



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

# ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y CRISTALOGRÁFICAS DE MATERIALES DE SECADO POR MICROONDAS EN COMPARATIVA DE SECADO POR ESTUFA

[Estudio de áridos]

Autor

VANESSA EGEE GUINDA

Director

MARTÍN ORNA CARMONA

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia  
2021





**Escuela Universitaria  
Politécnica - La Almunia**  
Centro adscrito  
**Universidad Zaragoza**

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA  
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

**MEMORIA II**

**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y  
CRISTALOGRÁFICAS DE MATERIALES DE  
SECADO POR MICROONDAS EN COMPARATIVA  
DE SECADO POR ESTUFA**

[Estudio de áridos]

**422.19.3**

Autor: VANESSA EGEA GUINDA

Director: MARTÍN ORNA CARMONA

Fecha: 23 de Noviembre de 2021



# ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	9
RESUMEN	10
PALABRAS CLAVE	11
ABSTRACT	12
1. INTRODUCCIÓN	13
2. OBJETIVOS	15
3. MEDIOS	16
4. ESTRUCTURA DEL TFG	17
5. METODOLOGÍA	19
6. ESTADO DEL ARTE	20
6.1. NORMATIVAS	21
6.1.1. Normativas por secado en microondas	21
6.1.2. Normativas por secado en estufa	21
6.2. ÁRIDOS EN EDIFICACIÓN	21
6.3. IMPORTANCIA DEL AGUA EN LOS ÁRIDOS	22
6.4. FORMAS DE MEDIR LA HUMEDAD	23
6.5. MÉTODOS DE SECADO	23
6.5.1. Secado por estufa	23
6.5.2. Secado por microondas	24
6.5.2.1. Naturaleza de los áridos	24
6.5.2.2. Influencia de las temperaturas	25
6.5.2.3. Potencias de los microondas	25
6.5.2.4. Tiempos de secado según el campo de estudio y el tamaño de las muestras	26
6.5.2.5. Equipos empleados	27
6.6. CALIBRADO DE EQUIPOS EN LAS PLANTAS	28
6.7. CORRELACIÓN DE LOS ÁRIDOS EN LAS PLANTAS	30
6.8. CAPA DIFUSA	32
6.9. SOBRECALENTAMIENTO	33
6.10. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA CON REDUCTORES DE CALOR	34

ÍNDICES

6.11.	CONCLUSIONES GENERALES SOBRE EL SECADO	35
<b>7.</b>	<b>NORMATIVA TÉCNICA SOBRE ÁRIDOS</b>	<b>36</b>
<b>8.</b>	<b>MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS</b>	<b>40</b>
8.1.	ESTUDIO DE LOS ÁRIDOS	40
8.1.1.	<i>Términos básicos de los áridos</i>	40
8.2.	FORMAS DE MEDIR LA HUMEDAD	44
8.2.1.	<i>Métodos para determinar la humedad los de los materiales.</i>	45
8.2.1.1.	Método del tacto	45
8.2.1.2.	Método gravimétrico	45
8.2.1.3.	Valoración de Val. Karl Fischer	46
8.2.1.4.	Método Speedy	47
8.2.1.5.	Métodos nucleares	47
8.2.1.6.	Higrómetro	49
8.2.1.7.	Resistencia eléctrica	49
8.2.1.8.	Reflectometría	50
8.2.1.9.	Método con tensiómetro	50
8.3.	EQUIPOS EMPLEADOS EN LOS ENSAYOS	51
8.3.1.	<i>Horno microondas</i>	51
8.3.2.	<i>Horno de estufa</i>	51
8.3.3.	<i>Báscula de pesado</i>	52
8.3.4.	<i>Cuarteador</i>	52
8.3.5.	<i>Tamices</i>	52
8.3.6.	<i>Medidor de tiempo: cronómetro</i>	53
8.3.7.	<i>Medidor de temperatura</i>	53
8.3.8.	<i>Recipientes y herramientas</i>	54
8.4.	SELECCIÓN MUESTRAS DE PLANTAS DE ÁRIDOS	57
8.4.1.	<i>Introducción</i>	57
8.4.2.	<i>Muestras de áridos</i>	58
8.4.3.	<i>Plantas seleccionadas</i>	60
<b>9.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b>	<b>63</b>
9.1.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	64
9.1.1.	<i>Fase 1: Ensayos gravímetros</i>	65
9.1.1.1.	Cálculo de humedad	65
9.1.1.2.	Codificación muestras	66
9.1.1.3.	Granulometría	70
9.1.1.4.	Ensayos gravimétricos	73



9.1.1.4.1.	Secado de horno de estufa	73
9.1.1.4.2.	Secado horno microondas	75
9.1.2.	Fase 2 - Resultados de las propiedades cristalográficas (Cemex)	77
9.1.3.	Fase 3 – Análisis estadístico de los áridos	78
<b>10.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>79</b>
10.1.	PLANTA GRAÑEN – ANGÜES	80
10.2.	PLANTA DOLOMIÁS ARAGÓN.	93
10.3.	PLANTA EMIPESA SILÍCEA (POYO DEL CID)	102
10.4.	PLANTA EMIPESA CALIZAS (POYO DEL CID)	107
10.5.	RESULTADOS CEMEX	114
10.6.	RESULTADOS ESTADÍSTICA	125
<b>11.</b>	<b>PROTOCOLO NORMATIVO</b>	<b>127</b>
11.1.	INTRODUCCIÓN	128
11.2.	OBJETO	128
11.3.	NORMAS DE CONSULTA	129
11.4.	TÉRMINOS Y DEFINICIONES	130
11.4.1.	Humedad, $w$ : (%)	130
11.4.2.	Calentamiento por microondas:	130
11.5.	APARATOS Y MATERIAL NECESARIO	130
11.6.	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	131
11.6.1.	Preparación de la muestra de ensayo	131
11.6.2.	Potencia de secado	133
11.6.3.	Ejecución del ensayo	133
11.7.	RESULTADOS DEL ENSAYO	134
11.7.1.	Informe del ensayo	134
<b>12.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>135</b>
<b>13.</b>	<b>FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>136</b>
<b>14.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA ZOTERO</b>	<b>137</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Medidor de humedad por microondas Humiarc (2021) .....	28
Ilustración 2 Cintas transportadoras Hidronix (2020) .....	28
Ilustración 3 Sensor sobre cinta transportadora de arena Hidronix (2020) .....	28
Ilustración 4 Sensor de humedad bajo cuba de áridos Hidronix (2020) .....	29
Ilustración 5 Sensor humedad bajo cuba Hidronix, (2020) .....	29
Ilustración 6 Capa difusa Gómez-Burgos & Parra-Cubillos (2015) .....	32
Ilustración 7 Ladrillo refractario Mr. Adam (2015) .....	33
Ilustración 8 Acetato de potasio (Nuoxin, s. f.) .....	34
Ilustración 9 Yoduro de potasio Wikipedia (2021) .....	34
Ilustración 10 Carbonato de potasio Wikipedia (2021) .....	35
Ilustración 11 Grava fina                      Ilustración 12 Grava gruesa .....	41
Ilustración 13 Arenas .....	41
Ilustración 14 Arenas finas .....	41
Ilustración 15 Prueba compresión de bola Gil-Montenegro (2018) .....	45
Ilustración 16 Balanza analítica .....	46
Ilustración 17 Método Karl Fischer .....	46
Ilustración 18 Método Speedy .....	47
Ilustración 19 Equipo método nuclear Universidad de Valparaíso (1993) .....	47
Ilustración 20 Formas de determinar la humedad método .....	48
Ilustración 21 Higrómetro Wikipedia (2020) .....	49
Ilustración 22 Resistencia eléctrica MideBien (2019) .....	49
Ilustración 23 Reflectometría CFT&ASoc. S.L. (2010) .....	50
Ilustración 24 Tensiómetro Agrologica (2012) .....	50
Ilustración 25 Microondas Optimo .....	51
Ilustración 26 Microondas Fagor .....	51

Ilustración 27 Horno estufa .....	51
Ilustración 28 Balanza digital.....	52
Ilustración 29 Cuarteador .....	52
Ilustración 30 Tamices .....	52
Ilustración 31 Cronómetro .....	53
Ilustración 32 Medidor de temperatura con sonda .....	53
Ilustración 33 Termómetro infrarrojos .....	53
Ilustración 34 Recipiente de cristal.....	54
Ilustración 35 Recipiente de plástico.....	54
Ilustración 36 Guantes .....	55
Ilustración 37 Espátulas .....	55
Ilustración 38 Pala de plástico .....	55
Ilustración 39 Cubos .....	56
Ilustración 40 Sacos.....	56
Ilustración 41 Plano de plantas y geológico.....	57
Ilustración 42 Roca caliza – Árido calizo .....	58
Ilustración 43 Roca caliza – Árido calizo .....	58
Ilustración 44 Roca silíceo – Árido silíceo.....	58
Ilustración 45 Roca dolomítica – Árido dolomítico .....	59
Ilustración 46 Plantas seleccionadas .....	61
Ilustración 47 Planta Emipesa.....	62
Ilustración 48 Planta Dolomías Aragón .....	62
Ilustración 49 Planta Grañen .....	62
Ilustración 50 Plantas codificadas.....	66
Ilustración 51 Ejemplo codificación.....	66
Ilustración 52 codificación P08.....	67
Ilustración 53 Codificación P21 .....	67

ÍNDICES

Ilustración 54 Codificación P22 .....	68
Ilustración 55 Columna de tamices.....	70
Ilustración 56 Abertura tamices .....	71
Ilustración 57 Curva granulométrica .....	72
Ilustración 58 Horno de estufa.....	73
Ilustración 59 Microondas Fagor .....	75
Ilustración 60 Microondas Optimo .....	75
Ilustración 61 Muestras Cemex.....	77
Ilustración 62 Proceso de ensayos.....	79
Ilustración 63 Árido grueso con film .....	80
Ilustración 64 Arena fina tamizada .....	81
Ilustración 65 Arena fina húmeda y secada por microondas .....	82
Ilustración 66 Arena gruesa 6% humedad .....	83
Ilustración 67 Arena gruesa 6% humedad .....	83
Ilustración 68 humedad pulverizada y goteo.....	84
Ilustración 69 Mezcladora con AG .....	85
Ilustración 70 AG mezcladora .....	85
Ilustración 71 AG saturada fondo .....	85
Ilustración 72 AG saturado en mezcladora.....	86
Ilustración 73 Grava fina saturada .....	86
Ilustración 74 Grava gruesa saturada .....	86
Ilustración 75 Contaminación AG y AF granulometría gravas.....	93
Ilustración 76 AG saturada.....	93
Ilustración 77 Gravas saturadas removidas .....	93
Ilustración 78 AG humedad 10% .....	94
Ilustración 79 Recipiente borosilicato.....	95
Ilustración 80 Plato de microondas.....	95

Ilustración 81 Pyrex .....	95
Ilustración 82 gravas .....	102
Ilustración 83 Tamizado gravas .....	102
Ilustración 84 Gravas saturadas.....	107
Ilustración 85 Muestras secadas por microondas .....	107
Ilustración 86 Filler grava fina .....	108
Ilustración 87 Grava fina saturada .....	108
Ilustración 88 Filler .....	108
Ilustración 89 Grava fina seca y saturada.....	109
Ilustración 90 Muestra de ensayo.....	109
Ilustración 91 Planta Cemex.....	114
Ilustración 92 P08 Grava fina caliza y sílicea .....	117
Ilustración 93 P21 grava gruesa caliza microondas 10 min.....	118
Ilustración 94 P21 Grava fina sílicea .....	119
Ilustración 95 P21 Grava fina sílicea composición .....	119
Ilustración 96 P22 Grava gruesa dolomitas.....	120
Ilustración 97 Grava gruesa dolomitas composición .....	120
Ilustración 98 P22 grava fina dolomitas .....	121
Ilustración 99 P22 grava fina dolomitas microondas 5 min .....	121
Ilustración 100 P22 arena gruesa dolomitas microondas 15 min .....	122
Ilustración 101 P22 arena gruesa dolomitas microondas 10 min .....	122
Ilustración 102 P22 grava gruesa dolomitas 5 min.....	123
Ilustración 103 P22 grava gruesa dolomitas 10 min .....	123

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación y denominación de los áridos Andrea-Blanco (2001) .....	30
Tabla 2 Norma técnica actualizada .....	36
Tabla 3 Clasificación de los áridos por tamaño .....	41
Tabla 4 Clasificación de los áridos según su procedencia .....	42
Tabla 5 Clasificación de los áridos según su forma.....	43
Tabla 6 Tamaños áridos Emipesa .....	62
Tabla 7 Tamaños áridos Dolomitas.....	62
Tabla 8 Tamaños áridos Huesca.....	62
Tabla 9 Tabla de plantas seleccionadas para analizar los áridos.....	62
Tabla 10 Humedad en las muestras analizadas en el secado .....	65
Tabla 11 Escala granulométrica Wikipedia (2020).....	71
Tabla 12 Absorción arenas finas.....	81
Tabla 13 Absorción arenas gruesas .....	84
Tabla 14 Absorción arenas gruesas 2.....	84
Tabla 15 Absorción arenas gruesas .....	94
Tabla 16 Ensayos por microondas Grañen .....	115
Tabla 17 Ensayos por microondas Dolomitas .....	116
Tabla 18 Ensayos por microondas Emipesa.....	116
Tabla 19 Masa mínima de la muestra de ensayo.....	132

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar le quiero dar las gracias a los profesores Martín Orna Carmona, Ángel Salesa Bordanaba, Luis Mariano Esteban Escaño, Pedro Luis López Julián, que nos han ayudado a realizar este TFG, sin ellos no podría haber desarrollado esta investigación.

Gracias a la universidad de la EUPLA por prestarnos sus instalaciones y a los conserjes Agustín Soria Sancho, Alejandro Lasarte Aísa y José Antonio Orna Montesinos que han estado disponibles en todo momento. Gracias a la colaboración de Cemex en especial a Joan por su habilidad y rapidez en su trabajo para ayudarnos.

*A todos vosotros gracias.....*

Le quiero dar las gracias a todos los que han estado apoyándome durante este tiempo sobre todo en los minutos más difíciles, su paciencia ha sido fundamental para poder terminar esta etapa.

Gracias a mi familia por animarme a continuar con mis objetivos y saber levantarme el ánimo en las situaciones más complicadas. Nunca olvidare esas frases de apoyo que me han empujado a continuar por el camino correcto ¿tú puedes? ¿Qué nada ni nadie se interponga en tu camino?

Quiero dar las gracias a mi pareja, mis amigos, compañeros de trabajo, por saber aconsejarme y entenderme en todo momento.

Mi formación académica es el esfuerzo de un trabajo continuo a lo largo de todos estos años dando prioridad a mi futuro, no podría haberlo conseguido sin todo el apoyo de la gente que está a mi lado.

Finalmente este trabajo no lo podría haber terminado sin mi compañera de TFG Vanessa Egea Guinda que ha estado a mi lado todo el tiempo.

*Muchas gracias a todos*

## RESUMEN

¿Para qué se emplean los áridos en construcción?, ¿Cómo influye la humedad según el tamaño de las partículas?, ¿Cómo afecta en el proceso de secado la composición mineralógica de los áridos?, ¿Qué diferencias existen de secar un árido por microondas a secarlo por estufa?, ¿Pueden emplearse posteriormente estos áridos en otros ensayos?, ¿Se puede crear una normativa que regule el empleo de este método como método alternativo al método por estufa?, ¿Qué debe contemplar esta norma?

Estas son algunas de las cuestiones que se han planteado y se van a resolver a lo largo de este TFG.

Los áridos son una de las materias primas minerales imprescindibles para el desarrollo económico y social de cada región, son uno de los recursos naturales principales para la industria de la construcción.

Para poder estudiar cómo se comportan los áridos en los procesos de secado es necesario conocer los motivos que les producen esos cambios.

El agua es un agente que hace cambiar las propiedades de muchos materiales. La realidad es que si no se controla el agua en construcción suele ser más motivo de problemas que de beneficios, pero sin ella tampoco podríamos fabricar el material que tantos beneficios ha aportado a la construcción, el hormigón.

Por ello es importante estudiar el comportamiento que tienen los áridos frente a la humedad, como afecta la humedad según el tamaño del árido o cómo afecta en los tiempos de secado según el método de secado empleado.

Este TFG se ha centrado en el proceso de secado de áridos comparando ambos métodos, el método de secado por microondas y el método de secado por estufa. Para ello se realiza un estudio con muestras gemelas recogidas de distintas plantas de áridos de la provincia de Aragón, los áridos empleados en los ensayos son silíceos, calizos y dolomíticos. Estas muestras se someten a distintos porcentajes de humedad según su tamaño o según el tipo de árido.

El método de secado por microondas es una técnica que ha sido estudiada a lo largo de los años en diversas publicaciones, en todas ellas con resultados satisfactorios, pero hasta el momento solo existe normativa española que regule su uso. Con este estudio se pretende demostrar que el método de secado por microondas es un método de secado alternativo al método de secado por estufa.



## **PALABRAS CLAVE**

ÁRIDOS

HORNO MICROONDAS

HORNO ESTUFA

MÉTODO GRAVIMÉTRICO

PROPIEDADES FÍSICAS Y CRISTALOGRÁFICAS

## ABSTRACT

What are aggregates used for in construction?, How does humidity influence the size of the particles?, How does the mineralogical composition of aggregates affect the drying process?, What are the differences between drying an aggregate by microwave to drying it by stove?, Can these aggregates be used later in other tests?, Can a regulation be created to regulate the use of this method as an alternative method to the stove method?, What should this rule contemplate?

These are some of the issues that have been raised and will be resolved throughout this TFG.

Aggregates are one of the essential mineral raw materials for the economic and social development of each region, they are one of the main natural resources for the construction industry.

In order to study how aggregates behave in drying processes, it is necessary to know the reasons that produce these changes.

Water is an agent that changes the properties of many materials. The reality is that if the water under construction is not controlled, it is usually more a reason for problems than for benefits, but without it we could not manufacture the material that has brought so many benefits to the construction, concrete.

That is why it is important to study the behavior of aggregates against moisture, how humidity affects according to the size of the aggregate or how it affects drying times according to the drying method used.

This TFG has focused on the process of drying aggregates by comparing both methods, the microwave drying method and the stove drying method. To do this, a study is carried out with twin samples collected from different aggregate plants in the province of Aragon, the aggregates used in the tests are siliceous, limestone and dolomitic. These samples are subjected to different percentages of moisture depending on their size or according to the type of aggregate.

The microwave drying method is a technique that has been studied over the years in various publications, in all of them with satisfactory results, but so far there are only Spanish regulations that regulate its use. This study aims to demonstrate that the microwave drying method is an alternative drying method to the stove drying method.

# 1. INTRODUCCIÓN

El término "árido" hace referencia a una materia prima que puede ser extraída del terreno y de canteras. Los áridos son materiales granulares inertes formados por fragmentos de roca o arenas utilizados en la construcción (edificación e infraestructuras) y en numerosas aplicaciones industriales Dirección general de Industria. Energía y Minas (2007). Coloquialmente según su tamaño se conocen como gravas, gravillas, arenas o piedras.

Además de los áridos, el agua es un elemento que juega un papel importante en la industria de la construcción, se emplea en los procesos de mezclado de algunos materiales, por este motivo se debe aplicar la cantidad necesaria en estos procesos para obtener su máxima efectividad.

Siendo conscientes que los áridos son fundamentales en edificación o para el desarrollo de cualquier actividad urbanística y sabiendo la importancia que tiene el agua y el hormigón en construcción es necesario estudiar y conocer la repercusión que tiene el agua en los áridos y determinar esa humedad a través de varios métodos de secado.

Se podría definir el secado como la eliminación del agua contenida en un sólido por evaporación, por aporte de calor. La investigación de este TFG está basada en la comparación de los dos métodos gravimétricos, el secado mediante estufa y el secado mediante microondas. Estos métodos están basados en la determinación del peso del material antes y después de su secado.

En la actualidad el método más utilizado para el secado de áridos es mediante el horno de estufa, hasta el momento es el único método del que se tiene una normativa UNE – EN 1097 -5 AENOR (2009) y UNE – EN 1367 -4 AENOR (2009). Este método además de emplearse para determinar la humedad de los materiales, se utiliza como método de referencia para otros métodos, como son el método de secado por microondas, el método de secado por lámparas alógenas, el método de secado por lámparas térmicas... aunque cuando existan dudas sobre la precisión de cualquiera de estos métodos se debe preferir el método de secado por estufa.

Como se ha dicho anteriormente en España no existe normativa respecto al método de determinación de la humedad mediante secado por microondas, aunque sí que hay un apunte en el anexo B de la norma UNE- EN ISO 17892-1:2015 AENOR (2015) en el que se cita textualmente "En algunas situaciones, por ejemplo en los controles de obra (in situ) en obras de tierra, puede ser necesario un método rápido de determinación de la humedad, existiendo varios métodos rápidos, por ejemplo el

## Introducción

método de baño de arena, el método de secado en horno microondas y el método de presión de gas usando carburo de calcio.

No se debería considerar que esos métodos son adecuados para todo tipo de suelos y cuando se usen en un suelo particular deberían llevarse a cabo ensayos con el método de secado en estufa como comprobación. Esta advertencia es aplicable especialmente a suelos que contienen arcillas o materia orgánica”.

Aun no existiendo una normativa que avale su uso como método de secado, en la actualidad las empresas que se dedican al pesaje de áridos en las plantas de áridos, están tarando los equipos con microondas, además este método es utilizado en las plantas cuando se precisa tener resultados más rápidos.

En este TFG se van a comparar los resultados de ambos métodos y valorar si el secado por microondas puede ser una alternativa al secado por estufa, con la finalidad de elaborar un borrador de normativa UNE que regule la utilización del horno microondas como método de secado alternativo

## 2. OBJETIVOS

El presente estudio tiene varios objetivos.

Por un lado existen unos objetivos generales:

- Estudiar del control de la humedad de los áridos mediante microondas en comparación con el método de secado por estufa.
- Demostrar que las propiedades cristalográficas de las muestras no varían después de ser ensayadas en el microondas y se pueden reutilizar en otros ensayos.
- Elaborar un borrador que sirva para crear una normativa UNE que avale la utilización del horno microondas como método de secado alternativo.

Y por otro lado existen unos objetivos específicos, que son los pasos que se siguen en el programa experimental:

- Efectuar tamizado de muestras con su correspondiente granulometría y clasificar muestras por tamaños.
- Secar los áridos por ambos métodos (microondas y estufa) con muestras gemelas para poder comparar los resultados obtenidos por ambos métodos.
- Elaborar tablas con los resultados de los tiempos de secado y las temperaturas para los distintos tipos de áridos en función de la humedad, la frecuencia del microondas y el tamaño de la muestra.
- Estudiar y comparar la estructura mineralógica de las muestras ensayadas por ambos métodos.
- Elaborar un estudio estadístico comparando tiempos de secado, temperaturas y gramos de secado para ambos métodos.
- Obtener y redactar conclusiones de los resultados obtenidos en los estudios y proponer futuras líneas de investigación.

### 3. MEDIOS

Es significativo nombrar los medios necesarios para la elaboración de este TFG y la colaboración que se nos ha prestado. La parte experimental requiere de medios técnicos, materiales y humanos que en ciertos momentos resultan difíciles de obtener debido a la complejidad del estudio a desarrollar. Para el desarrollo del proyecto se han utilizado los siguientes medios:

#### 1. Plantas.

Los áridos naturales utilizados en todos los ensayos han sido facilitados por distintas plantas de la provincia de Aragón. La planta de Emipesa SA (Teruel), Hormigones Grañen SL (Angües-Huesca), Dolomitas Aragón SL (Zaragoza).

#### 2. Instalaciones y Laboratorios.

Para el análisis de los áridos se ha tenido a disposición el laboratorio de la Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia (EUPLA).

Dichas instalaciones se encuentran en la C/ Ronda San Juan Bosco en La Almunia de Doña Godina. Se nos han facilitado todos los equipos e instalaciones necesarias para el desarrollo de la investigación.

Para el análisis de las propiedades cristalográficas se ha contado con el apoyo del laboratorio de CEMEX en calle Afueras, S/N, 50260 Morata de Jalón, Zaragoza.

## 4. ESTRUCTURA DEL TFG

Este TFG se encuentra organizado por capítulos. A continuación se realiza una descripción de cada uno de ellos.

En el primer capítulo "Introducción", se hace un breve resumen explicando conceptos que tienen relación sobre el secado de áridos.

En el segundo capítulo "Objetivos", se detallan los objetivos que se pretenden alcanzar al terminar este estudio.

El tercer capítulo "Medios", define las plantas de áridos y las instalaciones empleadas para la elaboración de este TFG.

En el cuarto capítulo "Estructura del TFG", se enumeran y explican los capítulos de los que se compone este proyecto.

El quinto capítulo "Metodología" es un resumen de los pasos seguidos en el estudio de la parte práctica. Se han elaborado tres tipos de estudios previos para facilitar los trabajos de campo. En primer lugar se ha empleado una herramienta gráfica para valorar los plazos previstos para el desarrollo del TFG, diagrama de Gantt. En segundo lugar se ha realizado el cálculo de gramos necesario para la ejecución de la parte práctica. Por último se ha creado un manual de procedimiento utilizado para anotar los resultados de los ensayos y facilitar el trabajo en el laboratorio.

El sexto capítulo "Estado del arte", es un resumen de los artículos y tesis encontrados desde el trabajo previo de la tesis doctoral de Martín Orna Carmona y posteriormente se han buscado desarrollos posteriores Orna-Carmona (2015).

El séptimo capítulo "Normativa técnica", menciona todas las normativas de secado por microondas y secado por estufa que afectan para el desarrollo de esta investigación.

En el octavo capítulo "Materiales y Procedimientos", explica los diferentes tipos de áridos, las formas de medir la humedad, distintos tipos de ensayos y los equipos a emplear. Igualmente se explica cómo se lleva a cabo la selección de muestras y de las plantas de áridos.

El noveno capítulo "Programa Experimental", es donde se recoge el desarrollo de los ensayos de secado de los áridos.

El décimo capítulo "Resultados", muestra los resultados obtenidos en los ensayos de secado por microondas y secado por estufa, los resultados de difracción de rayos X y el análisis estadístico.

#### Estructura del tfg

El onceavo capítulo "Conclusiones", en este apartado se explican los resultados a las que se llegan después de analizar los ensayos.

El décimo "Futuras Líneas de Investigación", sugiere posibles estudios.

Finalmente se presentan las referencias bibliográficas y los anexos.

## 5. METODOLOGÍA

En este capítulo se exponen los pasos que se han adoptado para realizar el TFG.

- Búsqueda de información:

La investigación comienza con el estudio de la tesis doctoral de Don Martín Orna Carmona, se revisa toda la documentación y normativas utilizadas para redactar su tesis. Se continúa con una búsqueda y análisis relacionados con el secado de áridos por el método de microondas publicados desde la fecha de finalización de la tesis hasta la actualidad Orna-Carmona (2015).

- Documentos previos a la fase experimental:

Se crea una documentación previa que facilite el desarrollo del trabajo práctico. Esta documentación se compone de un manual de procedimiento que facilita el trabajo en el laboratorio, un diagrama de Gantt para prever, asignar y controlar el tiempo que se tarda en cada fase, y por último un cálculo de gramos para conocer la cantidad de material necesaria para realizar todos los ensayos.

- Campaña de secado:

Con las muestras facilitadas por las plantas de áridos elegidas se procede a comenzar los ensayos por ambos métodos.

- Recopilación de resultados:

Se recogen las muestras más representativas de cada una de las plantas para cada uno de los tamaños de árido, posteriormente son enviadas a Cemex para comprobar las propiedades cristalográficas de cada una de ellas.

- Análisis estadístico de los resultados:

Se analizan y comparan los resultados obtenidos por ambos métodos de secado a través de un estudio estadístico.

- Elaboración de la memoria TFG:

Se confecciona la memoria recopilando toda la información que se ha ido obteniendo en todos estos apartados.

- Conclusiones.

Finalmente después de analizar todos los resultados obtenidos se llegan a unas conclusiones y se plantean futuras líneas de investigación.

## 6. ESTADO DEL ARTE

En este sexto capítulo "Estado del arte", se recogen las ideas y conclusiones de los trabajos de investigación publicados hasta el momento, haciendo especial hincapié en las publicaciones más recientes sobre el uso del horno microondas para determinar la humedad de los áridos.

El origen de este TFG nace de la investigación desarrollada por el Dr. Martín Orna Carmona, "Análisis del secado con microondas como alternativa a la estufa en la determinación de la humedad de disgregados de la construcción en laboratorio y campo. Elaboración de un protocolo normativo" Orna-Carmona (2015). Está fundamentada en la creencia que tiene el propio autor sobre la necesidad de que exista una norma española propia que regule el uso del microondas como método de secado, para determinar de forma rápida la humedad de materiales disgregados de construcción (suelos y áridos).

La revisión bibliográfica se ha completado con las investigaciones más relevantes de los últimos 6 años partiendo de cuatro documentos principales:

- Determinación de la humedad en suelos granulares utilizando horno microondas y comparación de los resultados en el método tradicional, Gámez-Camargo & Hilaron-Plazas (2006).

- Análisis del comportamiento de la curva característica de humedad en geo - materiales intermedios sometidos a diferentes niveles de estrés térmico (Díaz-Sánchez, 2015).

- Análisis comparativo de los resultados obtenidos en ensayos de humedad natural y caracterización sobre muestras de suelos finos secadas en horno microondas vs. el método tradicional Santos-Rojas et al. (2007).

- Comparación de diferentes métodos de calentamiento para la determinación del contenido de humedad en los suelos Mr. Adam (2015).

En el siguiente apartado aparecen todas las normativas que estos autores han empleado en sus publicaciones.

## 6.1. NORMATIVAS

En este presente apartado se realiza un recorrido por las normativas que regulan la determinación del contenido de humedad de los áridos por dos métodos de secado empleados es las investigaciones publicadas.

### *6.1.1. Normativas por secado en microondas*

Las normas empleadas en las investigaciones encontradas son aquellas que regulan métodos de secado térmico.

Las investigaciones que se han encontrado que utilizan este método como método de secado de áridos, utilizan como referencia en sus trabajos las siguientes normas (Estados Unidos de América) ASTM D4643 Departamento de Defensa (2017) y la norma (Colombia) INV E- 135 Instituto Nacional de Vías (2013) aquellas normativas técnicas tienen unas normas complementarias de secado por estufa ASTM D2216 Primer taller de mecánica de suelos (2019) y la INV E- 122 Instituto Nacional de Vías (2007). Estas normas son aplicables a todo tipo de suelos y en caso de duda sobre la precisión de ambos métodos se debe preferir las normas de secado por estufa.

### *6.1.2. Normativas por secado en estufa*

En todas las investigaciones que se han encontrado que utilizan este método de secado Díaz-Sánchez (2015); Gámez-Camargo & Hilaron-Plazas (2006); Mr Adam (2015); Santos-Rojas et al. (2007), utilizan las normativas técnicas ASTM D2216 Primer taller de mecánica de suelos (2019), INV E- 122 Instituto Nacional de Vías (2007) como referencia para sus estudios. Este último autor Mr. Adam (2015) emplea además normas australianas.

## 6.2. ÁRIDOS EN EDIFICACIÓN

Los áridos se emplean en todos los ámbitos de la construcción, ya sea en viviendas, obras de infraestructura, vías de comunicación, equipamientos o industria.

En edificación se emplean para la preparación de hormigón siendo base esencial del mismo; hormigón estructural (cimientos, pilares y vigas), hormigón en masa (pavimentos, muros). Para la fabricación de elementos prefabricados (ladrillos, bloques, aceras, vigas, tuberías...). Para la construcción de bases, subbases y aglomerados

asfálticos; que son los elementos que componen las carreteras, autovías, calles, aparcamientos o pistas Interempresas Media, S.L.U. - Grupo Nova Àgora (2019).

### 6.3. IMPORTANCIA DEL AGUA EN LOS ÁRIDOS

Debido a la importancia que tiene el agua en los áridos, es necesario analizar y justificar el cambio que puede generar el agua en su comportamiento, ya que podría afectar la estabilidad de las obras. Cada material tiene un contenido de humedad máximo, mientras más pequeñas sean las partículas mayor influirá el agua sobre estas.

El contenido de agua en un árido es la cantidad de agua contenida en un material, esta propiedad de analizar la humedad de un árido se utiliza en una amplia gama de áreas científicas y técnicas, y se expresa como una proporción que puede ir de 0 (completamente seca) hasta el valor de la porosidad de los materiales en el punto de saturación Wikipedia (2019).

En los áridos y rocas se encuentran partículas porosas, donde se constituye un patrón ya definido o fase sólida con enlaces y espacios que pueden presentar varios efectos debido al agua, como son los debidos a la capilaridad, tensiones superficiales, problemas de expansión y compresión Díaz-Sánchez (2015). Uno de los efectos más destructivos del agua son las heladas. El agua penetra en las rocas por contacto físico o en la humedad de los ambientes, llenando sus cavidades internas. Con una bajada de temperatura, el agua se congela y aumenta de volumen, provocando una tensión que en algunas zonas fractura la piedra Orna-Carmona (2016).

Los ciclos naturales de humedad-sequedad que sufren las rocas pueden provocar una intensa alteración que se manifiesta por la aparición de desconchados y resquebrajamientos de las piedras. La propia piedra como la porosidad accesible, la succión capilar, la red capilar, favorecerán o dificultarán la penetración del agua y los efectos producidos por esta Orna-Carmona (2016).

La humedad puede provenir: Orna-Carmona (2016)

-De la atmósfera, fijada a las rocas por condensación de vapor de agua penetra en el interior por medio de los poros o capilares.

-De la lluvia, si bien no penetra fácilmente en la piedra como podría esperarse. Para ello es necesario que la piedra presente una alta succión por capilaridad y que el viento favorezca la penetración.

- Del terreno, absorbida por capilaridad.

## 6.4. FORMAS DE MEDIR LA HUMEDAD

Este TFG se ha centrado en dos formas de medir la humedad de los áridos, el método de estufa y el método de microondas, del mismo modo las investigaciones que se han encontrado utilizan ambos métodos.

Excepto una de las publicaciones Díaz-Sánchez (2015) que utiliza secado de horno convencional, secado por microondas, secado por cámara térmica, secado con lámpara halógenas, secado ambiente, para evaluar los cambios que se producen en la curva característica de la humedad, además estudia el método para la medición de succión con el método de papel filtro y método del potenciómetro para determinar el punto de rocío.

Comparando todos estos métodos llega a la conclusión que el método de secado por horno convencional es el que presenta menores desventajas, no se presenta sobrecalentamiento de las muestras y el estrés térmico es relativamente uniforme sobre las muestras, aunque observa que el horno microondas presenta mayor eficiencia comparado con el resto de métodos respecto a tiempos de secado Díaz-Sánchez (2015).

En el apartado 8.2 de este TFG se explican varios procedimientos para medir la humedad.

## 6.5. MÉTODOS DE SECADO

### 6.5.1. *Secado por estufa*

La estufa es el procedimiento habitual utilizado en el laboratorio para determinar la humedad de los suelos. Los estudios encontrados utilizan este método como método de referencia esperando que no se presenten grandes variaciones en los resultados al compararlo con el método del horno microondas Gámez-Camargo & Hilaron-Plazas (2006); Mr. Adam (2015); Santos-Rojas et al. (2007).

El tiempo necesario para llegar a masa constante varía dependiendo del tipo de árido, tamaño de la muestra, el porcentaje de humedad de la muestra de ensayo y otros factores Mr. Adam (2015).

La norma UNE- EN ISO 17892-1 AENOR (2015) explica que para obtener el secado de suelos finos con la estufa, es suficiente un periodo de 16 horas, a temperatura entre

Estado del arte

105°C y 110°C. Los suelos gruesos pueden secarse en 4 horas a la misma temperatura, cuando se utilizan estufas con circulación de aire.

María Soledad Gómez Lorenzini y Sergio Vidal Arcos, 2007 Gómez-Lorenzini & Vidal-Arcos (2007) han estudiado la posibilidad de efectuar el secado de distintos tipos de áridos y a distintas humedades, obteniendo en suelos finos una duración mínima de 12 horas.

### 6.5.2. *Secado por microondas*

El comportamiento de un suelo cuando se somete a la energía del microondas depende de su composición mineralógica y como resultado no hay un procedimiento único aplicable para todos los tipos de suelo INV E-135-07 Instituto Nacional de Vías (2013)

Este método se puede utilizar en casi todo tipo de suelos, para algunos con alto contenido de yeso u otros materiales hidratados, suelos altamente orgánicos o suelos en los cuales el agua de los poros contiene sólidos disueltos (tales como sal en depósitos marinos), este método puede dar resultados no confiables de contenidos de agua debido a que el cambio de masa durante el secado puede no deberse solo a la pérdida de agua libre, en esas circunstancias el secado debería realizarse a  $T^0 < 50^{\circ}\text{C}$ , asegurando que la determinación de la masa seca se realiza empleando el método de pesada constante AENOR (2015); Instituto Nacional de Vías (2013).

#### 6.5.2.1. *Naturaleza de los áridos*

En las publicaciones encontradas emplean áridos de distinta naturaleza.

Nos explica Santos-Rojas et al.(2007) la humedad de suelos finos (arcillas), después de ser secadas las muestras en los diferentes hornos no se presentan sobrecalentamiento ni estrés térmico.

Nos dice Mr. Adam (2015) en su proyecto de investigación tiene como objetivo identificar las correlaciones entre los dos métodos para una gama específica de materiales, que son 3 tipos de arcillas mezcladas con limos en diferentes proporciones: grano fino silty (limo y arcilla), el porcentaje de diferentes tipos de minerales de arcilla (Kaolinite, Illite y Montmorillonite y musgo de turba que es material orgánico), el microondas no es un método aconsejable para pruebas de contenidos de humedad que contengan un 5% de musgo de turba y un 95% de suelo de grano fino.

Nos comenta Gámez-Camargo & Hilaron-Plazas (2006) en su estudio determinan las humedades naturales en suelos granulares (Grava media, arena gruesa y arena fina

mezcladas), en la investigación emplean esta técnica utilizando reductores de calor (carbonato de potasio) para evitar el sobrecalentamiento del árido que sucede cuando una muestra supera 110°C. Para suelos granulares hay riesgos de que las partículas de disgreguen y pierdan las propiedades físicas – químicas.

Nos explica Díaz-Sánchez (2015) como evalúa la curva característica de la humedad lograda con diferentes métodos de secado de Geo materiales intermedios (IGM) (rocas blandas y arenas) materiales térreos entre los límites de suelo, roca y arenas.

El método de microondas tiene como ventaja menor consumo de energía eléctrica y una mayor eficiencia respecto al tiempo de secado comparándolo con los otros métodos, se hace uso de un vaso con agua con el fin de reducir el calor del mismo y minimizar el sobrecalentamiento de la muestra

#### 6.5.2.2. *Influencia de las temperaturas*

La principal objeción del empleo del microondas como método de secado es la posibilidad de sobrecalentamiento de la muestra, ocasionalmente hay minerales en el agregado que pueden causar sobrecalentamiento y explosión del material Díaz-Sánchez (2015); Gámez-Camargo & Hilaron-Plazas (2006); Santos-Rojas et al. (2007).

#### 6.5.2.3. *Potencias de los microondas*

Nos comentan Gámez-Camargo & Hilaron-Plazas (2006); Santos-Rojas et al. (2007) que toman potencias de 420W, permitiendo de esta manera que la temperatura no supere los 110°C y que el suelo no sufra sobrecalentamiento.

Nos dice Díaz-Sánchez, (2015) que utiliza potencias entre 350W-700W según horno utilizado, esto tiene como ventaja menor consumo de energía eléctrica y una mayor eficiencia respecto al tiempo de secado del horno convencional.

Del mismo modo en sus estudios nos explica Mr. Adam (2015) como realiza un procedimiento con 2 microondas idénticos iniciando con 350 watts y terminando con 720 watts, se identifica que es suficiente con 700 vatios para secar las muestras y evitar exceso de temperaturas.

#### 6.5.2.4. *Tiempos de secado según el campo de estudio y el tamaño de las muestras*

La información encontrada nos interesa para saber que tamaños de muestra emplean, el número de ensayos en los que se basan las investigaciones y el tiempo en el que tardan en obtener los resultados.

Santos-Rojas et al. (2007) nos dice que realiza el procedimiento 3 veces para cada una de las 11 muestras con ensayos de suelos finos (arcillas) con muestras de 100gr y 150gr para los dos métodos tomando pesos de la muestra a intervalos de 5 minutos, el tiempo de secado necesario es de 17 a 31 min a potencia media.

Los materiales que ensaya Díaz-Sánchez (2015) son Geo materiales intermedios (IGM), rocas blandas y dos tipos de arenas una de ellas con cuarzo redondeado, realiza 2 ensayos uno para cada tipo de árido con muestras de 20 gramos, con un tiempo de secado de 40 min a potencia alta.

Gámez-Camargo & Hilaron-Plazas (2006) nos exponen que efectúan ensayos con suelos granulares (arena fina 100gr, arena gruesa 300gr, grava media 500gr). Las muestras son mezcladas entre ellas en distintas proporciones sumando 300gr en total para cada ensayo, realizando en total 10 ensayos para cada método, los tiempos de secado para arenas oscilan entre 14 y 33 minutos y la grava media en un tiempo de 20 minutos para las 3 humedades trabajadas (5%, 10%, 20%), con potencia media y potencia alta.

Mr. Adam (2015) nos explica que realiza 277 muestras utilizando tanto el método de secado por microondas como el método del horno convencional (554 muestras en total), para 3 tipos de arcillas mezcladas con limos en diferentes proporciones, los tamaños empleados son de 150 gramos y el tiempo varía en función del tipo y tamaño de la muestra pero aproximadamente son de 20 y 40 minutos a potencia alta.

En todas las investigaciones observan que el método de secado del horno microondas produjo resultados muy cercanos a los resultados obtenidos por el horno convencional.

### 6.5.2.5. *Equipos empleados*

- Horno microondas:

Preferiblemente con cámara de ventilación. Horno con control para variar temperatura y con graduaciones de potencia de entrada alrededor de 700W.

- Balanza:

Capacidad de 2000 gramos o mayor, precisa, legible y con sensibilidad dentro del 0,1%. Cumplir con los requerimientos de la especificación D4753.

- Recipientes para muestras:

No metálicos ni absorbentes, resistentes al shock térmico, no sujetos a cambios de masa o forma cuando se les somete repetidamente a calentamiento, enfriamiento o limpieza.

Recomendables (platos de porcelana, platos de vidrio de borosilicato y pyrex)

- Reductor de calor:

Disminuye la posibilidad de sobrecalentamiento de la muestra y de dañar el horno (vidrios llenos de agua, ladrillos humedecidos...).

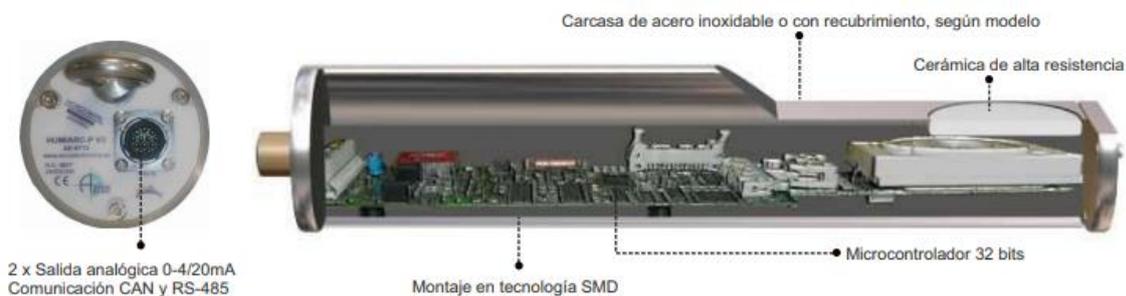
- Utensilios para manipular recipientes (guantes)
- Herramientas para mezclar (espátulas, cuchillos planos).
- Estufa de secado ventilada, controlada por termostato para mantener temperaturas de 110°C.
- Bandejas, resistentes al calor.
- Desecador con desecante, para la etapa de enfriamiento Calibrado de equipos a través de la humedad del secado por estufa

Este procedimiento tiene por objeto describir la sistemática utilizada en la calibración de instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático Laurila (2019)

La estufa sirve como referencia en la determinación de la humedad para otros métodos de secado, el calibrado de equipos se realiza con microondas en la actualidad.

## 6.6. CALIBRADO DE EQUIPOS EN LAS PLANTAS

Los medidores de humedad por microondas [Ilustración 1] son sensores para la medición de humedad en áridos / agregados resistentes, utilizando su tecnología digital por microondas realiza la lectura en el flujo del material de forma continua durante la dosificación. El medidor detecta las variaciones en los niveles de humedad permitiendo la automatización y corrección de arenas / agua en los procesos de hormigón Humiarc (2021).



*Ilustración 1 Medidor de humedad por microondas Humiarc (2021)*

Los sensores de humedad pueden medir los niveles de humedad en materiales descargados de cubas, sobre cintas transportadoras [Ilustración 3] o en alimentadores vibratorios, mezcladoras, cubas/tolvas/silos [Ilustración 2] [Ilustración 4] [Ilustración 5].



*Ilustración 3 Sensor sobre cinta transportadora de arena Hidronix (2020)*



*Ilustración 2 Cintas transportadoras Hidronix (2020)*

El calibrado se puede realizar dentro del sensor, dentro del sistema de control y para tres materiales diferentes. El sensor cuenta con dos salidas analógicas que se pueden configurar totalmente y calibrar de forma interna para proporcionar una salida de la humedad directa que sea compatible con cualquier sistema de control.



*Ilustración 4 Sensor de humedad bajo cuba de áridos Hidronix (2020)*

Hay dos entradas digitales disponibles que pueden controlar la función de cálculo de promedio interno. Esto permite la medición del sensor que se realiza 25 veces por segundo, para permitir la detección rápida de cualquier cambio que se produzca en el contenido de humedad que se va a calcular. Esto facilita el uso del sistema de control.

Es posible configurar una de las entradas digitales para que proporcione una salida digital que pueda suministrar una señal de alarma en caso de producirse una lectura baja o alta. Esto se puede utilizar para señalar una alarma de humedad alta o también para indicar a un operador que es necesario rellenar una cuba de almacenamiento Hidronix (2020)



*Ilustración 5 Sensor humedad bajo cuba Hidronix, (2020)*

Las plantas modernas pueden pesar áridos con una precisión de hasta  $\pm 0,5\%$ . Si la cantidad de humedad de un lote de arena o áridos varía entre un 2% y un 10%, esto afectará a la precisión y a las proporciones de los materiales pesados, puesto que el agua se está pesando correctamente y no sucede lo mismo con los materiales secos. Hidronix (2020).

## 6.7. CORRELACIÓN DE LOS ÁRIDOS EN LAS PLANTAS

Las plantas de tratamiento de áridos son las encargadas de producir las distintas fracciones granulométricas necesarias para la obra pública y la construcción de forma general. La explotación de los áridos se realiza casi siempre a cielo abierto, estos áridos pueden ser naturales, artificiales o reciclados. A continuación (Tabla 1) podemos ver la denominación general utilizada en los productos de cantera Andrea-Blanco (2001).

*Tabla 1 Clasificación y denominación de los áridos Andrea-Blanco (2001)*

<b>Denominación</b>	<b>Tamaño (mm) DIN 4022</b>	<b>Denominación</b>	<b>Tamaño (mm) CTE</b>
Bolos y bloques	> 60	Roca	Tamaños grandes
Grava gruesa	60 - 20	Grava gruesa	> 20
Grava media	20 - 6	Grava media	20 - 6
Grava fina	6 - 2	Grava fina	6 - 2
Arena gruesa	2 - 0,6	Arena gruesa	2 - 0,6
Arena media	0,6 - 0,2	Arena media	0,6 - 0,2
Arena fina	0,2 - 0,06	Arena fina	0,2 - 0,06
Limo grueso	0,06 - 0,02	Limo	< 0,06
Limo medio	0,02 - 0,006	Limo	0,06 - 0,002
Limo fino	0,006 - 0,002	Limo	> 0,002
Arcilla	< 0,002 (2µm)	-	< 0,002 (2µm)

Proceso de instalación de tratamientos de áridos en planta: Irondio-Cagigas (2008).

- Trituración:

Este proceso consiste en la reducción de los tamaños de los materiales que entran por el alimentador. Pueden usar diferentes mecanismos de rotura, como son la compresión, el impacto o percusión y la abrasión o atracción.

- Clasificación:

Este proceso consiste en la separación por tamaños mediante cribado de los áridos procedentes de la trituración o molienda, con el fin de clasificarlos como productos finales, enviarlos de nuevo a los procesos de reducción de tamaños o para eliminarlos.

- Lavado:

El lavado de los áridos se realiza con el objetivo de limpiar la superficie exterior para la eliminación de impurezas que pueda presentar, como lodos o arcillas, que pueden rebajar la calidad de los áridos. También se persigue aumentar la calidad de los mismos haciendo un producto mucho más homogéneo. Es importante conocer que este proceso se puede realizar al mismo tiempo que la clasificación.

- Almacenamiento:

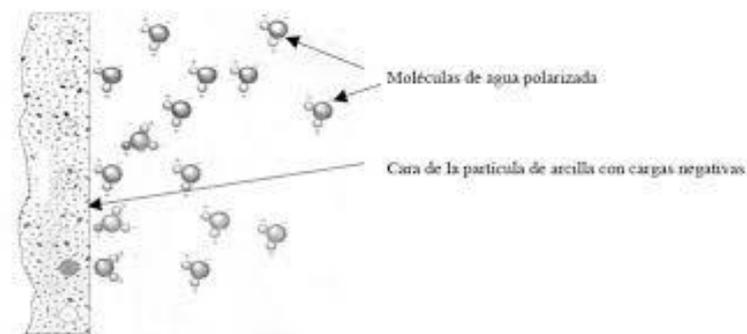
Una planta de tratamiento de áridos tiene que contar con equipos de almacenaje por diversas razones: protección frente a la climatología, comerciales (como forma de asegurar el suministro), y técnicas (necesario para el cumplimiento de normativas).

## 6.8. CAPA DIFUSA

Cuando una arcilla se pone en contacto con agua, alrededor de las partículas de arcilla comienzan a “flotar” las moléculas de agua polarizadas en forma conjunta con los cationes, de esta forma en la fase líquida alrededor de las partículas de arcilla se forma una concentración de cationes y de agua dipolar, formando lo que se conoce como la doble capa difusa, donde coexiste una elevada concentración de cationes y de aniones en las cercanías de la lámina de arcilla que va perdiendo concentración a medida que se aleja de ella Gómez-Burgos & Parra-Cubillos (2015)

Nos explica Santos-Rojas et al. (2007) el comportamiento de la doble capa difusa [Ilustración 6] con las diferentes muestras de suelos finos, siendo estas secadas por microondas con diferentes contenidos de humedad.

Deducen en su estudio que el horno microondas es una herramienta rápida y confiable para desarrollar todo lo concerniente a suelos finos.



*Ilustración 6 Capa difusa (Gómez-Burgos & Parra-Cubillos, 2015)*

## 6.9. SOBRECALENTAMIENTO

El sobrecalentamiento de un árido o de un suelo se produce cuando está sometido a temperaturas superiores a los 110°C. Esto provoca registros de contenidos de humedad más elevados de los que están establecidos por la norma cumpliendo los requisitos de determinación de humedad de suelos para investigaciones y ensayos geotécnicos, posibles alteraciones de las características físicas del suelo debido a las altas temperaturas Gámez-Camargo & Hilaron-Plazas (2006).

Se ha mostrado mayor confiabilidad en el método de secado con horno convencional ante este problema, con el método de microondas se puede presentar sobrecalentamiento de las muestras, Díaz-Sánchez (2015) propone en su tesis el uso de un vaso con agua dentro del horno microondas para reducir el calor dentro del mismo.

Nos indican Gámez-Camargo & Hilaron-Plazas (2006) como resuelven el problema del sobrecalentamiento tomando potencias más bajas de microondas (420W), permitiendo que la temperatura no supere los 110°C y de este modo el suelo no sufra sobrecalentamiento aunque esto ocasionará más tiempo de exposición, otra alternativa es tomar pesos secos de las muestras a intervalos de 5 minutos o más, menores tiempos implicaría alteraciones en la pérdida de la humedad y tiempos mayores de secado.

Nos dice Mr. Adam (2015) utilizó un ladrillo refractario (fuego) en cada microondas para reducir la posibilidad de sobrecalentamiento, mientras se secaban las muestras como se muestra en la [ilustración 7]. Estos fueron utilizados con éxito en estudios anteriores y parecían funcionar bien a lo largo de este proyecto.



*Ilustración 7 Ladrillo refractario Mr. Adam (2015)*

## 6.10. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA CON REDUCTORES DE CALOR

Los reductores de calor se emplean para evitar el sobrecalentamiento de los áridos que se produce cuando estos alcanzan los 110°C.

Nos habla Gámez-Camargo & Hilaron-Plazas (2006) en sus ensayos que utilizan carbonato de potasio en una concentración de 78,5%, para evitar que las muestras excedan 106°C de temperatura y así evitar un sobrecalentamiento de la muestra.

Los más habituales son:

- ACETATO DE POTASIO:

El acetato de potasio es una sal neutra. Wikipedia (2021) [Ilustración 8].



*Ilustración 8 Acetato de potasio (Nuoxin, s. f.)*

- YODURO DE POTASIO:

El yoduro de potasio es una sal cristalina. Wikipedia (2021) [Ilustración 9].



*Ilustración 9 Yoduro de potasio Wikipedia, (2021)*

- CARBONATO DE POTASIO:

El carbonato potásico es una sal blanca, soluble en agua. Wikipedia, (2021)  
[Ilustración 10].



*Ilustración 10 Carbonato de potasio Wikipedia (2021)*

## 6.11. CONCLUSIONES GENERALES SOBRE EL SECADO

Se deduce que el horno microondas es una herramienta rápida y confiable para desarrollar todo lo concerniente con la humedad natural de los suelos y áridos, produce resultados muy cercanos a los resultados reales producidos por el método tradicional, reduciendo notablemente el tiempo de secado de las muestras dependiendo estos valores del tipo de muestras que se están trabajando.

Los tiempos de secado oscilan entre 14-40 minutos para muestras de entre 80gr y 300gr, reduciendo costos y contaminación del medio ambiente. Con errores máximos entre ambos ensayos de aproximadamente el 0,47%, sin alterar las muestras ensayadas. Como aspecto negativo se encuentra el posible sobrecalentamiento al alcanzar temperaturas por encima de 110°C, que resuelven en todas las investigaciones con los métodos de secado por microondas y secado por estufa Díaz-Sánchez (2015); Gámez-Camargo & Hilaron-Plazas (2006); Mr. Adam (2015); Santos-Rojas et al. (2007).

## 7. **NORMATIVA TÉCNICA SOBRE ÁRIDOS**

Las normas técnicas UNE son documentos elaborados por comités de expertos que abordan un tema en concreto. Tratan de temas técnicos, se elaboran tras detectar una cierta necesidad y son elaboradas por expertos en la materia tratada. Hay varios tipos de normas UNE, las normas internacionales (ISO), normas europeas (EN) y normas nacionales (UNE). Hay normas internacionales o europeas que se traducen en español y se adoptan como normas UNE, estas dan lugar a las UNE -EN, UNE-ISO, UNE-EN-ISO Constumática (2010).

Las normas que aparecen a continuación (Tabla 2) han sido empleadas para poder realizar esta investigación y poder redactar este TFG.

*Tabla 2 Norma técnica actualizada*

<b>ESTUFA</b>	<b>AÑO</b>	<b>MICROONDAS</b>	<b>AÑO</b>	<b>GRANUOMETRÍA</b>	<b>AÑO</b>
NTC 1495	2016	NFP 94 - 49 -01	1996	UNE EN 933 - 1	2012
NTE 069	1982	ASTM D4643	2017	UNE EN 933 - 2	1999
NF P 94 - 050	1996	ASTM C566	1997	UNE EN 933 - 3	2012
UNE 12570 (A1)	2013	INVE 135	2013	UNE EN 933 - 4	2008
UNE 17892 (A1)	2015			UNE EN 933 - 5 (A1)	2005
UNE 1097 - 5	2009				
UNE 1367 - 4	2009				
INVE 122	2013				
ASTM D2216	2019				
NLT	1958				

### DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD MEDIANTE SECADO EN ESTUFA:

- NTC COLOMBIANA 1495 (2016) (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2013) (Colombia)

Suelos. Método de ensayo para determinar en el laboratorio el contenido de agua (humedad) de suelos y rocas, con base en la masa.

- NTE REPUBLIC OF ECUADOR (1982) NYE 0690 (INEN Instituto ecuatoriano de normalización (1982) (Ecuador)

Mecánica de suelos determinación del contenido de agua método del secado al horno.

- NF P94-050 (1996) AFNOR, (1995) (Francia)

Determinación del contenido de agua corporal de los materiales.

- UNE- EN ISO 12570 Y UNE- EN ISO 12570:2000/A1:2013 (2013) AENOR (2013)

Prestaciones higrotermicas de los productos de los productos y materiales para edificios.

Determinación del contenido de humedad mediante secado a elevadas temperatura.

Modificación 1 (UNE – EN ISO 12570:2000/a1:2013).

- UNE-EN ISO 17892-1 (2015) AENOR (2015) (España)

Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos.

(Parte 1: Determinación de la humedad).Modificación (ISO 17892-1:2014).

- UNE- EN 1097-5 (2009) AENOR (2009) (España)

Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.

(Parte 5: Determinación del contenido de agua por secado en estufa).

- UNE- EN 1367-4 (2009) AENOR (2009) (España)

Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos, retracción por secado.

(Parte 4: Determinación de la retracción por secado).

---

Normativa técnica sobre áridos

- INVE 122 (2013) Instituto Nacional de Vías (2007) (Colombia)

Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado.

- ASTM D-2216 (2019) Primer taller de mecánica de suelos (2019) (Estados Unidos de América)

Método de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo.

DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD MEDIANTE SECADO CON MICROONDAS:

- NF P 94-049-1 (1996) AFNOR (1996) (Francia)

Determinación del contenido de agua corporal de los materiales.

(Parte 1: Método de secado por microondas).

- ASTM D 4643 (2017) Departamento de Defensa (2017) (Estados Unidos de América)

Método de prueba estándar para la determinación del contenido de agua (humedad) en suelos por calentamiento de horno microondas.

- ASTM C 566 (1997) Departamento de Defensa (1997) (Estados Unidos de América)

Método de prueba estándar para contenido de humedad total evaporable de un agregado por secado.

- INVE - 135 (2013) Instituto Nacional de Vías (2013) (Colombia)

Método para determinar la humedad de suelos usando el horno microondas

### NORMATIVA ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO:

Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.

- UNE- EN 933 – 1 (2012) AENOR (2012) (España)

Determinación de la granulometría de las partículas.

Método de tamizado

- UNE- EN 933 – 2 (1996) AENOR (1996) Modificación (1999) (España)

Determinación de la granulometría de las partículas.

Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.

- UNE- EN 933 – 3 (2012) AFNOR (2012) (España)

Determinación de la forma de las partículas

Índice de lajas

- UNE- EN 933 – 4 (2008) AENOR (2008) (España)

Determinación de la forma de las partículas

Coeficiente de forma

- UNE- EN 933 – 5 (1999) AENOR (1999) Modificación (2005)A1 (España)

Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso

## **8. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS**

### **8.1. ESTUDIO DE LOS ÁRIDOS**

#### *8.1.1. Términos básicos de los áridos*

ÁRIDOS: Grupo Nova Àgora (2019)

Materiales granulares inertes formados por fragmentos de roca o arenas utilizados en la construcción (edificación e infraestructuras) y en numerosas aplicaciones industriales.

1. CLASIFICACIÓN DE LOS ÁRIDOS POR TAMAÑO (Tabla 3)
2. CLASIFICACIÓN DE LOS ÁRIDOS SEGÚN SU PROCEDENCIA (Tabla 4)
3. CLASIFICACIÓN DE LOS ÁRIDOS SEGÚN SU FORMA (Tabla 5)

Tabla 3 Clasificación de los áridos por tamaño

TIPO DE ÁRIDO	TAMAÑO
AG: Árido grueso (Gravas) [Ilustración 11] [Ilustración 12]	Partículas de sedimentos con tamaños entre 2 mm y 64 mm. <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <p><i>Ilustración 11 Grava fina</i></p> <p><i>Ilustración 12 Grava gruesa</i></p> </div>
AF: Árido Fino (Arenas) [Ilustración 13].	Entre 1mm y 2 mm. <div style="text-align: center;">  <p><i>Ilustración 13 Arenas</i></p> </div>
FN: Para finos (Arenas Finas) [Ilustración 14].	Entre 1 mm y 0,063mm <div style="text-align: center;">  <p><i>Ilustración 14 Arenas finas</i></p> </div>
PM: Polvo mineral o Filler	Material de partículas de áridos muy finos. < ( 0,074mm ó 0,063 mm)
En cuanto al tamaño, los áridos se designan mediante fracción granulométrica d/D comprendida entre el tamaño inferior (d) y el superior (D).	

Tabla 4 Clasificación de los áridos según su procedencia

TIPO DE ÁRIDO	PROCEDENCIA	
ÁRIDOS NATURALES	Si no proceden de proceso industrializado.	<p>SILÍCEOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Difícil trituración.</li> <li>• Mala adherencia con conglomerantes (necesidad de activadores) por su carácter ácido.</li> <li>• Cumplen mejor las caras de fractura.</li> <li>• Resistencias mecánicas muy altas. Mejor esqueleto mineral que los calizos.</li> </ul>
		<p>CALIZOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fácil trituración.</li> <li>- Buena adherencia con los conglomerantes (cemento y ligantes hidrogenocarbonatos).</li> <li>- Roca fácilmente pulimentable (prohibida utilización en rodadura).</li> </ul>
ÁRIDOS ARTIFICIALES	Si proceden de proceso industrializado.	<p>Clasificación según su procedencia:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Demolición y reciclados de materiales pétreos artificiales.</li> <li>- Hormigón</li> <li>- Materiales cerámicos</li> <li>- Vidrios                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesos industriales</li> </ul> </li> <li>- Desechos de explotaciones mineras</li> <li>- Escorias cristalizadas de horno alto</li> <li>- Escorias de acerías</li> <li>- Desechos industria cerámica y del vidrio.                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Áridos especiales</li> </ul> </li> <li>- Arcillas expansivas (Arlita)</li> <li>- Sílice calcinada</li> <li>- Bauxita y corindón (Alúminas)</li> </ul>

*Tabla 5 Clasificación de los áridos según su forma*

<b>TIPO DE ÁRIDO</b>	<b>DEFINICIÓN</b>
ÁRIDOS RODADOS	Se obtienen de graveras que explotan depósitos granulares. Tienen forma redondeada, con superficies lisas y sin aristas, se les denomina también áridos naturales. Son principalmente de naturaleza silíceo.
ÁRIDOS MACHAQUEO O TRITURADO	Se obtienen por machaqueo de rocas (granitos, gabros, traquitas...), la maquinaria más empleada son las machacadoras rotatorias o de mandíbula. Contienen más elementos finos que los áridos rodados. Proporcionan una mejor adherencia que los áridos rodados pero dan morteros menos manejables. Presentan superficies rugosas y aristas vivas. Son principalmente de naturaleza caliza, aunque también pueden ser de naturaleza silíceo.

## 8.2. FORMAS DE MEDIR LA HUMEDAD

Se denomina humedad del suelo a la cantidad de agua por volumen de tierra que hay en un terreno. La humedad es la cantidad de vapor de agua que hay en el ambiente Wikipedia (2019).

Los principales métodos para determinar la humedad de los materiales son:

- Método del tacto
- Método gravimétrico
  - Secado con estufa
  - Secado con microondas
- Valoración de Karl Fischer
- Método Speedy
- Métodos nucleares
- Higrómetro
- Resistencia eléctrica
- Reflectometría
- Método con tensiómetro

## 8.2.1. Métodos para determinar la humedad los de los materiales.

### 8.2.1.1. Método del tacto

Uno de los métodos más antiguos y empleados para estimar el contenido de humedad de un terreno consiste en su inspección ocular y su tacto [Ilustración 15] USDA (2005). Al apretar la tierra entre el pulgar y el dedo índice o al exprimir la tierra en la palma de la mano, se puede obtener una estimación bastante aproximada de la humedad en el suelo Martín (1914)

Este método es rápido y simple y no es necesario equipos para determinar la humedad, solo es válido para suelos finos que contengan % altos de humedad, es bastante correcto cuando es usado por personal experimentado, permitiendo que un gran número de muestras sean analizadas rápidamente USDA (2005).



*Ilustración 15 Prueba compresión de bola (Gil-Montenegro, 2018)*

### 8.2.1.2. Método gravimétrico

Está basado en la determinación de la humedad antes y después de su secado. Se denomina también método térmico de secado y la fuente de calor puede proceder del calentamiento de resistencias eléctricas (estufa u horno convencional), combustión de un combustible, normalmente derivado del petróleo (secaderos a gas o gasoil) y por radiaciones electromagnéticas (microondas) Orna-Carmona (2015).

Materiales y procedimientos

El contenido de humedad expresado en base al peso [Ilustración 16] se expresa con la siguiente expresión:

$$\%H = \frac{Ph - Pd}{Pd} \times 100$$

Donde:

Ph: es el peso húmedo del suelo (en g o Kg).

Pd: es el peso seco del suelo (en g o Kg).

H: es el contenido de humedad (en %).

- Ventajas:

Método económico y sencillo.

Requiere de equipos comunes de laboratorio.

- Desventajas:

Se puede producir pérdida de agua en su traslado al laboratorio si no se manipula correctamente.

Requiere de mucho tiempo para obtener resultados, mínimo 16 horas en suelos finos.



Ilustración 16 Balanza analítica

### 8.2.1.3. Valoración de Val. Karl Fischer

El método de Karl Fisher [Ilustración 17] es un procedimiento de análisis químico basado en la oxidación de dióxido de azufre con yodo en una solución de hidróxido metálico y se puede realizar de forma volumétrica o coulométrica Orna-Carmona (2015).

- Ventajas:

Alta exactitud y precisión.

Análisis de corta duración.

- Desventajas:

Es caro.

Personal altamente cualificado para su manejo.



Ilustración 17 Método Karl Fischer

Wikipedia (2019)

#### 8.2.1.4. *Método Speedy*

Este método [Ilustración 18] está basado en la reacción entre el agua y el carburo cálcico, que produce una cantidad de gas (acetileno) directamente proporcional a la cantidad de agua presente en la muestra. El porcentaje de humedad se obtiene mediante un manómetro que mide la presión producida por el gas.

Es el método alternativo a la determinación de la humedad mediante secado por microondas si no se quieren emplear métodos nucleares Orna-Carmona (2015).

Está usado para determinar el contenido de humedad de suelos, arena y agregados finos en el campo. Es un método fácil, rápido y portátil (Utest Material Testing Equipment, s. f.)



*Ilustración 18 Método Speedy  
(Utest Material Testing Equipment)*

#### 8.2.1.5. *Métodos nucleares*

Los métodos nucleares [Ilustración 19] están basados en la emisión y recepción de neutrones, son los más extendidos en la medición en campo de la humedad de suelos compactados por su rapidez y precisión.



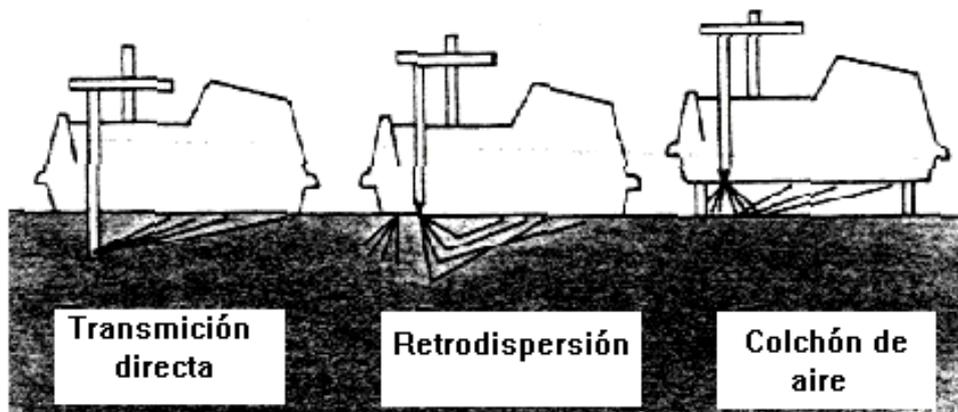
*Ilustración 19 Equipo método nuclear Universidad Católica de Valparaíso (1993)*

Estos métodos son la sonda de neutrones y los emisores de rayos gamma.

Materiales y procedimientos

La sonda de neutrones contiene una fuente radioactiva que envía una cierta cantidad de neutrones rápidos. Cuando los neutrones rápidos chocan contra los átomos de hidrógeno, se vuelven más lentos. Un detector dentro de la sonda mide la proporción de los neutrones rápidos que salen y los neutrones lentos que regresan. Esta relación determina el contenido de humedad del suelo Orna-Carmona (2015).

Existen tres formas [ilustración 20] para hacer las determinaciones, retrodispersión, transmisión directa y colchón de aire, entregando resultados satisfactorios en espesores aproximados de 50 a 300 mm. Universidad Católica de Valparaíso (1993)



*Ilustración 20 Formas de determinar la humedad método*

*Universidad Católica de Valparaíso (1993)*

- Ventajas:

Es muy exacto y rápido.

No es destructivo, las mediciones se hacen en el campo en el mismo sitio y a la misma profundidad.

- Desventajas:

El equipo es costoso.

El operador está en contacto con una fuente radiactiva, requiere de personal entrenado para su uso.

No es adecuado para suelos orgánicos o con alto contenido de fragmentos gruesos.

### 8.2.1.6. Higrómetro

El higrómetro [Ilustración 21] es un instrumento para medir el grado de humedad del aire, gases, suelo y plantas. Los higrómetros de absorción se basan en la propiedad que algunos materiales tienen de dilatarse o contraerse según cuál sea el grado de humedad Wikipedia (2020).



*Ilustración 21 Higrómetro Wikipedia (2020)*

### 8.2.1.7. Resistencia eléctrica

Este método se basa en la propiedad que tienen algunos materiales porosos de conducir la corriente eléctrica, cuya resistencia está relacionada con el contenido de humedad Orna-Carmona (2015).

El principio físico de estos dispositivos [Ilustración 22] es que el contenido de humedad se puede determinar por la resistencia al paso de corriente eléctrica entre dos electrodos en contacto con el suelo. Cuanto más agua haya en la tierra, más baja es la resistencia (Martin, 1914).



*Ilustración 22 Resistencia eléctrica MideBien (2019)*

- Ventajas:

Simple y barato.

Proporciona lecturas directas de la humedad del suelo.

- Desventajas:

Necesita calibración.

No sirve para suelos arenosos o con fuerte agrietamiento.

No es útil en suelos secos y de texturas gruesas.

### 8.2.1.8. *Reflectometría*

La reflectometría [Ilustración 23] se basa en la relación que existe entre el contenido de humedad de un material y su constante dieléctrica.

El agua tiene una constante dieléctrica mucho más alta que la de los materiales, por lo que la constante dieléctrica del material húmedo dependerá principalmente de su contenido de humedad.

La constante dieléctrica del suelo se mide aplicando al material una onda electromagnética de alta frecuencia y midiendo la velocidad de propagación Orna-Carmona (2015).



*Ilustración 23 Reflectometría CFT&ASoc. S.L. (2010)*

### 8.2.1.9. *Método con tensiómetro*

El tensiómetro [ilustración 24] mide la intensidad de la fuerza con la que el suelo retiene el agua. Consiste en una punta de cerámica porosa conectada por medio de una columna de agua a un manómetro. Los tensiómetros son instalados a la profundidad deseada a medida que el suelo se seca, comienza a coger agua de la columna de agua a través del bulbo de cerámica, provocando succión en la columna de agua. La succión que es medida por un manómetro Orna-Carmona (2015).



*Ilustración 24 Tensiómetro Agrologica (2012)*

- Ventajas: Bajo costo y fácil de instalar.

Muy rápido para medir la tensión de agua del suelo.

- Desventajas:

No funcionan bien en suelos muy secos o de texturas gruesas.

No mide directamente el contenido de agua del suelo.

## 8.3. EQUIPOS EMPLEADOS EN LOS ENSAYOS

### 8.3.1. Horno microondas

El horno microondas es un electrodoméstico usado para calentar alimentos que funciona mediante la generación de ondas electromagnéticas en la frecuencia de la radiación en torno a los 2450 MHz ( $2.45 \cdot 10^9$  Hz) Wikipedia (2020).

Para este estudio se debe utilizar un horno microondas provisto de un sistema de regulación de potencia.

En la fase práctica de este TFG se emplean 2 modelos distintos de microondas pero con potencias idénticas, los intervalos de las potencias utilizadas para los ensayos con horno microondas marca Fagor [Ilustración 25] son de 500 W a potencia media y 700W a potencia alta, con el modelo de horno microondas marca Optimo [Ilustración 26] son de 550 W a potencia media y 800W a potencia alta.



Ilustración 26 Microondas Fagor



Ilustración 25 Microondas Optimo

### 8.3.2. Horno de estufa

Dispositivo que genera calor y que lo mantiene dentro de un compartimento cerrado, controlado termostáticamente Wikipedia (2021).

Existen dos tipos hornos de convención:

- Horno de convención natural: extrae el aire del ambiente en el cual se encuentra ubicada la estufa.
- Horno de convención forzada [Ilustración 27]: genera aire dentro de la máquina de manera forzada. Este aire se encuentra a temperatura ambiente Usos de la Estufa de laboratorio (2015).



Ilustración 27 Horno estufa

### 8.3.3. Báscula de pesado



*Ilustración 28 Balanza digital*

La báscula [Ilustración 28] es utilizada para determinar el peso o la masa de los cuerpos. La manipulación de la báscula sin un adecuado uso puede generar errores de gran importancia que afectan el resultado de la práctica Wikipedia (2020). Deben tener una precisión de 0,01 g o el 1% de la masa pesada Orna-Carmona (2015).

### 8.3.4. Cuarteador

El cuarteador es [Ilustración 29] utilizado para dividir las muestras en partes representativas, mediante una serie de tolvas. Están contruidos en chapa pintada, se suministran con dos receptores de muestras Proeti (2014).



*Ilustración 29 Cuarteador*

### 8.3.5. Tamices

Utensilio [Ilustración 30] formado por una tela metálica trenzada o rejilla densa tupida que está sujeta a un aro, también es conocido por cedazo o criba Instrumentos Técnicos (2019).

Consiste en pasar una mezcla de partículas de diferentes tamaños por un tamiz, criba o herramienta de colador; Las partículas de menor tamaño atraviesan el filtro por los poros, y las de mayor tamaño quedan retenidas Wikipedia (2021).



*Ilustración 30 Tamices*

### 8.3.6. Medidor de tiempo: cronómetro

El cronómetro es un reloj de gran precisión que permite medir intervalos de tiempo muy pequeños, hasta fracciones de segundo, cuya precisión ha sido comprobada y certificada por algún instituto o centro de control de precisión Wikipedia (2021) [Ilustración 31].



Ilustración 31 Cronómetro

### 8.3.7. Medidor de temperatura

MEDIDOR DE TEMPERATURA ELÉCTRICO:

El medidor de temperatura con sonda [Ilustración 32], está compuesto por dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente), con la capacidad de medir la temperatura colocando la sonda en el lugar del que se desea Gesa (2018).



Ilustración 32 Medidor de temperatura con sonda

TERMÓMETRO INFRARROJO:

Un termómetro de infrarrojos [Ilustración 33], pirómetro de infrarrojos o termómetro sin contacto. Es un medidor de temperatura que tiene la capacidad de medir la temperatura a distancia Wikipedia (2019).



Ilustración 33 Termómetro infrarrojos

### 8.3.8. Recipientes y herramientas

Los recipientes apropiados para este estudio están compuestos de material no metálico, no absorbente, resistente al shock térmico, y no sujeto a cambios en su masa o forma cuando se lo somete repetidamente a calentamiento, enfriamiento o limpieza.

Recipientes de porcelana, de vidrio de borosilicato y bol de vidrio de pyrex actúan satisfactoriamente.

#### - RECIPIENTES:

Los recipientes son de diferentes tamaños, materiales y formas, son empleados para albergar en su interior productos de todo tipo. Wikipedia (2021).



*Ilustración 34 Recipiente de cristal*



*Ilustración 35 Recipiente de plástico*

Se debe tener especial cuidado con los recipientes de vidrio de borosilicato [Ilustración 34]. Se ha observado que cuando son de poco espesor tienden a romper por gradiente térmico en contacto con un material frío (plato metálico de la balanza).

Recipientes de plástico [Ilustración 35], se han utilizado para almacenar el árido después de realizar el tamizado.

- HERRAMIENTAS MANUALES DE LABORATORIO:

Se deberán llevar guantes [Ilustración 36] para trasportar los recipientes y evitar las quemaduras al sacar los recipientes calientes del microondas o la estufa.



*Ilustración 36 Guantes*

Se deberán usar espátulas [Ilustración 37] para mezclar las muestras teniendo especial cuidado para evitar que la muestra quede pegada al cuchillo.



*Ilustración 37 Espátulas*

Se emplean palas de plástico [Ilustración 38] para recoger las muestras y poder transportarlas evitando la pérdida de material.



*Ilustración 38 Pala de plástico*

Materiales y procedimientos

Se emplean cubos de obra (gaveta o cuevo) [Ilustración 39] para poder mezclar grandes cantidades de árido y poder almacenarlo mientras se realizan los ensayos Wikipedia (2020).



*Ilustración 39 Cubos*

Se emplean sacos [Ilustración 40] que están hechos principalmente con tejidos de lona, de tela resistente, o bien de cuero, de papel o de diferentes tipos de plástico. Se utilizan para almacenar y transportar una gran variedad de productos Wikipedia (2019).



*Ilustración 40 Sacos*

## 8.4. SELECCIÓN MUESTRAS DE PLANTAS DE ÁRIDOS

### 8.4.1. Introducción

Este capítulo está centrado en una búsqueda de información de las plantas de áridos que hay en Aragón [Ilustración 41]. Para el desarrollo del TFG se emplean muestras con distintas composiciones mineralógicas (calizas, silíceas y dolomitas) de la provincia de Aragón.

Se ha creado un plano (Anexo I Planos) detallado con las plantas de áridos encontradas y el tipo de suelo que hay en toda la provincia de Aragón, para saber qué tipo de árido se encuentra en cada planta según su localización. Terminada la búsqueda se procede a una toma de contacto con las tres plantas elegidas para los ensayos.

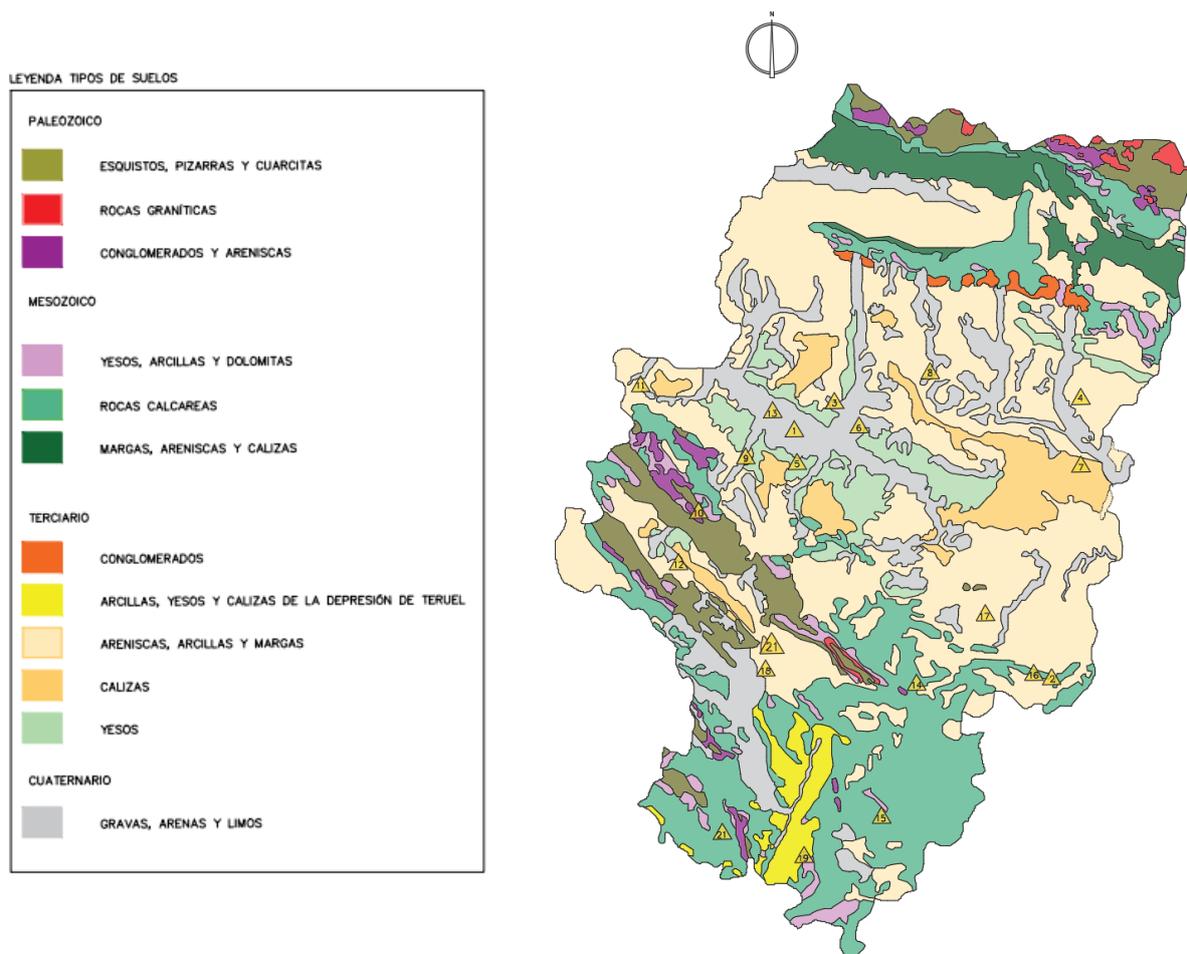


Ilustración 41 Plano de plantas y geológico

## 8.4.2. Muestras de áridos

Las muestras que se han empleado para el desarrollo de la investigación son áridos que contienen roca silíceo, roca caliza y roca dolomítica.

**CALIZA:** [Ilustración 42] [Ilustración 43]  
Roca sedimentaria que permite el paso del agua, es decir, es una roca permeable Wikipedia, (2020). Cuando el agua penetra en la caliza se lleva a cabo el proceso de disolución, mediante el cual se disuelve el carbonato de calcio.



*Ilustración 42 Roca caliza - Árido calizo*

La caliza desempeña un importante papel en la industria de la construcción no solo por presentar una gran diversidad de aplicaciones como material de construcción u ornamentación, sino también por ser uno de los componentes principales para la fabricación del cemento y de la cal, entre otros usos. Se trata de una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato cálcico que debido a la forma natural en que se presenta, hace que sea un recurso mineral no metálico Rocas y minerales (2018).



*Ilustración 43 Roca caliza - Árido calizo*

**SILÍCEA:** Es una denominación general para el subconjunto de las rocas sedimentarias cuya característica común es el alto contenido en sílice ( $\text{SiO}_2$ ). El dióxido de silicio (arena y arcilla) es un importante constituyente del hormigón y de los ladrillos, y se emplea en la producción de cemento portland Wikipedia (2019).



*Ilustración 44 Roca silíceo - Árido silíceo*

El uso de la arena de sílice [Ilustración 44] en la construcción se lleva a cabo para la creación de morteros autonivelantes, sistemas multicapas, pinturas, reparaciones, etcétera. Está compuesta principalmente por arena, cuarcita, granito o arenisca.

DOLOMITA: La dolomita [Ilustración 45] es un mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio Wikipedia (2020).

Se utiliza como fuente de magnesio y para la fabricación de materiales refractarios. También se utiliza como fundente en metalurgia, pinturas y como componente para fabricar el vidrio. Está totalmente proscrita como mineral en el Clinker del hormigón por el contenido en MgO ya que da una alta expansividad. En cambio como árido de hormigón valdría, siempre que se analice su reacción con el cemento Wikipedia (2021).



*Ilustración 45 Roca dolomítica – Árido dolomítico*

### *8.4.3. Plantas seleccionadas*

PLANTAS ENCONTRADAS EN EL COMUNIDAD DE ARAGÓN: [Ilustración 46]

1. ÁRIDOS ARAGÓN S.L (ZARAGOZA)
2. ÁRIDOS CURTO S.L (TERUEL)
3. ZUBETON S.L (ZARAGOZA)
4. ÁRIDOS Y PLANTAS S.L (HUESCA)
5. HANSON HISPANIA S.A.U (ZARAGOZA)
6. ÁRIDOS Y EXCAVACIONES RUBERTE S.L (ZARAGOZA)
7. HORMIGONES FRAGA S.L (HUESCA)
8. HORMIGONES GRAÑEN S.L (HUESCA)
9. ÁRIDOS GRUPO MLN (ZARAGOZA)
10. CEMEX (ZARAGOZA)
11. HORMIGONES CABELLO S.L (ZARAGOZA)
12. ÁRIDOS DE RIBOTA S.L (ZARAGOZA)
13. ÁRIDOS Y HORMIGONES PEDROLA S.L (ZARAGOZA)
14. ÁRIDOS Y HORMIGONES GRACIA S.L (TERUEL)
15. PLANTA DE ÁRIDOS SAN BLAS (TERUEL)
16. ÁRIDOS FABRE ABAS S.L (TERUEL)
17. TRANSFORMADOS BAJO ARAGÓN S.L (TERUEL)
18. ÁRIDOS Y TRANSPORTES DEL JILOCA S.L (TERUEL)
19. ÁRIDOS TERUEL SA (TERUEL)
20. HORMIGONES Y ÁRIDOS EL PIRINEO ARAGONÉS SA (HUESCA)
21. EMIPESA PLANTA POYO DEL CID (TERUEL)
22. DOLOMÍAS ARAGÓN S. I (ZARAGOZA)

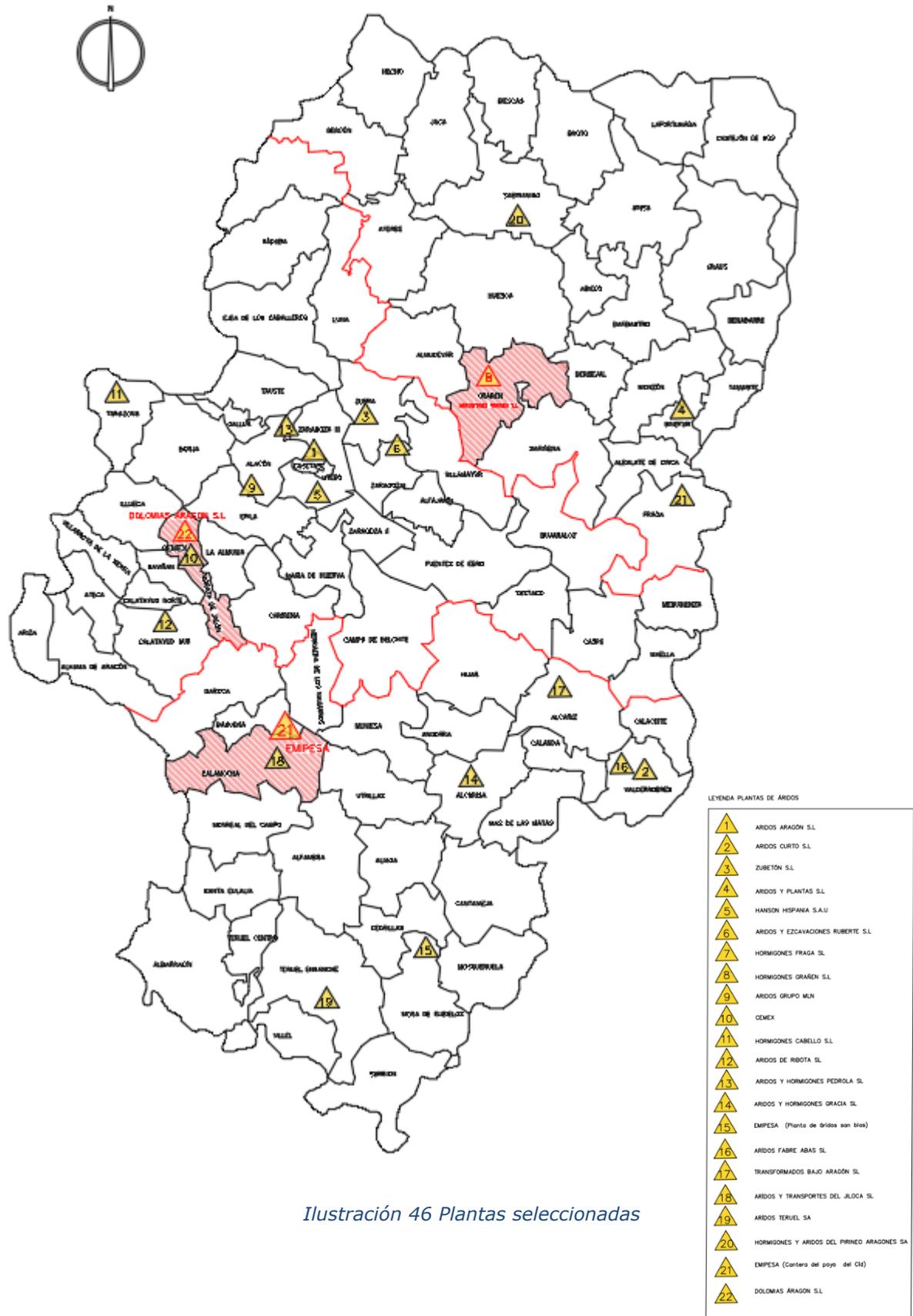


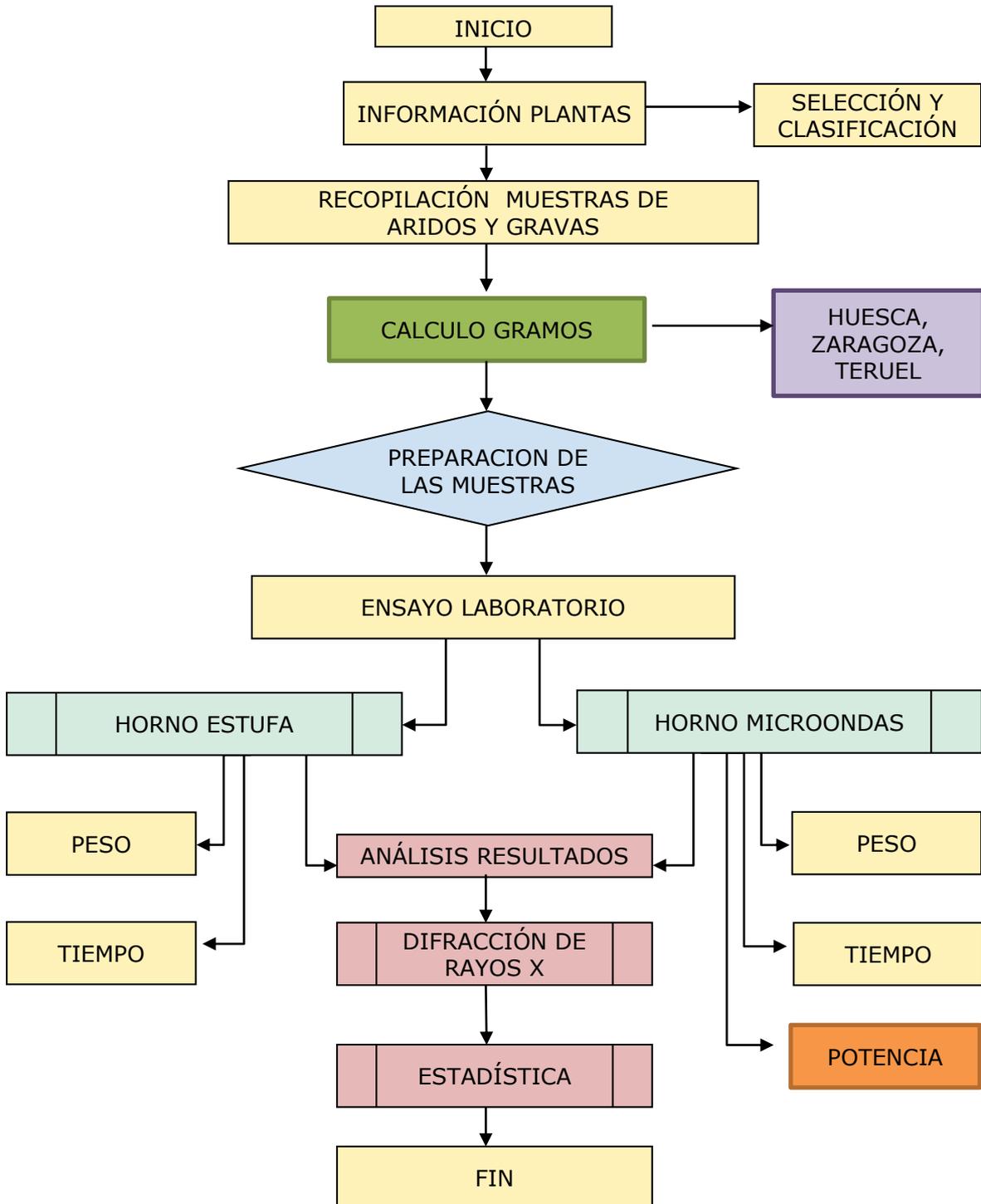
Ilustración 46 Plantas seleccionadas

Tabla 9 Tabla de plantas seleccionadas para analizar los áridos

PROVINCIA	PLANTA SELECCIONADA	DATOS DE CONTACTO	INFORMACIÓN DE LAS PLANTAS FACILITADAS POR LA EMPRESAS								
TERUEL	<b>PLANTA P21: EMIPESA</b> (Emipesa, s. f.) [Ilustración 47] (Tabla 6)	<b>DIRECCIÓN:</b> Polígono Industrial Platea, Calle 1, 5, 44001 Teruel. <b>DIRECCIÓN:</b> Partida el Plano, s/n 44400 Mora de Rubielos Teruel. <b>TELÉFONO:</b> 978 80 00 13. <b>TELÉFONO LABORATORIO:</b> 669842781. <b>CORREO:</b> laboratorio@emipesaCALIZAS.es <b>CORREO:</b> emipesa@emipesa.es	<p><i>Tabla 6 Tamaños áridos Emipesa</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>CALIZA</th> <th>SILICEA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Arena 0 - 4 / 4 - 6</td> <td>0 -2 / 3- 5</td> </tr> <tr> <td>Gravilla 6 -12</td> <td>6 -12</td> </tr> <tr> <td>Grava 12 -20</td> <td>12 -20</td> </tr> </tbody> </table>  <p><i>Ilustración 47 Planta Emipesa</i></p>	CALIZA	SILICEA	Arena 0 - 4 / 4 - 6	0 -2 / 3- 5	Gravilla 6 -12	6 -12	Grava 12 -20	12 -20
CALIZA	SILICEA										
Arena 0 - 4 / 4 - 6	0 -2 / 3- 5										
Gravilla 6 -12	6 -12										
Grava 12 -20	12 -20										
ZARAGOZA	<b>PLANTA P22: DOLOMITAS DE ARAGÓN S.L</b> (Grupo SAMCA, s. f.) [Ilustración 48] (Tabla 7)	<b>DIRECCIÓN:</b> Camino de la dehesa san felices, s/n 50240 Mores - Zaragoza. <b>TELÉFONO:</b> 976826005 <b>CORREO:</b> ventas.doar@samca.com	<p><i>Tabla 7 Tamaños áridos Dolomitas</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>DOLOMITAS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Arena 2 - 4</td> </tr> <tr> <td>Gravilla 4 - 10</td> </tr> <tr> <td>Grava 10 - 40</td> </tr> </tbody> </table>  <p><i>Ilustración 48 Planta Dolomitas Aragón</i></p>	DOLOMITAS	Arena 2 - 4	Gravilla 4 - 10	Grava 10 - 40				
DOLOMITAS											
Arena 2 - 4											
Gravilla 4 - 10											
Grava 10 - 40											
HUESCA	<b>PLANTA P08: HORMIGONES GRAÑEN SL</b> (Hormigones Grañen S.L., s. f.) [Ilustración 49] (Tabla 8)	<b>DIRECCIÓN:</b> ctra. fraella, s/n, 22260 Grañén, Huesca <b>TELÉFONO:</b> 974 39 04 22.	<p><i>Tabla 8 Tamaños áridos Huesca</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>CALIZA - SILICEAA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Arena 0,125 - 1, (arena lavada 0,6 - 1) y 0 -6</td> </tr> <tr> <td>Gravilla 2 - 8, ( corte 6)</td> </tr> <tr> <td>Grava 10 - 20 y 12/20</td> </tr> </tbody> </table>  <p><i>Ilustración 49 Planta Grañen</i></p>	CALIZA - SILICEAA	Arena 0,125 - 1, (arena lavada 0,6 - 1) y 0 -6	Gravilla 2 - 8, ( corte 6)	Grava 10 - 20 y 12/20				
CALIZA - SILICEAA											
Arena 0,125 - 1, (arena lavada 0,6 - 1) y 0 -6											
Gravilla 2 - 8, ( corte 6)											
Grava 10 - 20 y 12/20											

## 9. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A continuación se muestra un diagrama general desde el inicio del TFG con toda la investigación, aparece la información detalla en los anexos I, anexos II y anexos III.



## 9.1. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo de la investigación se divide en cuatro fases:

- "Fase 1", ENSAYOS GRAVIMÉTRICOS:

Secado de áridos por ambos métodos (microondas y estufa) con muestras gemelas para poder comparar los resultados obtenidos por ambos métodos "apartado 10 Resultados".

Elaboración de tablas con los resultados de los tiempos de secado y las temperaturas para los distintos tipos de áridos en función de la humedad, la frecuencia del microondas y el tamaño de la muestra. "anexos II 2.10 Resultados estufa" "anexos II 2.11 Resultados microondas".

- "Fase 2 " ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES CRISTALOGRÁFICAS:

Estudio y comparación de la estructura mineralógica de las muestras ensayadas por ambos métodos. "anexos II 2.12 Resultados Cemex" "apartado 10.5 Resultados Cemex".

- "Fase 3", ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS ÁRIDOS:

Elaboración de un estudio estadístico comparando tiempos de secado y temperaturas para ambos métodos. "anexos III Resultados estadística"

- "Fase 4", ELABORACIÓN DE UN BORRADOR PARA CREAR UN MARCO NORMATIVO UNE:

Elaboración de borrador que sirva para crear una normativa UNE que avale la utilización del horno microondas como método de secado alternativo. "apartado 11 Conclusiones y recomendaciones".

## 9.1.1. Fase 1: Ensayos gravímetros

### 9.1.1.1. Cálculo de humedad

Antes de comenzar con los ensayos se necesita calcular la cantidad de agua que se debe añadir a la muestra seca para conseguir la humedad deseada. En la tabla que aparece a continuación (Tabla 10) se puede apreciar los gramos de agua que se deben añadir según sean las humedades del (4%, 7% o 10%) y según se esté calculando para muestras de 500gr o de 1000gr.

Tabla 10 Humedad en las muestras analizadas en el secado

TAMAÑO	MUESTRA	% HUMEDAD	GR H2O	TOTAL GR ENSAYOS	HUMEDAD H2O
<b>AG- AF- GF -GG</b>	200 GR	4%	8	5000	200GR H2O
<b>AG- AF- GF -GG</b>	200 GR	7%	12	5000	350GR H2O
<b>AG- AF- GF -GG</b>	200 GR	10%	20	5000	500GR H2O
<b>AG- AF- GF -GG</b>	500GR	4%	20	13000	520GR H2O
<b>AG- AF- GF -GG</b>	500GR	7%	30	13000	875GR H2O
<b>AG- AF- GF -GG</b>	500GR	10%	50	13000	1300GR H2O
<b>AG- AF- GF -GG</b>	1000 GR	4%	40	25000	1000GR H2O
<b>AG- AF- GF -GG</b>	1000 GR	7%	70	25000	1750GR H2O
<b>AG- AF- GF -GG</b>	1000 GR	10%	100	25000	2500GR H2O

La fórmula para calcular la humedad:

$$\% H = \frac{Pn - Pd}{Pd} \times 100$$

Donde:

- Ph es el peso húmedo del suelo (en g o Kg).
- Pd es el peso seco del suelo (en g o Kg).
- H es el contenido de humedad (en %).

Programa experimental

### 9.1.1.2. Codificación muestras

Se asigna la codificación e identificación adecuada de las muestras de áridos de manera que no exista confusión alguna entre la identidad de las muestras y los resultados obtenidos, cada código corresponde a un tipo de muestra (Feopa, s. f.) [Ilustración 50].

Las muestras se introducen en bolsas transparentes perfectamente selladas, y el código queda escrito con tinta indeleble en la bolsa.

La codificación incluye:

- Planta de procedencia de las muestras.
- Tipo de árido.
- Tamaño del árido.
- Humedad del ensayo.
- Tamaño de las muestras.
- Método de ensayo.



Ilustración 50 Plantas codificadas

Las muestras van dispuestas en el interior de otras bolsas de mayor tamaño, dichas bolsas van etiquetadas convenientemente con la información referida a las plantas de áridos de las que proceden y el método de ensayo empleado.

Ejemplo formato de codificación de muestras:

[Ilustración 51]

**P21/Si-GF-SAT-1000 E**



Ilustración 51 Ejemplo codificación

Planta de Emipesa / Árido silíceo-Grava fina-Saturada-Muestra de 1000gr-Estufa

En primer lugar se representa la planta de árido de la que procede la muestra, cada planta tiene una numeración que queda reflejada en el "apartado 8.4.3 Plantas seleccionadas". Las plantas están designadas con la letra "P" en mayúscula seguida de la numeración que le corresponde a cada planta y separadas con una barra inclinada. Cada elemento de los que se compone la codificación se separa uno de otro con un guion, excepto después de designar las plantas que se emplea barra inclinada.

Se han seleccionado tres plantas de áridos para la realización de los ensayos, que se designan con la siguiente numeración:

- Hormigones Grañen S.L (Huesca), se identifica con el número 8, la codificación de esta planta se representa como P08. [Ilustración 52]



Ilustración 52 codificación P08

- Emipesa S.A (Teruel), se identifica con el número 21, la codificación de esta planta se representa como P21. [Ilustración 53]



Ilustración 53 Codificación P21

- Dolomitas de Aragón (Zaragoza), se identifica con el número 22, la codificación de esta planta se representa como P22. [Ilustración 54]



Ilustración 54 Codificación P22

En segundo lugar aparece el tipo de árido, se emplea el mismo nombre que tiene el elemento según la tabla periódica.

- Dolomitas, (D).
- Silíceas, (Si).
- Calizas, (Ca).
- Mezcla de silíceas y calizas, se representa como (SiCa).

En tercer lugar el tamaño del árido.

- Arenas finas, (AF).
- Arenas gruesas, (AG).
- Gravas finas, (GF).
- Gravas gruesas, (GG).

Se continúa la codificación con la humedad, todos los tamaños han sido saturados excepto las arenas finas (AF) que no han tenido problemas con la absorción de la humedad. Las arenas finas se someten a tres humedades distintas.

- Humedad del 4% (H4).
- Humedad del 7% (H7).
- Humedad del 10% (H10).
- Las muestras saturadas se identifican como (SAT).



En quinto lugar se representa el tamaño de las muestras, se han realizado los ensayos con dos tamaños:

- 500 gramos (500).
- 1000 gramos (1000).

La codificación concluye con la designación del método de secado empleado para realizar el ensayo. Si el método empleado en los ensayos es el microondas no se pone nada al final de la codificación pero si por el contrario el método empleado es la estufa, al final de la codificación se escribe la letra "E" con mayúscula.

### 9.1.1.3. Granulometría

El análisis granulométrico es el conjunto de operaciones cuyo fin es determinar la distribución del tamaño de los elementos que componen una muestra (Wikipedia, 2019).

Para la realización de este método se van a emplear las siguientes normas, UNE- EN 933 – 1 AENOR (2012) Método de tamizado, UNE- EN 933 – 2 AENOR (1996) Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas, UNE- EN 933 – 3 AFNOR (2012) Índice de lajas, UNE- EN 933 – 4 AENOR (2008) Coeficiente de forma, UNE- EN 933 – 5 AENOR (1999) Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso.

Salvo indicación en contra los aparatos empleados siguen los requisitos generales establecidos en la norma EN 932 -5 AENOR (2012).

El método de determinación granulométrico más sencillo es hacer pasar las partículas por una serie de mallas de distintos anchos de entramado (a modo de coladores) que actúen como filtros de los granos, comúnmente se denomina columna de tamices Wikipedia (2019).



*Ilustración 55 Columna de tamices*

Para su realización se utiliza una serie de tamices [Ilustración 55] con diferentes diámetros que son ensamblados en una columna. En la parte superior, donde se encuentra el tamiz de mayor diámetro, se agrega el material original (suelo o sedimento mezclado) y la columna de tamices se somete a vibración y movimientos rotatorios intensos en una máquina especial o de forma manual. Después de algunos minutos, se retiran los tamices y se desensamblan, tomando por separado los pesos de material retenido en cada uno de ellos y que, en su suma, deben corresponder al peso total del material que inicialmente se colocó en la columna de tamices Wikipedia (2020).

Secuencia de operaciones que se han llevado a cabo para realizar el análisis granulométrico:

1. Definir la proporción en que se encuentran los tamaños de granos dentro una masa de suelo (tamizado) [Ilustración 56].

TABLA 28.3.3.b  
Huso granulométrico del árido fino

Límites	Material retenido acumulado, en % en peso, en los tamices						
	4 mm	2 mm	1mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm
Superior	0	4	16	40	70	82	(1)
Inferior	20	38	60	82	94	100	100

(1) Este valor será el que corresponda de acuerdo con la tabla 28.3.3.a:

- 94% para:
  - Áridos redondeados.
  - Áridos de machaqueo no calizos para obras sometidas a la clase general de exposición IIIa, IIIb, IIIc, IV o bien que estén sometidas a alguna clase específica de exposición.
- 90% para:
  - Áridos de machaqueo calizos para obras sometidas a la clase general de exposición IIIa, IIIb, IIIc ó IV o bien que estén sometidas a alguna clase específica de exposición.
  - Áridos de machaqueo no calizos para obras sometidas a la clase general de exposición I, IIa ó IIb y que no estén sometidas a ninguna clase específica de exposición.
- 85% para:
  - Áridos de machaqueo calizos para obras sometidas a la clase general de exposición I, IIa ó IIb y que no estén sometidas a ninguna clase específica de exposición.

*Ilustración 56 Abertura tamices*

2. Determinar experimentalmente la distribución cuantitativa del tamaño de las partículas de un suelo (Porcentajes tamiz).
3. Clasificar los áridos en finos y gruesos (Tabla 11).

*Tabla 11 Escala granulométrica Wikipedia, (2020)*

ESCALA GRANULOMÉTRICA	
Partícula	Tamaño
Arcillas	< 0,002 mm
Limos	0,002-0,06 mm
Arenas	0,06-2 mm
Gravas	2-60 mm
Cantos rodados	60-250 mm
Bloques	>250 mm

Programa experimental

4. Realizar la curva de distribución granulométrica [Ilustración 57] del suelo estudiado. (Granulometría).

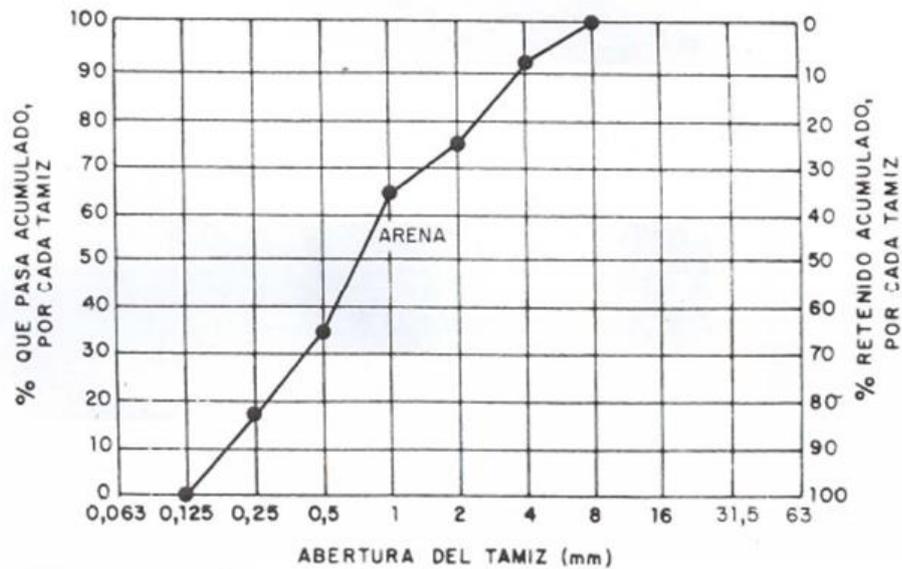


Ilustración 57 Curva granulométrica

## 9.1.1.4. Ensayos gravimétricos

### 9.1.1.4.1. Secado de horno de estufa

Este equipo está explicado en el "apartado 8.3.2 Equipos empleados en los ensayos". La estufa es el procedimiento habitual utilizado en el laboratorio para determinar la humedad de los áridos, se utiliza como método de referencia para determinar la humedad por otros métodos de ensayo.

El método de secado en horno estufa [Ilustración 58] se realiza siguiendo las normas UNE - EN 1097 -5 AENOR (2009) y UNE - 17892-1 AENOR (2015).



Ilustración 58 Horno de estufa

Procedimiento de ensayo: AENOR (2009), AENOR (2015)

#### 1. Preparación de las muestras:

- Si se almacenan las muestras antes de ensayarse, mantenerse a una temperatura de entre 3°C y 30°C, en un lugar protegido de la luz solar directa, fuentes de calor y corrientes de aire.
- Determinar la humedad tan pronto como sea posible.
- Tomar una muestra representativa de cada tipo de árido. Los detalles de la selección del tipo de árido elegidos para los ensayos se explican en el apartado "apartado 8.4 Selección muestras de plantas de áridos".

#### 2. Ejecución del ensayo:

- Colocar la muestra húmeda en un recipiente limpio, seco y de masa conocida. La determinación de la masa debe realizarse inmediatamente después de la colocación de la muestra en el recipiente.

---

Programa experimental

- Colocar el recipiente con la muestra húmeda en la estufa con una temperatura mantenida en  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ , para conseguir la masa constante, debe secarse hasta que la masa sea constante cuando el cambio de masa es inferior al 0,1%.

- El tiempo que se necesita para llegar a masa constante varía dependiendo del tipo de suelo, tamaño de la muestra, tamaño y capacidad de la estufa.

En la mayoría de los casos para obtener el secado de suelos finos es suficiente con un periodo de 16 horas a temperatura de  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Los suelos gruesos pueden secarse en 4 horas a la misma temperatura, cuando se utiliza una estufa con circulación de aire.

- Tras el secado de la muestra, se procede a un pesado posterior, pasada 1 hora tras su extracción de la estufa a temperatura ambiente.

### 9.1.1.4.2. Secado horno microondas

Este equipo [Ilustración 59] está explicado en el "apartado 8.3.1 Equipos empleados en los ensayos".

El método de secado en horno microondas se realiza siguiendo las normas UNE – EN 135 Instituto Nacional de Vías (2013) y ASTM D 4643 Departamento de Defensa (2017).



*Ilustración 59 Microondas Fagor*

En ocasiones el empleo del horno de estufa como método para determinar el contenido de humedad de los áridos puede ser muy lento y hay en ocasiones en las que es necesario un método más rápido. El empleo del horno microondas es uno de estos métodos.

La principal objeción al empleo del horno microondas [Ilustración 60] ha sido la posibilidad de sobrecalentamiento de los áridos produciendo un contenido de agua más alto que el que se determinaría con el método de la estufa.



*Ilustración 60 Microondas Optimo*

---

Programa experimental

La reacción de un árido cuando es sometido a la energía de un microondas, depende de su composición mineralógica, y por lo tanto ningún procedimiento es aplicable para todo tipo de suelos.

Procedimiento de ensayo:

1. Ejecución del ensayo:

- Colocar la muestra húmeda en un recipiente limpio, seco y de masa conocida. La determinación de la masa debe realizarse inmediatamente después de la colocación de la muestra en el recipiente.
- Colocar el recipiente con la muestra húmeda en el horno microondas, los ensayos se han realizado con potencias de 700W y 1500W.
- La muestra está sujeta a intervalos de secado de 30 segundos, para algunas muestras como las arenas finas estos intervalos de secado son un poco mayores (entre 1-2 minutos), se retira en cada intervalo la muestra del microondas y se determina su masa. El procedimiento se repite hasta que su masa es constante.
- Este método sirve especialmente cuando se usa un material de tamaño menor al n<sup>o</sup>4. Las partículas más grandes se debe tener cuidado porque aumenta la posibilidad de destrucción de las partículas.

### 9.1.2. Fase 2 - Resultados de las propiedades cristalográficas (Cemex)

Terminados los ensayos por ambos métodos de secado, se procede a enviar de cada tamaño de áridos una cantidad representativa de muestra de cada planta [Ilustración 61], para comprobar las propiedades cristalográficas de las muestras ensayadas.



*Ilustración 61 Muestras Cemex*

Los resultados obtenidos se explican en el "apartado 10.6 Resultados" y las gráficas correspondientes a estos ensayos aparecen en los "anexos III en el punto 1.1 Resultados Cemex".

### *9.1.3. Fase 3 – Análisis estadístico de los áridos*

Se realiza un equivalente en gramos con la estufa, comparando los valores de gramos de secado alcanzados por la estufa con el promedio de todos los gramos de secado obtenidos por microondas para cada planta de áridos, en función del tipo de árido, tamaño de árido y potencias empleadas. En esta comparativa se obtienen los valores de tiempos de secado y temperatura para los cuales el horno microondas alcanza el equivalente en gramos con la estufa.

Estos resultados y las conclusiones adoptadas se explican en el "apartado 10 Resultados", las gráficas se localizan en el apartado de "anexos III en el punto 2 Tablas Estadística".

## 10. RESULTADOS

Antes de comenzar con los ensayos es necesario determinar la distribución del tamaño de los elementos que componen las muestras (granulometría). Para ello se pasan las muestras por una columna de tamices sometiendo a vibración y movimientos rotatorios intensos de forma manual. Después de algunos minutos, se retiran los tamices y se separa la muestra en recipientes de plásticos según los tamaños que corresponden a cada fracción granulométrica de acuerdo a la EHE. Esta operación se repite con cada planta de áridos.

Finalizado el proceso de tamizado se procede al cálculo de gramos de agua que se necesita añadir a las muestras para alcanzar las humedades de ensayo deseadas tanto para microondas como para estufa. "apartado 9.1.1.1 Cálculo de humedad" "apartado 2.3.2 Anexo I Cálculos".

Para los ensayos se emplean dos microondas al mismo tiempo, para agilizar y recortar los tiempos de duración de la parte práctica del TFG. Una persona se encarga de un microondas y de medir las temperaturas cada vez que las muestras son extraídas del microondas para su pesado y otra persona se encarga del otro microondas y de anotar los datos de temperaturas y pesos que se van tomando [Ilustración 62].



*Ilustración 62 Proceso de ensayos*

## 10.1. PLANTA GRAÑEN – ANGÜES

Los tamaños de árido empleados en esta planta son arenas finas, arenas gruesas, gravas finas y gravas gruesas.

Los ensayos realizados con estufa y con microondas para arena gruesa se realizan con muestras de 500 gramos y de 1000 gramos, para el resto de tamaños (arena fina, grava fina, grava gruesa) solo se emplean muestras de 1000 gramos "anexos II 1.2.1 Resultados estufa" "anexos II 1.3.1 Resultados microondas".

- Procedimiento de ensayo:

Las muestras tamizadas deben mantenerse a una temperatura de entre 3°C y 30°C, en un lugar protegido de la luz solar directa, fuentes de calor y corrientes de aire. Las muestras que ya han sido preparadas para los ensayos se envuelven con plástico film para evitar pérdida de humedad [Ilustración 63], es aconsejable determinar la humedad tan pronto como sea posible.



*Ilustración 63 Árido grueso con film*

Para la ejecución de los ensayos se coloca la muestra húmeda en un recipiente limpio, seco y de masa conocida dentro del horno microondas y se somete a intervalos de secado de 30 segundos, se retira en cada intervalo la muestra del microondas y se determina su masa.

El procedimiento se repite hasta que su masa es constante. Se observa que 2 minutos antes de que la muestra esté completamente seca, en ese momento las temperaturas comienzan a subir por encima de los 110°C. Si se realizan los ensayos en intervalos cortos de 30 segundos la muestra no supera los 110°C, pero en intervalos de 1 minuto las muestras sobrepasan esa temperatura y se aprecian picos de subida y bajada de temperatura. Los ensayos se realizan con potencias de 700W y 1500W. Estos datos son anotados en unas plantillas en Excel "apartado 1.3 anexo 2 Resultados por microondas".

- Arena fina:

Los ensayos de arena fina se realizan con muestras de 1000 gramos. Se observa durante la realización de los tamizados de 0 - 6 (áridos gruesos y áridos finos), que el porcentaje de arena fina que se obtiene con el tamizado es mucho menor en relación con el porcentaje de arena gruesa, esto origina escasez de material de arena fina para realizar los ensayos, y como consecuencia los ensayos de arena fina al 7% de humedad solo se realizan a potencia alta [Ilustración 64].



*Ilustración 64 Arena fina tamizada*

Se decide realizar 2 ensayos por estufa previos a los ensayos por microondas para comprobar la absorción (tabla 12) de arenas finas y conocer cuál es la humedad máxima, de este modo descartar valores de humedades que se encuentren por encima de los valores que se obtienen de la absorción. Las humedades que se adoptan para los ensayos con arenas finas por microondas y por estufa son del 4%, 7% y 10%.

*Tabla 12 Absorción arenas finas*

Tamaño	Tara	Peso natural	Peso húmedo + tara	Peso seco + Tara	Peso SAT	Peso seco	Absorción
AF M1	280,6	500	892,4	777,6	611,8	497	23,10
AF M2	286,1	500	894	783,9	608	497,8	22,12

---

#### Resultados

Los tiempos de secado para arenas finas son mayores que para el resto de áridos (28 minutos), realizar los 10 ensayos con cada potencia supone más de una semana con la muestra preparada. Se decide cubrir las muestras para evitar pérdidas de humedad y se comprueba que las muestras de arena fina envueltas con film pasados unos días han tenido una pérdida de humedad mínima [Ilustración 65]. En los ensayos de absorción previos (tabla 12) se muestra como las arenas finas absorben un 23% de humedad, al mezclarse con el agua la mezcla es más homogenizada que para el resto de tamaños, retiene mejor el agua y se producen menos huecos entre sus partículas, como consecuencia el agua no se evapora tan rápido.



*Ilustración 65 Arena fina húmeda y seca por microondas*

- Arena gruesa:

Se inician los ensayos de arena gruesa con muestras de 200gr, 500gr y 1000gr para una humedad del 4% para microondas y estufa, con este porcentaje de humedad los ensayos transcurren sin inconvenientes, terminados los ensayos de arena gruesa al 4% se decide eliminar las muestras de 200 gr porque los resultados con esta cantidad de gramos se consideran poco significativos, a partir de ese momento los ensayos de arena gruesa para el resto de porcentajes de humedad se realizan con muestras de 500gr y 1000gr.

Se decide añadir un 6% de humedad a la muestra [Ilustración 66] [Ilustración 67], se observa que incluso mezclando intensamente la muestra no absorbe todo el agua, quedando esta en el fondo del cubo.



*Ilustración 66 Arena gruesa 6% humedad*



*Ilustración 67 Arena gruesa 6% humedad*

Los ensayos con estufa para un 6% humedad aportan resultados satisfactorios, pero se observa que con microondas los valores quedan muy por debajo del 6%, por este motivo se repiten los ensayos con microondas para esta misma humedad pero se decide añadir el agua pulverizando la muestra y por goteo [Ilustración 68], se comprueba que aun así los valores de humedad están por debajo del 6%.

Resultados



*Ilustración 68 humedad pulverizada y goteo*

Por este motivo se realizan dos ensayos en estufa para comprobar la absorción de las arenas gruesas, estos valores quedan entre el 8% y el 10%, resultando mucho mayores que los valores obtenidos por microondas (tabla 13).

*Tabla 13 Absorción arenas gruesas*

Tamaño	Tara	Peso natural	Peso húmedo + tara	Peso seco + Tara	Peso SAT	Peso seco	Absorción
AG M1	908	500	1.448	1406,3	540	498,3	8,27
AG M2	914,8	500	1.464,70	1413,5	549,90	498,7	10,27

Se decide realizar nuevos ensayos con microondas pulverizando la muestra para una humedad del 7%, los valores que se obtienen en estos ensayos están entre 4%-5%, por este motivo se decide volver a realizar dos nuevos ensayos de absorción en estufa para corroborar los dos primeros valores o para descartarlos en el caso de un posible error. Los valores alcanzados en los dos últimos ensayos por estufa se aproximan más a los valores obtenidos en los ensayos con microondas, por este motivo se decide tomar como buenos los dos últimos ensayos de estufa estando estos más próximos al 5% (tabla 14).

*Tabla 14 Absorción arenas gruesas 2*

Tamaño	Tara	Peso natural	Peso húmedo + tara	Peso seco + Tara	Peso SAT	Peso seco	Absorción
AG M1	908	500	1.408	1385	500	477	4,82
AG M2	914,8	500	1.414,80	1390,2	500	475,40	5,17

Mientras se esperan los resultados de los ensayos de absorción en la estufa, se toman dos muestras de arena gruesa de la parte superior e inferior del cubo donde se encuentran saturadas. Se observan resultados muy dispares, la muestra que se toma de la parte inferior del cubo da un valor de humedad más alto 7,81% y la muestra que se toma de la parte más superficial del cubo 2,85%.

Se decide introducir la muestra del cubo en una mezcladora [Ilustración 69] con mayor superficie que donde estaba para poder extender mejor el árido y de esta manera que absorba mejor la humedad.



*Ilustración 69 Mezcladora con AG*

Se deja la muestra durante una semana para comprobar si en ese tiempo ha absorbido algo de humedad, durante esa semana el árido se va removiendo mecánicamente con la propia mezcladora [Ilustración 70], se comprueba que el agua que se encuentra en el fondo sigue estando después de una semana [Ilustración 71], por este motivo se decide saturar la muestra [Ilustración 72].



*Ilustración 70 AG mezcladora*



*Ilustración 71 AG saturada fondo*

Resultados



*Ilustración 72 AG saturado en mezcladora*

Pasados unos días con la muestra saturada se toma una muestra de árido grueso de la mezcladora y se seca en el microondas, obteniendo un valor de humedad del 4,12%. Al comprobar que las arenas gruesas tienen valores de absorción próximos al 5% se decide tomar las muestras iniciales ensayadas del 4% de humedad como muestras saturadas, y se descartan los ensayos para arenas gruesas con humedades del 7% y del 10%.

- Gravas:

Las gravas al ser saturadas son sumergidas en agua durante una semana, obteniendo valores de humedad alrededor del 2% [Ilustración 73] [Ilustración 74].



*Ilustración 73 Grava fina saturada*



*Ilustración 74 Grava gruesa saturada*

## 1. Resultados de arenas finas:

Los ensayos con arenas finas se realizan con muestras de 1000gr para ambas potencias, las humedades empleadas son 4 %, 7% y 10%.

Resultados estufa:

Humedad del 4%: **4,33%, 4,34% y 4,38%**.

Humedad del 7%: **7,10%, 7,17% y 7,17%**.

Humedad del 10%: **9,90%, 9,04% y 10,60%**.

Resultados microondas:

- Potencia alta:

Los ensayos con arenas finas a potencia alta se realizan en intervalos de 30 segundos para las 2 primeras muestras el resto de muestras en intervalos de 1 min.

Se observa que en todos los ensayos se produce un aumento de temperatura ascendente desde el minuto 1 hasta que la muestra está prácticamente seca.

- Muestras de 1000gr para una humedad del 4%:

Los valores de humedad se encuentran entre **3,67% y 4,20%**.

Tiempo máximo de secado de **15 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 115,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 143,5°C.

- Muestras de 1000gr para una humedad del 7%:

Los valores de humedad se encuentran entre **6,94% y 7,38%**.

Tiempo máximo de secado de **17 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 103°C hasta la temperatura máxima anotada de 134,5°C.

- Muestras de 1000gr para una humedad del 10%:

Los valores de humedad se encuentran entre **9,20% y 10,04%**.

Tiempo máximo de secado de **21 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde los 109°C hasta la temperatura máxima anotada de 135°C.

---

Resultados

- Potencia media:

Los ensayos con arenas finas a potencia media se realizan en intervalos de 30 segundos para las 2 primeras muestras el resto de muestras en intervalos de 1 min.

- Muestras de 1000gr para una humedad del 4%:

Los valores de humedad se encuentran entre **3,71%** y **4,77%**.

Tiempo máximo de secado de **18 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 99,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 117°C.

- Muestras de 1000gr para una humedad del 10%:

Los valores de humedad se encuentran entre **9,95%** y **10,68%**.

Tiempo máximo de secado de **28 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde los 104,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 132,5°C.

## 2. Resultados de arenas gruesas:

Las arenas gruesas son saturadas y se realizan los ensayos con muestras de 500gr y 1000gr para ambas potencias.

Resultados estufa:

Humedad del 4%: **2,93%, 4,02% y 4,39%**.

Arenas gruesas saturadas: **8,67%, 5,06% y 10,07%**.

Resultados microondas:

- Potencia alta:

Los ensayos con arenas gruesas a potencia alta se realizan en intervalos de 30 segundos.

- Muestras de 500gr para una humedad del 4%:

Los valores de humedad se encuentran entre **4% y 4,54%**.

Tiempo máximo de secado de **8,5 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 108,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 140,5°C.

- Muestras de 1000gr para una humedad del 4%:

Los valores de humedad se encuentran entre **3,62% y 4,12%**.

Tiempo máximo de secado de **14 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 110,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 140,5°C.

#### Resultados

- Potencia media:

Los ensayos con arenas gruesas a potencia media se realizan en intervalos de 30 segundos.

- Muestras de 500gr para una humedad del 4%:

Los valores de humedad se encuentran entre **2,95%** y **3,65%**.

Tiempo máximo de secado de **10 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 88°C hasta la temperatura máxima anotada de 138,5°C.

- Muestras de 1000gr para una humedad del 4%:

Los valores de humedad se encuentran entre **3,84%** y **4,30%**.

Tiempo máximo de secado de **19,5 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde los 110,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 120°C.

### 3. Resultados de gravas finas:

Las gravas finas son saturadas y se realizan los ensayos con muestras de 1000gr para ambas potencias.

Resultados estufa:

Los resultados de gravas finas saturadas son **0,27%**, **0,45%** y **0,15%**.

Resultados microondas:

- Potencia alta:

Los ensayos con gravas finas a potencia alta se realizan en intervalos de 30 segundos para las dos primeras muestras, se observa que próximos al minuto 6,5 las muestras tienen una pérdida mínima de humedad, a partir de este momento se continúa con intervalos de 1minuto hasta el minuto 9,5.

- Muestras de 1000gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **2,24%** y **3,21%**.

Tiempo máximo de secado de **12 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 124°C hasta la temperatura máxima anotada de 174°C, estas temperaturas se producen en los intervalos de 1 minuto (desde el minuto 6,5 hasta el minuto 9,5).

- Potencia media:

Los ensayos de gravas finas a potencia media se realizan en intervalos de 30 segundos para las cuatro primeras muestras, se observa que próximos al minuto 9,5 las muestras tienen una pérdida mínima de humedad, a partir de este momento se continúa con intervalos de 1minuto hasta el minuto 14,5.

- Muestras de 1000gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **2,63%** y **4,20%**.

Tiempo máximo de secado de **17,5 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 83,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 163°C, estas temperaturas se producen en los intervalos de 1 minuto (desde el minuto 9,5 hasta el minuto 14,5).

---

Resultados

#### 4. Resultados de gravas gruesas:

Las gravas gruesas son saturadas y se realizan los ensayos con muestras de 1000gr para ambas potencias.

Resultados estufa:

Los resultados de gravas finas saturadas son **1,90%, 2,20% y 2,48%**.

Resultados microondas:

- Potencia alta:

Los ensayos con gravas gruesas a potencia alta se realizan en intervalos de 30 segundos para las dos primeras muestras, se observa que próximos al minuto 5 las muestras tienen una pérdida mínima de humedad, a partir de este momento se continúa con intervalos de 1minuto hasta el minuto 10.

- Muestras de 1000gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **2,01% y 2,90%**.

Tiempo máximo de secado de **12 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 130,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 181,5°C, estas temperaturas se producen en los intervalos de 1 minuto (desde el minuto 8 hasta el minuto 10).

- Potencia media:

Los ensayos de gravas gruesas a potencia media se realizan en intervalos de 30 segundos para las cuatro primeras muestras, se observa que próximos al minuto 6 las muestras tienen una pérdida mínima de humedad, a partir de este momento se continúa con intervalos de 1minuto hasta que la muestra se encuentra seca.

- Muestras de 1000gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,93% y 2,59%**.

Tiempo máximo de secado de **19 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 133,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 174,5°C, estas temperaturas se producen en los intervalos de 1 minuto (desde el minuto 6 hasta el minuto 11).

## 10.2. PLANTA DOLOMIÁS ARAGÓN.

Los ensayos realizados con estufa y con microondas de la planta de Dolomías Aragón se hacen con muestras de 500 gr y 1000gr para arena gruesa, grava fina y grava gruesa. Estos resultados se toman como referencia para comparar con los resultados obtenidos por microondas "anexos II 1.3.2 Resultados microondas".

Las muestras tamizadas deben mantenerse a una temperatura de entre 3°C y 30°C, en un lugar protegido de la luz solar directa, fuentes de calor y corrientes de aire. Las muestras que ya han sido preparadas para los ensayos se envuelven con plástico film para evitar pérdida de humedad, es aconsejable determinar la humedad tan pronto como sea posible.

Se observa contaminación de árido en todos los tamaños (2-4), (4-10), (10-20) [Ilustración 75], al tamizar se obtienen tamaños de árido por encima y por debajo de los tamaños clasificados en la planta.



*Ilustración 75 Contaminación AG y AF granulometría gravas*

Es apreciable la contaminación que presenta este tipo de árido, incluso después de tamizar la muestra. Al saturarla y removerla diariamente se aprecia la diferencia de color de antes y después de removerla por la gran cantidad de filler que contiene la muestra [Ilustración 76] [Ilustración 77].



*Ilustración 76 AG saturada*



*Ilustración 77 Gravass saturadas removidas*

Resultados

Se decide realizar dos ensayos previos con estufa para arenas gruesas antes de proceder a realizar los ensayos con microondas para comprobar su absorción y conocer la humedad máxima en este tipo de áridos (tabla 15) "anexos II 1.2.2 Resultados estufa".

*Tabla 15 Absorción arenas gruesas*

Tamaño	Tara	Peso natural	Peso húmedo + tara	Peso seco + Tara	Peso SAT	Peso seco	Absorción
AG M1	908	500	1.459	1406,3	551	498,3	10,58
AG M2	914,8	500	1.468,60	1413,1	553,80	498,3	11,14

Los resultados de absorción para arenas gruesas en esta planta dan valores de humedad del 11,18%, como consecuencia de los problemas que se han producido en anteriores ensayos para este mismo tamaño de árido se decide comenzar los ensayos de microondas con valores de humedad del 10%, se observa que incluso mezclando intensamente, la muestra no absorbe todo el agua quedando esta en el fondo del cubo [ilustración 78].



*Ilustración 78 AG humedad 10%*

Se introduce la muestra de arena gruesa con un 10% de humedad en el microondas a intervalos de 5 minutos, se observa como la muestra alcanza a los 10 minutos una temperatura de 248°C y tiene una humedad de 4,43%. Al volver a calentar la muestra otros 5 minutos, se aprecia que el recipiente de la muestra ha quedado fundido con el plato del microondas [Ilustración 79] [Ilustración 80]. Esto puede deberse a las propiedades cristalográficas que tiene este árido, porque el mismo ensayo con muestras de árido silíceo y calizo no alcanzaron temperaturas tan altas, y por otro lado se piensa que puede deberse al tipo de recipiente, se emplean recipientes de vidrio de pyrex [Ilustración 81] o borosilicato, estos al ser tan finos presentan problemas con el gradiente térmico que hace que se fisure el recipiente.



*Ilustración 79 Recipiente borosilicato*



*Ilustración 80 Plato de microondas*



*Ilustración 81 Pyrex*

Como consecuencia se decide realizar los ensayos de arena gruesa para estufa y microondas con la mezcla saturada.

---

Resultados

### 1. Resultados de arenas gruesas dolomitas:

Las arenas gruesas son saturadas y se realizan los ensayos con muestras de 500gr y 1000gr para ambas potencias.

Resultados estufa:

Los resultados de arenas gruesas saturadas con muestras de 500 gr son:

**5,57%, 4,43% y 4,98%.**

Los resultados de arenas gruesas saturadas con muestras de 1000 gr son:

**3,16%, 4,06% y 4,24%.**

Resultados microondas:

- Potencia alta:

Los ensayos con arenas gruesas a potencia alta para las muestras de 500gr y para las muestras de 1000gr se realizan en intervalos de 30 segundos para las dos primeras muestras, se observa en las muestras de 500gr como próximas al minuto 5 las muestras tienen una pérdida mínima de humedad y lo mismo ocurre con las muestras de 1000gr próximas al minuto 9 a partir de ese momento se continúan ambos ensayos con intervalos de 1minuto hasta que la muestra está seca.

- Muestras de 500gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **3,73% y 4,91%**.

Tiempo máximo de secado de **10 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 74°C hasta la temperatura máxima anotada de 133°C.

- Muestras de 1000gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **3,36% y 4,82%**.

Tiempo máximo de secado de **14 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 100°C hasta la temperatura máxima anotada de 136,5°C.

- Potencia media:

Los ensayos con arenas gruesas a potencia media para las muestras de 500gr y para las muestras de 1000gr se realizan en intervalos de 30 segundos para las dos primeras muestras, se observa en las muestras de 500gr como próximas al minuto 5 las muestras tienen una pérdida mínima de humedad y lo mismo ocurre con las muestras de 1000gr próximas al minuto 13 a partir de ese momento se continúan ambos ensayos con intervalos de 1minuto hasta que la muestra está seca.

- Muestras de 500gr saturada:

Los valores de humedad se encuentran entre **4,04%** y **5,17%**.

Tiempo máximo de secado de **12 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 76°C hasta la temperatura máxima anotada de 127°C.

- Muestras de 1000gr saturada:

Los valores de humedad se encuentran entre **4,07%** y **4,96%**.

Tiempo máximo de secado de **19 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde los 89°C hasta la temperatura máxima anotada de 120,5°C.

---

Resultados

## 2. Resultados de gravas finas dolomitas:

Las gravas finas son saturadas y se realizan los ensayos con muestras de 500gr y 1000gr para ambas potencias.

Resultados estufa:

Los resultados de gravas finas saturadas con muestras de 500 gr son:

**2,02%, 1,94% y 1,85%.**

Los resultados de gravas finas saturadas con muestras de 1000 gr son:

**2,57%, 2,49% y 2,33%.**

Resultados microondas:

- Potencia alta:

Los ensayos de gravas finas a potencia alta para las muestras de 500gr y para las muestras de 1000gr se realizan en intervalos de 30 segundos para las dos primeras muestras, a partir del momento del minuto 5,5 la pérdida de humedad es mínima se continúa con intervalos de 1minuto hasta que la muestra está seca.

- Muestras de 500gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,48%** y **2,48%**.

Tiempo máximo de secado de **8 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 84,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 116°C.

- Muestras de 1000gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,77%** y **2,98%**.

Tiempo máximo de secado de **11,5 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 92,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 133,5°C.

- Potencia media:

En los ensayos con gravas finas a potencia media las 2 primeras muestras de 500gr se realizan en intervalos de 30 segundos y las 4 primeras muestras de 1000gr se realizan en intervalos de 30 segundos, se observa en las muestras de 500gr como próximas al minuto 5,5 las muestras tienen una pérdida mínima de humedad y lo mismo ocurre con las muestras de 1000gr próximas al minuto 10 a partir de ese momento se continúan ambos ensayos con intervalos de 1minuto hasta que la muestra está seca.

- Muestras de 500gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,36%** y **2,69%**.

Tiempo máximo de secado de **10,5 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 76°C hasta la temperatura máxima anotada de 108,5°C.

- Muestras de 1000gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,60%** y **2,83%**.

Tiempo máximo de secado de **14 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 79°C hasta la temperatura máxima anotada de 120°C.

---

Resultados

### 3. Resultados de gravas gruesas dolomitas:

Las gravas gruesas son saturadas y se realizan los ensayos con muestras de 500gr y 1000gr para ambas potencias.

Resultados estufa:

Los resultados de gravas gruesas saturadas con muestras de 500 gr son:

**1,54%, 1,34% y 2,08%.**

Los resultados de gravas gruesas saturadas con muestras de 1000 gr son:

**1,19%, 1,33% y 1,67%.**

Resultados microondas:

- Potencia alta:

Los ensayos con gravas gruesas a potencia alta para las muestras de 500gr y para las muestras de 1000gr se realizan en intervalos de 30 segundos.

- Muestras de 500gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **0,73%** y **1,61%**.

Tiempo máximo de secado de **6,5 minutos.**

Temperaturas máximas finales desde 78°C hasta la temperatura máxima anotada de 108°C.

- Muestras de 1000gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,25%** y **1,53%**.

Tiempo máximo de secado de **8,5 minutos.**

Temperaturas máximas finales desde 90°C hasta la temperatura máxima anotada de 119,5°C.



- Potencia media:

Los ensayos de gravas gruesas a potencia media para las muestras de 500gr y para las muestras de 1000gr se realizan en intervalos de 30 segundos.

- Muestras de 500gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,17%** y **1,56%**.

Tiempo máximo de secado de **7 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 70,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 98°C.

- Muestras de 1000gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,26%** y **1,76%**.

Tiempo máximo de secado de **11 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 90°C hasta la temperatura máxima anotada de 128°C.

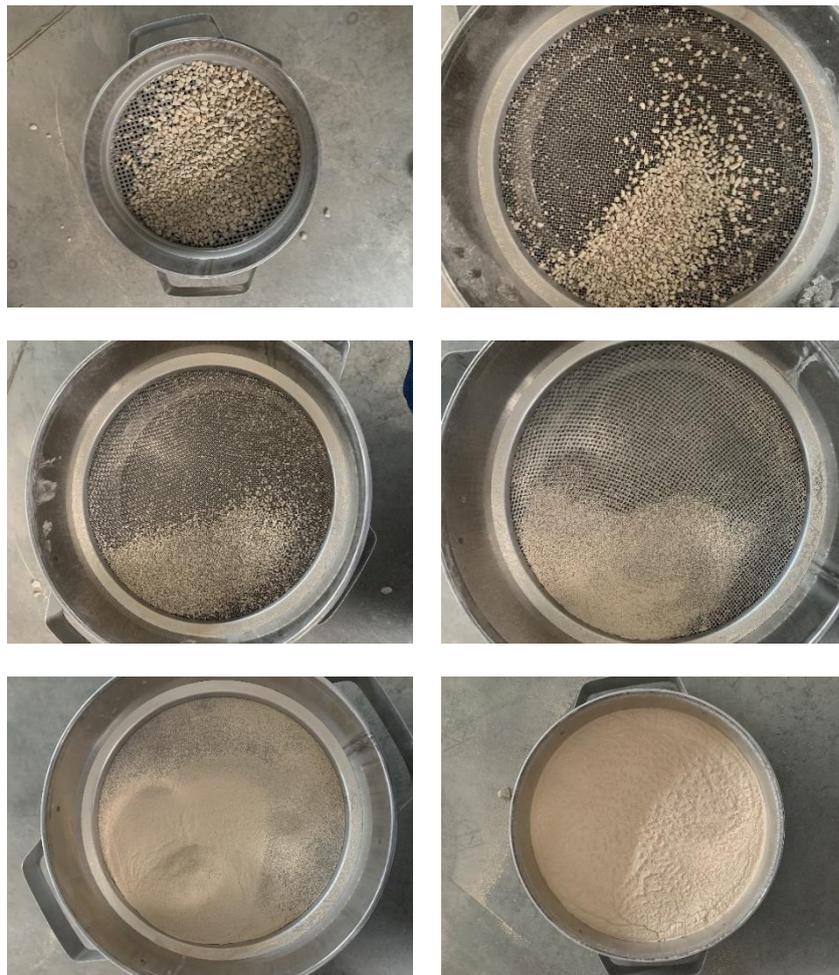
### 10.3. PLANTA EMIPESA SILÍCEA (POYO DEL CID)

Los ensayos realizados con estufa y con microondas de la planta de Emipesa se hacen con muestras de 500 gr y 1000gr de grava fina y grava gruesa [Ilustración 82]. Estos resultados se toman como referencia para comparar con los resultados obtenidos por microondas "anexos II 1.2.4 Resultados estufa" "anexos II 1.3.4 Resultados microondas"



*Ilustración 82 gravas*

Al realizar la granulometría con las gravas del tamaño 12 - 20 se observa que hay contaminación de árido, al tamizar se obtienen tamaños por debajo del tamiz nº12 hasta el tamiz nº0,063 [Ilustración 83].



*Ilustración 83 Tamizado gravas*

## 1. Resultados de gravas finas silíceas:

Las gravas finas son saturadas y se realizan los ensayos con muestras de 500gr y 1000gr para ambas potencias.

Resultados estufa:

Los resultados de gravas finas saturadas con muestras de 500 gr son:

**1,73%, 1,63% y 1,05%.**

Los resultados de gravas finas saturadas con muestras de 1000 gr son:

**1,47%, 1,80% y 2,27%.**

Resultados microondas:

- Potencia alta:

Los ensayos con gravas finas a potencia alta para las muestras de 500gr y para las muestras de 1000gr se realizan en intervalos de 30 segundos para las dos primeras muestras, se observa que próximos al minuto 6 las muestras tienen una pérdida mínima de humedad, a partir de este momento se continúa con intervalos de 1minuto hasta que la muestra está seca.

- Muestras de 500gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,19%** y **2,04%**.

Tiempo máximo de secado de **9 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 77°C hasta la temperatura máxima anotada de 128,5°C.

- Muestras de 1000gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,46%** y **2,03%**.

Tiempo máximo de secado de **11 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 89,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 116,5°C.

---

Resultados

- Potencia media:

Los ensayos de gravas finas a potencia media para las muestras de 500gr y para las muestras de 1000gr se realizan en intervalos de 30 segundos para las dos primeras muestras, a partir del momento en el que la pérdida de humedad es mínima se continúa con intervalos de 1minuto hasta que la muestra está seca.

- Muestras de 500gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,01%** y **2,65%**.

Tiempo máximo de secado de **11 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 60°C hasta la temperatura máxima anotada de 106,5°C.

- Muestras de 1000gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **0,99%** y **2,82%**.

Tiempo máximo de secado de **12 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 86,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 107,5°C.

## 2. Resultados de gravas gruesas silíceas:

Las gravas gruesas son saturadas y se realizan los ensayos con muestras de 500gr y 1000gr para ambas potencias.

Resultados estufa:

Los resultados de gravas gruesas saturadas con muestras de 500 gr son:

**1,05%, 1,63% y 1,73%.**

Los resultados de gravas gruesas saturadas con muestras de 1000 gr son:

**1,47%, 1,80% y 1,84%.**

Resultados microondas:

- Potencia alta:

Los ensayos con gravas gruesas a potencia alta para las muestras de 500gr y para las muestras de 1000gr se realizan en intervalos de 30 segundos para las dos primeras muestras, a partir del momento en el que la pérdida de humedad es mínima se continúa con intervalos de 1minuto hasta que la muestra está seca.

- Muestras de 500gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,94%** y **2,61%**.

Tiempo máximo de secado de **5,5 minutos.**

Temperaturas máximas finales desde 82,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 115,5°C.

- Muestras de 1000gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,31%** y **1,69%**.

Tiempo máximo de secado de **8,5 minutos.**

Temperaturas máximas finales desde 131°C hasta la temperatura máxima anotada de 169°C.

---

Resultados

- Potencia media:

Los ensayos de gravas gruesas a potencia media para las muestras de 500gr y para las muestras de 1000gr se realizan en intervalos de 30 segundos para las dos primeras muestras, a partir del momento en el que la pérdida de humedad es mínima se continúa con intervalos de 1minuto hasta que la muestra está seca.

- Muestras de 500gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **0,93%** y **1,11%**.

Tiempo máximo de secado de **8 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 66°C hasta la temperatura máxima anotada de 105,5°C.

- Muestras de 1000gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,12%** y **1,85%**.

Tiempo máximo de secado de **17 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 68,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 89,5°C.

## 10.4. PLANTA EMIPESA CALIZAS (POYO DEL CID)

Los ensayos realizados con estufa y con microondas de la planta de Emipesa se hacen con muestras de 500 gr y 1000gr de grava fina y grava gruesa [ilustración 84]. Estos resultados se toman como referencia para comparar con los resultados obtenidos por microondas "anexos II 1.2.3 resultados estufa" "anexos II 1.3.3 resultados microondas"



*Ilustración 84 Gravas saturadas*

Las calizas ofrecen un buen comportamiento en cuanto a tiempo de secado y temperatura comparando los resultados de los áridos del resto de plantas ofrecen tiempos de secado más cortos, empleando los mismos intervalos de 30 segundos que para el resto de áridos.

Las humedades y en el tiempo de secado (6 minutos) [ilustración 85] son similares a las síliceas y a las dolomitas.



*Ilustración 85 Muestras secadas por microondas*

Resultados

Es apreciable la contaminación que presenta este tipo de árido, incluso después de tamizar la muestra, de saturarla y removerla diariamente [Ilustración 86], se aprecia al extraer las muestras para realizar los ensayos como queda en el fondo del cubo gran cantidad de filler (la mayor parte pasa por el tamiz de 0,063 mm) [Ilustración 87].



*Ilustración 86 Filler grava fina*



*Ilustración 87 Grava fina saturada*

Incluso removiendo diariamente la muestra se observa en los ensayos por microondas que parte de ese filler se queda unido a la grava [Ilustración 88].



*Ilustración 88 Filler*

- Grava fina:

La grava fina [Ilustración 89] en los minutos 2 y 3 comienzan a perder humedad y ser constante la temperatura, esto sucede con todas las muestras y en todas las plantas con este tamaño de árido, la humedad que pierde en los primeros minutos es del 0,50 % hasta llegar al minuto 7 que la humedad que alcanza es próxima al 2%.



*Ilustración 89 Grava fina seca y saturada*

Las gravas finas alcanzan temperaturas más bajas desde el principio en todos los ensayos, son las que mejor se comportan en temperatura y tiempo [Ilustración 90].



*Ilustración 90 Muestra de ensayo*

---

Resultados

### 1. Resultados de gravas finas calizas:

Las gravas finas son saturadas y se realizan los ensayos con muestras de 500gr y 1000gr para ambas potencias.

Resultados estufa:

Los resultados de gravas finas saturadas con muestras de 500 gr son:

**1,30%, 1,40% y 2,25%.**

Los resultados de gravas finas saturadas con muestras de 1000 gr son:

**1,77%, 1,96% y 2%.**

Resultados microondas:

- Potencia alta:

Los ensayos con gravas finas a potencia alta para las muestras de 500gr y para las muestras de 1000gr se realizan en intervalos de 30 segundos para las dos primeras muestras, se observa que próximos al minuto 6 las muestras tienen una pérdida mínima de humedad, a partir de este momento se continúa con intervalos de 1minuto hasta que la muestra está seca.

- Muestras de 500gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **0,85%** y **2,17%**.

Tiempo máximo de secado de **6 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 77°C hasta la temperatura máxima anotada de 97°C.

- Muestras de 1000gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,36%** y **2,16%**.

Tiempo máximo de secado de **9,5 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 76°C hasta la temperatura máxima anotada de 106°C.

- Potencia media:

Los ensayos de gravas finas a potencia media para las muestras de 500gr y para las muestras de 1000gr se realizan en intervalos de 30 segundos para las dos primeras muestras, a partir del momento en el que la pérdida de humedad es mínima se continúa con intervalos de 1 minuto hasta que la muestra está seca.

- Muestras de 500gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,34%** y **2,97%**.

Tiempo máximo de secado de **6 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 67°C hasta la temperatura máxima anotada de 83,5°C.

- Muestras de 1000gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,26%** y **2,11%**.

Tiempo máximo de secado de **9,5 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 75,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 108,5°C.

---

Resultados

## 2. Resultados de gravas gruesas calizas:

Las gravas gruesas son saturadas y se realizan los ensayos con muestras de 500gr y 1000gr para ambas potencias.

Resultados estufa:

Los resultados de gravas gruesas saturadas con muestras de 500 gr son:

**1,19%, 1,85% y 2,08%.**

Los resultados de gravas gruesas saturadas con muestras de 1000 gr son:

**1,18%, 1,66% y 1,86%.**

Resultados microondas:

- Potencia alta:

Los ensayos con gravas gruesas a potencia alta para las muestras de 500gr y para las muestras de 1000gr se realizan en intervalos de 30 segundos para las dos primeras muestras, a partir del momento en el que la pérdida de humedad es mínima se continúa con intervalos de 1minuto hasta que la muestra está seca.

- Muestras de 500gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,42%** y **1,94%**.

Tiempo máximo de secado de **6 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 80°C hasta la temperatura máxima anotada de 106°C.

- Muestras de 1000gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **0,85%** y **1,82%**.

Tiempo máximo de secado de **9 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 79,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 112,5°C.

- Potencia media:

Los ensayos de gravas gruesas a potencia media para las muestras de 500gr y para las muestras de 1000gr se realizan en intervalos de 30 segundos para las dos primeras muestras, a partir del momento en el que la pérdida de humedad es mínima se continúa con intervalos de 1minuto hasta que la muestra está seca.

- Muestras de 500gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **0,89%** y **1,85%**.

Tiempo máximo de secado de **5,5 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 74,5°C hasta la temperatura máxima anotada de 113,5°C.

- Muestras de 1000gr saturadas:

Los valores de humedad se encuentran entre **1,18%** y **2,28%**.

Tiempo máximo de secado de **10,5 minutos**.

Temperaturas máximas finales desde 76°C hasta la temperatura máxima anotada de 115°C.

## 10.5. RESULTADOS CEMEX

En este apartado vamos a explicar los resultados de los ensayos realizados por difracción de rayos X, comparando la estructura cristalográfica de muestras que han sido secadas por ambos métodos de secado.

Las gráficas con los resultados recibidos de la planta de Cemex están el "anexo III punto 1 Resultados Cemex".

### Datos de contacto:

**P10: CEMEX** (Cemex, s. f.)

[Ilustración 91]

DIRECCION: AFUERAS, S/N., Morata de  
Jalón, 50260, Zaragoza.

TELEFONO: 918007800.

CORREO: canal.cemex@cemex.com



*Ilustración 91 Planta Cemex*

Se pretende comprobar y demostrar si es cierto lo que marca la norma ASTM 4643 Departamento de Defensa (2017) en el apartado 5.6.

*"Debido a las altas temperaturas localizadas a la que el espécimen está expuesto en el calentamiento por microondas, las características físicas del suelo podrían ser alteradas. Puede ocurrir la desagregación de las partículas individuales, en conjunto con la vaporización o transición química. Es por eso que se recomienda que los especímenes a utilizar en este método de ensayo no se utilicen para posteriores ensayos de secado".*

Se someten las muestras que son enviadas a Cemex a intervalos de secado por microondas superiores a 5 minutos, dependiendo de su comportamiento en los ensayos previos en el laboratorio.

Cada estructura cristalina tiene un patrón de picos que es como una huella dactilar, la composición es la misma pero su estructura ha cambiado.

A continuación se muestran las tablas con los tiempos y temperatura de secado por microondas que son enviadas para el análisis y comprobación de su estructura cristalográfica (tabla 16) (tabla 17) (tabla 18).

*Tabla 16 Ensayos por microondas Grañen*

<b>Grañen</b>	<b>Minutos</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Grañen</b>	<b>Minutos</b>	<b>Temperatura</b>
<b>AF 30</b>	10	110°	<b>GF 10</b>	5	105°
	20	150,5°		10	117°
	22	239°	<b>GF 20</b>	5	94°
<b>AF 15</b>	15	130°		10	176°
<b>AG 30</b>	15	108°	<b>GG 5</b>	10	204°
	30	135,5°	<b>GG 10</b>	5	168°
<b>AG 15</b>	15	145,5°		10	165,5°
				13	192° roto

Resultados

*Tabla 17 Ensayos por microondas Dolomitas*

<b>Dolomitas</b>	<b>Minutos</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Dolomitas</b>	<b>Minutos</b>	<b>Temperatura</b>
<b>AG 10</b>	5	81°	<b>GF 5</b>	5	94°
	10	115,5°	<b>GF 10</b>	5	216°
<b>AG 15</b>	5	116,5		10	145°
	7	179 roto	<b>GG 5</b>	5	122°
			<b>GG 10</b>	5	74°
				10	128°

*Tabla 18 Ensayos por microondas Emipesa*

<b>Calizas</b>	<b>Minutos</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Silíceas</b>	<b>Minutos</b>	<b>Temperatura</b>
<b>GF 10</b>	5	89°	<b>GF 10</b>	5	144°
	10	121°		10	96°
<b>GF 15</b>	5	70°	<b>GF 15</b>	5	28°
	10	73°		10	29,5°
	15	80°		15	30°
<b>GG 10</b>	5	30,5°	<b>GG 5</b>	5	29°
	10	30			29°
<b>GG 15</b>	5	21,5°	<b>GG 10</b>	5	56°
	10	158°		10	173°
	15	159°		15	155°

Con respecto a los picos de los difractogramas indicar que:

- PLANTA GRAÑEN: Muestra P08 SC GF: [Ilustración 92]

No se ve diferencia alguna en los tres difractogramas, los picos son los mismos, que tengan más o menos altura no tiene nada que ver con una diferencia en la composición mineralógica/estructural. Como se puede ver no hay cambio en la forma de los 3 difractogramas de esta muestra, "la huella" es la misma.

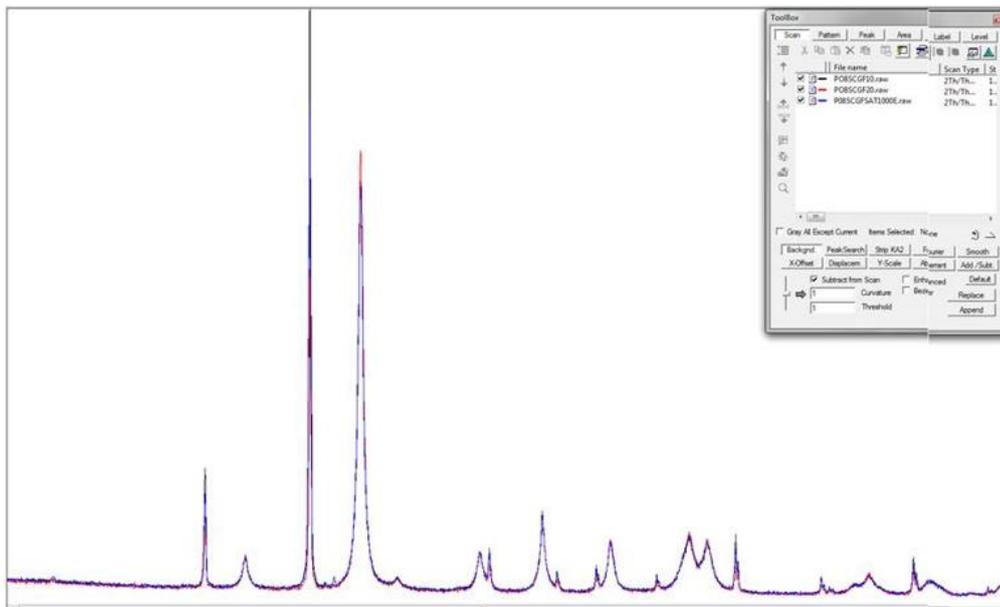


Ilustración 92 P08 Grava fina caliza y sílicea

Resultados

- PLANTA EMIPESA: Muestra P21 C GG: [Ilustración 97]

La desaparición de estos picos en las otras muestras puede ser debido a la desaparición o modificación estructural de alguna de las fases con el tratamiento. Estos picos no sé sabe a qué estructura o compuesto pertenecen y no se han conseguido identifica, pero al no ser picos muy intensos, el cambio es en alguno de los compuestos mineralógicos secundarios, por ejemplo podría ser debido un proceso de deshidratación que la fase del yeso se deshidratara y pasara a hemihidrato o dihidrato.

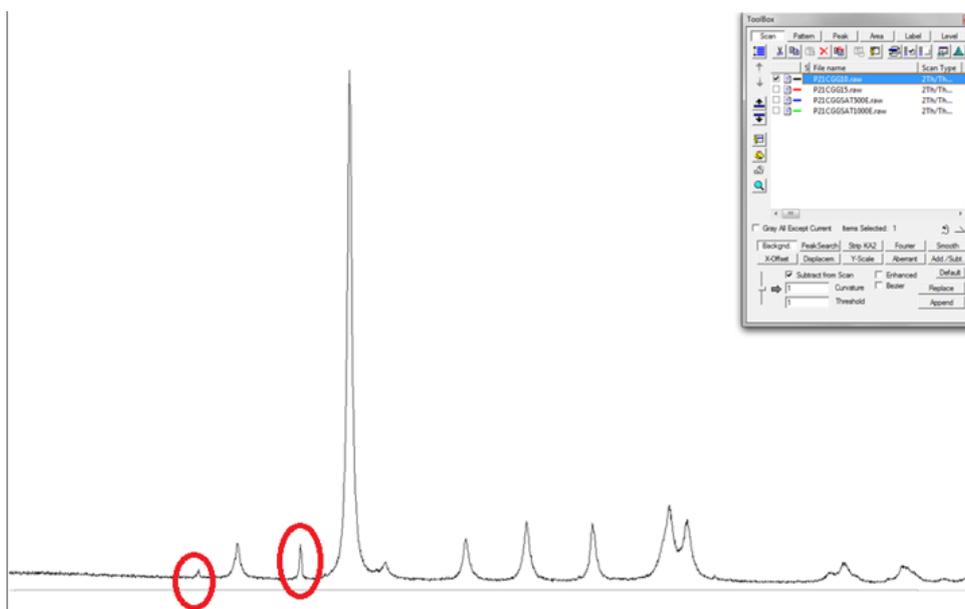


Ilustración 93 P21 grava gruesa caliza microondas 10 min

Como se ha comentado la huella de las muestras calizas es clavada a la de la dolomita y la de la huella de los áridos silicios es igual a la del cuarzo, para cada uno de los áridos tenéis más de un 95% de cada una de ellas:

- PLANTA EMIPESA: Muestra P21 S GF 10: [Ilustración 93] [Ilustración 94]

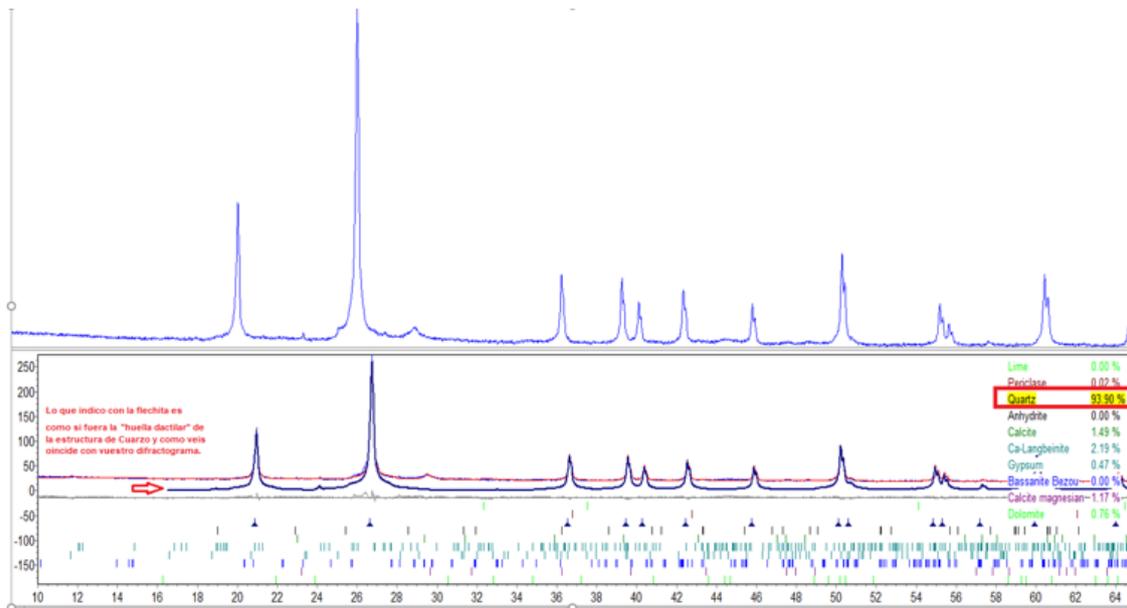


Ilustración 94 P21 Grava fina silícea



Ilustración 95 P21 Grava fina silícea composición

Resultados

- PLANTA DOLOMÍAS: Muestra P22 D GG 5: [Ilustración 95] [Ilustración 96]

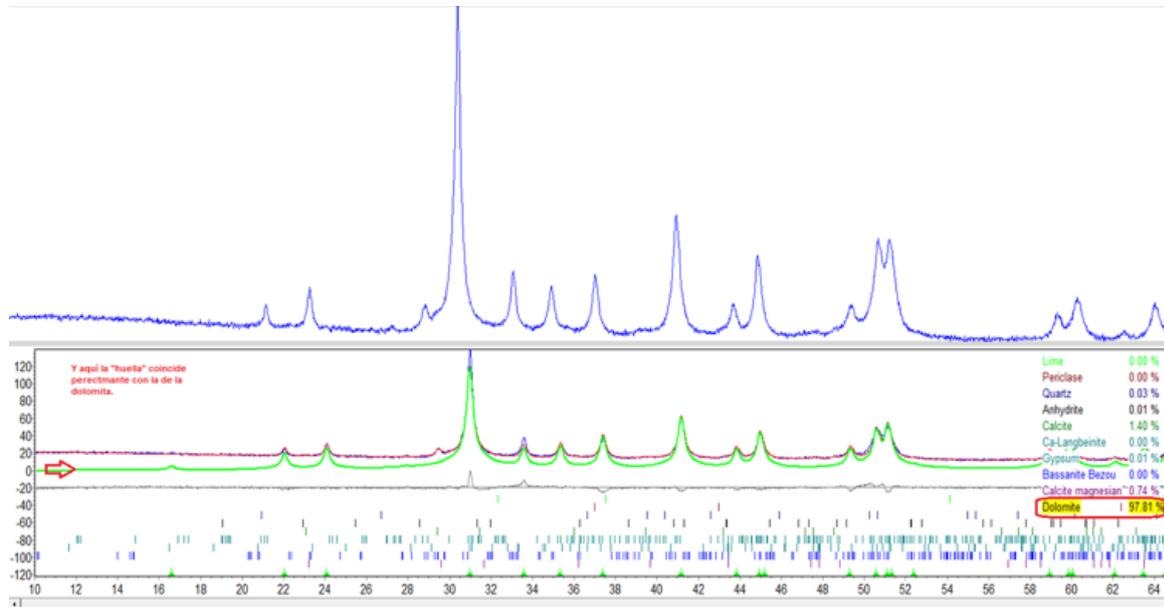


Ilustración 96 P22 Grava gruesa dolomitas



Ilustración 97 Grava gruesa dolomitas composición

- PLANTA DOLOMIÁS: Muestra P22 D GF: [Ilustración 98] [Ilustración 99]

Se ha vuelto a analizar la muestra P22DGF10 y el pico tan exagerado ya no aparece (probablemente algún tipo de contaminación) Te adjunto de nuevo el archivo con el difractograma corregido. En este caso pasa lo mismo que para el caso 21 CGG. Desaparece el pico que aparece en el P22 DGF05 (difractograma negro):

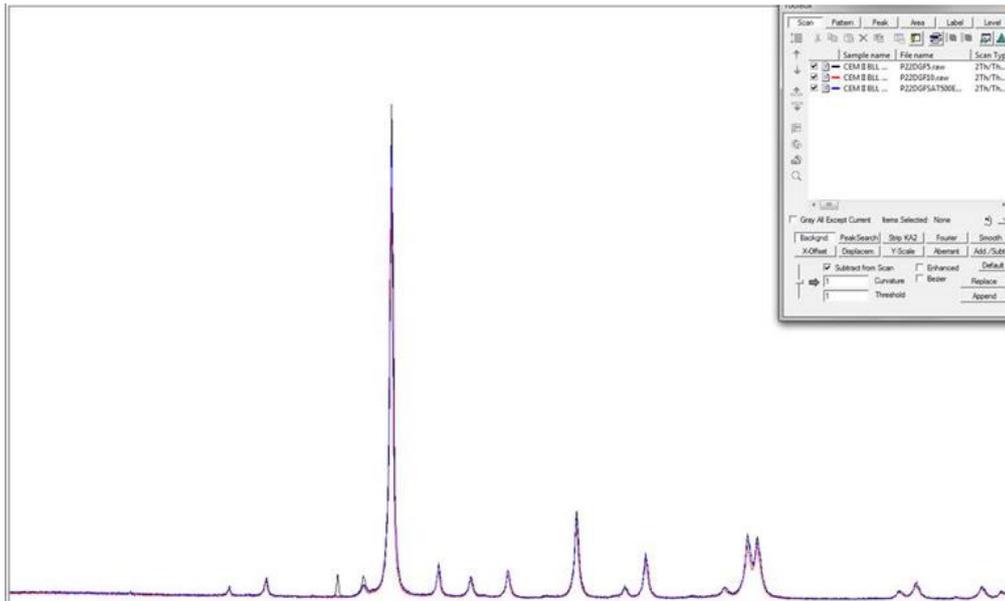


Ilustración 98 P22 grava fina dolomitas

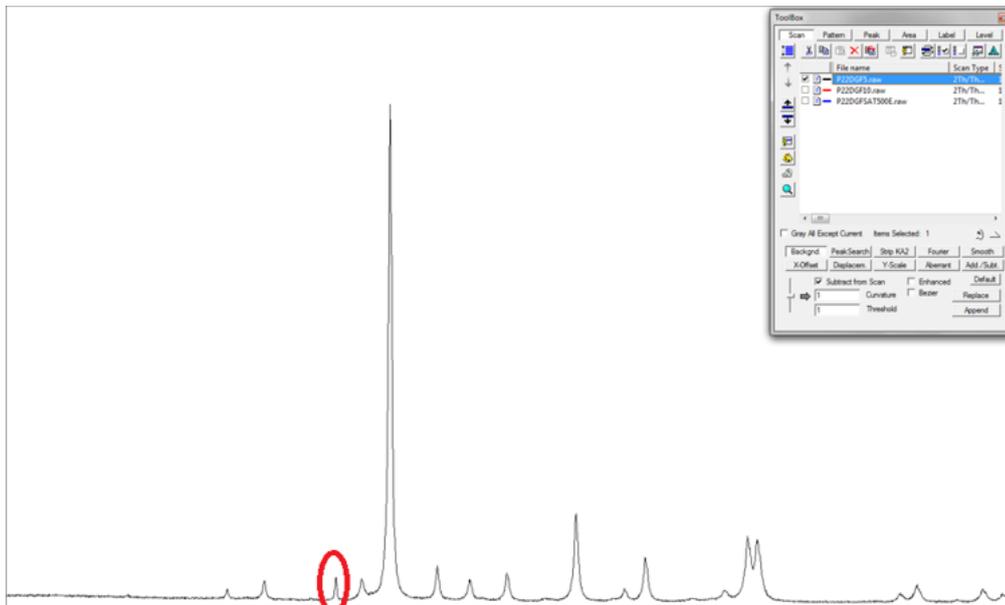


Ilustración 99 P22 grava fina dolomitas microondas 5 min

Resultados

- PLANTA DOLOMIÁS: Muestra P22 D AG: [Ilustración 100] [Ilustración 101]

Como tenía muestra de todo, he vuelto analizar la muestra P22DGG10 y el pico tampoco aparece. Te adjunto de nuevo el archivo con el difractograma corregido. En este caso pasa lo mismo que para el caso 21 CGG. Desaparece el pico que aparece en el P22 DAG05 (difractograma negro):

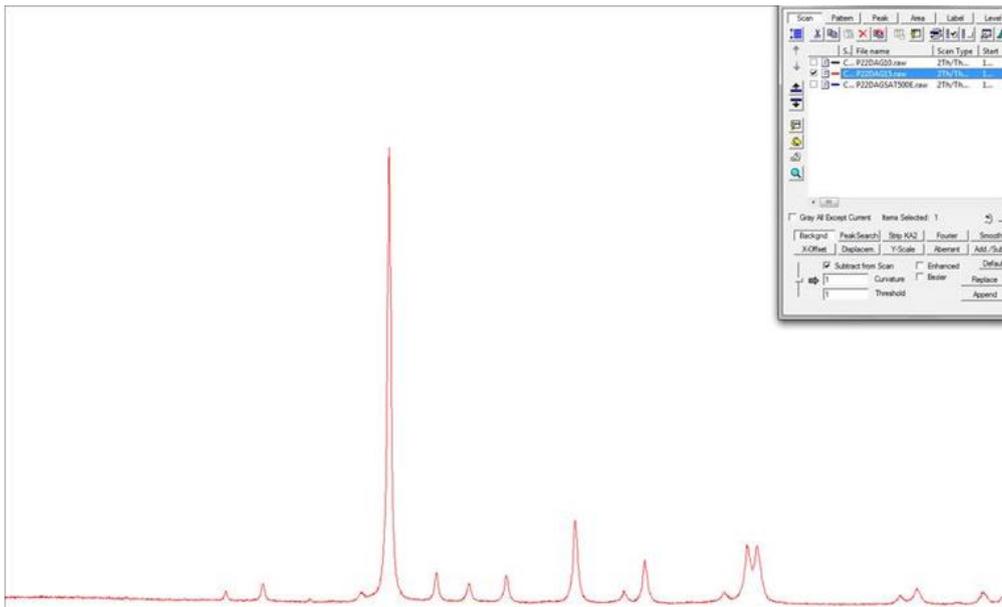


Ilustración 100 P22 arena gruesa dolomitas microondas 15 min

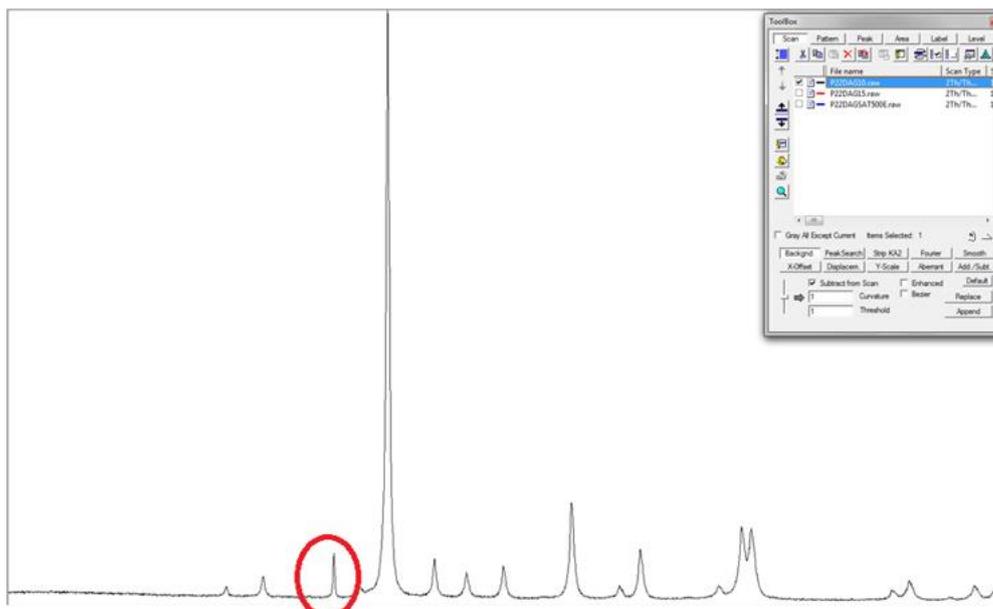
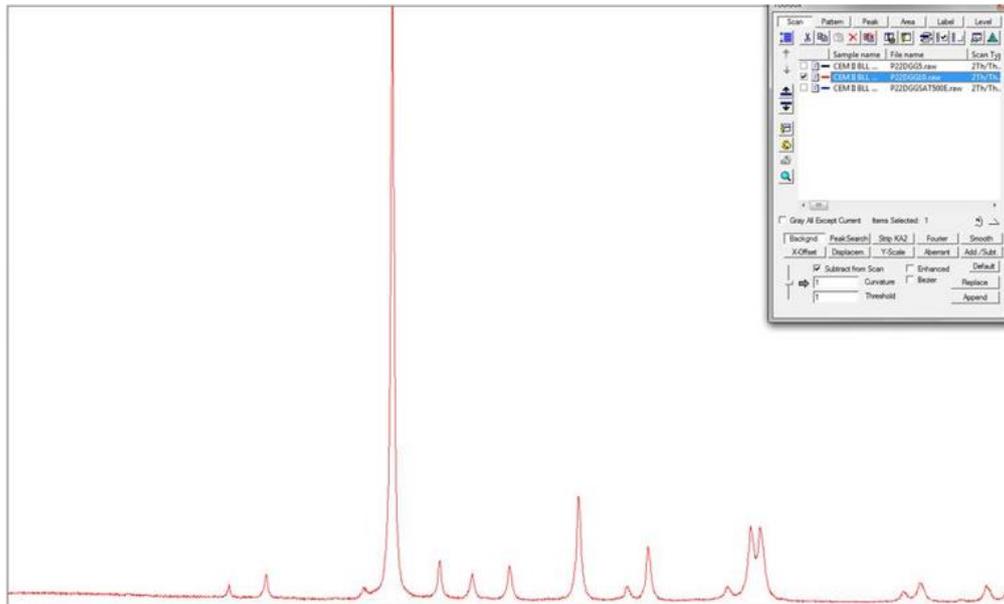


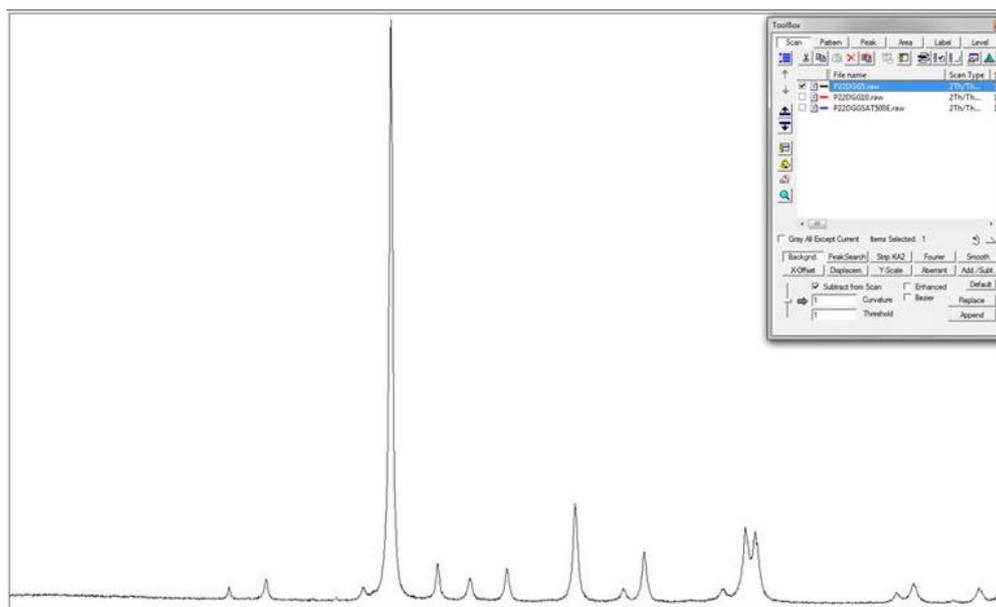
Ilustración 101 P22 arena gruesa dolomitas microondas 10 min

- PLANTA DOLOMIÁS: Muestra P22 D GG: [Ilustración 102] [Ilustración 103]

Como tenía muestra de todo, he vuelto a analizar la muestra P22DGG10 y el pico tampoco aparece (probablemente algún tipo de contaminación) Te adjunto de nuevo el archivo con el difractograma corregido. En este caso no pasa lo mismo que los anteriores casos. Ya que aparece este pico en el P22 DGG05 (difractograma negro, lo he vuelto a pasar y tampoco ha aparecido el pico):



*Ilustración 102 P22 grava gruesa dolomitas 5 min*



*Ilustración 103 P22 grava gruesa dolomitas 10 min*

#### Resultados

En conclusión, con los conocimientos aportados de DRX no se ven por esta técnica un cambio en la estructura de ninguno de los áridos después del tratamiento. No sé sabe si se podría probar con otra técnica espectroscópica para ver un cambio.

En nuestro caso no se han encontrado diferencias entre ambas muestras de secado por estufa y secado por microondas, ni cambios mineralógicos. Aunque hay que decir que el número de muestras comparadas con este método han sido pocas para poder cuestionar o asegurar que no se producen cambios.

Con los resultados obtenidos podemos garantizar que no hay un cambio mineralógico.

## 10.6. RESULTADOS ESTADÍSTICA

Según se observa en los resultados "anexo III punto 2 Resultados estadística", las gráficas que relacionan temperatura de secado con tiempos de secado sí que se aprecia que tienen una dependencia lineal, sin embargo las gráficas que relacionan los gramos de secado con tiempos de secado no tienen una dependencia lineal exactamente, esto se debe a que los primeros minutos cuando la muestra está húmeda, los gramos de agua que pierde la muestra son proporcionales con respecto al tiempo, pero los últimos minutos de los ensayos cuando la muestra está próxima a estar seca los gramos de agua que pierde la muestra son mínimos, por eso los gramos de secado apenas varían con respecto a la pesada anterior, estas gráficas se asemejan a una parábola que en los últimos minutos se aprecia como la curva se va aplanando. Se decide utilizar el modelo lineal porque es una opción más conservadora frente a un ajuste local que podía ser de tipo polinómico que en las gráficas se ve que podía ajustar mejor, pero vimos que aunque ajusta mejor en los valores centrales, en los extremos se nos iba y es allí donde está el mayor interés del estudio, es por eso que se toma el modelo lineal como una buena opción dando valores de ajuste próximos de 0,88.

En la gráfica que relaciona tiempos de secado con gramos de secado se realiza un equivalente en gramos con la estufa, comparando los valores de gramos de secado obtenidos por la estufa cuando la muestra está seca, con el promedio de todos los gramos de secado obtenidos por microondas para cada planta de áridos, en función del tipo de árido, tamaño de árido y potencias empleadas. En esta comparativa se obtiene el tiempo de secado que tarda el microondas en alcanzar el mismo valor de gramos de secado que obtiene la estufa cuando la muestra está seca. Se observa que la estufa en cuanto a gramos de secado no ha tenido tanta variabilidad con respecto a los valores de gramos de secado obtenidos por microondas. En la estufa las muestras secas nos dan valores más próximos unos con otros, es más coherente y se ajusta bien a los promedios.

En la gráfica que relaciona tiempos de secado con temperatura, se representa la temperatura que alcanza el microondas en el momento que obtiene los mismos gramos de secado que se obtienen con la estufa cuando la muestra está seca. Se observa que el horno microondas alcanza los mismos gramos de secado que la estufa en tiempos menores, alcanzando de todas las muestras ensayadas un tiempo de secado máximo para microondas de 22,30 minutos con respecto a las 24 horas que se necesitan para la estufa, este tiempo corresponde a una muestra de 1000 gramos de arena fina con

#### Resultados

una humedad del 10% a potencia media. Las temperaturas que se alcanzan con el microondas en el momento que obtiene los mismos gramos de secado que la estufa no superan los 110°C que marca la norma UNE – EN 1097 -5 [4] y UNE – 17892-1 [6]. Se observa que los ensayos que se producen con dolomitas, calizas y silíceas obtienen los mismos gramos de secado que la estufa llegando a este punto con intervalos de temperatura que oscilan entre 63,5°C y 107°C, y solo superan la temperatura que marca la norma UNE – EN 1097 -5 [4] y UNE – 17892-1 [6] cuando las muestras ya empiezan a estar secas y es cuando se produce el sobrecalentamiento de la muestra. Por el contrario se observa que los ensayos que se producen con mezcla de calizas y silíceas presentan temperaturas más altas que las que se observan con el resto de los áridos, llegando en algunos casos a superar los 110°C en ambas potencias y para distinto tamaño de árido, llegando a temperaturas máximas de hasta 133,9°C.

## 11. PROTOCOLO NORMATIVO

A continuación se va a plantear el borrador de norma basada en la experiencia y en las conclusiones indicadas por otros investigadores en sus publicaciones.

**UNE xxxxx**

**norma**

**española**

Noviembre 2021

---

### **TITULO:**

Ensayos de laboratorio de áridos

Parte 1: Determinación de la humedad mediante el método rápido de secado por microondas.

### **CORRESPONDENCIA:**

Esta norma tiene su correspondencia con las normas:

ASTM D4643 – 08 "Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Microwave Oven Heating" (Estados Unidos de América)

NF P 94-049-1 "Détermination de la teneur en eau pondérale des sols. Méthode de la dessiccation au four a micro-ondes" (Francia)

I.N.V. E – 135– 07 "Método para determinar la humedad de suelos usando el horno microondas" (Colombia)

### **OBSERVACIONES:**

La norma que sirve como referencia a esta norma es la UNE-EN ISO 17892-1.

Parte 1: Determinación de la humedad

## 11.1. INTRODUCCIÓN

Este método de ensayo describe los procedimientos para determinar el contenido de agua (humedad) en suelos secando de manera incrementada el árido en un horno microondas.

Esta norma pretende incluir en el marco normativo nacional la tendencia demostrada por otros países para la determinación de la humedad por un método alternativo más rápido que consiga adelantar los resultados de los ensayos y por tanto agilizar la toma de decisiones.

## 11.2. OBJETO

Esta normal es aplicable a la determinación, en laboratorio y campo, de la humedad de una muestra de suelo mediante secado en microondas, dentro del campo de las investigaciones geotécnicas. La humedad se necesita como una guía para la clasificación de los suelos naturales y como un criterio de control, se mide en muestras utilizadas para la mayoría de ensayos de campo y laboratorio.

Este método de ensayo puede ser usado como sustituto para el Método de Prueba **UNE-EN ISO 17892-1: 2014** cuando se desean resultados más rápidos para acelerar otras fases y la obtención de resultados levemente menos precisos es aceptable.

Este método de ensayo es aplicable para la mayoría de los tipos de suelos.

El método de obtención de la humedad mediante secado en estufa es el procedimiento utilizado en la práctica habitual de laboratorio y cuando se originen cuestiones de precisión entre este método y el método mediante secado por microondas, se deberá utilizar el método descrito en la norma **UNE-EN ISO 17892-1**.

El procedimiento práctico para obtener la humedad de un árido es la determinación de la pérdida de masa de la muestra ensayada por secado, hasta masa constante. La pérdida de masa se considera que es debida al agua libre y se mide respecto de la masa seca restante de las partículas sólidas.

El comportamiento de un árido (tiempo de secado, temperatura que alcanza, etc.), cuando se encuentra sometido a la energía de microondas, es dependiente de sus componente mineralógicas.

Por lo que el objeto de esta norma es la de servir como guía cuando se utilice el horno microondas para secar los suelos de los que se quiere determinar la humedad.

## 11.3. NORMAS DE CONSULTA

Los documentos indicados a continuación, en su totalidad o en parte, son normas para consulta indispensables para la aplicación de este documento. Para las referencias con fecha, sólo se aplica la edición citada. Para las referencias sin fecha se aplica la última edición (incluyendo cualquier modificación de ésta).

### **UNE- EN ISO 12570 Y UNE- EN ISO 12570:2000/A1:2013 (2013)**

Prestaciones higrotermicas de los productos de los productos y materiales para edificios.

Determinación del contenido de humedad mediante secado a elevadas temperatura.

Modificación 1 (une – en ISO 12570:2000/a1:2013).

### **UNE-EN ISO 17892-1 (2015)**

Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos.

(Parte 1: determinación de la humedad).Modificación (ISO 17892-1:2014).

### **UNE- EN 1097-5 (2009)**

Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.

(Parte 5: determinación del contenido de agua por secado en estufa).

### **UNE- EN 1367-4 (2009)**

Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos, retracción por secado.

(Parte 4: determinación de la retracción por secado).

## 11.4. TÉRMINOS Y DEFINICIONES

Para los fines de este documento, se aplican los términos y definiciones siguientes:

### *11.4.1. Humedad, $w$ : (%)*

Cociente entre la masa de agua libre y la masa de suelo seco.

### *11.4.2. Calentamiento por microondas:*

Proceso por el cual el calor es inducido dentro del material debido a la interacción entre moléculas dipolares del material y un campo eléctrico alternante de alta frecuencia. Los equipos generan frecuencias en torno a los 2,45 GHz.

## 11.5. APARATOS Y MATERIAL NECESARIO

Se utilizarán los siguientes equipos:

### **Horno microondas. (HM)**

Un horno microondas, preferentemente con cámara de ventilación, es apropiado. El tamaño y poder de regulación requeridos del horno son dependientes de las intenciones de su uso. Los hornos con controles de poder variable y entradas de regulación de poder de aproximadamente 700 W son los adecuados para este uso. Controles de poder variable son importantes y reducen el potencial de sobrecalentamiento de los especímenes.

### **Termómetro o dispositivo termopar de lectura rápida**

Con precisión de 1°C. Para comprobar la temperatura de la muestra antes de realizar la pesada.

### **Balanza**

Con una precisión de 0,01 g o el 0,1% de la masa pesada, el mayor de los dos valores.

### **Recipientes para la muestra de ensayo**

Los recipientes para la muestra de ensayo deben fabricarse con un material que no cambie de masa con la repetición de los ciclos de secado. Se considera que el vidrio

al borosilicato o vidrio de pirex, recomendándose este último. Se necesita un recipiente para cada determinación de la humedad.

Los recipientes deben tener una capacidad suficiente para contener la totalidad de la masa de la muestra a secar sin que ésta se derrame, pero no debería ser tan grande como para que la masa del recipiente vacío sea significativamente superior respecto a la masa de la muestra. Para muestras grandes, de más de 1.000g sería conveniente separar la muestra porciones que no superen dicha masa.

**Nota:** Se debe tener especial cuidado con los recipientes de vidrio al borosilicato. Se ha observado que cuando son de poco espesor tienden a romper por gradiente térmico en contacto con un material frío (plato metálico de la balanza).

### **Herramientas manuales**

Se deberán llevar guantes o estar dotado de un dispositivo para sujetar y transportar los recipientes para evitar quemaduras que se producirían al tocar el recipiente con las muestras cuando lo sacamos del microondas.

Se deberán llevar espátulas y cuchillos planos para mezclar las muestras. Hay que tener especial cuidado que la muestra no se quede pegada a estos utensilios.

Se deberán llevar protecciones oculares por si alguna muestra estallase durante el proceso de traslado a la balanza para la comprobación de la masa.

## **11.6. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO**

### ***11.6.1. Preparación de la muestra de ensayo***

La masa mínima de un árido húmedo recomendada para la determinación de la humedad se recoge en la tabla 19. Si se ensaya una masa inferior de suelo debería especificarse en el informe del ensayo.

*Tabla 19 Masa mínima de la muestra de ensayo*

Tamaño de grano $D. max^a$	Masa mínima recomendada de muestra de ensayo de suelo húmedo b
mm	g
0.063	100
2.0	200
10.0	500
22.0	1.000
31.5	3.000 (1000+1000+1000)
63.0	15.000c

a Tamaño máximo de partículas de suelo, excluida cualquier partícula individual más gruesa presente.

b El uso de una cantidad de muestra de ensayo inferior a la masa mínima indicada requiere cierta precaución, aunque puede ser adecuado para el objetivo del ensayo. Debe anotarse en el informe de resultados toda muestra de ensayo que tenga una masa menor que la indicada. En muchos casos, cuando se trabaja con muestras pequeñas que contengan cantidades relativamente elevadas de partículas gruesas, es apropiado no incluir estas partículas en la muestra de ensayo. Si esto ocurre, debería anotarse.

c No sería práctico debido a que las cantidades de muestra que se pueden ensayar en el microondas no son superiores a 1.000g. En este caso se recomienda el uso de la estufa de secado

La determinación de la humedad debería llevarse a cabo tan pronto como sea posible.

La manera en la que se guardan y se seleccionan las muestras de ensayo, se hará de acuerdo al procedimiento indicado en la norma UNE-EN ISO 17892-1: 2014 en sus apartados 5.1.2, 5.1.3, 5.1.4 y 5.1.5.

### *11.6.2. Potencia de secado*

Para todo tipo de áridos la potencia de secado será indistinta, consiguiéndose realizar en menos tiempo cuanto mayor es esta. Los tiempos de secado se realizarán en intervalos de 30 segundos.

### *11.6.3. Ejecución del ensayo*

Se coloca la muestra húmeda en un recipiente limpio, seco y de masa conocida (mc) y se determina su masa total. Este valor debe registrarse (m1). Para ayudar al secado en microondas de las muestras de ensayo de mayor tamaño deberían utilizarse recipientes con mayor superficie y disgregar el suelo en tamaños menores. No se recomienda secar tamaños de muestra de más de 1.000g.

Debe colocarse el recipiente con la muestra de ensayo húmeda en el microondas junto al disipador térmico o reductor de calor, si fuese necesario, y debe secarse hasta que la masa sea constante. Se considera que la masa es constante cuando el cambio de masa es inferior al 0,1% de la masa de suelo seco cuando se ha secado durante un periodo adicional de, al menos, 2 minutos en suelos de menos de 200g, de 3 minutos en suelos de menos de 500g y de 5 minutos en suelos de 1000g.

Para los suelos que contienen yeso u otros minerales que tengan una cantidad significativa de agua de hidratación, o suelos con contenidos significativos de materia orgánica o puedan sufrir cambios de masa durante el secado, no debida solo a la pérdida de agua libre, sino a sólidos disueltos en el agua de los poros, por ejemplo, de sal en suelos marinos. **En esas circunstancias, este método de ensayo no es recomendado.**

El tiempo que se necesita para llegar a masa constante variará dependiendo del tipo de suelo, del tamaño de la muestra de ensayo, del tamaño y capacidad de la microondas y de otros factores. La influencia de estos factores generalmente puede establecerse a través del sentido común y con las experiencias de otros suelos ensayados y de los aparatos utilizados.

La masa del recipiente y la muestra seca debe determinarse y anotarse (m2).

Cada vez que se saca la muestra del microondas para comprobar si ya se ha obtenido la masa constante debe comprobarse la temperatura con el termómetro de lectura rápida a la que se encuentra la muestra. En el informe se anotará la temperatura a la que se consigue la masa constante.

NOTA: Las balanzas son susceptibles de pequeños errores cuando pesan elementos calientes debido a las corrientes de convección que se forman, debidas al calentamiento local del aire alrededor de la balanza. Por este motivo sería necesario calibrar la balanza cuando se pesan muestras a temperaturas elevadas con objeto de hacer la corrección oportuna.

## 11.7. RESULTADOS DEL ENSAYO

La humedad del suelo debe calcularse de acuerdo a la fórmula (1):

$$W = \frac{m1 - m2}{m2 - m1} \times 100 = \frac{mw}{md} \times 100$$

donde

w : es la humedad (%);

m1: es la masa del recipiente y la muestra de ensayo húmeda (g);

m2: es la masa del recipiente y la muestra de ensayo seca (g);

mc: es la masa del recipiente (g); mw es la masa de agua (g);

md: es la masa de la muestra de ensayo seca (g).

### 11.7.1. Informe del ensayo

El informe del ensayo debe afirmar que el ensayo se ha llevado a cabo de acuerdo con esta norma y debe incluir la siguiente información:

a) Identificación de la muestra ensayada, por ejemplo con el número de sondeo, el número de muestra y la profundidad y cualquier otro dato relevante, como por ejemplo, la profundidad de la porción ensayada dentro de una muestra, y el método de selección de la muestra, si procede.

b) Descripción visual de la muestra ensayada, incluyendo cualquier característica observada tras el ensayo, de acuerdo a los principios recogidos en la norma ISO 14688-1;

c) La humedad de la muestra ensayada, con un decimal, si es inferior al 100% y con el porcentaje entero más cercano si es superior al 100%;

d) La temperatura final del suelo secado mediante microondas.

## 12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Tras haber analizado los resultados obtenidos en los ensayos de las tres plantas de áridos se observa que la estufa en cuanto a gramos de secado, no ha tenido tanta variabilidad con respecto a los valores de gramos de secado obtenidos por microondas, aunque los valores obtenidos por microondas son muy próximos a los valores de la estufa.

En cuanto a tiempos de secado, se observa que el método de secado por microondas es más efectivo, es una herramienta rápida, práctica y económica ya que se puede utilizar para una rápida determinación de la humedad. Los tiempos de secado empleados en los ensayos de este TFG no exceden en ningún caso de los 30 minutos, lo que indica una reducción considerable en el tiempo de secado de las muestras en comparación con las 24 horas de la estufa.

Aunque existen discrepancias entre el contenido de humedad obtenido con microondas en algunos ensayos con respecto a la estufa, los dos métodos están fuertemente correlacionados.

Los resultados mostraron que al secar los áridos con horno microondas a intervalos cortos de tiempo se observa que la temperatura de los ensayos no sobrepasa los 110°C. Comparando los ensayos para ambas potencias se observa que los ensayos realizados a potencia alta tienen temperaturas más elevadas incluso para los intervalos inferiores a 1 minuto, pudiendo producirse sobrecalentamiento si no se controla los ciclos de los tiempos de secado. Los áridos empleados para este estudio son adecuados para el secado con horno microondas aunque los áridos que presentan mayores temperaturas en los ensayos son los áridos dolomíticos.

Se recomienda utilizar ciclos cortos de secado próximos a 30 segundos para evitar sobrecalentamiento de la muestra.

## **13. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

Determinación de la humedad en áridos con:

- con yesos
- con materia orgánica

Estudio de las alteraciones en los áridos o suelos por ser secados con microondas.

- Arenas de la comunidad de Aragón
- Arcillas de la comunidad de Aragón
- Humedades en arenas gruesas

## 14. BIBLIOGRAFÍA ZOTERO

- AENOR. (1996). UNE- EN 933 – 2 Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.
- AENOR. (1999). UNE- EN 933 – 5 Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso.
- AENOR. (2008). UNE- EN 933 – 4 Determinación de la forma de las partículas Coeficiente de forma.
- AENOR. (2009a). UNE- EN 1097-5 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. (Parte 5: Determinación del contenido de agua por secado en estufa).
- AENOR. (2009b). UNE- EN 1367-4 Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos, retracción por secado.
- AENOR. (2012a). UNE- EN 933 – 1 Determinación de la granulometría de las partículas. Método de tamizado.
- AENOR. (2012b). UNE-EN 932-5 Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte5: Equipo común y calibración. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0049817>
- AENOR. (2013). UNE- EN ISO 12570 Prestaciones higrotermicas de los productos de los productos y materiales para edificios. Determinación del contenido de humedad mediante secado a elevadas temperatura. Modificación 1 (une – en ISO 12570:2000/A1:2013).
- AENOR. (2015). UNE-EN ISO 17892-1 Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. (Parte 1: Determinación de la humedad).Modificación (ISO 17892-1:2014).

---

Bibliografía zotero

AFNOR. (1995). NF P 94-050 Determinación del contenido de agua corporal de los materiales.

AFNOR. (1996). NF P94-49-01 Determinación del contenido de agua corporal de los materiales. (Parte 1: Método de secado por microondas).

AFNOR. (2012). UNE- EN 933 - 3 Determinación de la forma de las partículas Índice de lajas.

Andrea-Blanco, E. (2001). Plantas de áridos. Open course ware.

Cemex. (s. f.). FABRICA MORATA | CEMEX España. Recuperado 16 de septiembre de 2021, de <https://www.cemex.es/-/fabrica-morata>

CFT&ASoc. S.L. (2010, abril 10). CFT & Asociados—Medidor de densidad y humedad no radiactivo por método TDR. <https://fernandeztadeo.com/tdr.htm>

Constumática. (2010). Diferencia entre UNE, UNE-EN, UNE-EN-ISO. Blog de Construmática. <https://www.construmatica.com/blog/diferencia-entre-une-une-en-une-en-iso/>

Departamento de Defensa. (1997). ASTM C566—9 Método de Prueba Estándar para Contenido de Humedad Total Evaporable de un Agregado por Secado.

Departamento de Defensa. (2017). ASTM 4643 Método de Prueba Estándar para la Determinación del Contenido de Agua (Humedad) en Suelos por Calentamiento de Horno Microondas.

Díaz-Sánchez, L. K. (2015). Análisis del comportamiento de la curva característica de humedad en geo-materiales intermedios sometidos a diferentes niveles de estrés térmico [Pontificia universidad javeriana]. Pdf.

Dirección general de Industria. Energía y Minas. (2007). Los áridos y el cemento.

Emipesa. (s. f.). Home. EMIPESA. Recuperado 16 de septiembre de 2021, de <https://emipesa.es/>

Feopa. (s. f.). Registro de la toma de muestra.  
[http://formacion.desarrollando.net/cursosfiles/feqpa/curso\\_11/m10c2.pdf](http://formacion.desarrollando.net/cursosfiles/feqpa/curso_11/m10c2.pdf)

Gámez-Camargo, C. P., & Hilaron-Plazas, D. L. (2006). Determinación de la humedad en suelos granulares utilizando horno microondas y comparación de los resultados con el método tradicional [Universidad de la Salle facultad de ingeniería civil bogotá d.c.]. Pdf.

Gesa. (2018, marzo 8). Termometro digital con sonda.  
<https://www.termometros.com/termometro-digital-con-sonda-fija>

Gil-Montenegro, P. (2018). Monitoreo y control del manejo de riego. 9.

Gómez-Burgos, L. A., & Parra-Cubillos, Y. (2015). Influencia de fluidos en el comportamiento de la doble capa difusa en arcillas. Pdf.

Gómez-Lorenzini, M. S., & Vidal-Arcos, S. (2007). Correlación de determinación de humedad de suelos por medio de secado en horno y en microondas. DIALTE, 6, 1. Pdf.

Grupo SAMCA. (s. f.). Contacto | Dolomías de Aragón. Recuperado 16 de septiembre de 2021, de <https://dolomiasdearagon.com/contacto>

Hidronix. (2020a). Hydro-Probe—Sensor digital de humedad por microondas para cubas, conductos y transportadores.  
<https://www.hydrnix.com/es/productos/hydroprobe.php>

Hidronix. (2020b). Medición de la humedad de áridos y arena con los sensores digitales Hydronix por microondas.  
[https://www.hydrnix.com/es/aplicaciones/humedad\\_en\\_aridos.php](https://www.hydrnix.com/es/aplicaciones/humedad_en_aridos.php)

Hormigones Grañen S.L. (s. f.). Hormigones Grañen S.L. - Inicio. Recuperado 16 de septiembre de 2021, de <http://www.hormigonesgranen.es/>

---

Bibliografía Zotero

- Humiarc. (2021). Sensor humedad arenas por microonda HUMIARC V3 | Arco Electrónica. AUTOMATIZACION PROCESOS - ARCO ELECTRONICA.  
<https://www.arcoelectronica.es/productos/medidores-de-humedad/humiarc/>
- INEN Instituto ecuatoriano de normalización. (1982). NTE 0690—NYE 0690 Mecánica de suelos determinación del contenido de agua método del secado al horno.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2013). NTC1495 Suelos. Método de ensayo para determinar en el laboratorio el contenido de agua (humedad) de suelos y rocas, con base en la masa.
- Instituto Nacional de Vías. (2007). INVE 122 Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E - 135—07 Método para determinar la humedad de suelos usando el horno microondas.
- Interempresas Media, S.L.U. - Grupo Nova Àgora. (2019). Los áridos. Interempresas.  
<https://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/37082-Los-aridos.html>
- Ironadio-Cagigas, P. (2008). Diseño, simulación y estudio económico de una planta de tratamiento de áridos. Universidad de Cantabria.
- Laurila, H. (2019). Calibración de básculas- Cómo calibrar instrumentos de pesaje.  
<https://blog.beamex.com/es/calibracion-de-basculas-como-calibrar-instrumentos-de-pesaje>
- Martin, E. C. (1914). Métodos para Medir la Humedad del Suelo. 9.
- MideBien. (2019, enero 25). Método de medición por impulso para medir resistencia de tierra. Midebien. <https://midebien.com/metodo-de-medicion-por-impulso-para-medir-resistencia-de-tierra/>

- M&M Instrumentos Técnicos. (2019, abril 2). Tamiz. mym instrumentos tecnicos.  
<https://www.myminstrumentostecnicos.com/equipos-de-laboratorio/tamices/-tamiz-que-es/>
- Mr Adam, C. (2015). Comparing Different Heating Methods for Determination of Moisture Content in Soils [University of Southern Queensland]. Pdf.
- Nuoxin. (s. f.). Acetato de potasio. Recuperado 7 de octubre de 2021, de <https://es.lygnxsp.com/product/99-tech-grade-potassium-acetate-used-as-oil-drilling-fluid>
- Orna-Carmona, M. (2015). Análisis del secado con microondas como alternativa a la estufa en la determinación de la humedad de disgregados de la construcción en laboratorio y campo. Elaboración de un protocolo normativo [Universidad de Zaragoza]. Pdf.
- Orna-Carmona, M. (2016). Presentación Tema Rocas.
- Primer taller de mecánica de suelos. (2019). ASTM D-2216 Método de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo. 6.
- Proeti. (2014). Proetisa. <http://proetisa.com/proetisa-productos.php?ID=173&inicio=6&limite=6>
- Rocas y minerales. (2018, febrero 2). Caliza | Características, formación, tipos, usos, yacimientos | Roca. Rocas y Minerales. <https://www.rocasym minerales.net/caliza/>
- Santos-Rojas, J. K., Cabra-Carreño, C. D., & Pinto-Patiño, A. F. P. (2007). Análisis comparativo de los resultados obtenidos en ensayos de humedad natural y caracterización sobre muestras de suelos finos secadas en horno microondas vs. El método tradicional. [Universidad de la salle facultad de ingeniería civil bogotá d.c.]. Pdf.

Bibliografía zotero

Universidad Católica de Valparaíso. (1993). Grupo de Geotecnia.

[https://dfngw79elwra.cloudfront.net/v2-icc-pucv-cl/geotecnia/11\\_nuestro\\_laboratorio/laboratorio/dinsitu/dinsitu.html](https://dfngw79elwra.cloudfront.net/v2-icc-pucv-cl/geotecnia/11_nuestro_laboratorio/laboratorio/dinsitu/dinsitu.html)

USDA. (2005). Calculo de humedad del suelo por tacto y apariencia.

Usos de la Estufa de laboratorio. (2015, marzo 2). Instrumentos de Laboratorio.

<https://instrumentosdelaboratorio.org/estufa-de-laboratorio>

Utest Material Testing Equipment. (s. f.). Medidor de Humedad (Tipo Speedy)—Medidor de Humedad en el Campo. Utest Material Testing Equipment. Recuperado 24 de marzo de 2020, de <http://www.utest.com.tr/es/25725/Medidor-de-Humedad-Tipo-Speedy>

Wikipedia. (2019a). Humedad del suelo. En Wikipedia, la enciclopedia libre.

[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Humedad\\_del\\_suelo&oldid=117343142](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Humedad_del_suelo&oldid=117343142)

Wikipedia. (2019b). Contenido de agua. En Wikipedia, la enciclopedia libre.

[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Contenido\\_de\\_agua&oldid=117665391](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Contenido_de_agua&oldid=117665391)

Wikipedia. (2019c). Termómetro de infrarrojos. En Wikipedia, la enciclopedia libre.

[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Term%C3%B3metro\\_de\\_infrarrojos&oldid=119081686](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Term%C3%B3metro_de_infrarrojos&oldid=119081686)

Wikipedia. (2019d). Rocas silíceas. En Wikipedia, la enciclopedia libre.

[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Rocas\\_sil%C3%ADceas&oldid=120689229](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Rocas_sil%C3%ADceas&oldid=120689229)

Wikipedia. (2019e). Saco (recipiente). En Wikipedia, la enciclopedia libre.

[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Saco\\_\(recipiente\)&oldid=120681530](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Saco_(recipiente)&oldid=120681530)

- Wikipedia. (2019f). Granulometría. En Wikipedia, la enciclopedia libre.  
<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Granulometr%C3%ADa&oldid=122134750>
- Wikipedia. (2020a). Clasificación granulométrica. En Wikipedia, la enciclopedia libre.  
[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Clasificaci%C3%B3n\\_granulom%C3%A9trica&oldid=123064779](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Clasificaci%C3%B3n_granulom%C3%A9trica&oldid=123064779)
- Wikipedia. (2020b). Higrómetro. En Wikipedia, la enciclopedia libre.  
<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Higr%C3%B3metro&oldid=123780303>
- Wikipedia. (2020c). Dolomita. En Wikipedia, la enciclopedia libre.  
<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Dolomita&oldid=123959501>
- Wikipedia. (2020d). Horno de microondas. En Wikipedia, la enciclopedia libre.  
[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Horno\\_de\\_microondas&oldid=124077882](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Horno_de_microondas&oldid=124077882)
- Wikipedia. (2020e). Caliza. En Wikipedia, la enciclopedia libre.  
<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Caliza&oldid=124107811>
- Wikipedia. (2020f). Cubo de albañilería. En Wikipedia, la enciclopedia libre.  
[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Cubo\\_de\\_alba%C3%B1iler%C3%ADa&oldid=126925516](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Cubo_de_alba%C3%B1iler%C3%ADa&oldid=126925516)
- Wikipedia. (2020g). Báscula. En Wikipedia, la enciclopedia libre.  
<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=B%C3%A1scula&oldid=130996075>
- Wikipedia. (2021a). Recipiente. En Wikipedia, la enciclopedia libre.  
<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Recipiente&oldid=132280495>

Bibliografía zotero

Wikipedia. (2021b). Acetato de potasio. En Wikipedia, la enciclopedia libre.

[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Acetato\\_de\\_potasio&oldid=134636555](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Acetato_de_potasio&oldid=134636555)

Wikipedia. (2021c). Carbonato de potasio. En Wikipedia, la enciclopedia libre.

[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Carbonato\\_de\\_potasio&oldid=134783634](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Carbonato_de_potasio&oldid=134783634)

Wikipedia. (2021d). Dolomita. En Wikipedia, la enciclopedia libre.

<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Dolomita&oldid=136227366>

Wikipedia. (2021e). Yoduro de potasio. En Wikipedia, la enciclopedia libre.

[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Yoduro\\_de\\_potasio&oldid=136223167](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Yoduro_de_potasio&oldid=136223167)

Wikipedia. (2021f). Cronómetro. En Wikipedia, la enciclopedia libre.

<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Cron%C3%B3metro&oldid=136621643>

Wikipedia. (2021g). Tamizado. En Wikipedia, la enciclopedia libre.

<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Tamizado&oldid=138325795>

Wikipedia. (2021h). Horno. En Wikipedia, la enciclopedia libre.

<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Horno&oldid=138692948>



**Escuela Universitaria  
Politécnica** - La Almunia  
Centro adscrito  
**Universidad Zaragoza**

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y CRISTALOGRÁFICAS DE  
MATERIALES DE SECADO POR MICROONDAS EN COMPARATIVA DE  
SECADO POR ESTUFA

---

