mismo diámetro y una altura de alrededor de 60 mm, para que sea colocado en la parte superior del molde cuando se realicen las operaciones de apisonado pertinentes. La construcción del molde y del collar permitirá que éstos se fijen rígidamente a la base plana desmontable. El molde podrá estar realizado de una pieza o poseer dos mitades que lo dividan longitudinalmente.



ILUSTRACIÓN 21: MOLDE (IZQUIERDA) Y COLLAR (DERECHA) PARA PROCTOR NORMAL
(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)



ILUSTRACIÓN 22: MOLDE Y COLLAR MONTADOS

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

- **MAZA METÁLICA:** con un peso de $(2,5 \pm 0,01)$ kg que se acople a una guía que imprima una altura de caída libre de (305 ± 2) mm. La maza puede ser manual, en ese caso deberá poseer un diámetro de $(50 \pm 0,2)$ mm y la guía tener un mínimo de 4 orificios con 1 cm de diámetro y separados 90° a 2 cm de cada extremo. La separación que ha de existir entre la maza y la guía deberá ser tal, que permita la caída libre. Otro modelo de maza puede ser automática, en este caso se reparten los golpes de manera homogénea por toda la superficie del material; en el supuesto de encontrarse en este caso la superficie de contacto entre la maza y el suelo puede ser de forma circular o de sector, pero conservando en todo momento la altura de caída y superficie de $(19,6 \pm 0,2)$ cm.



ILUSTRACIÓN 23: MAZA PARA PROCTOR NORMAL

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

- **BALANZA:** con capacidad para 20 kg y sensibilidad de 1 g y capacidad para 1 kg y sensibilidad de 0,1 g.

- **RECIPIENTES ADECUADOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD**
- **ESTUFA DE DESECACIÓN:** con temperatura que se pueda regular hasta 115°C.
- **AMASADORA MECÁNICA O INSTRUMENTOS PARA AMASAR MANUALMENTE**
- **TAMICES DE 50; 20 Y 5 mm**
- **ENRASADOR:** ha de poseer un borde afilado, resistente y metálico además de tener una longitud que sea superior al diámetro del molde.
- **CUARTEADORES**
- **MAZO DE GOMA Y PALETA**
- **PROBETA GRADUADA**
- **OPCIONALMENTE, EXTRACTOR DE MUESTRAS**

3.2.15.2 Preparación de la muestra

En el caso de encontrarse el suelo húmedo, se debe proceder al secado del material por medio de una estufa o al aire libre, pero teniendo cuidado de no superar una temperatura de 60°C. Después de secar la muestra se disgregan los terrones con ayuda de un mazo de goma.

Una vez que se tenga el suelo seco y disgregado se toman, con ayuda de cuarteadores, 15 kg de suelo que atraviese el tamiz 20,0 mm. Se pesa la muestra objeto de ensayo y la que quedó retenida en el tamiz para determinar qué proporción del total de suelo representa dicha fracción.

Se separa, por medio de cuarteo, porciones de muestra de 2,5 kg.

En el caso de querer realizarse a continuación de este ensayo, el de ensayo C.B.R, se puede realizar el cambio del material que ha quedado retenido en el tamiz de 20,0 mm por una cantidad de material igual que quede retenida en el tamiz de 5,0 mm y pase el tamiz de 20,0 mm.

3.2.15.3 Procedimiento operatorio

Se realiza el cálculo del volumen del molde, de manera periódica, en cm^3 . Además de obtener la masa del molde superior con la base y sin el collar que se coloca en la parte superior.

Se coge una de las fracciones de ensayo que previamente se han obtenido y se mezcla con cierta cantidad de agua hasta que la mezcla sea homogénea. El amasado de la muestra puede realizarse por medio de métodos mecánicos o manualmente.

Se rellena el molde, previa colocación del collar, con la mezcla de agua y suelo realizando tres capas que presenten un espesor aproximadamente igual, para realizar este paso se ha de lograr que cuando se introduzca una capa en el molde, y tras proceder a su compresión, el espesor resultante sea igual a un tercio de la altura del molde. Dicha compresión se consigue realizando 26 golpes de la maza que se repartirán de forma uniforme por toda la superficie de contacto. Cuando se realice la compactación de la última capa, ésta deberá quedar 1 cm dentro del collar superior.

Cuando se finaliza el proceso de compactación, se quita el collar y se enrasa el suelo a la altura del molde. A continuación se pesa el conjunto formado por el molde y el suelo que se encuentra dentro del mismo.

Se retira el suelo del molde abriéndolo, en el caso de que el molde permita realizar dicha operación, o con ayuda de un extractor, en caso de que el molde fuera de una sola pieza.

Se divide de manera vertical por la mitad y se obtiene una muestra del centro con una masa, como mínimo, de 100 g que se empleará para la determinación de la humedad siguiendo, para ello, la norma UNE 103-300.

El procedimiento que se ha explicado en este apartado se repite tantas veces como sean necesarias para la obtención de los puntos que sean precisos para la representación gráfica de la curva que relaciona las densidades secas obtenidas con las humedades que le corresponden. Para la realización de las repeticiones del ensayo que añada al suelo una porción de agua distinta cada vez.

3.2.16 Apisonado Proctor normal (Norma NLT 107/98)

3.2.16.1 Aparato y material necesario

- **MOLDE CILÍNDRICO:** estará realizado en metal, con un diámetro interior de $(102\pm 0,4)$ mm y una altura de $(122,4\pm 0,1)$ mm, lo que le confiere un volumen aproximado de 1000 cm^3 . Además se debe poseer un collar con el mismo diámetro que presenta el molde y con una altura de 60 mm, aproximadamente, que se ha de colocar en la zona superior cuando se realice las operaciones de apisonado. El diseño del collar y del molde debe permitir que se sujeten a la base. El molde podrá estar realizado de una sola pieza o dividido de manera longitudinal en dos partes iguales.
- **MAZA METÁLICA:** presentará un peso de $(2,5\pm 0,01)$ kg y se deberá acoplar a una guía que se empleará para efectuar la caída libre desde una altura de (305 ± 2) mm. La maza podrá ser manual, en este caso tendrá un diámetro de $(50\pm 0,2)$ mm y en la guía se observarán 4 orificios con 1 cm de diámetro y distados 90° a 2 cm de cada uno de los extremos. La separación que debe observarse entre la maza y la guía ha de permitir la caída libre; puede emplearse una maza automática, ésta distribuye los golpes de forma uniforme por toda la superficie del molde, en caso de poseer esta maza la superficie de contacto que debe existir será circular o sectorial pero, en todo momento, deberá conservar la superficie de $(19,6\pm 0,2)\text{ cm}^2$, la altura de caída y la masa.
- **BALANZA:** una de ellas con una capacidad para 20 kg y una sensibilidad de 1 g y la otra de ellas con una capacidad para 1 kg y una sensibilidad de 0,1 g.
- **RECIPIENTES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD**
- **ESTUFA DE DESECACIÓN:** que no supere una temperatura de 115°C .
- **AMASADORA MECÁNICA O INSTRUMENTOS PARA REALIZAR EL AMASADO DE FORMA MANUAL**
- **TAMICES CON ABERTURAS 50: 20 Y 5 mm**
- **ENRASADOR METÁLICO**
- **CUARTEADOR**
- **MAZO DE GOMA Y PALETA**
- **PROBETA GRADUADA**

- **OPCIONALMENTE, EXTRACTOR DE MUESTRAS:** se empleará para la extracción del material compactado dentro del molde, en el caso de que éste sea de una sola pieza.

3.2.16.2 Preparación de la muestra

En el caso de encontrarse con el suelo a ensayar con excesiva humedad se procede a dejarlo secar con ayuda de una estufa, que no alcance los 60°C, o al aire libre hasta lograr que se puedan desmenuzar los terrones con ayuda de un mazo de goma.

Se toma una muestra de ensayo de 15 kg de suelo que atraviese el tamiz de 20,0 mm, calculando cuanto supone al total de la muestra la masa que se queda retenida en dicho tamiz. En el caso de que la fracción retenida en el tamiz represente más del 30% de la masa total o existan partículas de granulometría superior a 50 mm, el suelo no será válido para la ejecución de este ensayo. Se cuartea la masa total de ensayo en porciones de 2,5 kg, aproximadamente.

En el caso de quererse conservar la misma proporción de gruesos que presenta la muestra original, casuística que puede darse en el caso de querer realizar el ensayo de C.B.R., se puede sustituir la muestra que se queda retenida en el tamiz por una muestra de igual peso de una granulometría comprendida entre 5,0 y 20,0 mm.

3.2.16.3 Procedimiento

Se ha de determinar el volumen que presenta el molde de forma periódica, además de determinar, también, la masa que posee el molde con la base y sin el collar.

Se coge una porción de ensayo y se le adiciona agua hasta que se forme una masa homogénea. Este paso se puede realizar con la ayuda de una amasadora mecánica o a mano.

Se realiza el llenado del molde, previa colocación del collar, con la mezcla del suelo y agua, se deben realizar tres capas de, aproximadamente, el mismo espesor, de manera que, cuando se haya realizado la compactación, la capa presente una altura algo superior a un tercio de la altura del molde. La compactación citada anteriormente se realiza aplicando 26 golpes, repartidos de forma uniforme.

Cuando se realice la compactación de la última capa, la altura de ésta ha de quedar 1 cm dentro del cuello del molde.

Cuando se finalicen las compactaciones, se quita el cuello y se enrasa el suelo a nivel con el molde y se pesa el conjunto formado por la muestra de ensayo y el molde.

Se retira el suelo del interior del molde siguiendo un modo diferente dependiendo del tipo de molde que se posea, en el caso de tenerse un molde de una sola pieza se extrae el suelo con ayuda de un extractor y en caso de poseerse un molde con abertura longitudinal se abre el molde y se retira el material; a continuación se divide la muestra por la mitad y se toma de la zona central una porción de 100 g para determinar con ella la humedad que posee.

Se realiza el ensayo de la manera que se ha descrito anteriormente tantas veces sean necesarias para representarse en la grafica una curva que permita obtener la densidad seca máxima y la humedad óptima que le corresponda. Para efectuar una repetición de ensayo se debe variar la cantidad de agua que se añade al suelo.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente apartado se procederá a exponer, previa explicación de cómo se deben realizar los cálculos extraídos en todos los casos de la norma pertinente, cuáles han sido los resultados que se han obtenido tras haber realizado los ensayos que se han explicado en el apartado anterior.

Cabe destacar que las hojas de datos de ensayo a las que hacen referencia algunos de los ensayos se agruparán todas en un anejo, que aparecerá al final de este trabajo.

4.1 Determinación de granulometría por tamizado (Norma UNE EN 933-1)

4.1.1 *Cálculo y expresión de los resultados*

- **CÁLCULO:** las masas que se han ido anotando a lo largo del ensayo se vuelcan en las hojas de resultados de ensayos, como ejemplo de dichas hojas se puede observar el Anexo C de la norma en la que se está basando el ensayo.

GRANULOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS MÉTODO DEL TAMIZADO DE LA NORMA EN 933-1	Laboratorio:
Identificación de la muestra	Fecha de recepción de la muestra: Técnico:
Método utilizado: lavado y tamizado / tamizado en vía seca (tachar el que no corresponda)	

Masa seca total, $M_1 =$ (o $M_1' =$ véase anexo B)

Masa seca tras lavado, $M_2 =$

Masa seca de los finos eliminados mediante lavado, $M_1 - M_2 =$

Tamaño de abertura del tamiz mm	Masa de material retenido R_i kg	Porcentaje de material retenido $100 \times R_i / M_1$ (% en masa)	Porcentajes acumulados que pasan $100 - \Sigma(100 \times R_i / M_1)$ (% en masa)
	R_1 R_2		(redondeado al número entero más próximo)
Material en la bandeja del fondo	P		

<p>Porcentaje de finos que pasan por el tamiz de 0,063 mm, $f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100$</p> <p>Para tamizado en vía seca, $f = \frac{100P}{M_1}$ (redondeado al decimal más próximo)</p>
--

$\Sigma R_i + P =$	Comentarios:
$\frac{M_2 - (\Sigma R_i + P)}{M_2} \times 100 =$ < 1%	

La masa seca de la porción de ensayo debería registrarse como M_1 cuando se determine directamente o como M_1' cuando se calcule a partir de una muestra de ensayo duplicada.

ILUSTRACIÓN 24: EJEMPLO DE HOJAS DE DATOS DE ENSAYO

(FUENTE: NORMA UNE EN 933-1)

La masa que se queda retenida en cada tamiz se calcula como porcentaje de la masa inicial seca M_1 .

Se realiza el cálculo del porcentaje acumulativo del peso de la muestra seca inicial que atraviesa cada tamiz, excluyendo el tamiz de 0,063 mm.

El porcentaje de finos f que atraviesa el tamiz de 0,063 mm se realiza siguiendo la expresión:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} * 100$$

Donde:

- \underline{M}_1 : masa seca de la fracción a ensayar, en kg.
- \underline{M}_2 : masa seca retenida en el tamiz 0,063 mm, en kg.
- \underline{P} : masa de la porción que queda sobre el fondo, en kg.

Para el tamizado en vía seca la expresión a emplear es:

$$f = \frac{100 * P}{M_1}$$

- **VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS:** en caso de obtenerse una diferencia de más del 1% del peso de M_2 en la suma de las masas R_i y P , el ensayo se debe repetir, siendo R_i la suma de todas las masas que han quedado retenidas en cada uno de los tamices.

4.1.2 Resultados obtenidos

Los valores que aparecen en esta tabla se han obtenido después de la realización de los ensayos de granulometría (Norma UNE EN 933-1) e índice de lajas (Norma UNE EN 933-3), pues en la ejecución del ensayo de granulometría las fracciones granulométricas comprendidas entre 40 mm y 8 mm que aparecen en dicha tabla no son las mismas fracciones que se indican en la norma, por lo que, atendiendo a los valores que se obtuvieron para el ensayo de índice de lajas, en el que si se emplearon los tamices necesarios, se pueden llegar a conocer las cantidades que quedarían retenidas en cada una de las fracciones granulométricas que se precisan para comparar con la norma.

TABLA 31: RESULTADOS DE GRANULOMETRÍA (NORMA UNE EN 933-1)

MATERIAL	ABERTURA DE LOS TAMICES UNE-EN 933-2 (mm)									
	40	32	20	12,5	8	4	2	0,500	0,250	0,063
ZAHORRA ARTIFICIAL		100	99	66	51	42	38	29	18	4
100% RECICLADO		100	92	73	59	42	32	18	9	1
MIXTO CERÁMICO		100	88	74	59	42	32	17	10	0

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

Para saber qué tipo de zahorra es cada uno de los materiales que se están ensayando, se comparan los porcentajes de cada una de las fracciones granulométricas obtenidas en el ensayo con los presentes en la siguiente tabla, obteniéndose los siguientes resultados:

TABLA 32: COMPARACIÓN DEL TIPO DE ZAHORRA ZA 0/32

TIPO DE ZAHORRA	ABERTURA DE LOS TAMICES UNE-EN 933-2 (mm)									
	40	32	20	12,5	8	4	2	0,500	0,250	0,063
ZAHORRA ZA 0/32	100	88-100	65-90	52-76	40-63	26-45	15-32	7-21	4-16	0-9
MATERIAL										
ZAHORRA ARTIFICIAL		100	99	66	51	42	38	29	18	4
100% RECICLADO		100	92	73	59	42	32	18	9	1
MIXTO CERÁMICO		100	88	74	59	42	32	17	10	0

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

En la tabla anterior, se puede observar como para el material mixto cerámico se cumplen los porcentajes del tipo de zahorra ZA 0/32 para todas las aberturas de tamices, mientras que para el 100% reciclado y la zahorra artificial se cumplen parcialmente, siendo esta parcialidad menor en el caso del material procedente de hormigón, pues en ese caso solo se deja de cumplir en una de ellas.

Se puede determinar que el material mixto cerámico se puede encuadrar dentro del tipo de zahorra ZA 0/32. Así mismo, se puede determinar que, al solo dejar de cumplir una de las fracciones granulométricas, se puede encuadrar también en este tipo de zahorra el material 100% reciclado.

TABLA 33: COMPARACIÓN DEL TIPO DE ZAHORRA ZA 0/20

TIPO DE ZAHORRA	ABERTURA DE LOS TAMICES UNE-EN 933-2 (mm)									
	40	32	20	12,5	8	4	2	0,500	0,250	0,063
ZA 0/20		100	75-100	60-86	45-73	31-54	20-40	9-24	5-18	0-9
MATERIAL										
ZAHORRA ARTIFICIAL		100	99	66	51	42	38	29	18	4
100% RECICLADO		100	92	73	59	42	32	18	9	1
MIXTO CERÁMICO		100	88	74	59	42	32	17	10	0

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

En la tabla que se encuentra sobre estas líneas, se puede observar como para los materiales 100% reciclado y mixto cerámico se cumplen las exigencias de cada una de las fracciones granulométricas, por lo que estos materiales se pueden encuadrar dentro del tipo de zahorra ZA 0/20.

Se deben destacar dos cosas; la primera, que en la tabla anterior se puede observar como el material mixto cerámico también cumplía para ese tipo de zahorra por lo que este material se podría clasificar en cualquiera de los dos tipos de zahorras, y la segunda, que para la zahorra artificial solo se dejan de cumplir las exigencias marcadas por la normativa en una de las fracciones granulométricas estudiadas, por lo que se podría considerar, en el caso de que no cumpliera totalmente para ninguno de los tres casos, encuadrar a la zahorra artificial dentro de este tipo.

Lo que se puede determinar de esta tabla es que los materiales 100% reciclado y mixto cerámico se pueden clasificar como zahorras tipo ZA 0/20.

TABLA 34: COMPARACIÓN DEL TIPO DE ZAHORRA ZAD 0/20

TIPO DE ZAHORRA	ABERTURA DE LOS TAMICES UNE-EN 933-2 (mm)									
	40	32	20	12,5	8	4	2	0,500	0,250	0,063
ZAD 0/20		100	65-100	47-78	30-58	14-37	0-15	0-6	0-4	0-2
MATERIAL										
ZAHORRA ARTIFICIAL		100	99	66	51	42	38	29	18	4
100% RECICLADO		100	92	73	59	42	32	18	9	1
MIXTO CERÁMICO		100	88	74	59	42	32	17	10	0

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

En esta tabla de tipos de zavorras, se puede observar como ninguno de los tres materiales ensayados cumpliría con las exigencias para este tipo, pues las fracciones en las que no se cumplen los parámetros pedidos son elevadas en los tres casos.

Como se dijo para la zavorra artificial en el caso anterior, al no cumplirse totalmente las exigencias en ninguno de los tres tipos de zavorras indicados en la norma, y observándose como el tipo en el que menos fracciones se incumplen corresponde con el tipo de zavorra ZA 0/20, se procederá a clasificarla dentro de ese grupo. Por lo que los materiales ensayados quedan clasificados de la siguiente manera:

- **ZAHORRA ARTIFICIAL:** tipo de zavorra ZA 0/20.
- **100% RECICLADO:** tipo de zavorra ZA 0/20 y ZA 0/32.
- **MIXTO CERÁMICO:** tipo de zavorra ZA 0/20 y ZA 0/32.

Además de comprobar que la granulometría que se exige en la normativa, que en todos los casos será el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), se debe comprobar el contenido de finos que poseen los tres materiales ensayados, para ello se debe comprobar que lo atravesado por el tamiz de abertura 0,063 mm es menor del 1% en masa, con respecto a la masa total, por ello:

TABLA 35: RESULTADOS DE CONTENIDO DE FINOS (NORMA UNE EN 933-1) Y COMPARACIÓN CON LA NORMATIVA

Material	Normativa
	<1%
Zavorra artificial	6
100% reciclado	7
Mixto cerámico	11

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

A la vista de los resultados que se han obtenido una vez realizado el ensayo de granulometría, en lo respectivo a la fracción que atraviesa el tamiz de 0,063 mm, se puede determinar que ninguno de los tres materiales ensayados cumple con la normativa, pues en todos los casos el valor que se obtiene es superior al 1% que indica como máximo la norma.

Para intentar sufragar este incumplimiento de la normativa, en futuros trabajos se podría realizar el tamizado del material para que, de esta manera, descendiera el porcentaje de finos presentes en la muestra y, seguidamente volver a estudiar los resultados que se obtendrían con la nueva granulometría que presentarían los materiales.

4.2 Índice de lajas (Norma UNE EN 933-3, Marzo 2012)

4.2.1 Cálculo y expresión de los resultados

Los resultados que se obtengan al realizar el ensayo se deben registrar en hojas de ensayo, como la presente en la ilustración siguiente. Se realiza el cálculo de la suma de los pesos de las fracciones granulométricas obtenidas y se apunta la masa como M_1 .

Índice de lajas		Laboratorio:		
EN 933-3				
Identificación de la muestra:		Fecha de recepción:		
		Técnico de laboratorio:		
Masa de la porción de ensayo $M_0 =$ g		Masa retenida por el tamiz de 100 mm = g		
		Masa que pasa por el tamiz de 4 mm = g		
		—		
		Suma de las masas rechazadas = g		
Tamizado con tamices de ensayo		Cribado con tamices de barras		
Fracción granulométrica d_i/D_i mm	Masa (R_i) de la fracción granulométrica d_i/D_i g	Anchura nominal de las ranuras de los tamices de barras mm	Masa que pasa por el tamiz de barras (m_i) g	II_i $= (m_i/R_i) \times 100$
80/100		50		
63/80		40		
50/63		31,5		
40/50		25		
31,5/40		20		
25/31,5		16		
20/25		12,5		
16/20		10		
12,5/16		8		

10/12,5		6,3	
8/10		5	
6,3/8		4	
5/6,3		3,15	
4/5		2,5	
$M_1 = \sum R_i =$		$M_2 = \sum m_i =$	
$IL = (M_2/M_1) \times 100 =$			
$100 \times \frac{M_0 - \left\{ \sum R_i + \sum (\text{masas rechazadas}) + \sum (\text{masas de las fracciones no sometidas a ensayo}) \right\}}{M_0} < 1\%$			

ILUSTRACIÓN 25: EJEMPLO DE HOJA DE RESULTADOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE LAJAS
(FUENTE: NORMA UNE EN 933-3)

Se realiza el sumatorio de los pesos de las fracciones granulométricas que atraviesan los tamices de barras que presentan una anchura de las ranuras con una distancia la mitad del tamiz mayor y se anota la masa como M_2 .

El cálculo del índice de lajas global (IL) se realiza por medio de la siguiente expresión:

$$IL = \left(\frac{M_1}{M_2} \right) * 100$$

Donde:

- **M_1** : corresponde con el sumatorio de las masas de las fracciones granulométricas, en gramos.
- **M_2** : corresponde con el sumatorio de las masas del material que atraviesa los tamices de barras con una anchura igual a la mitad de la distancia entre las barras del tamiz mayor en cada una de las fracciones granulométricas, en gramos.

El valor del índice de lajas global se ha de anotar después de realizar el redondeo al número entero más próximo.

El índice de lajas que se observa en cada una de las fracciones granulométricas (IL_i) se calcula, en los casos en los que sea necesario, por medio de la siguiente ecuación:

$$IL_i = \left(\frac{m_i}{R_i} \right) * 100$$

Donde:

- m_i : corresponde con el peso de cada una de las fracciones granulométricas, en gramos.
- R_i : corresponde con el peso del material de cada una de las fracciones granulométricas que atraviesan los tamices de barras correspondiente a una anchura igual a la mitad de la distancia entre las barras del tamiz mayor en cada una de las fracciones granulométricas, en gramos.

Si al realizar el sumatorio de las masas R_i con los pesos de cualquiera de las fracciones descartadas y cualquiera de las fracciones no ensayadas, este se diferencia en un 1% de la masa M_0 , el ensayo ha de repetirse con otra fracción de ensayo.

4.2.2 Resultados obtenidos

Después de haberse ejecutado el ensayo, se han obtenido los siguientes resultados:

TABLA 36: RESULTADOS DEL ENSAYO ÍNDICE DE LAJAS Y COMPARACIÓN CON LA NORMATIVA (UNE EN 933-3)

	ZAHORRA ARTIFICIAL	100 % RECICLADO	MIXTO CERÁMICO	NORMATIVA
FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA d_i/D_i mm	$IL_i = \left(\frac{m_i}{R_i} \right) * 100$			
80/100	0	0	0	≤35
63/80	0	0	0	
50/63	0	0	0	
40/50	0	0	0	
31,5/40	0	0	0	
25/31,5	0	0	40	
20/25	7	9	30	
16/20	6	5	22	
12,5/16	8	6	19	
10/12,5	8	6	7	
8/10	8	6	15	
6,3/8	11	5	18	
5/6,3	11	5	14	
4/5	12	1	7	

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

Realizando la comparación de los valores obtenidos con el valor presente en la norma se puede observar, según aparece en la tabla anterior, como, en el caso de la zahorra artificial y el material 100% reciclado de hormigón, cumple con dicho valor en todas las fracciones granulométricas, mientras que en el material mixto cerámico en la única fracción granulométrica que no cumple es en la correspondiente a 25/31,5 mm, es decir, en la que el material que atraviesa el tamiz de 31,5 mm y queda retenido en el tamiz de 25 mm.

4.3 Determinación del porcentaje de caras de fractura (Norma UNE EN 933-5, Febrero 1999)

4.3.1 Cálculo y expresión de los resultados

- **MUESTRAS DE ENSAYO CON D_{s2d}**: se apuntan todas las masas obtenidas a lo largo del ensayo en la hoja de datos del ensayo, se puede observar un ejemplo en la ilustración que aparece al final de este apartado, y se realiza el cálculo del porcentaje C de las partículas existentes en cada grupo por medio de la siguiente expresión:

$$C_{(c,r,tcotr)} = \left(\frac{M_{(c,r,tcotr)}}{M_1} \right) * 100$$

Donde:

- M_(c, r, tr o tr): corresponde con las masas de las partículas trituradas, redondeadas, totalmente trituradas y totalmente redondeadas, respectivamente, que se han obtenido a la hora de realizar el ensayo, expresada en gramos.
- M₁: corresponde con la masa total del ensayo, expresada en gramos.

Se apuntan los valores que se obtienen después de realizar el cálculo redondeando dicho valor al número entero más próximo.

EN 933-5	Laboratorio:
Identificación de la muestra:	Fecha:
	Operador:

$$M_o = \text{ g }$$

Fracción granulométrica d/D con $D \leq 2d$ mm	Masa M_i g	Masas g		Porcentajes redondeados al entero más próximo %	
		M_c	M_r	C_c	C_r
		Incluyendo M_{ic}	Incluyendo M_{ir}	Incluyendo C_{ic}	Incluyendo C_{ir}

Validación de la retención de masas:

$100 \times \frac{M_i - (M_c + M_r)}{M_i} =$	<1%
--	-----

ILUSTRACIÓN 26: EJEMPLO DE HOJA DE RESULTADOS DEL ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE CARAS DE FRACTURA

(FUENTE: NORMA UNE EN 933-5)

- MUESTRAS DE ENSAYO CON $D > 2d$:

- **FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS NO REDUCIDAS:** en caso de no haberse realizado ninguna reducción en las fracciones granulométricas se realiza el cálculo del porcentaje de cada una de las partículas de cada grupo por medio de la siguiente expresión:

$$C_{(c,r,tcotr)} = \left(\frac{\sum M_{(c,r,tcotr)}}{\sum M_{1i}} \right) * 100$$

Donde:

$\sum M_{(c,r,tcotr)}$: corresponde con el sumatorio de las masas de las partículas trituradas, redondeadas, totalmente trituradas y totalmente redondeadas, respectivamente, que se han obtenido a la hora de realizar el ensayo, expresada en gramos.

$\sum M_{1i}$: corresponde con el sumatorio de la masa total del ensayo, expresada en gramos.

Se apuntan los valores que se obtienen después de realizar el cálculo redondeando dicho valor al número entero más próximo.

- FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS REDUCIDAS: en caso de haberse realizado alguna reducción en las fracciones granulométricas empleadas en el ensayo se calcula el porcentaje de cada una de las partículas de cada grupo referido a la masa de cada fracción granulométrica.

Se calcula el valor medio ponderado del porcentaje global para uno de los grupos sobre los que se ha realizado el ensayo empleando la siguiente expresión:

$$C_{(c,r,tcotr)} = \left(\frac{\sum V_i C_{(c,r,tcotr)}}{\sum V_i} \right)$$

Donde:

$C_{(c, r, tr o tr)}$: corresponde con las masas de las partículas trituradas, redondeadas, totalmente trituradas y totalmente redondeadas, respectivamente, que se han obtenido a la hora de realizar el ensayo, expresada en gramos.

V_i : corresponde con la masa total del ensayo, expresada en gramos.

Se apuntan los valores que se obtienen después de realizar el cálculo redondeando dicho valor al número entero más próximo.

4.3.2 Resultados obtenidos

Primero se van a abordar los parámetros correspondientes a las partículas total o parcialmente trituradas, y se procederá a continuación con los parámetros de partículas totalmente redondeadas.

Donde, en las tablas que aparecen a continuación:

- C_c : corresponde a las partículas parcialmente trituradas.
- C_{tc} : corresponde a las partículas totalmente trituradas.
- C_{tr} : corresponde a las partículas totalmente redondeadas.

TABLA 37: RESUMEN RESULTADOS DE PARTÍCULAS TOTAL Y PARCIALMENTE TRITURADAS

MATERIAL	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO					
	T00 A T0		T1 A T2 Y ARCENES T00 A T0		T3 A T4 Y RESTO DE ARCENES	
	100		≥70		≥50	
	C _c	C _{tc}	C _c	C _{tc}	C _c	C _{tc}
ZAHORRA ARTIFICIAL	80	65	80	65	80	65
100 % RECICLADO	75	55	75	55	75	55
MIXTO CERÁMICO	86	77	86	77	86	77

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

Observando los valores que se han obtenido para las partículas total o parcialmente trituradas en los tres materiales ensayados se puede determinar que ninguno de los materiales cumpliría con el mínimo exigido por normativa para la categoría de tráfico pesado T00 a T0, pues en todos los materiales tanto para total o como para parcialmente trituradas el valor obtenido es inferior al 100%, si bien es cierto que no existen demasiados caminos rurales, por no decir casi ninguno, que presente esta categoría de tráfico pesado.

Para las categorías de tráfico pesado de T1 a T2 y arcenes de T00 a T0 los valores obtenidos para los tres materiales de partículas parcialmente trituradas cumplen con lo indicado en la norma, puesto que el valor es superior al 70%, no es así en el caso de las partículas totalmente trituradas pues ese valor solo se supera en el caso del mixto cerámico.

Para las categorías de tráfico pesado T3 a T4 y el resto de arcenes, como el valor que se debe alcanzar es un porcentaje de partículas, total o parcialmente trituradas, mayor del 50%, se cumple en todos los casos.

TABLA 38: RESUMEN RESULTADOS DE PARTÍCULAS TOTALMENTE REDONDEADAS

MATERIAL	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
	T00 A T0	T1 A T2 Y ARCENES T00 A T0	T3 A T4 Y RESTO DE ARCENES
	0	≤10	≤10
	C _{tc}	C _{tc}	C _{tc}
ZAHORRA ARTIFICIAL	13	13	13
100 % RECICLADO	15	15	15
MIXTO CERÁMICO	8	8	8

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

En el caso de las partículas totalmente redondeadas, la comparación de los resultados con la normativa es la siguiente. Como en el caso anterior, para la categoría de tráfico pesado T00 a T0 ninguno de los tres materiales ensayados cumple la exigencia de presentar un 0% de partículas totalmente redondeadas. En el caso de la categoría de tráfico pesado de T1 a T2 y arcenes de T00 a T0 solo se cumple en el caso del mixto cerámico, en el resto de casos el valor obtenido en el ensayo es superior al 10% que exige la norma como máximo. Y lo mismo pasa si se consultan las categorías de tráfico T3 a T4 y el resto de arcenes, donde la exigencia de la norma es igual, es decir, menor del 10%, por lo que solo cumple el material mixto cerámico.

4.4 Ensayo del equivalente de arena (Norma UNE EN 933-8, Noviembre 2015)

4.4.1 Cálculos y expresión de los resultados

Se realiza el cálculo de la relación existente entre h_1 y h_2 por medio de la siguiente expresión, dando el resultado con una precisión de una cifra decimal:

$$\left(\frac{h_2}{h_1}\right) * 100$$

El ensayo se ha de repetir en caso de que los valores obtenidos varíen más de 4.

Se realiza el cálculo del valor de equivalente de arena SE(10) por medio de calcular la media de los valores que toma la relación antes mencionada que se ha obtenido para cada probeta sobre la que se ha realizado en ensayo, el resultado obtenido se anota y se redondea al número entero más próximo.

EN 933-8	Laboratorio:
Identificación de la muestra:	Fecha:
	Operario:

Contenido en agua w	%
Masa M_1	g
Masa M_2	g
Masa M_3 (si se utiliza)	g
Contenido en finos f	%

	1ª muestra de ensayo	2ª muestra de ensayo
Masa de la muestra de ensayo M_T g		
h_1 mm		
h_2 mm		
$100 \times (h_2/h_1)$ (con una cifra decimal)		
NOTA Los valores de $100 \times (h_2/h_1)$ de las dos muestras de ensayo no deberían diferir en más de 4.		

Valor del equivalente de arena $SE(10)$ – la media de los valores: $100 \times (h_2/h_1)$ para las dos muestras de ensayo.

$SE(10) =$ (se redondea al número entero más próximo)

ILUSTRACIÓN 27: EJEMPLO DE HOJA DE DATOS DEL ENSAYO

(FUENTE: NORMA UNE EN 933-8)

4.4.2 Resultados obtenidos

Una vez realizado el ensayo correspondiente, se obtienen los siguientes resultados para cada uno de los materiales escogidos.

En la siguiente tabla aparecen los resultados obtenidos enfrentados al valor mínimo exigido por normativa para este parámetro:

TABLA 39: RESULTADOS DEL ENSAYO DE EQUIVALENTE EN ARENA (NORMA UNE EN 933-8) Y COMPARACIÓN CON LA NORMATIVA

MATERIAL	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
	T00 a T0	T1 a T2 y ARCENES T00 a T0	T3 a T4 y RESTO de ARCENES
	>40	>35	>30
ZAHORRA ARTIFICIAL	45	45	45
100% RECICLADO	76	76	76
MIXTO CERÁMICO	67	67	67

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

A la vista de los resultados, se puede deducir que en los tres materiales se cumple con la normativa, pues el valor que se ha obtenido, después de ejecutado el ensayo, supera el valor mínimo exigido por la normativa.

4.5 Ensayo de Los Ángeles (Norma UNE EN 1097-2, Septiembre 2010)

4.5.1 Cálculo y expresión de los resultados

Para realizar el cálculo del coeficiente de Los Ángeles, se debe aplicar la siguiente fórmula

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$

Donde m corresponde con la masa que es retenida en el tamiz de 1,6 mm, expresada en gramos.

El valor obtenido anteriormente se aproxima al número entero más próximo.

4.5.2 Resultados obtenidos

Después de realizarse el ensayo de Los Ángeles, se ha llegado a los resultados que aparecen en la tabla siguiente. En dicha tabla los valores obtenidos se comparan con los valores máximos que exige la norma.

TABLA 40: RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE LOS ÁNGELES (NORMA UNE EN 1097-2) Y COMPARACIÓN CON LA NORMATIVA

MATERIAL	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	
	T00 A T2	T3, T4 Y ARCENES
	≤30	≤35
ZAHORRA ARTIFICIAL	26	26
100% RECICLADO	35	35
MIXTO CERÁMICO	39	39

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

Como ya se dijo en el párrafo anterior, en esta tabla aparecen enfrentados los valores de la normativa con los valores que se han obtenido para cada uno de los tres materiales ensayados, por ello, se puede determinar que el único material que cumple para todas las categorías de tráfico pesado sería la zahorra artificial, pues en ambos casos el valor obtenido es inferior al máximo permitido.

En el caso del material 100% reciclado de hormigón, solo se cumpliría la norma en el caso de categoría de tráfico pesado T3 a T4 y arcenes, pues el valor obtenido es justamente el valor máximo permitido por normativa.

Por último, para el material Mixto cerámico, procedente de residuos de construcción y demolición, no se cumpliría la norma para ninguna de las categorías de tráfico pesado.

4.6 Determinación del límite líquido (Norma UNE 103-103)

4.6.1 *Resultados*

Se toman los valores de golpes obtenidos en los dos casos y se trasladan a una gráfica en la que en el eje de abscisas se encuentre el número de golpes y en el eje de ordenadas se encuentre la humedad, ambos ejes con escala logarítmica.

Se realiza el trazado de una línea paralela a la línea de trazos presente en la gráfica, de manera que se encuentre a una distancia igual de los dos puntos referenciados.

La humedad obtenida del punto en el que cruza dicha línea con la ordenada que corresponde con 25 golpes, es el límite líquido, para su expresión se ha de tomar una cifra decimal y no añadir tanto por ciento al final.

En el caso de que la recta se encontrara alejada demasiado de los puntos antes mencionados se ha de realizar una tercera determinación para, de este modo, comprobar si existiera algún error en los valores obtenidos o se estuviera delante de un suelo que no siguiera la ley indicada; en este caso se realizaría una recta que se adapte de la mejor manera a los puntos representados.

ANEXO A (Informativo)
MODELO DE IMPRESO PARA EXPRESIÓN DE RESULTADOS

LIMITE LIQUIDO					LIMITE PLASTICO				
Número de golpes									
Toro número									
Toro + Suelo + Agua									
Toro + Suelo									
Toro									
Suelo									
Agua									
% Humedad									

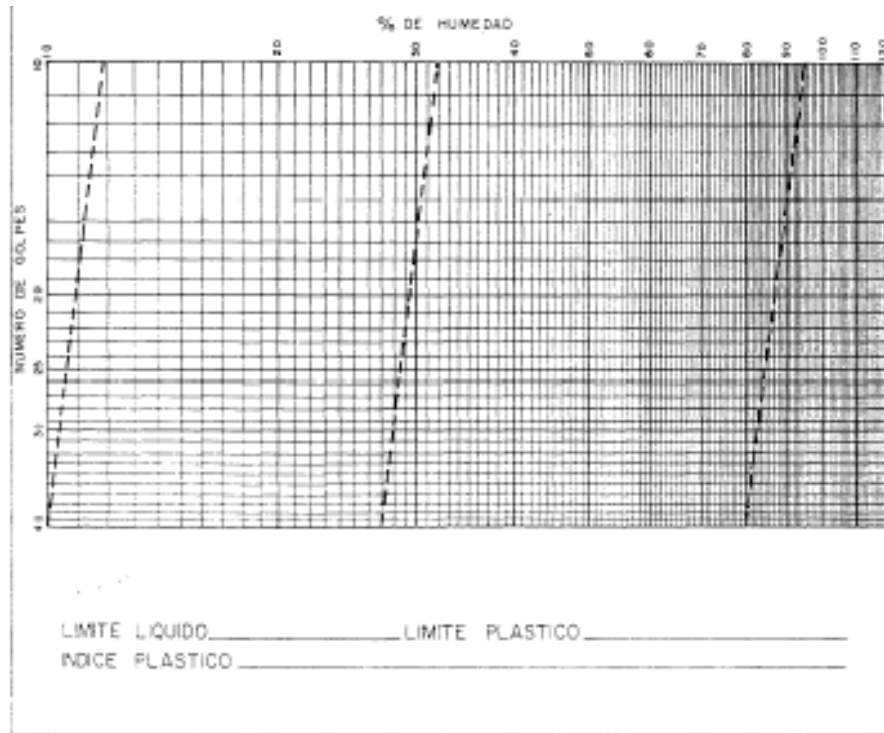


ILUSTRACIÓN 28: MODELO DE IMPRESO PARA EXPRESIÓN DE RESULTADOS

(FUENTE: NORMA UNE 103-103-94)

4.6.2 Resultados obtenidos

Como se indica en la norma, cuando tras varias repeticiones del ensayo no se consigue que el número de golpes que se precisan para cerrar el surco sea superior a 25 golpes, se concluye que el material es “No Plástico”.

Lo descrito en el apartado anterior sucede en los tres materiales que están siendo objeto de estudio, por lo que se puede determinar, que en los tres casos se está frente a unos suelos no plásticos. Por otro lado, en la normativa se indica que se puede exigir que el material que se emplee en la ejecución de caminos rurales sea no plástico, por lo que en los tres materiales esto se cumple.

A modo de resumen, y para que sea más intuitivo, se realiza la siguiente tabla:

TABLA 41: RESULTADOS DEL ENSAYO LÍMITE LÍQUIDO (NORMA UNE 103-103) Y COMPARACIÓN CON LA NORMATIVA

MATERIAL	NORMATIVA
	No Plástico
ZAHORRA ARTIFICIAL	No Plástico
100% RECICLADO	No Plástico
MIXTO CERÁMICO	No Plástico

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

4.7 Determinación del límite plástico (Norma UNE 103-104)

4.7.1 Obtención y expresión de los resultados

El valor de límite plástico resulta de la media de las humedades que se obtienen de las dos determinaciones, su expresión se realiza con una cifra decimal y sin añadir tanto por ciento al final.

En el caso de obtenerse resultados que difieran un valor superior a 2, se ha de repetir el ensayo.

4.7.2 Resultados obtenidos

Al indicarse, en el punto anterior, que en los tres casos el material es no plástico, y tal como indica la norma UNE 103-103, no hace falta realizar este ensayo.

4.8 Ensayo de compactación. Proctor normal (Norma UNE 103-500-94)

4.8.1 Obtención y expresión de los resultados

Observando el gráfico que se presenta a continuación, se realiza el cálculo de la densidad seca y de la humedad que le corresponde a cada una de las determinaciones que se han realizado.

Se representan en un gráfico en el que en el eje de abscisas se encuentren los tanto por ciento de humedad y en el eje de ordenadas las densidades secas los puntos que se obtienen de los cálculos anteriormente descritos. Con la indicación de dichos puntos sobre la gráfica se obtiene una curva suave, en la que el máximo corresponde con la densidad máxima que se puede obtener y la humedad óptima que le corresponde.

TRABAJO N.º DENOMINACION MUESTRA N.º

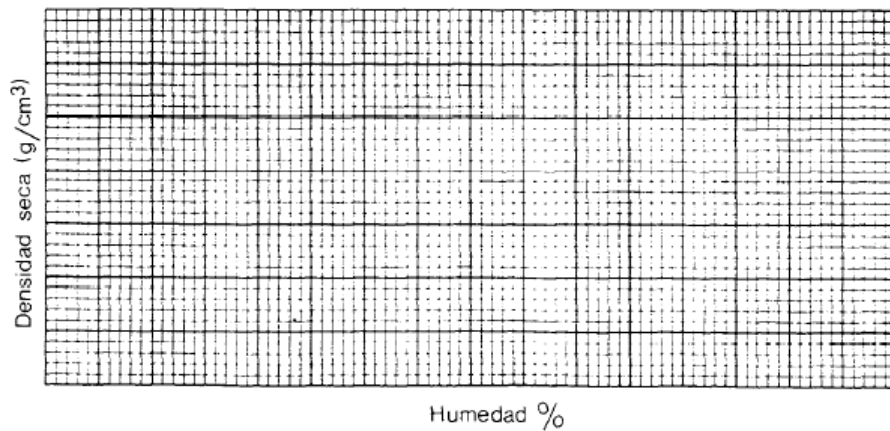
ENSAYO PROCTOR

Molde: N.º de capas: Material utilizado:
 Maza: N.º de golpes por capa: % de materia no utilizado:
 Altura de caída:

Densidad seca	—	Punto n.º						
	—	% agua añadida						
	t + s + a	Molde + suelo + agua						
	t	Molde						
	s + a = (t + s + a) - t	suelo + agua						
	$s = \frac{(s+a)100}{100+w}$	Suelo						
	$\rho_d = \frac{s}{V}$	Densidad seca						
Humedad	—	Referencia tara						
	t + s + a	Tara + suelo + agua						
	t + s	tara + suelo						
	t	Tara						
	s = (t + s) - t	Suelo						
	a = (t + s + a) - (t + s)	Agua						
	$w = \frac{a}{s} \times 100$	Humedad %						

DENSIDAD MAXIMA

HUMEDAD OPTIMA



Descripción del suelo y observaciones

ILUSTRACIÓN 29: MODELO DE IMPRESO PARA EXPRESIÓN DEL RESULTADO

(FUENTE: NORMA UNE 103-500-94)

4.8.2 Resultados obtenidos

El ensayo que se ha realizado para la ejecución de este trabajo, como ya se ha dicho, ha sido el ensayo de Proctor Normal, pero existe una equivalencia entre este ensayo y el ensayo de Proctor Modificado. Dicha equivalencia es:

95% PROCTOR NORMAL = 90% PROCTOR MODIFICADO

En los siguientes gráficos se indican cuales han sido los resultados de densidad y humedad que se han obtenido cuando se ha ejecutado el ensayo de Proctor normal. En cada uno de ellos, aparecen los puntos realizados unidos por una línea de color azul; además, aparece una línea roja que corresponde con el valor de densidad máxima y humedad óptima.

Los resultados obtenidos después de realizar el ensayo de Proctor normal han sido:

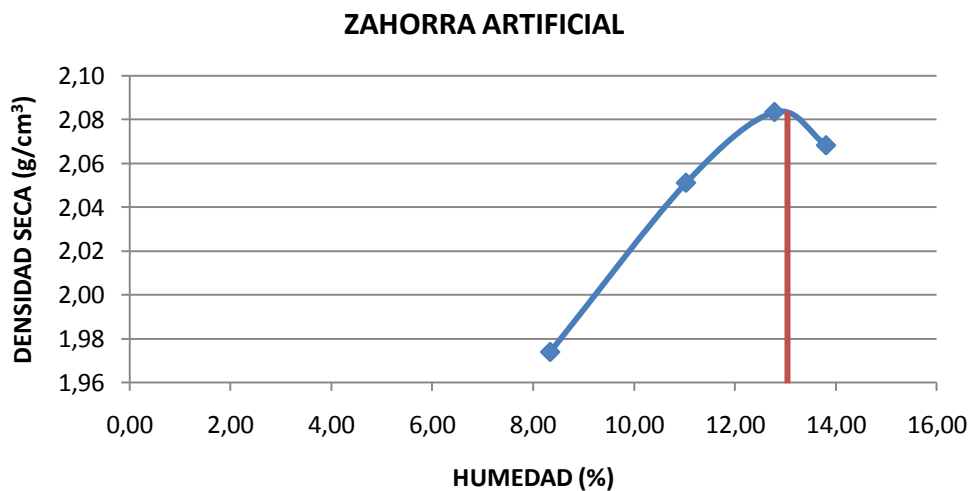


ILUSTRACIÓN 30: RESULTADOS DEL ENSAYO DE PROCTOR NORMAL EN ZAHORRA NATURAL

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

Ensayando la zahorra artificial se necesitaron de cuatro puntos, con diferentes humedades de partida, para poder obtener la humedad óptima y la densidad máxima. El valor de dichos parámetros en este caso ha sido de una densidad seca de, aproximadamente, $2,085 \text{ g/cm}^3$ con una humedad óptima del, también aproximadamente, 13%.

Los valores de densidad y humedad que se han alcanzado en cada punto, y que han sido con los que se ha realizado la gráfica anterior, son:

TABLA 42: PUNTOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PROCTOR NORMAL PARA ZAHORRA ARTIFICIAL

ZAHORRA ARTIFICIAL				
DENSIDAD SECA (g/cm³)	1,97	2,05	2,08	2,07
HUMEDAD (%)	8,34	11,03	12,79	13,81

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

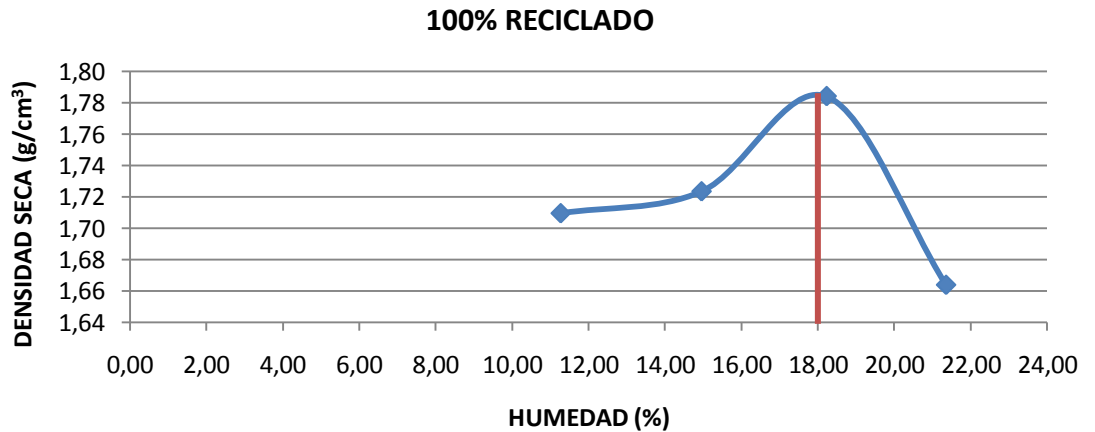


ILUSTRACIÓN 31: RESULTADOS DEL ENSAYO DE PROCTOR NORMAL PARA 100% RECICLADO

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

En este caso, en el que se realizó el ensayo con el material 100% reciclado de hormigón, también se necesitaron de cuatro puntos para poder trazar la curva con la que conocer cuáles son los valores de densidad máxima y humedad óptima. Dichos valores, para este tipo de material, son, aproximadamente, de $1,785 \text{ g/cm}^3$ de densidad seca máxima y una humedad óptima del 18%.

Los valores de densidad y humedad que se han alcanzado en cada punto, y que han sido con los que se ha realizado la gráfica anterior, son:

TABLA 43: PUNTOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PROCTOR NORMAL PARA 100% RECICLADO

100% RECICLADO				
DENSIDAD SECA (g/cm^3)	1,71	1,72	1,78	1,66
HUMEDAD (%)	11,28	14,96	18,23	21,35

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

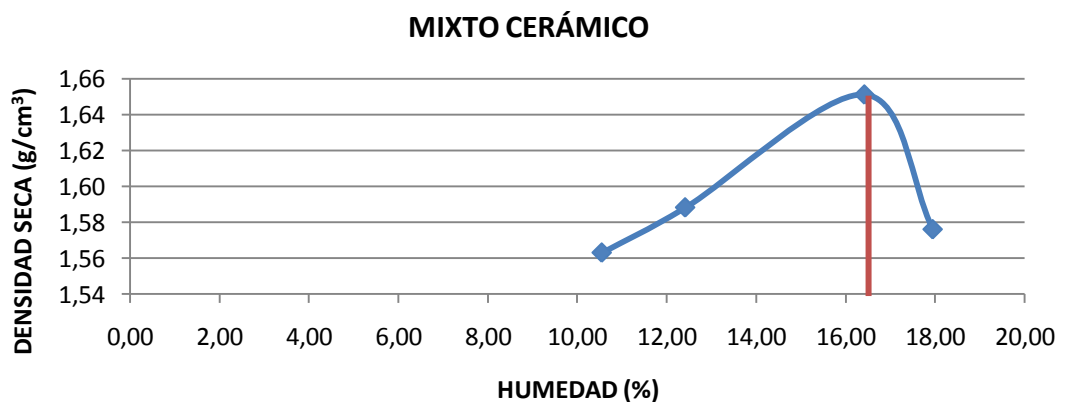


ILUSTRACIÓN 32: RESULTADOS DEL ENSAYO DE PROCTOR NORMAL PARA MIXTO CERÁMICO

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

Por último, en el caso del material mixto cerámico procedente de residuos de construcción y demolición, también se han necesitado cuatro puntos para saber cuál es la densidad máxima y la humedad óptima de ensayo. Los valores que se han obtenido son, de manera aproximada, 1,650 g/cm³ de densidad seca máxima y 16,5% de humedad óptima.

Los valores de densidad y humedad que se han alcanzado en cada punto, y que han sido con los que se ha realizado la gráfica anterior, son:

TABLA 44: PUNTOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE PROCTOR NORMAL PARA MIXTO CERÁMICO

MIXTO CERÁMICO				
DENSIDAD SECA (g/cm³)	1,56	1,59	1,65	1,58
HUMEDAD (%)	10,54	12,41	16,42	17,94

(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

5 CONCLUSIONES

Se van a realizar dos tipos de conclusiones; el primer tipo será para cada uno de los ensayos que se han realizado indicando, en cada caso, cual es la conclusión a la que se llega una vez se han comparado los resultados obtenidos con los valores exigidos por normativa de los parámetros; en todos los casos como ya se dijo la normativa a cumplir es el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3); y el segundo tipo serán las conclusiones generales.

5.1 Conclusiones particulares

- Comparando los resultados obtenidos en el ensayo de granulometría, con los valores de cada una de las fracciones granulométricas que poseen los diferentes tipos de zahorra presentes en la normativa, se puede observar como para los tres materiales se cumplen las exigencias del tipo de zahorra ZA 0/20. Además de indicar que para el material mixto cerámico y 100% reciclado de hormigón también se cumplen las exigencias del tipo de zahorra ZA 0/32. Por otro lado, ninguno de los materiales que son objeto de estudio cumplen con el contenido de finos máximo que deben de poseer los materiales para poderse emplear en la ejecución de caminos rurales.
- Cuando se realiza la comparación de los valores obtenidos en el ensayo de índice de lajas, con los presentes en la normativa, se observa como para la zahorra artificial y para el material 100% reciclado de hormigón se cumple la exigencia en todas las fracciones granulométricas estudiadas, mientras que en el material mixto cerámico para la fracción 25/31,5 mm no se cumple pero para el resto de las fracciones si lo hace.
- En el caso de la comparación de los valores obtenidos en el ensayo de caras de fractura con los valores presentes en la normativa, se puede observar para la categoría de tráfico T00 a T0 no cumple ninguno de los materiales, ni para las partículas trituradas ni para las redondeadas; en el caso de la categoría de tráfico pesado T1 a T2 y arcenes de T00 a T0 se puede ver que en el caso de las partículas redondeadas los tres materiales cumplen mientras que para el caso de totalmente trituradas solo cumple el material mixto cerámico.

Por último, en las categorías de tráfico pesado T3 a T4 y el resto de arcenes los tres materiales a estudiar cumplen con las exigencias presentes en la normativa. Por otro lado, la zahorra artificial y el material 100% reciclado de hormigón no cumplen con ninguna de las exigencias de partículas redondeadas, mientras que el material mixto cerámico cumple cuando las categorías de tráfico son T1 a T3 y para todos los tipos de arcenes.

- En la comparación de los resultados del ensayo equivalente de arena con los valores presentes en la norma para dicho parámetro se puede observar como cumplen para todas las categorías de tráfico pesado.

- Observando la comparación de los resultados obtenidos en el ensayo de Los Ángeles con los valores presentes en la normativa se puede ver como la zahorra artificial cumple para todos las categorías de tráfico pesado, mientras que el material mixto cerámico no cumple para ninguna de ellas; en un estado intermedio se encuentra el material 100% reciclado de hormigón, el cual no cumple cuando la categoría de tráfico pesado es T00 a T2, pero si lo hace cuando ésta es T3 a T4 y en los arcenes de todas las categorías de tráfico pesado.

- El no poder realizar el ensayo de limite liquido arrojó un resultado, para los tres materiales, de estar frente a un suelo no plástico, por lo que, comparando ese “valor” con la normativa, se puede observar como en los tres casos, ésta se cumple. Por otro lado, al no poder realizarse este ensayo, no se ejecutó el ensayo de límite plástico.

- Por último, con los valores de densidad máxima y humedad óptima que se han obtenido con el ensayo de Proctor normal, sabiendo cual es la correspondencia entre este ensayo y el de Proctor modificado y, observando cuales son los valores de Proctor modificado que se han de conseguir, se puede llegar a los valores de densidad máxima y humedad óptima para cada uno de los tipos de suelos estabilizados.

5.2 Conclusiones generales

Ninguno de los tres materiales cumple con todos los parámetros que se exigen por normativa, por lo que en todos ellos se deberían realizar ciertas actuaciones para intentar lograr que cumplan o por lo menos suplir, en la medida de lo posible, las deficiencias de cada uno de ellos.

Por ejemplo, algunas de las actuaciones que se podrían hacer, indicadas para cada uno de los ensayos, serían:

- **ENSAYO DE ÍNDICE DE LAJAS (NORMA UNE EN 933-3):** eliminar la fracción 25/31,5 mm del material mixto cerámico, produciéndose con eso que este material cumpliera en todas las fracciones granulométricas el máximo exigido por normativa. Una vez que se llevara a cabo la retirada de material cerámico, habría que realizar nuevamente todos los ensayos, pues la granulometría que presentaría el material sería diferente a la de partida.
- **ENSAYO DE CARAS DE FRACTURA (NORMA UNE EN 933-5):** aumentar la trituración de los materiales en la planta gestora, con el fin de elevar las caras de fractura que presentan los áridos. De este modo también se disminuirían las cantidades de caras redondeadas, por lo que se podría llegar a cumplir también con los máximos permitidos para este tipo de partículas. Después realizar esta actuación se deberían repetir todos los ensayos, pues la granulometría se vería alterada y los resultados obtenidos cambiarían.
- **ENSAYO DE LOS ÁNGELES (NORMA UNE EN 1097-2):** la naturaleza de los materiales que se han ensayado hace complicado que se pueda mejorar este parámetro, pues, en el caso del material mixto cerámico, la gran cantidad de material cerámico que posee hace que el conjunto del árido presente unos resultados de resistencia a la fragmentación elevados, lo que significa que se fragmenta en exceso. Una de las actuaciones a realizar sería, en el caso del material mixto cerámico, disminuir la cantidad de material cerámico presente en el conjunto a fin de disminuir la fragmentación del grupo del árido. Una vez realizada esta actuación se deberían realizar, de nuevo, todos los ensayos.

6 BIBLIOGRAFÍA

Asociación Española de Normalización y Certificación (1993) UNE 103-104-93: *determinación del límite plástico de un suelo* Madrid: AENOR

Asociación Española de Normalización y Certificación (1994) UNE 103-103-94: *determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande* Madrid: AENOR

Asociación Española de Normalización y Certificación (1994) UNE 103-500-94: *Geotecnia: ensayo de compactación. Proctor normal* Madrid: AENOR

Asociación Española de Normalización y Certificación (2005) *UNE-EN 933-5: ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 5 Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso* Madrid: Comité técnico AEN/CTN 146.

Asociación Española de Normalización y Certificación (2010) *UNE-EN 1097-2: ensayos para determinación de la resistencia a la fragmentación* Madrid: Comité técnico AEN/CTN 146.

Asociación Española de Normalización y Certificación (2012) *UNE-EN 933-1: ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1 Determinación de la granulometría de las partículas: método del tamizado* Madrid: Comité técnico AEN/CTN 146.

Asociación Española de Normalización y Certificación (2012) *UNE-EN 933-3: ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3 Determinación de la forma de las partículas: índice de lajas* Madrid: Comité técnico AEN/CTN 146.

Asociación Española de Normalización y Certificación (2012) *UNE-EN 933-8: ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8 Evaluación de los finos: ensayo del equivalente de arena* Madrid: Comité técnico AEN/CTN 146.

Cabreros García, E.M., Devesa Fernández, C., Gar Esteban, D., Llorente Muñoz, J., Manteca Beneitez, F.J. y García García, J.C. (2017) Guía para la utilización de árido reciclado y recomendaciones para su compra: Utilización de materiales procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) en obras del municipio de Valladolid. Valladolid: Agrupación Empresarial Innovadora para la Construcción Eficiente (AEICE).

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (1990) *NLT-358/90 porción de árido grueso que presenta dos o más caras de fractura por machaqueo* Madrid: MOPT, Dirección General de Carreteras, CEDEX

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (1992) *NLT-104/91 Granulometría de suelos por tamizado* Madrid: MOPT, Dirección General de Carreteras, CEDEX

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (1992) *NLT-113/87 equivalente de arena* Madrid: MOPT, Dirección General de Carreteras, CEDEX

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (1995) *NLT-149/91 Resistencia al desgaste de los áridos por medio de la máquina de Los Ángeles* Madrid: MOPT, Dirección General de Carreteras, CEDEX

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (1995) *NLT-354/91 índice de lajas y de agujas de los áridos para carreteras* Madrid: MOPT, Dirección General de Carreteras, CEDEX

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (1998) *NLT-105/98 límite líquido por el método de la cuchara* Madrid: MOPT, Dirección General de Carreteras, CEDEX

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (1998) *NLT-106/98 Límite plástico* Madrid: MOPT, Dirección General de Carreteras, CEDEX

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (1998) *NLT-107/98 Normas NLT. II, Ensayos de suelos. NLT 107/98, apisonado próctor normal* Madrid: MOPT, Dirección General de Carreteras, CEDEX

Dal-Ré, R (2015) *Caminos rurales, proyecto y construcción*. Reimpresión. Madrid: Mundi-Prensa

España (2003) "Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1-IC "Secciones de firme", de la Instrucción de Carreteras", *Boletín Oficial del Estado*, 12 de diciembre de 2003 (19), pp. 44274-44292.

España (2014) "Orden FOM/2523/2014, de 12 de diciembre, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a materiales básicos, a firmes y pavimentos, y a señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos", *Boletín Oficial del Estado*, 3 de enero de 2015 (513), pp. 584-1096.

Proyecto GEAR. Equipo de Investigación Científica (2012) *Guía Española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD)*. Madrid: Fueyo.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, querría manifestar mi agradecimiento a todos los componentes que forman parte del Grupo de Investigación "INMATECO" y al profesor Dr. Pedro José Aguado Rodríguez, por ayudarme en la realización de este trabajo, así como por haberme brindado la oportunidad de poder hacerlo con ellos. Además, les quiero dar las gracias, tanto al grupo como a la Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal (EIAF), por dejarme utilizar las instalaciones necesarias para la ejecución de los ensayos que he tenido que llevar a cabo.

Por otro lado, también quiero agradecer a la empresa Valdearcos S.L, que me haya proporcionado el material necesario y me haya asesorado en las dudas surgidas en relación a los ensayos durante la escritura del trabajo.

Por último, pero no por ello menos importante, quiero agradecer a todas las personas que, de una manera u otra, me han apoyado y ayudado durante la elaboración de este trabajo. Además, quiero de darles las gracias a mi familia y amigos por creer y confiar siempre en mí.



**universidad
de león**

ESCUELA DE INGENIERÍA AGRARIA Y FORESTAL

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA AGRARIA

**ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN Y
CALIDAD DE ÁRIDOS RECICLADOS DE LA EMPRESA
VALDEARCOS S.L Y COMPARACIÓN CON ÁRIDOS
NATURALES PARA LA EJECUCIÓN DE CAMINOS RURALES**

ANEJO: Informes de los ensayos

Alumno: Noelia Sandín Alonso

Tutores: Julia María Morán del Pozo
Pedro José Aguado Rodríguez

León, septiembre 2019

ÍNDICE

1	ZAHORRA ARTIFICIAL	1
1.1	GRANULOMETRÍA.....	1
1.2	ÍNDICE DE LAJAS	2
1.3	CARAS DE FRACTURA.....	3
1.4	EQUIVALENTE EN ARENA.....	4
1.5	LOS ÁNGELES	4
1.6	PROCTOR NORMAL.....	5
2	MATERIAL 100% RECICLADO DE HORMIGÓN	6
2.1	GRANULOMETRÍA.....	6
2.2	ÍNDICE DE LAJAS	7
2.3	CARAS DE FRACTURA.....	8
2.4	EQUIVALENTE EN ARENA.....	9
2.5	LOS ÁNGELES	9
2.6	PROCTOR NORMAL.....	10
3	MATERIAL MIXTO CERÁMICO.....	11
3.1	GRANULOMETRÍA.....	11
3.2	ÍNDICE DE LAJAS	12
3.3	CARAS DE FRACTURA.....	13
3.4	EQUIVALENTE EN ARENA.....	14
3.5	LOS ÁNGELES	14
3.6	PROCTOR NORMAL.....	15

1 ZAHORRA ARTIFICIAL

1.1 Granulometría

GRANULOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS MÉTODO DEL TAMIZADO DE LA NORMA EN 933-1	LABORATORIO: Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: Zahorra artificial	FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA: 3 de Mayo de 2019 TÉCNICO: Noelia Sandín Alonso
MÉTODO UTILIZADO: lavado y tamizado	

Masa seca total, $M_1 = 5,2980$ kg

Masa seca tras el lavado, $M_2 = 4,9750$ kg

Masa seca de los finos eliminados mediante lavado, $M_1 - M_2 = 0,3230$ kg

TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ mm	MASA DEL MATERIAL RETENIDO R_i kg	PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO $100 * \frac{R_i}{M_1}$ (% en masa)	PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN $100 - \sum 100 * \frac{R_i}{M_1}$ (% en masa)
31,5 mm	R_1	0,0000	100
16 mm	R_2	1,7010	68
8 mm	R_3	0,9410	50
4 mm	R_4	0,4240	42
2 mm	R_5	0,2180	38
1 mm	R_6	0,2100	34
0.500 mm	R_7	0,2300	30
0.250 mm	R_8	0,5180	20
0.125 mm	R_9	0,5100	10
0.063 mm	R_{10}	0,1980	7
MATERIAL EN LA BANDEJA DEL FONDO		0,0110	

PORCENTAJE DE FINOS QUE PASAN POR EL TAMIZ DE 0,063 mm,

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} * 100 = \frac{(5,2980 - 4,9750)}{5,2980} * 100 = 6$$

$\sum R_i + P = 4,9610$ kg	COMENTARIOS:
$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} * 100 = \frac{4,9750 - 4,9610}{4,9750} * 100 = 0,271$	

1.2 Índice de lajas

ÍNDICE DE LAJAS		LABORATORIO: Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal		
EN 933-3		FECHA DE RECEPCIÓN: 3 de Mayo de 2019		
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: Zahorra artificial		TÉCNICO DE LABORATORIO: Noelia Sandín Alonso		
Masa de la porción de ensayo, $M_0 = 4975$ g		Masa retenida por el tamiz 100 mm= 0 g Masa que pasa por el tamiz 4 mm= 1895 g ---- Suma de las masas rechazadas= 1895 g		
TAMIZADO CON TAMICES DE ENSAYO		CRIBADO CON TAMICES DE BARRAS		
Fracción granulométrica d_i/D_i mm	Masa (R_i) de la fracción granulométrica d_i/D_i g	Anchura nominal de las ranuras de los tamices de barras mm	Masa que pasa por el tamiz de barras (m_i) g	$IL_i = \left(\frac{m_i}{R_i}\right) * 100$
80/100	0	50	0	0
63/80	0	45	0	0
50/63	0	31,5	0	0
40/50	0	25	0	0
31,5/40	0	20	0	0
25/31,5	32,5	16	0	0
20/25	743,5	12,5	52	7
16/20	898	10	57	6
12,5/16	476	8	39	8
10/12,5	308,5	6,3	24,5	8
8/10	183,5	5	15,5	8
6,3/8	209,5	4	23	11
5/6,3	140	3,15	15,5	11
4/5	78	2,5	9	12
$M_1 = \sum R_i$		$M_2 = \sum m_i$		
$IL = \left(\frac{m_i}{R_i}\right) * 100 = 8$				
$100 * \frac{M_0 - \{\sum R_i + \sum(masas rechazadas) + \sum(masas de las fracciones no sometidas a ensayo)\}}{M_0} = 0,201 < 1\%$				

1.3 Caras de fractura

EN 933-5 IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: Zahorra artificial	LABORATORIO: Escuela de Ingeniería agraria y forestal FECHA: 25 de Junio de 2019 OPERADOR: Noelia Sandín Alonso
--	---

FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA D/D CON D≤2D mm	MASA M ₁ g	MASAS g		PORCENTAJES REDONDEADOS AL ENTERO MÁS PRÓXIMO %	
		M _c	M _r	C _c	C _r
16 mm	2363	M _c	M _r	C _c	C _r
		1014,5	203	43	9
		Incluyendo M _{tc}	Incluyendo M _{tr}	Incluyendo C _{tc}	Incluyendo C _{tr}
888,5		126,5	38	5	
8 mm		M _c	M _r	C _c	C _r
		649	116	27	5
		Incluyendo M _{tc}	Incluyendo M _{tr}	Incluyendo C _{tc}	Incluyendo C _{tr}
583,5		54	25	2	
4 mm		M _c	M _r	C _c	C _r
		369	10	16	0
		Incluyendo M _{tc}	Incluyendo M _{tr}	Incluyendo C _{tc}	Incluyendo C _{tr}
344		6,5	15	0	

Validación de la retención de las masas:

$100 * \frac{M_1 - (M_c + M_r)}{M_1} =$ $100 * \frac{2363 - [(1014,5 + 649 + 369) + (203 + 116 + 10)]}{2363}$ $= 0,063\%$	<1%
---	-----

1.4 Equivalente en arena

EN 933-8 IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: Zahorra artificial	LABORATORIO: Escuela de Ingeniería agraria y forestal FECHA: 19 de julio de 2019 OPERADOR: Noelia Sandín Alonso
--	---

Contenido en agua w	%	0,234
Masa M_1	g	888,8
Masa M_2	g	753,0
Masa M_3 (si se utiliza)	g	80,0
Contenido en finos f	%	15,1

		1ª muestra de ensayo	2ª muestra de ensayo
Masa de la muestra de ensayo M_T	g	120	120
h_1	mm	18,1	16,6
h_2	mm	8	7,7
$100x(h_2/h_1)$ (con una cifra decimal)		44	46
NOTA: Los valores $100x(h_2/h_1)$ de las dos muestras de ensayo no deberían diferir en más de 4.			

Valor del equivalente de arena SE (10)- media de los dos valores: $100x(h_2/h_1)$ para las dos muestras de ensayo

SE(10)=

45

(se redondea al número entero más próximo)

1.5 Los ángeles

EN 1097-2 IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: Zahorra artificial	LABORATORIO: Escuela de Ingeniería agraria y forestal FECHA: 17 de julio de 2019 OPERADOR: Noelia Sandín Alonso
---	---

FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA: 12,5 a 16 mm con un 60-70% que pase por 14 mm	14/16 mm	62,61%	3,1305 kg
	12,5/14 mm	37,39%	1,8695 kg
Masa seca	5,0000 kg		
Método de ensayo	Ensayo de Los Ángeles		

Coefficiente de Los Ángeles	$LA = \frac{5000 - m}{50}$	LA= 26,40
------------------------------------	----------------------------	------------------

Donde m es la masa retenida en el tamiz de 1,6 mm.

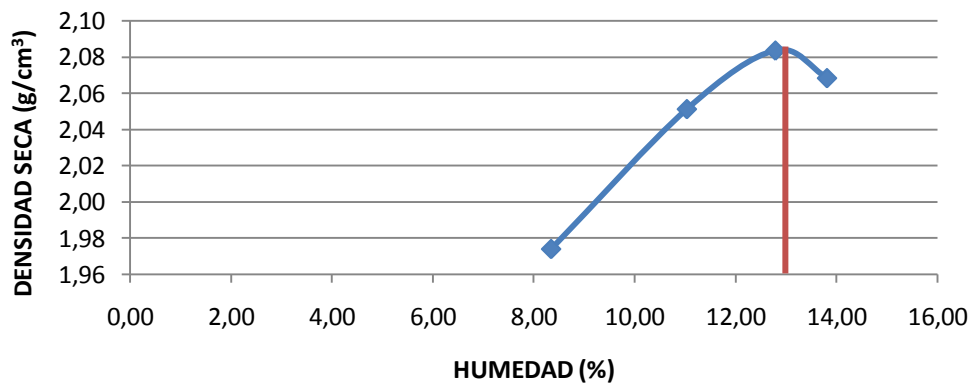
1.6 Proctor normal

ENSAYO PROCTOR					
MOLDE	4739 g 1000 cm ³	Nº DE CAPAS	3	MATERIAL UTILIZADO	Zahorra artificial
MAZA	2,500 kg	Nº DE GOLPES POR CAPA	26	% DE MATERIAL NO UTILIZADO	0
ALTURA DE CAÍDA	0,305 m				

PUNTO Nº		1	2	3	4	
% AGUA AÑADIDA		6	10	12	13	
DENSIDAD SECA	$t + s + a$ (g)	MOLDE +SUELO +AGUA	6877,5	7016,5	7089,0	7093,0
	t (g)	MOLDE	4739,0	4739,0	4739,0	4739,0
	$s + a = (t + s + a) - t$ (g)	SUELO +AGUA	2168,5	2277,5	2350,0	2354,0
	$s = \frac{(s+a) \cdot 100}{100+w}$ (g)	SUELO	1974,0	2051,0	2083,5	2068,0
	$Pd = \frac{s}{v}$ (g/cm ³)	DENSIDAD SECA	1,97	2,05	2,08	2,07
HUMEDAD	REFERENCIA TARA					
	$t + s + a$ (g)	TARA +SUELO +AGUA	144,02	141,67	138,72	127,36
	$t + s$ (g)	TARA +SUELO	135,50	130,90	126,77	114,57
	t (g)	TARA	33,32	33,27	33,32	21,96
	$s = (t + s) - t$ (g)	SUELO	102,18	97,63	93,45	92,61
	$a = (t + s + a) - (t + s)$ (g)	AGUA	8,52	10,77	11,95	12,79
$w = \frac{a}{s} * 100$ (%)	HUMEDAD %	8,34	11,03	12,79	13,81	

Densidad máxima 2,085 g/cm³ Humedad óptima 13%

ZAHORRA ARTIFICIAL



2 MATERIAL 100% RECICLADO DE HORMIGÓN

2.1 Granulometría

GRANULOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS MÉTODO DEL TAMIZADO DE LA NORMA EN 933-1	LABORATORIO: Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: 100% reciclado	FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA: 3 de Mayo de 2019 TÉCNICO: Noelia Sandín Alonso
MÉTODO UTILIZADO: lavado y tamizado	

Masa seca total, $M_1 = 7,0560$ kg

Masa seca tras el lavado, $M_2 = 6,6060$ kg

Masa seca de los finos eliminados mediante lavado, $M_1 - M_2 = 0,4500$ kg

TAMAÑO ABERTURA TAMIZ mm	DE DEL	MASA MATERIAL RETENIDO R_i kg	DEL	PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO $100 * \frac{R_i}{M_i}$ (% en masa)	PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN $100 - \sum 100 * \frac{R_i}{M_i}$ (% en masa)
31,5 mm	R_1	0,0000		0	100
16 mm	R_2	1,0560		15	85
8 mm	R_3	1,6655		24	61
4 mm	R_4	1,1370		16	45
2 mm	R_5	0,6295		9	36
1 mm	R_6	0,4750		7	30
0.500 mm	R_7	0,4790		7	23
0.250 mm	R_8	0,5885		8	15
0.125 mm	R_9	0,3845		5	9
0.063 mm	R_{10}	0,1600		2	7
MATERIAL EN LA BANDEJA DEL FONDO		0.0195			

PORCENTAJE DE FINOS QUE PASAN POR EL TAMIZ DE 0,063 mm,

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} * 100 = \frac{(7,0560 - 6,6060)}{7,0560} * 100 = 7$$

$\sum R_i + P = 6,5945$ kg	COMENTARIOS:
$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} * 100 = \frac{6,6060 - 6,5945}{6,6060} * 100 = 0,174$	

2.2 Índice de lajas

ÍNDICE DE LAJAS		LABORATORIO: Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal		
EN 933-3		FECHA DE RECEPCIÓN: 3 de Mayo de 2019		
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: 100% reciclado		TÉCNICO DE LABORATORIO: Noelia Sandín Alonso		
Masa de la porción de ensayo, $M_0 = 2554$ g		Masa retenida por el tamiz 100 mm= 0 g Masa que pasa por el tamiz 4 mm= 2736 g ---- Suma de las masas rechazadas= 2736 g		
TAMIZADO CON TAMICES DE ENSAYO		CRIBADO CON TAMICES DE BARRAS		
Fracción granulométrica d_i/D_i mm	Masa (R_i) de la fracción granulométrica d_i/D_i g	Anchura nominal de las ranuras de los tamices de barras mm	Masa que pasa por el tamiz de barras (m_i) g	$IL_i = \left(\frac{m_i}{R_i}\right) * 100$
80/100	0	50	0	0
63/80	0	45	0	0
50/63	0	31,5	0	0
40/50	0	25	0	0
31,5/40	0	20	0	0
25/31,5	135,5	16	0	0
20/25	366	12,5	31,5	9
16/20	540,5	10	28	5
12,5/16	769	8	45,5	6
10/12,5	501,5	6,3	28,5	6
8/10	401,5	5	23,5	6
6,3/8	525,5	4	24	5
5/6,3	384,5	3,15	20	5
4/5	239,5	2,5	1,5	1
$M_1 = \sum R_i$	3863	$M_2 = \sum m_i$	202,5	
$IL = \left(\frac{m_i}{R_i}\right) * 100 = 5$				
$100 * \frac{M_0 - \{\sum R_i + \sum(\text{masas rechazadas}) + \sum(\text{masas de las fracciones no sometidas a ensayo})\}}{M_0} = 0106 < 1\%$				

2.3 Caras de fractura

EN 933-5 IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: 100% reciclado	LABORATORIO: Escuela de Ingeniería agraria y forestal FECHA: 25 de Junio de 2019 OPERADOR: Noelia Sandín Alonso
--	---

FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA D/D CON D≤2D mm	MASA M ₁ g	MASAS g		PORCENTAJES REDONDEADOS AL ENTERO MÁS PRÓXIMO %	
		M _c	M _r	C _c	C _r
16 mm	1055,5	M _c	M _r	C _c	C _r
		850	184,5	22	5
		Incluyendo M _{tc}	Incluyendo M _{tr}	Incluyendo C _{tc}	Incluyendo C _{tr}
698		118,5	18	3	
8 mm		M _c	M _r	C _c	C _r
		1329,5	316	34	8
		Incluyendo M _{tc}	Incluyendo M _{tr}	Incluyendo C _{tc}	Incluyendo C _{tr}
1145		226	30	6	
4 mm		M _c	M _r	C _c	C _r
	922	261,5	24	7	
	Incluyendo M _{tc}	Incluyendo M _{tr}	Incluyendo C _{tc}	Incluyendo C _{tr}	
683	156,5	18	4		

Validación de la retención de las masas:

$100 * \frac{M_1 - (M_c + M_r)}{M_1} =$ $100 * \frac{1055,5 - [(850 + 1329,5 + 922) + (184,5 + 316 + 261,5)]}{1055,5}$ $= 0,194\%$	<1%
--	-----

2.4 Equivalente en arena

EN 933-8 IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: 100% reciclado	LABORATORIO: Escuela de Ingeniería agraria y forestal FECHA: 19 de julio de 2019 OPERADOR: Noelia Sandín Alonso
--	---

Contenido en agua w	%	0,719
Masa M_1	g	943,5
Masa M_2	g	867,5
Contenido en finos f	%	7,4

		1ª muestra de ensayo	2ª muestra de ensayo
Masa de la muestra de ensayo M_T	g	121	121
h_1	mm	13,3	13,9
h_2	mm	9,9	10,8
100x(h_2/h_1) (con una cifra decimal)		74	78
NOTA: Los valores 100x (h_2/h_1) de las dos muestras de ensayo no deberían diferir en más de 4.			

Valor del equivalente de arena SE (10)- media de los dos valores: 100x (h_2/h_1) para las dos muestras de ensayo

SE(10)=

76

(se redondea al número entero más próximo)

2.5 Los Ángeles

EN 1097-2 IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: 100% reciclado	LABORATORIO: Escuela de Ingeniería agraria y forestal FECHA: 17 de julio de 2019 OPERADOR: Noelia Sandín Alonso
---	---

FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA: 12,5 a 16 mm con un 60-70% que pase por 14 mm	14/16 mm	65,34%	3,2670 kg
	12,5/14 mm	34,66%	1,7330 kg
Masa seca	5,0000 kg		
Método de ensayo	Ensayo de Los Ángeles		

Coeficiente de Los Ángeles	$LA = \frac{5000 - m}{50}$	LA= 35
----------------------------	----------------------------	--------

Donde m es la masa retenida en el tamiz de 1,6 mm.

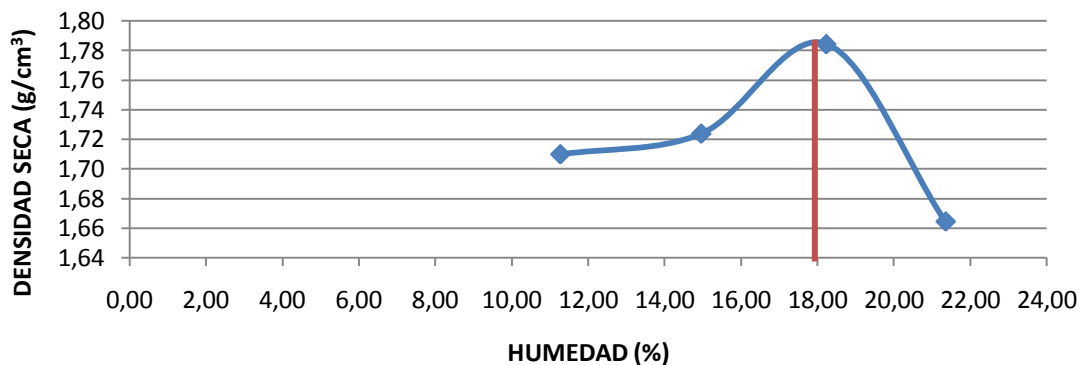
2.6 Proctor normal

ENSAYO PROCTOR					
MOLDE	4,739 kg 1000 cm ³	Nº DE CAPAS	3	MATERIAL UTILIZADO	100% reciclado
MAZA	2,500 kg	Nº DE GOLPES POR CAPA	26	% DE MATERIAL NO UTILIZADO	0
ALTURA DE CAÍDA	0,305 m				

PUNTO Nº		1	2	3	4	
% AGUA AÑADIDA		10	14	18	20	
DENSIDAD SECA	$t + s + a$ (g)	MOLDE +SUELO +AGUA	6641,5	6720,5	6848,5	6758,5
	t (g)	MOLDE	4739,0	4739,0	4739,0	4739,0
	$s + a = (t + s + a) - t$ (g)	SUELO +AGUA	1902,5	1981,5	2109,5	2019,5
	$s = \frac{(s+a) \cdot 100}{100+w}$ (g)	SUELO	1710,0	1725,5	1784,0	1664,0
	$Pd = \frac{s}{v}$ (g/cm ³)	DENSIDAD SECA	1,71	1,72	1,78	1,66
REFERENCIA TARA						
HUMEDAD	$t + s + a$ (g)	TARA +SUELO +AGUA	137,55	141,43	124,25	129,12
	$t + s$ (g)	TARA +SUELO	126,97	127,35	108,43	110,24
	t (g)	TARA	33,15	33,23	21,65	21,82
	$s = (t + s) - t$ (g)	SUELO	93,82	94,12	86,78	88,42
	$a = (t + s + a) - (t + s)$ (g)	AGUA	10,58	14,08	15,82	18,88
	$w = \frac{a}{s} * 100$ (%)	HUMEDAD %	11,28	14,96	18,23	21,35

Densidad máxima 1,785 Humedad óptima 18%

100% RECICLADO



3 MATERIAL MIXTO CERÁMICO

3.1 Granulometría

GRANULOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS MÉTODO DEL TAMIZADO DE LA NORMA EN 933-1	LABORATORIO: Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: Mixto cerámico	FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA: 3 de Mayo de 2019 TÉCNICO: Noelia Sandín Alonso
MÉTODO UTILIZADO: lavado y tamizado	

Masa seca total, $M_1 = 2,8460$ kg

Masa seca tras el lavado, $M_2 = 2,5540$ kg

Masa seca de los finos eliminados mediante lavado, $M_1 - M_2 = 0,2920$ kg

TAMAÑO ABERTURA TAMIZ mm	DE DEL	MASA MATERIAL RETENIDO R_i kg	DEL	PORCENTAJE DE MATERIAL RETENIDO $100 * \frac{R_i}{M_i}$ (% en masa)	PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN $100 - \sum 100 * \frac{R_i}{M_i}$ (% en masa)
31,5 mm	R_1	0,0000		0	100
16 mm	R_2	0,4470		16	84
8 mm	R_3	0,5930		21	63
4 mm	R_4	0,4140		15	49
2 mm	R_5	0,2710		10	39
1 mm	R_6	0,2200		8	32
0.500 mm	R_7	0,1885		6	26
0.250 mm	R_8	0,1815		6	19
0.125 mm	R_9	0,1475		5	14
0.063 mm	R_{10}	0,0845		3	11
MATERIAL EN LA BANDEJA DEL FONDO		0,0080			

PORCENTAJE DE FINOS QUE PASAN POR EL TAMIZ DE 0,063 mm,

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} * 100 = \frac{(2,8460 - 2,5540)}{2,8460} * 100 = 11$$

$\sum R_i + P = 6,5945$ kg	COMENTARIOS:
$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} * 100 = \frac{2,5540 - 2,5350}{2,5540} * 100 = 0,744$	

3.2 Índice de lajas

ÍNDICE DE LAJAS		LABORATORIO: Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal		
EN 933-3		FECHA DE RECEPCIÓN: 3 de Mayo de 2019		
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: Mixto cerámico		TÉCNICO DE LABORATORIO: Noelia Sandín Alonso		
Masa de la porción de ensayo, $M_0 = 2554$ g		Masa retenida por el tamiz 100 mm = 0 g Masa que pasa por el tamiz 4 mm = 20 g ---- Suma de las masas rechazadas = 8 g		
Tamizado con tamices de ensayo		Cribado con tamices de barras		
Fracción granulométrica d_i/D_i mm	Masa (R_i) de la fracción granulométrica d_i/D_i g	Anchura nominal de las ranuras de los tamices de barras mm	Masa que pasa por el tamiz de barras (m_i) g	$IL_i = \left(\frac{m_i}{R_i}\right) * 100$
80/100	0	50	0	0
63/80	0	45	0	0
50/63	0	31,5	0	0
40/50	0	25	0	0
31,5/40	0	20	0	0
25/31,5	31,0	16	12,5	40
20/25	267,5	12,5	80,5	30
16/20	134,5	10	29	22
12,5/16	230	8	43	19
10/12,5	224,5	6,3	16,5	7
8/10	168	5	25	15
6,3/8	160,5	4	29	18
5/6,3	142	3,15	20,5	14
4/5	112,5	2,5	8	7
$M_1 = \sum R_i$	1470	$M_2 = \sum m_i$	264	
$IL = \left(\frac{m_i}{R_i}\right) * 100 = 18$				
$100 * \frac{M_0 - \{\sum R_i + \sum(masas rechazadas) + \sum(masas de las fracciones no sometidas a ensayo)\}}{M_0} = 0117 < 1\%$				

3.3 Caras de fractura

EN 933-5 IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: Mixto cerámico	LABORATORIO: Escuela de Ingeniería agraria y forestal FECHA: 25 de Junio de 2019 OPERADOR: Noelia Sandín Alonso
--	---

FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA D/D CON D≤2D mm	MASA M ₁ g	MASAS g		PORCENTAJES REDONDEADOS AL ENTERO MÁS PRÓXIMO %	
		M _c	M _r	C _c	C _r
16 mm	1055,5	M _c	M _r	C _c	C _r
		251	81,5	24	8
		Incluyendo M _{tc}	Incluyendo M _{tr}	Incluyendo C _{tc}	Incluyendo C _{tr}
		135,5	42	13	4
8 mm		M _c	M _r	C _c	C _r
		278,5	144	27	14
		Incluyendo M _{tc}	Incluyendo M _{tr}	Incluyendo C _{tc}	Incluyendo C _{tr}
		204	86	20	8
4 mm		M _c	M _r	C _c	C _r
		241	36	23	3
		Incluyendo M _{tc}	Incluyendo M _{tr}	Incluyendo C _{tc}	Incluyendo C _{tr}
		225,5	28	22	3

Validación de la retención de las masas:

$100 * \frac{M_1 - (M_c + M_r)}{M_1} =$ $100 * \frac{1055,5 - [(251 + 278,5 + 241) + (81,5 + 144 + 36)]}{1055,5}$ $= 0,145\%$	<1%
---	-----

3.4 Equivalente en arena

EN 933-8 IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: Mixto cerámico	LABORATORIO: Escuela de Ingeniería agraria y forestal FECHA: 19 de julio de 2019 OPERADOR: Noelia Sandín Alonso
--	---

Contenido en agua w	%	1,531
Masa M_1	g	905,0
Masa M_2	g	724,5
Masa M_3 (si se utiliza)	g	65,0
Contenido en finos f	%	18,7

		1ª muestra de ensayo	2ª muestra de ensayo
Masa de la muestra de ensayo M_T	g	121	121
h_1	mm	14,3	14,6
h_2	mm	9,6	9,9
100x(h_2/h_1) (con una cifra decimal)		67	68
NOTA: Los valores 100x (h_2/h_1) de las dos muestras de ensayo no deberían diferir en más de 4.			

Valor del equivalente de arena SE (10)- media de los dos valores: 100x (h_2/h_1) para las dos muestras de ensayo

SE(10)=

67

(se redondea al número entero más próximo)

3.5 Los Ángeles

EN 1097-2 IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: Mixto cerámico	LABORATORIO: Escuela de Ingeniería agraria y forestal FECHA: 17 de julio de 2019 OPERADOR: Noelia Sandín Alonso
---	---

FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA: 12,5 a 16 mm con un 60-70% que pase por 14 mm	14/16 mm	65,26%	3,2630 kg
	12,5/14 mm	34,74%	1,7370 kg
Masa seca	5,0000 kg		
Método de ensayo	Ensayo de Los Ángeles		

Coefficiente de Los Ángeles	$LA = \frac{5000 - m}{50}$	LA= 38,53
------------------------------------	----------------------------	------------------

Donde m es la masa retenida en el tamiz de 1,6 mm.

3.6 Proctor normal

ENSAYO PROCTOR					
MOLDE	4,739 kg 1000 cm ³	Nº DE CAPAS	3	MATERIAL UTILIZADO	Mixto cerámico
MAZA	2,500 kg	Nº DE GOLPES POR CAPA	26	% DE MATERIAL NO UTILIZADO	0
ALTURA DE CAÍDA	0,305 m				

PUNTO Nº		1	2	3	4	
% AGUA AÑADIDA		10	12	14	16	
DENSIDAD SECA	$t + s + a$ (g)	MOLDE +SUELO +AGUA	6467,0	6524,5	6661,5	6598,0
	t (g)	MOLDE	4739,0	4739,0	4739,0	4739,0
	$s + a = (t + s + a) - t$ (g)	SUELO +AGUA	1728,0	1785,5	1922,5	1859,0
	$s = \frac{(s+a) \cdot 100}{100+w}$ (g)	SUELO	1560,0	1588,5	1651,5	1576,0
	$Pd = \frac{s}{v}$ (g/cm ³)	DENSIDAD SECA	1,56	1,59	1,65	1,58
HUMEDAD	REFERENCIA TARA					
	$t + s + a$ (g)	TARA +SUELO +AGUA	123,78	130,78	130,58	134,58
	$t + s$ (g)	TARA +SUELO	114,07	118,77	115,21	117,42
	t (g)	TARA	21,98	21,98	21,58	21,78
	$s = (t + s) - t$ (g)	SUELO	92,09	96,79	93,63	95,64
	$a = (t + s + a) - (t + s)$ (g)	AGUA	9,71	12,41	15,37	17,16
$w = \frac{a}{s} \cdot 100$ (%)	HUMEDAD %	10,54	12,41	16,42	17,94	

Densidad máxima 1,650 g/cm³ Humedad óptima 16,5%

MIXTO CERÁMICO

