

--- **PROYECTO** ---

1



**ESTUDIO DE PROCESOS DE  
ENVEJECIMIENTO DE MONUMENTOS DE  
PIEDRA. ESTUDIO DE MATERIALES  
PARA RESTAURACION.**

*Noviembre de 1991*

**LABORATORIO OFICIAL  
DE ENSAYOS DE MATERIALES  
DE LA CONSTRUCCION  
(LOEMCO)**



**CATEDRA DE MINERALOGIA  
Y PETROLOGIA  
ESCUELA TECNICA  
SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE MINAS**



--- *PROYECTO* ---

**ESTUDIO DE PROCESOS DE  
ENVEJECIMIENTO DE MONUMENTOS DE  
PIEDRA. ESTUDIO DE MATERIALES  
PARA RESTAURACION.**

**LABORATORIO OFICIAL  
DE ENSAYOS DE MATERIALES  
DE LA CONSTRUCCION  
(LOEMCO)**

**CATEDRA DE MINERALOGIA Y PETROLOGIA  
ESCUELA TECNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE MINAS**

**Noviembre de 1991**

## INDICE

<b>1.</b>	<b>ASPECTOS GENERALES</b> . . . . .	-- 2 --
1.1.	<b>Introducción</b> . . . . .	-- 2 --
1.2.	<b>Composición del Grupo de Trabajo</b> . . . . .	-- 4 --
1.3.	<b>Objetivos y alcance del Proyecto</b> . . . . .	-- 5 --
1.4.	<b>Metodología de trabajo</b> . . . . .	-- 7 --
1.5.	<b>Notas Técnicas Preliminares</b> . . . . .	-- 27 --
1.5.1.	<b>PROCESO DE FORMACIÓN DE LAS</b> <b>ROCAS</b> . . . . .	-- 27 --
1.5.2.	<b>CARACTERÍSTICAS LITOLÓGICAS</b> . . . . .	-- 28 --
1.5.3.	<b>C A R A C T E R Í S T I C A S</b> <b>ESTRUCTURALES</b> . . . . .	-- 32 --
<b>2.</b>	<b>CARACTERIZACION DE LAS ROCAS</b> . . . . .	-- 34 --
<b>2.1.</b>	<b>Caracterización Química</b> . . . . .	-- 34 --
2.1.1.	<b>INTRODUCCIÓN</b> . . . . .	-- 34 --
2.1.2.	<b>TECNICAS ANALITICAS</b> . . . . .	-- 36 --
2.1.2.1.	<u>Química Elemental</u> . . . . .	-- 36 --
2.1.2.2.	<u>Métodos instrumentales</u> . . . . .	-- 39 --
2.1.3.	<b>VALORACIÓN DE RESULTADOS</b> . . . . .	-- 45 --
<b>2.2.</b>	<b>Caracterización mineralógica y petrográfica</b> . . . . .	-- 50 --
2.2.1.	<b>INTRODUCCION</b> . . . . .	-- 50 --
2.2.2.	<b>TECNICAS DE ANALISIS</b> . . . . .	-- 51 --
2.2.2.1.	<u>Difracción de Rayos X</u> . . . . .	-- 51 --
2.2.2.2.	<u>Microscopía óptica</u> . . . . .	-- 56 --
<b>2.3.</b>	<b>Caracterización Física</b> . . . . .	-- 57 --
2.3.1.	<b>INTRODUCCIÓN</b> . . . . .	-- 57 --
2.3.2.	<b>CARACTERIZACIÓN MECÁNICA</b> . . . . .	-- 58 --
2.3.2.1.	<u>Características Deformacionales</u> <u>Estáticas</u> . . . . .	-- 58 --
2.3.2.2.	<u>Características Deformacionales</u> <u>Dinámicas</u> . . . . .	-- 74 --
2.3.2.3.	<u>Resultados</u> . . . . .	-- 83 --
2.3.3.1.	<u>Aspectos Generales</u> . . . . .	-- 91 --
2.3.3.2.	<u>Técnicas de Estudio</u> . . . . .	-- 92 --
2.3.3.3.	<u>Porosidad</u> . . . . .	-- 92 --
2.3.3.4.	<u>Porometría</u> . . . . .	-- 105 --
2.3.4.	<b>C A R A C T E R I Z A C I O N D E L</b> <b>COMPORTAMIENTO HIDRICO</b> . . . . .	-- 118 --
2.3.4.1.	<u>Introducción</u> . . . . .	-- 118 --

2.3.3 Caracteres del sistema Poroso →

2.3.4.2.	<u>Aplicaciones</u> . . . . .	-- 118 --
2.3.4.3.	<u>Técnicas de estudio. Ensayos.</u> . . . . .	-- 119 --
2.3.4.4.	<u>Aparatos utilizados</u> . . . . .	-- 130 --
2.3.4.5.	<u>Resultados obtenidos</u> . . . . .	-- 131 --
2.3.5.	CARACTERIZACION CROMATICA . . . . .	-- 132 --
2.3.5.1.	<u>Introducción</u> . . . . .	-- 132 --
2.3.5.2.	<u>Metodología</u> . . . . .	-- 133 --
2.3.5.3.	<u>Resultados</u> . . . . .	-- 134 --
<b>2.4.</b>	<b>Alterabilidad de la roca</b> . . . . .	-- 136 --
2.4.1.	GENERALIDADES . . . . .	-- 136 --
2.4.2.	ENSAYOS DE ACELERADOS DE ALTERACION . . . . .	-- 137 --
2.4.2.2.	<u>Humedad-sequedad</u> . . . . .	-- 145 --
2.4.2.3.	<u>Ensayo de Cristalización de Sales</u> . . . . .	-- 147 --
2.4.2.4.	<u>Ataque con soluciones</u> . . . . .	-- <del>146</del> --
2.4.3	INDICADORES DE ALTERABILIDAD--	<del>156</del> --
2.4.4.	RESULTADOS OBTENIDOS . . . . .	-- 160 -- <sup>-169</sup>
2.4.4.1.	<u>Heladicidad</u> . . . . .	-- 160 -- <sup>-169</sup>
2.4.4.2.	<u>Humedad-sequedad</u> . . . . .	-- 163 -- <sup>-172</sup>
2.4.4.3.	<u>Cristalización de sales</u> . . . . .	-- 167 -- <sup>-176</sup>
2.4.4.4.	<u>Ataque por SO<sub>2</sub></u> . . . . .	-- 174 -- <sup>-182</sup>
<b>2.5.</b>	<b>Relaciones entre los parámetros</b> . . . . .	-- 187 -- <sup>-187</sup>
2.5.1.	INTRODUCCION . . . . .	-- 187 --
2.5.2.	MATRIZ DE IMPLICACION . . . . .	-- 188 --
2.5.3.	GRUPOS DE PARAMETROS RELACIONADOS . . . . .	-- 189 --
2.5.4.	DATOS Y RECTAS DE REGRESION EN PAREJAS RELACIONADAS . . . . .	-- 190 --
2.5.5.	CONCLUSIONES . . . . .	-- 194 --
<b>2.6.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b> . . . . .	-- 196 --

**3. DESCRIPCION DE LOS TIPOS DE PIEDRA**

**4. FICHAS TECNICAS DE LOS TIPOS DE PIEDRA**

## **1. ASPECTOS GENERALES**

## **1. ASPECTOS GENERALES**

### **1.1. Introducción**

En el uso de los materiales pétreos en la construcción, bien sea esta histórica-monumental ó actual, es de una importancia básica el conocimiento de sus características y comportamiento. Ello permite una correcta selección de los materiales para construcción más apropiados en cada caso, así como predecir, ó dictaminar (en el caso de edificaciones históricas) las causas de su posible deterioro y sienta las bases para un adecuado pronóstico, reposición ó tratamiento.

La aparición de nuevas técnicas de construcción, la racionalización en el uso de los materiales y el desarrollo de estructuras de gran altura, metálicas ó de hormigón, ha llevado a la necesidad de un mayor conocimiento de los materiales.

Por otro lado, la necesidad de basar las labores de

restauración del patrimonio histórico-artístico inmueble, en los conocimientos técnicos y científicos de que se dispone en la actualidad, ha llevado al desarrollo de técnicas específicas de caracterización de los materiales y su comportamiento.

Si tradicionalmente la selección del material se efectuaba "a ojo", basándose en la experiencia del profesional, hoy día se prefiere recurrir a la caracterización técnica del mismo

El estudio de los materiales con que se está tratando ó que se van a usar, debería ser paso obligado para una correcta intervención ó utilización. Este estudio puede ser puntual, en cada caso, con el consiguiente despilfarro de recursos al repetirse estudios del mismo material en proyectos distintos, ó abordado a nivel nacional, de forma que en las obras concretas se disponga de una base de partida. Enfocado el estudio, de esta última manera, constituye una labor de infraestructura propia de las tareas que la Administración debe de enfrentar.

Ahora bien, muchas veces, la heterogeneidad de los materiales y la apertura de nuevas canteras con tipos de piedra no estudiados, aconsejan, no solamente proporcionar una especie de catálogo con las características de la tipología conocida, sino una norma de ensayos ó pasos a seguir para caracterizar el material. El proyecto que aquí se presenta, constituye un primer paso piloto en

ambos sentidos, al haberse abordado los dos caminos sobre un número limitado y escogido de nueve tipos de piedra utilizados abundantemente en la construcción histórica y actual en nuestro país, en distintas regiones y comunidades.

El Laboratorio Oficial de Ensayos de Materiales de Construcción (LOEMCO), mixto del Ministerio de Industria y la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, dispone de la base instrumental y técnica necesaria, para su desarrollo, con la colaboración accesoria en técnicas instrumentales específicas de la Cátedra de Física de la citada Escuela. Asimismo, la Cátedra de Mineralogía se encuentra con la experiencia y conocimientos necesarios para abordar la ejecución técnica de esta tarea. La conjunción y colaboración entre estas entidades ha hecho posible la realización del proyecto que aquí se presenta.



## **1.2. Composición del Grupo de Trabajo**

### **- Ministerio de Industria, Comercio y Turismo:**

#### **\* Coordinador Superior:**

MARIANO ECHEVARRIA CABALLERO

### **- Cátedra de Petrología ETSI Minas de Madrid-LOEMCO**

**\* Dirección:** J. M. GARCIA DE MIGUEL

**\* Miembros:** L. SANCHEZ CASTILLO  
M.T. GONZALEZ AGUADO  
I. MARIN DE LA BARCENA  
A. PEREZ AQUECHE

**\* Equipo de Ensayos:** F. LOPEZ G. MESONES  
L. LLOPIS TRILLO

## **1.3. Objetivos y alcance del Proyecto**

El presente proyecto tiene como objetivos fundamentales:

- \* Desarrollar una metodología para el establecimiento de una futura normativa sobre piedra de cantería (aplicaciones en la construcción y en restauración del Patrimonio Monumental Inmueble).
- \* Iniciar los estudios básicos necesarios para el conocimiento de las características particulares de la piedra de corte y cantería en España.

En definitiva, los resultados concretos que se pretenden alcanzar con este proyecto serían:

- 1) Diseño de una programación básica de ensayos para la caracterización de la alterabilidad de las piedras de corte y cantería utilizadas en construcción.
- 2) Establecimiento de una metodología analítica relacionando los resultados obtenidos de cada uno de los tipos de piedra estudiados con la aplicabilidad constructiva de los mismos.
- 3) Definición de la potencialidad de deterioro de los distintos materiales en base a los diferentes tipos de agresión a que son sometidos.
- 4) Servir de base técnica para poder realizar posteriores estudios sobre el tratamiento más oportuno a aplicar a cada tipo de piedra, con vistas a su conservación.

#### 1.4. Metodología de trabajo

La metodología de trabajo surge de la necesidad de caracterizar la roca lo más profundamente posible, dirigida hacia dos fines fundamentales:

- Conocer el estado **natural** de la roca y relacionar sus diferentes parámetros (químicos, mineralógico-petrográficos y físicos) entre sí, estableciéndose así su modelo de equilibrio químico-físico.
- Conocer el modelo de **evolución** (alterabilidad) de la roca frente a los distintos ambientes que van a modificar el modelo de equilibrio inicial (patrón) anteriormente establecido. Para la consecución de este fin se realizarán los denominados "ensayos de alteración acelerada".

# METODOLOGIA DE TRABAJO

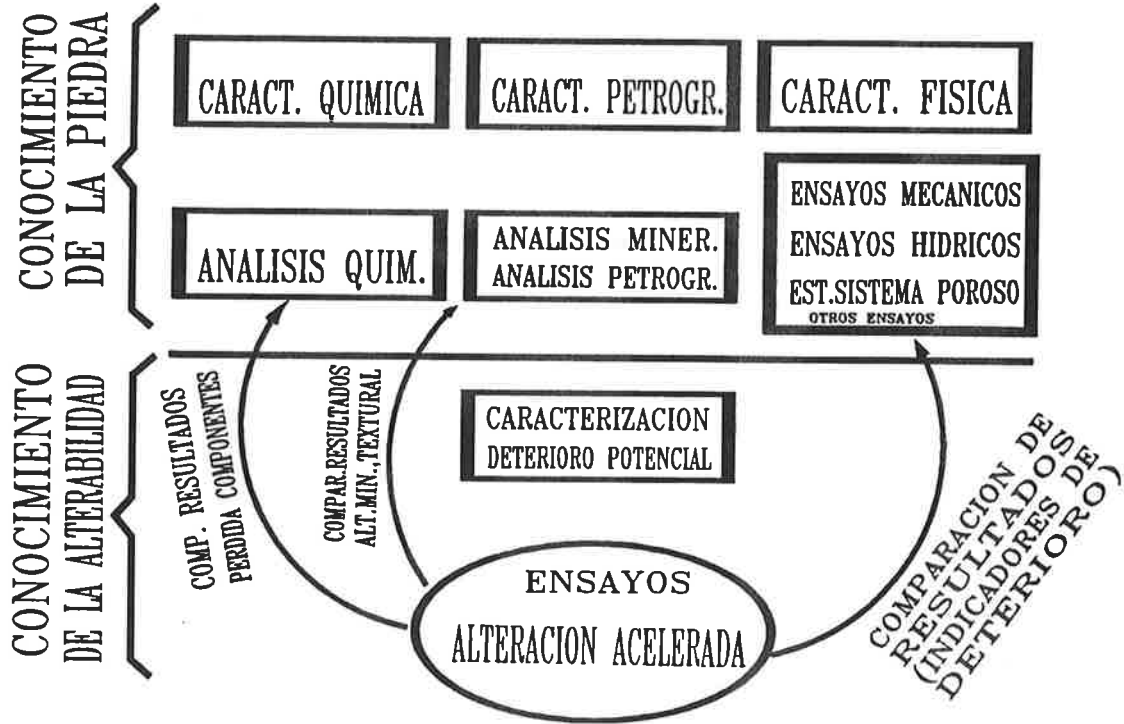


Fig. 1.- Metodología de trabajo.

Tomando como punto de partida los fines anteriormente citados, la primera fase del desarrollo del proyecto ha consistido en la definición del programa de ensayos a realizar. Se ha tenido en cuenta para esta programación, el estado actual, a nivel mundial, de la investigación sobre la piedra de corte, en especial aplicada a la conservación de monumentos, estudiándose las diferentes normativas existentes sobre el tema así como las distintas metodologías de ensayo, reseñadas bibliográficamente, y promulgadas por los distintos grupos investigadores, y en particular, la experiencia acumulada en este campo por el equipo que lleva a cabo este proyecto.

El criterio de selección de la normativa o método a seguir en los diferentes ensayos ha sido en algunos casos la simplicidad y buenos resultados demostrados de los mismos, disponibilidad de los equipos idóneos para realizarlos (en especial normativa UNE). En otros casos se ha estimado oportuno obviar ciertos ensayos debido a la considerable heterogeneidad de las rocas objeto de estudio, lo que implicaría poca representatividad de los resultados obtenidos o la necesidad de realizar un elevado número de medidas para lograr una no siempre aceptable precisión del mismo.

La siguiente fase del proyecto es la selección de los materiales de ensayo, correspondiéndose con algunos de los tipos de piedra de corte más utilizados en el Patrimonio Monumental en España. Estos tipos de roca, en un número de nueve, se han elegido en base a la importancia de su empleo como roca de construcción en

el pasado, y a otros factores diferenciales tales como su litología, ámbito geográfico de origen, facilidades de obtención de muestras, etc.

Una vez realizado el desmuestre en cantera, se ha procedido a caracterizar tanto química como petrográficamente las distintas rocas. Estas caracterizaciones pretenden conocer la composición cualitativa y cuantitativa elemental (química) y mineral (petrograf.) como base para el análisis de los estados natural y de evolución de la roca. La petrografía es una herramienta útil para establecer el estado actual de alteración, pronosticar la alterabilidad mineralógica en distintos ambientes, así como conocer la morfología del sistema poroso en los rangos observables al microscopio.

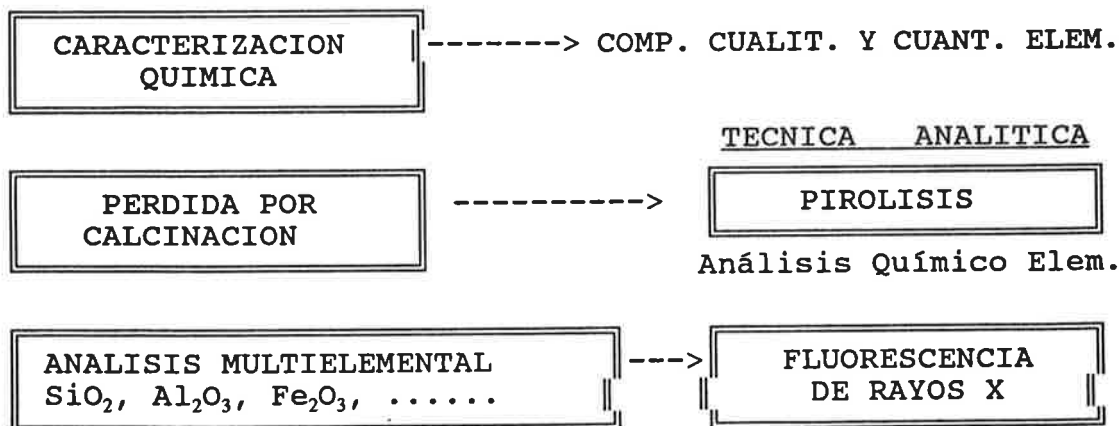


Fig. 2.- Ensayos para la caracterización química.

---

Los cuadros representan las distintas técnicas aplicables, así como las normativas y/o métodos existentes. Recuadradas aparecen las técnicas a utilizar en el proyecto, y el equipo realizador.

**CARACTERIZACION PETROGRAFICA**

Cualitativo  
Cuantitativo

TECNICA ANALITICA

NORMAL 10/82

" 14/83

" 16/84

UNE 22.181

UNE 22.181  
modific.

. **MICROSCOPIA OPTICA**

- Composición Mineral

- Mineralogía de alteración

- Textura

- Tamaño de grano

. **MEB**

- Determinación morfologías

- Composición elemental

. **DIFRACCION DE RAYOS X**

- Composición cualitativa

Fig. 3.- Ensayos para la caracterización petrográfica-mineralógica

La fase simultánea con la anterior se corresponde con la ejecución del programa de ensayos sobre los materiales elegidos para su caracterización física. La realización de la mayor parte de estos ensayos ha tenido lugar en los laboratorios del LOEMCO, con el seguimiento y supervisión del equipo investigador de la Cátedra de Petrología de la ETS de Minas, dentro del marco del convenio de colaboración establecido entre ambas entidades.

Mediante el conocimiento de las propiedades físicas de las rocas se pueden identificar su calidad global (resistencia mecánica, densidad, etc.), así como caracterizar la estructura interna de las mismas (porosidad, porometría, permeabilidad, conductividades térmicas, sónicas y eléctricas, etc.).

La caracterización física de una roca es esencial para el entendimiento de los procesos de alteración **de uso (carácter antropogénico) y tensional** que generalmente padecen las edificaciones en relación con la arquitectura y diseño de estas.



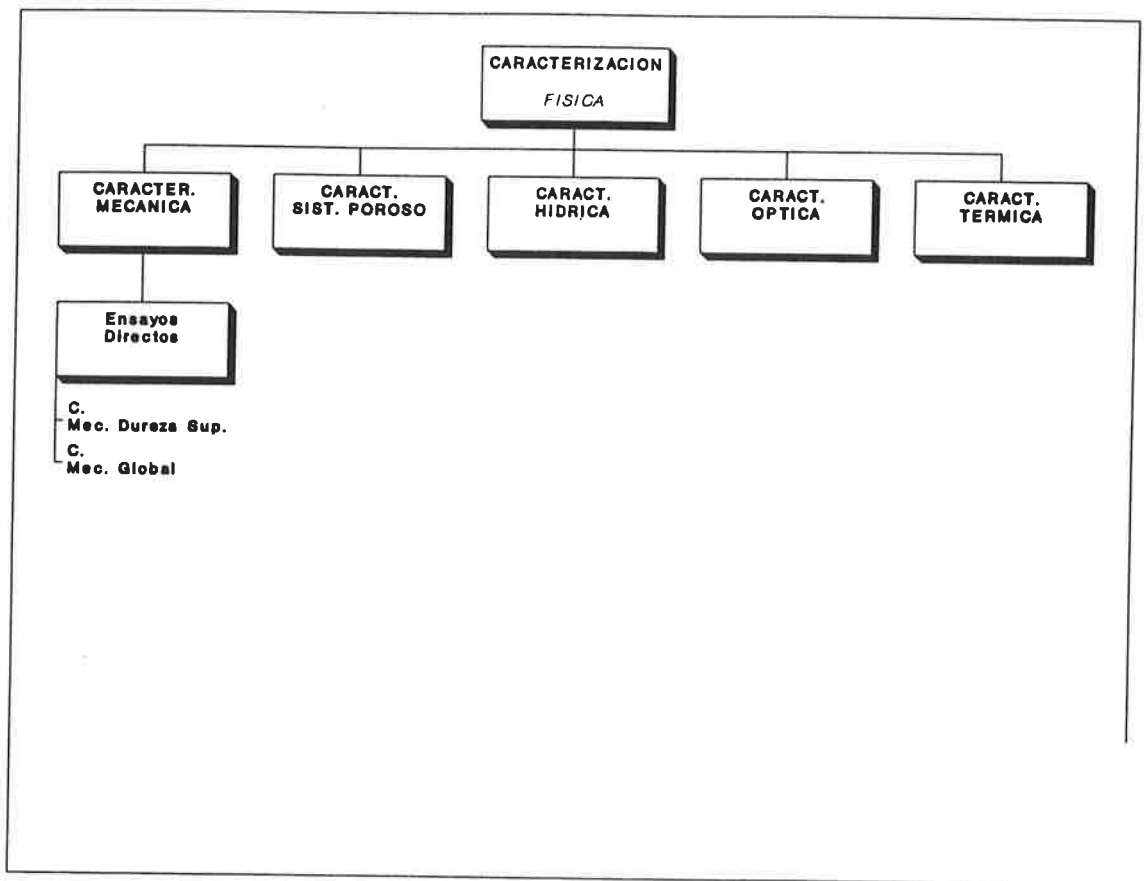


Fig. 4.- Técnicas para la caracterización física.

Dentro de las propiedades físicas a determinar se pueden diferenciar un gran grupo de ensayos, para lograr la **caracterización mecánica** de la roca en estudio.

La caracterización mecánica de una roca persigue conocer su comportamiento frente a fuerzas o sollicitaciones de carácter externo (**Prop. mecánicas globales**), así como su comportamiento superficial ligado a posibles alteraciones de la roca (**Prop. mecánicas de superficie o "dureza superficial"**).

En la determinación de las prop. mecánicas globales, y dependiendo de la metodología de ensayo, se pueden distinguir estos en **directos** e **indirectos**.

## **CARACTERIZACION MECANICA**

### **ENSAYOS INDIRECTOS NO DESTRUCTIVOS**

#### **Velocidad de Propagación del Sonido**

- N F F 10.505
- Rilem Test III.2

#### **Frecuencia Fundamental de Resonancia**

- Rilem Test III.1

### **ENSAYOS DIRECTOS DESTRUCTIVOS**

#### **DE SUPERFICIE**

##### **Resistencia al desgaste por rozamiento**

- ASTM C 448.64 y Rilem Test. IV.2
- DIN 52.108
- Une 22.183

##### **Resistencia al choque**

- Rilem Test. IV.2
- UNE 22.189

#### **GLOBALES**

##### **Resistencia a la compresión** (Mod. elástico)

ASTM C 365-57 AFNOR NFB 10309  
DIN 52.105 Rilem Test. III.5 UN

##### **Resistencia a la flexión** (Mod. de ruptura)

DIN 52112 Rilem Test III.  
AFNOR NFB 10510 UNE 22.186

##### **Resistencia a la tracción**

Rilem III.4  
UNE 22-950

Fig. 5.- Técnicas para la caracterización mecánica.

Dentro de los ensayos para determinar la **dureza superficial**, se han elegido como ensayos a efectuar el de **resistencia al desgaste por rozamiento** o **resistencia a la abrasión** y el de **dureza por rebote** o **resistencia al choque**. La primera propiedad está íntimamente ligada a la resistencia a acciones como las pisadas, acción del viento, etc, siendo la que proporciona los datos más representativos al tratarse de materiales heterogéneos. El segundo ensayo mide la absorción de energía bajo cargas de impacto, y está íntimamente ligada a la resistencia superficial del material. Los dos ensayos se están realizando en el LOEMCO bajo las condiciones y método normativo UNE (Normas UNE 22.183 y 22.189), por su simplicidad y rapidez de ensayo.

los **métodos directos** de caracterización mecánica existentes se han realizado todos ellos excepto el **ensayo de tracción** por no disponerse de la técnica de medida (indirecta mediante el ensayo brasileño), por lo que se pospone este ensayo a posteriores proyectos, ya que estimamos proporcionaría una medida bastante aproximada de la resistencia a factores externos tales como la cristalización de sales y agua en el interior del sistema poroso. Como viene siendo habitual se ha elegido la normativa UNE en el resto de los ensayos, por la buena representatividad de los resultados obtenidos, la disponibilidad de los equipos y puesta a punto de la técnica de ensayo en el LOEMCO.

Los ensayos **indirectos** para la caracterización mecánica global de la roca poseen la ventaja de ser no destructivos y por esta razón son las técnicas que están experimentando más desarrollo en los últimos cinco años. Otra propiedad que las caracteriza es su gran precisión y su aplicabilidad a monumentos "in situ". Permiten comparar, además, los resultados obtenidos mediante estas técnicas con otros ensayos directos como el de compresión (módulo de Young). Así mismo, los parámetros obtenidos mediante estas técnicas son buenos **indicadores del deterioro** sufrido por los diferentes ensayos de alteración (test postalteración). Las medidas han sido efectuadas sobre probetas prismáticas, por el método de **transparencia**, en el Departamento de Física Aplicada de la ETS de Ing. de MINAS, bajo la supervisión del equipo investigador, siguiendo una metodología propia, modificada de RILEM TEST III.1 y III.2.

Otro grupo importante de propiedades físicas son las relacionadas con la **compacidad o estructura de los materiales pétreos**. Las normativas de ensayo elegidas han sido las UNE para los casos en que esta exista, y las NORMAL (Normalizzazione Manuffati Lapidei-CNR-ICR), para la determinación de la porometría, ya que es la metodología más habitual, e implementada automáticamente en los aparatos comerciales (porosímetros de mercurio).

El grupo anterior de propiedades está íntimamente relacionado con la caracterización petrográfica, ya definida anteriormente. También se relaciona intensamente con la eficacia y

posibles daños a la piedra en los procesos de limpieza.

Otro grupo, muy importante bajo el aspecto de las posibles alteraciones que pueda sufrir una roca son las ligadas a la **dinámica hídrica** o comportamiento frente al agua de la roca, ya que todos los procesos de alteración están vinculados al movimiento de agua en el interior de los poros de un material, transportando sales y gases en disolución, e incluso el agua en sí puede actuar como agente agresor (procesos de cristalización en forma de hielo, de disolución, etc..). El estudio de la dinámica hídrica permite determinar la eficacia de los posibles tratamientos de impregnación (hidrófugos, consolidantes, pinturas). La normativa elegida ha sido la promulgada por RILEM, por su simplicidad de ensayo y su extendido uso. Estos ensayos serán realizados por LOEMCO, con la colaboración y coordinación del equipo investigador.

Como propiedad óptica a medir, se ha considerado oportuno la estimación visual del color, basado en el uso de la carta de colores Munsell (ASTM D 1.535-68 y 1.729-74), ya que resulta más representativo para materiales heterocromáticos como las rocas en estudio, frente a la determinación de la composición vectorial de espectros de absorción lumínica. La estimación del color adquiere especial importancia como **indicador de alteración o deterioro de las rocas** (valoración del grado de deterioro de las rocas mediante comparación visual).

La propiedad térmica a determinar será la **expansión térmica o coeficiente de dilatación lineal**, bajo método RILEM Test VI.3. Su conocimiento es esencial para prevenir efectos de las tensiones internas generadas por los cambios de temperatura día-noche. Ejemplos de lesiones de este tipo son las producidas en el mármol de Macael de las columnas del Patio de los Leones en la Alhambra. Las malas restauraciones efectuadas mediante llagueado ó mortero de cemento Portland son otro ejemplo a evitar por desconocimiento de estas características. El ensayo se realizará en los laboratorios del Departamento de Física Aplicada de la ETSI MINAS.

Otra característica térmica fundamental como la **conductividad**, la cual determina la capacidad aislante térmica de la roca, no se realizará por la complejidad del ensayo y la no disponibilidad de los equipos necesarios. La representatividad de sus resultados está cuestionada ya que en su cálculo deben entrar múltiples variables, no siempre determinables.

Una vez realizada la caracterización básica de la roca, y con el fin de predecir la durabilidad de las mismas frente a ciertos cambios en las condiciones de equilibrio del entorno, se desarrollarán dentro del proyecto, la denominadas **experiencias de alteración**.

Las experiencias de alteración pueden ser llevadas a cabo **a la intemperie (experiencias de exposición al medio ambiente)**, o

bien bajo condiciones impuestas por el hombre en **atmósferas controladas**. Las primeras se realizan comúnmente sobre las diferentes edificaciones, una vez conocido el medio ambiente circundante, relacionando este con la alteraciones o patologías sufridas por la piedra. Por tanto, este método definiría el comportamiento de una determinada roca frente a un conjunto de condiciones interrelacionadas, no siendo válido para la caracterización genérica de la piedra, si bien proporciona numerosos datos sobre los **indicadores de alteración** a emplear para controlar o testificar los cambios producidos sobre la misma por las diferentes experiencias empíricas de alteración.

La segunda metodología es llevada a cabo en el laboratorio, por lo tanto es susceptible de ser normalizada, y a su vez puede realizarse de dos formas distintas atendiendo a la intensidad y tiempo de exposición:

- \* **Ensayos de imitación o simulación:** Acción prolongada de los agentes agresores bajo las mismas o similares condiciones reinantes en el medio ambiente natural. Tiene la ventaja de que sus resultados pueden cuantificarse en **tiempo real (representatividad cualitativa y cuantitativa de resultados)**, si bien, debido a la lentitud de los procesos degradativos (algunos hasta de varios años) la hace costosa y poco

aplicable.

- \* **Ensayos de alteración acelerada:** Acción intensiva y concentrada en el tiempo de los principales factores degradativos presentes en la climatología, con o sin vinculación entre ellos. Su principal desventaja estriba en la imposibilidad de comparar cuantitativamente los resultados obtenidos con los posibles efectos en tiempo real causados por los mismos agentes en condiciones ambientales normales. Como virtudes de este método aparecen su simplicidad, economía, comparabilidad de resultados con las propiedades iniciales o básicas de la roca indicando la tendencia cualitativa de alterabilidad, y sobre todo su rapidez.

Bajo estos aspectos, se ha estimado oportuno estudiar el comportamiento de las rocas frente a los agentes más comunes de agresión bajo la metodología de **ensayos de alteración acelerada**, también denominados por algunos autores como de envejecimiento artificial.

Los ensayos de alteración más utilizados, y que se



corresponden cualitativamente, con las acciones de deterioro más comunes sobre la piedra, son:

- \* **Heladicidad o resistencia al hielo-deshielo.**
- \* **Cristalización de sales o resistencia a las sales.**
- \* **Humidificación/secado o resistencia al agua.**
- \* **Resistencia al ataque químico.**
- \* **Ciclos termohigrométricos y/o de radiación.**

De los cinco ensayos anteriormente citados se van a realizar los cuatro primeros, quedando el último, menos desarrollado en general por los estudiosos del tema, y en particular por el equipo encargado del proyecto, para una posible segunda fase del mismo. Así mismo, la no disponibilidad de los equipos apropiados (cámaras de control automático de temperatura-humedad) hace relegar este último ensayo para posteriores ocasiones.

Como primer paso en el desarrollo de las experiencias de alteración se ha de fijar aquellos cambios en las propiedades básicas de la roca, que han de utilizarse como **indicadores de alteración**

(Martin, A.-1990). Así mismo se ha de fijar el orden de importancia de los factores de degradación, y las intensidades mínimas necesarias para inducir cambios suficientemente rápidos en sus propiedades físicas. En este aspecto, se ha seguido por parte del equipo investigador las directrices promulgadas por Accardo, A.; Tabasso, M., et al (1978), así como ASTM E 632-78, para la valoración de los resultados obtenidos en los ensayos de envejecimiento acelerado. Más específicamente se ha tomado como base de partida para la elección de tales indicadores los estudios e investigaciones llevados a cabo por el equipo investigador dentro de la acción concertada con la CICYT, relacionando el grado de deterioro de los materiales pétreos con su porosidad. Así, para cada tipo de ensayo se proponen los siguientes **indicadores de deterioro:**

- Heladicidad:

- 1) Examen visual. Comparación con registro fotográfico.
- 2) Variación de peso.
- 3) Variación del coef. de absorción. y evaporación.
- 4) Variación en la frecuencia fundamental de resonancia.
- 5) Cálculo del coef. de resistencia de la

roca.

- **Cristalización de sales:**

- 1) Examen visual. Comparación con registro fotográfico.
- 2) Variación de peso y volumen.
- 3) Variación del coef. de absorción. y evaporación.
- 4) Variación en la frecuencia fundamental de resonancia.
- 5) Cálculo del coef. de resistencia de la roca.
- 6) Estudio de morfologías de deterioro mediante MEB.

- **Humidificación/secado:**

- 1) Examen visual. Comparación con registro fotográfico.
- 2) Variación de peso.
- 3) Variación del coef. de absorción. y evaporación.
- 4) Variación en la frecuencia fundamental

de resonancia.

5) Cálculo del coef. de resistencia de la roca.

- **Ataque químico:**

1) Examen visual. Comparación con registro fotográfico.

2) Variación de peso.

3) Variación del coef. de absorción. y evaporación.

4) Variación en la frecuencia fundamental de resonancia.

5) Cálculo del coef. de resistencia de la roca.

6) Estudio de las morfologías de alteración. Posibilidad de formación de nuevas fases minerales.

Paso seguido se han diseñado los ensayos a realizar, en base a su comodidad en tiempos de operación, simplicidad, disponibilidad de equipos y seguridad de producir, para un número de ciclos prefijado cambios significativos en las propiedades indicadoras de degradación siempre sometiendo a las muestras a unas condiciones

agresivas lo más parecidas a la realidad (por ejemplo, se descartaron aquellos métodos en la que la temp. de desecación fuese superior a los 60° C aún necesitando las muestras un menor tiempo de secado).

# **ENSAYOS DE ALTERACION**

## **EN ATMOSFERA CONTROLADA A LA INTEMPERIE**

### **ACELERADOS**

### **EN T. REAL (SIMULACION)**

#### **HELADICIDAD**

Rilem Test V.3

NFB 10.513

UNE 22.184

ASTM C 67-80

#### **CRISTALIZACION DE SALES**

ASTM C 218

DIN 52.111

Alonso, J. (1988) modificado

Rilem V.1a y V2 modificado

#### **HUMEDAD-SEQUEDAD**

Martín, A. (1979)

#### **ATAQUE QUIMICO**

Martin, A. (1979) modificado

#### **CICLOS TERMO HIGROMETRICOS Y/O RADIACION**

Macmillan y Simonet (1971)

## **1.5. Notas Técnicas Preliminares**

### **1.5.1. PROCESO DE FORMACIÓN DE LAS ROCAS**

La piedra de construcción en nuestro país puede pertenecer a uno de dos grupos fundamentales de rocas dentro de la universalmente admitida, triple clasificación genética: ígneas (generalmente rocas de la familia granítica); ó sedimentarias. Las rocas metamórficas, por su característica textura orientada y fisibilidad apenas se utilizan (exclusión hecha de las pizarras de techar). Las nueve rocas seleccionadas en este estudio pertenecen, en su totalidad a las rocas sedimentarias, abandonando el estudio de las rocas ígneas a posibles estudios futuros.

Las rocas sedimentarias proceden de la consolidación de los materiales detríticos ó químicos aportados al mar y los lagos, por los ríos. En el ambiente de depósito pueden crecer y desarrollarse organismos diversos cuyos esqueletos y excrementos constituidos por carbonato cálcico, han originado rocas sedimentarias denominadas

calizas conchíferas y biogénicas. El constituyente fundamental de este tipo de rocas es como se ha afirmado, el carbonato de calcio bajo la forma del mineral denominado calcita ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ).

Las calizas también pueden encontrar su origen en la precipitación química del carbonato a partir del bicarbonato disuelto en el agua, por cambios en la salinidad, temperatura, etc., dando lugar a la formación de calizas puras u oolíticas.

Las areniscas por el contrario, se originan por acumulación de elementos detríticos, principalmente granos de arena (generalmente constituidos por cuarzo  $\text{SiO}_2$ , que durante su consolidación son cementadas por varias sustancias. Particularmente, las denominadas calcarenitas se caracterizan por la presencia de cemento a base de carbonato cálcico.

#### 1.5.2. CARACTERÍSTICAS LITOLÓGICAS

Ya se ha descrito que el carbonato cálcico, bajo la forma mineral de calcita, suele ser el componente más relevante de los materiales del tipo que se estudia, utilizados en construcción. Debido a ello, las propiedades de este mineral normalmente, afectan de forma decisiva a las características de las rocas sedimentarias.



Se trata de una especie de baja dureza (3 en la escala de Mohs) lo que suministra a las rocas calcáreas su característica facilidad para el serrado y el tallado, de donde deriva su extendido uso en la construcción monumental. Desafortunadamente, la calcita es un mineral fácilmente atacable por las aguas ácidas lo que proporciona a estas rocas su sensibilidad a la degradación, especialmente en ambientes contaminados.

Si una parte de las características de los materiales calcáreos de construcción encuentra su explicación en su composición mineral, otra lo hace en sus rasgos texturales.

Como ya se ha explicado, se pueden considerar estos materiales como integrados por dos elementos texturales diferentes: el material clástico; y el cemento que le da cohesión.

El elemento clástico está, generalmente, integrado por fragmentos de carbonato cálcico y subordinadamente de cuarzo. En forma accesoria, puede aparecer algún fragmento de mica, turmalina, circón, y/o cualquier otro mineral más ó menos resistivo a los procesos geológicos de alteración química.

Las rocas en las que el carbonato cálcico aparece como subordinado al cuarzo y otros materiales en el elemento clástico se denominan globalmente areniscas. Estas rocas pueden encontrarse cementadas por, de nuevo, carbonato cálcico (areniscas calcáreas) y

menos frecuentemente por sílice, óxidos de hierro, etc.

Las rocas en las que la mayor parte del elemento clástico está formado por carbonato y este elemento predomina claramente sobre la matriz se denominan calcarenitas.

Entre el elemento clástico, además de los citados, puede aparecer, en algunas rocas, una fracción arcillosa de granulometría muy fina. Si se trata de arcillas expansibles, esta fracción puede ser responsable (como ocurre en la Piedra de Novelda) de una especial sensibilidad del material a los cambios higrométricos, provocando un rápido proceso de degradación.

La mayor ó menor recristalización del cemento en unidades cristalinas mayores aproximándose a la textura en mosaico del mármol, conlleva un notable cambio en las propiedades del material. Cementos muy recristalizados (espáticos) disminuyen grandemente la porosidad de la piedra (y con ello su capacidad de absorber el agua) y aumentan su resistencia mecánica.

Las rocas con cemento muy recristalizado, ó con predominio del cemento calcáreo sobre el elemento clástico se denominan globalmente calizas compactas. De acuerdo con la naturaleza del elemento clástico reciben diferentes nombres específicos: calizas oolíticas si los clastos están formados por esférulas de unas 100 a 1000 micras, con estructura concéntrica formadas por

precipitación de carbonato cálcico a partir de un núcleo mineral u orgánico en un medio agitado; calizas conchíferas, arrecifales, con crinoides, con micro-organismos, etc., de acuerdo siempre con la naturaleza original correspondiente.

Las calcarenitas con abundante elemento clástico y cemento poco recristalizado, así como las areniscas son, en general, rocas más fáciles de trabajar que las calizas compactas. Por ello han sido ampliamente utilizadas en la construcción monumental, tanto en sillería como en tallas y esculturas. Por contra, su mayor porosidad conlleva el un fácil acceso de la humedad y un proceso más rápido de degradación (generalmente por disolución y pérdida del cemento). La caliza compacta ha sido muy utilizada en sillería.

El cuarzo de las areniscas debido a su dureza (7 en la escala de Mohs), provoca una mayor resistencia a la abrasión.

Las características de las rocas no son solo consecuencia de su mineralogía. La porosidad, por ejemplo, debida a distintas circunstancias juega un papel de gran importancia en su resistencia a la degradación. El agua es el vehículos de muchos procesos de alteración. Rocas muy porosas absorben el agua con facilidad. Si los poros tienen una sección de gran diámetro, este agua es eliminada por evaporación, pero si la porosidad es fina, las moléculas de agua aparecen unidas fuertemente a la superficie de la roca por fuerzas electrostáticas, siendo difícil de eliminar.

### 1.5.3. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES

La existencia de determinadas estructuras puede causar diferencias importantes en el comportamiento y utilidad de rocas mineralógica y texturalmente análogas. Las superficies de sedimentación crean, por ejemplo, anisotropía en el material respecto a coloraciones y tonalidades, porosidad, mineralogía, resistencia mecánica, dilatación lineal térmica, etc., de forma que la orientación con que se coloca adquiere gran importancia. Lo mismo puede decirse respecto del diaclasado. Este factor puede determinar, ya en cantera, el que un material sea ó no explotable, ó condicionar el sistema por el que se explotó en el pasado y el tamaño de los sillares de un edificio histórico.

La microfisuración, inapreciable a simple vista, establece una porosidad con una morfología muy particular, con todo lo que esto conlleva, afectando a las propiedades físicas y mecánicas, así como a su alterabilidad.

La existencia de venas, cambios de tonalidad, etc., determinan características ornamentales que, a veces, condicionan altamente el valor del material en el mercado.

## **2. CARACTERIZACION DE LAS ROCAS**

## **2. CARACTERIZACION DE LAS ROCAS**

### **2.1. Caracterización Química**

#### **2.1.1. INTRODUCCIÓN**

La caracterización química de una roca debe determinar no sólo la composición química de los elementos mayoritarios, sino además, la de los elementos traza y/o compuestos orgánicos presentes en la misma.

El conocimiento de la composición química de una roca es fundamental para el estudio de las posibles alteraciones que puede sufrir una roca. Proporciona información no sólo de carácter cualitativo, indicando la formación de productos de alteración (por disolución y precipitación, hidrólisis, interacción con agentes contaminantes, etc..), sino también semicuantitativo, pudiéndose estimar la intensidad o grado de alteración de una roca por

comparación de la composición química de muestras alteradas (monumento) y no alteradas (cantera).

Especialmente importantes son los estudios de la variación espacial (generalmente en profundidad o en altura) de la composición química, estableciendo correlaciones entre los datos del análisis y las características/intensidad de la alteración. Así, puede llegar a interesar relacionar el grado de humedad de la roca (generalmente en función de su situación dentro del monumento) con el empobrecimiento en determinados minerales (por disolución).

Otro punto en donde es útil el análisis químico es la explicación de las diferentes coloraciones que puede presentar un mismo tipo de roca, tal y como ocurre con los elementos cromóforos de los minerales.

Por otro lado, la caracterización química de ciertas rocas mediante el estudio del contenido y distribución de elementos traza, junto con la mineralógico-petrográfica permite en ocasiones identificar las canteras de origen de una roca en un determinado monumento.

Para llegar a conocer la composición de elementos mayoritarios, se utilizan los métodos químicos (puros). Para establecer la proporción de elementos minoritarios (traza) se recurre a métodos instrumentales, siendo los métodos físicoquímicos los utilizados para el análisis de los elementos orgánicos (especialmente sobre rocas que

han tenido un tratamiento orgánico y se quiera saber la naturaleza del mismo, presencia de hidrocarburos debida a la contaminación ambiental, etc).

## 2.1.2. TECNICAS ANALITICAS

### 2.1.2.1. Química Elemental

La composición de una roca en elementos mayoritarios viene expresada, generalmente, en porcentajes en peso de los siguientes elementos (en forma de óxido):

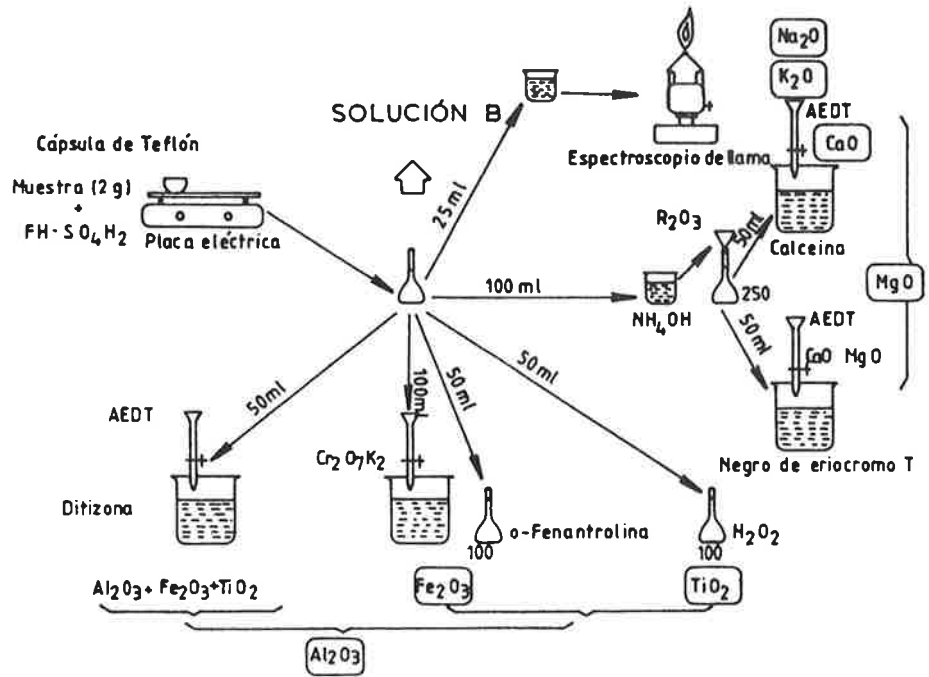
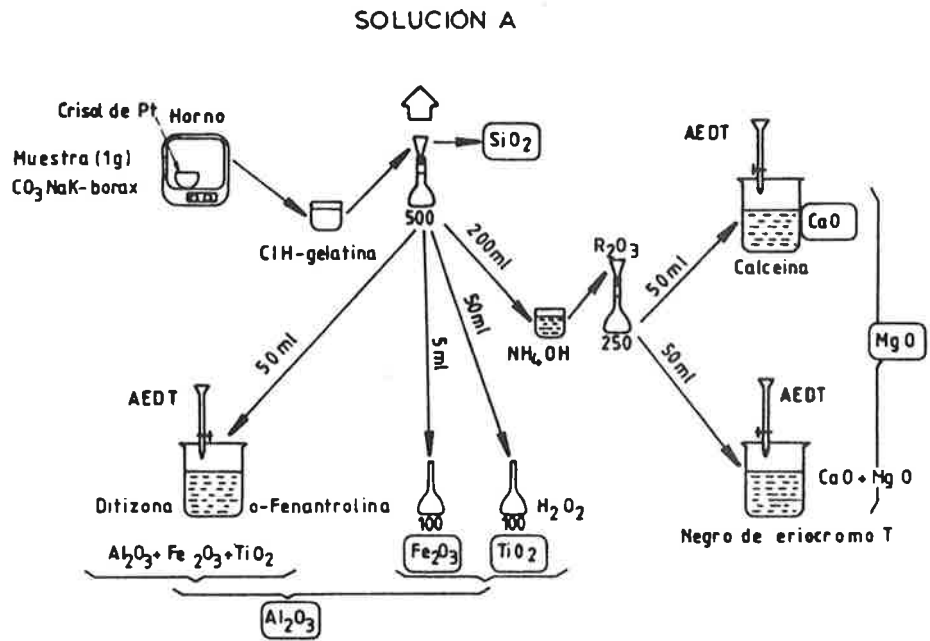
- SiO<sub>2</sub>
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- TiO<sub>2</sub>
- CaO
- MgO
- Na<sub>2</sub>O
- K<sub>2</sub>O

Otro parámetro a analizar es la pérdida por calcinación, para lo cual se recurre a la técnica de pirólisis. La variación viene



expresada en tanto por ciento en peso de la muestra en seco, antes de ser calcinada.

Los procedimientos, en general, constan de una fase de ataque (progresiva) o disolución de la muestra mediante una solución de lavado, y una fase de secado de los residuos obtenidos. La cuantificación se realiza mediante diferencias de pesada. Estos métodos han sido descritos por diversos autores, como DUPAS, M. (1.981) y GUIDOBALDI, F et al (1.975). En el siguiente cuadro se adjunta el esquema propuesto por Martin, A. (1.978)



-Esquema general para el análisis de materiales pétreos

Estos métodos, aunque suficientemente precisos, no poseen la sensibilidad que suministran los métodos instrumentales, además de ser mucho menos rápidos, por lo que para la confección de este Proyecto se han escogido los primeros (espectroscopía por fluorescencia de rayos X).

#### 2.1.2.2. Métodos instrumentales

Estos métodos, con carácter general, permiten determinar con una extraordinaria precisión y sensibilidad (p.p.m.) la composición elemental de una roca, aunando además dos ventajas principales con las que debe contar un ensayo normalizado, frente a los métodos clásicos o puramente químicos.

- a) Menor necesidad de muestra (basta generalmente con 0,5 ó 1 gr), especialmente importante cuando se ha de analizar la muestra de una determinada obra de arte.
- b) Mayor rapidez de procedimiento.

Entre las técnicas analíticas empleadas se encuentran las siguientes:

- Espectroscopía de absorción atómica.
- Espectroscopía de emisión.
- Microsonda electrónica.
- Cromatografía de gases y capa fina.
- Fluorescencia de Rayos X.
- Espectrometría de masas.

Alguna de estas técnicas como la microsonda electrónica o la espectrometría de masas requieren equipos muy costosos. Por otro lado, se requiere para efectuar un análisis representativo de la muestra un método de análisis general, no sólo puntual, rápido, aplicabilidad uni o multielemental, carácter no destructivo (posibilidad de uso reiterado de la muestra). Teniendo en cuenta los requerimientos anteriores se ha escogido el método de **espectroscopía de emisión de rayos X o espectroscopía por fluorescencia de rayos X.**

## FLUORESCENCIA DE RAYOS X

### a) Principios

La espectroscopía de emisión por fluorescencia de rayos X tiene por finalidad el análisis cualitativo elemental de una muestra dada. Posee la gran ventaja de su extremada sensibilidad (ppm-análisis de elementos menores) y precisión, así como una gran rapidez de operación, debido a la automatización del proceso analítico.

El método se basa en la identificación de la longitud de onda  $\lambda$  de la radiación característica (radiación de fluorescencia) emitida por la muestra al recibir un haz de rayos X de menor longitud de onda. Esta identificación se produce efectuando una "reflexión de Bragg" (difracción) de los rayos X de fluorescencia, en un cristal analizador de una sustancia conocida orientado de forma que se conoce el espaciado entre los planos reticulares "d" en los que se produce la "reflexión".

El cristal analizador va montado sobre un dispositivo conocido como el Círculo de Roland. Este dispositivo consta de un goniómetro, el propio cristal analizador y una cámara de centelleo. El círculo gira con el cristal analizador. La cámara gira con velocidad doble a la del cristal, de forma que siempre se encuentra en posición de recoger los haces "reflejados" en el mismo.

La longitud de onda de la radiación de fluorescencia  $\lambda$  que interesa determinar, el espaciado "d" entre planos reticulares del cristal analizador y las direcciones en las que se producen las "reflexiones"  $\theta$ , se encuentran relacionadas mediante la ecuación de Bragg

$$n\lambda = 2d \operatorname{sen}\theta$$

Cuando se cumple la ecuación, se produce un haz difractado que recoge la cámara de centelleo, transformándolo en un impulso

eléctrico. Un sistema electrónico recoge tanto la intensidad de la radiación como el ángulo de rotación en que se produce y calcula la correspondiente longitud de onda. Estas son características de cada elemento y se corresponden con los niveles energéticos entre los orbitales más internos de los correspondientes átomos, permitiendo identificar el elemento correspondiente.

Los análisis efectuados sobre los nueve tipos de roca han sido realizados por el Servicio de análisis Centralizado de la E.T.S.I. de Minas de Madrid, con un espectrógrafo de la marca Philips Modelo PW 1404.

Las unidades más importantes de las que consta el equipo son:

- 1) Generador de rayos X.
- 2) Cristal analizador y goniómetro.
- 3) Procesador electrónico de registros de impulsos.
- 4) Ordenador para el análisis espectral.

El tubo de rayos X posee un ánodo de Sc/Mo con una potencia máxima aproximada de 3 KW (40 Kv y 70 Ma).

Para disminuir la absorción de la radiación por el aire la

muestra se analiza dentro de una cámara de vacío.

El cristal analizador va colocado sobre un plano deslizable en el interior de la cámara de vacío. El cristal elegido para las determinaciones es el cristal EDDT, plano (020)), que da un espaciado  $2d = 8.808 \text{ \AA}$ . Para este cristal se utiliza un contador proporcional de flujo, con atmósfera estabilizada de gas PR (Argón 90% - Metano 10%), el cual va montado sobre el brazo del goniómetro.

El sistema de registro es automático, instalado como software en un ordenador conectado al contador electrónico.

Para identificar los elementos de bajo número atómico son útiles las series K, y para los de número atómico alto, la serie L y los últimos valores de las series K.

#### b) Muestras

Con el fin de homogeneizar la muestra para evitar los llamados "efectos de matriz" (interferencia en la intensidad de línea de un elemento debida a la concentración de todos los demás elementos presentes en la muestra), en cuanto a tamaño de grano se refiere se ha

procedido a tamizar la misma malla (200 mesh), una vez molida en un mortero de ágata de accionamiento eléctrico.

Con el mismo propósito y para poder llevar a cabo la determinación de elementos ligeros se ha destruido la matriz mineral por fusión actuando como fundente el tetraborato de litio (5 g) para obtener, en un crisol de platino, una perla.

El número de muestras ha sido de dos por cada tipo de roca, teniendo en cuenta además los datos que se tienen de la recopilación bibliográfica. El peso de la muestra es de aproximadamente 0,5 gr.



### 2.1.3. VALORACIÓN DE RESULTADOS

En principio, y dado que la totalidad de las muestras a analizar, son de naturaleza carbonatada, se han determinado cuantitativamente la presencia de los siguientes elementos (en forma de óxidos): Si, Ti, Al, Fe, Mn, Ca, Mg, Na, K, P, Cr y V.

Como software de análisis espectral se ha utilizado el programa "CALIZAS" específico para rocas de naturaleza carbonatada.

De este análisis se ha aprovechado esencialmente los datos relativos a la abundancia de determinados elementos, en especial Si, Ca, Al, K y Na, que definen la presencia de los principales minerales constituyentes de este tipo de rocas.

Así, el método constituye, más que un análisis absoluto representativo, para lo cual se necesitaría previamente realizar un estudio estadístico del muestreo y posteriormente de los resultados (determinación de los valores y la varianza), una técnica analítica de apoyo a la petrografía, detectando la presencia de elementos minoritarios ó trazas camuflados, capturados ó admitidos en las redes de los minerales.

Así mismo, está técnica puede llegar a ser útil en la localización de las canteras de origen de una determinada roca presente en un monumento, gracias a su extraordinaria sensibilidad

(ver Tabla de indicios FRX), capaz de caracterizar una sustancia por su contenido en elementos traza, si bien, se ha de tener en cuenta la posible variación composicional (presencia de minerales y/o sustancias de neoformación, enriquecimientos debido a pérdida selectiva de minerales, alteraciones mineralógicas aceleradas) que ha podido experimentar la roca en monumento debido a un cambio en su estado de equilibrio químico-físico natural.

Tabla de indicios de FRX



ANALISIS POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Comp.	TIPOS DE PIEDRA				
	EP	PL	CM	CL	NV
SiO <sub>2</sub>	3,34-3,36	7,95-8,44	1,40-1,44	0,13-0,14	8,77-8,81
TiO <sub>2</sub>	0,05	0,01	0,02-0,03	0,01	0,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,74	0,04-0,05	0,28-0,29	-	0,75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,37	0,06	0,01	0-0,01	0,43-0,44
MnO	-	-	-	-	0,01
CaO	33,44-33,49	20,13-20,17	36,82-37,04	35,80-36,06	20,25-20,28
MgO	0,51	0,11	0,74-0,76	0,14	1,49
Na <sub>2</sub> O	-	-	-	-	-
K <sub>2</sub> O	0,09	0,01	0,03	-	0,31-0,32
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07	0,03-0,04	0,04	0,02-0,03	0,07
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-	-

**ANALISIS POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X**

Comp.	TIPOS DE PIEDRA			
	OS	ES	SP	BO
SiO <sub>2</sub>	7,68-7,86	0,18-0,20	1,47-1,49	1,05-1,09
TiO <sub>2</sub>	0,01-0,02	0,01	0,02	0,02-0,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,31-0,32	0,04-0,06	0,36	0,47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,15-0,16	0,01-0,02	0,40-0,41	0,58
MnO	-	-	0,02	0,02
CaO	16,70	38,85-39,00	36,53-36,58	26,95
MgO	0,10	0,37-0,49	0,34	14,31-14,53
Na <sub>2</sub> O	-	-	-	-
K <sub>2</sub> O	0,12	-	0,11-0,12	0,08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	0,03-0,04	0,04-0,05	0,03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-

## **2.2. Caracterización mineralógica y petrográfica**

### **2.2.1. INTRODUCCION**

Para cada caracterizar el material, se han elegido técnicas de análisis que suministran una información complementaria: El análisis petrográfico, y la difracción de Rayos X.

La primera de estas técnicas permite determinar la mineralogía, relaciones texturales y una estimación visual de la abundancia de cada especie. Asimismo, presenta a la observación directa la porosidad más grosera (hasta unas 5  $\mu\text{m}$ .).

La difracción de rayos X proporciona una idea global de las especies con estructura cristalina. Las intensidades de radiación "reflejadas", suministran, además un análisis semicuantitativo de la abundancia relativa de los diferentes minerales. Es una técnica complementaria de la petrografía para identificar la naturaleza de los materiales arcillosos siempre que estos se encuentren con una cierta abundancia.

Existen diversas normas al respecto. Entre ellas se encuentran las siguientes:

- . NORMAL 10/82 (CNR-ICR) "Composición mineral".
- . NORMAL 14/83 (CNR-ICR) "Minerales de alteración"
- . 16/84 Test UNE
- . 22-181-85 AENOR "Mármoles y calizas ornamentales. Clasificación"

sin embargo, en lo que respecta al proyecto que aquí se considera y dado su carácter iniciatorio al estudio de una normativa adecuada, se ha preferido seguir un esquema metodológico propio.

## 2.2.2. TECNICAS DE ANALISIS

### 2.2.2.1. Difracción de Rayos X

#### **Fundamento**

Mediante la difracción de rayos X, es posible identificar directamente las sustancias que componen una muestra, siempre que éstas tengan estructura cristalina. Esta técnica es complementaria del análisis petrográfico permitiendo identificar la naturaleza de la fracción arcillosa, cuando se presenta suficientemente abundante.

El método se basa en la difracción que experimentan los rayos X, al atravesar una red cristalina. Aparte del haz principal, ó espectro de orden 0, existen unas direcciones de refuerzo de los trenes de onda a su paso por el cristal. Estas direcciones se encuentran



íntimamente relacionadas con el espaciado entre los planos reticulares de la sustancia y con la longitud de onda de los rayos X mediante la ecuación de Bragg

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

de forma que conocidas las direcciones de refuerzo " $\theta$ " y la longitud de onda " $\lambda$ ", se pueden calcular los espaciados entre los planos reticulares del cristal " $d$ ". Estos espaciados son característicos de cada sustancia cristalina, lo que permite identificarla.

Para su análisis la muestra se muele a un tamaño inferior a 200 mallas y se coloca en un portamuestra, constituido por una pequeña ventana metálica de 1 mm. de espesor aproximadamente y 1,5 cms. de arista, requiriéndose cantidades de muestras superiores a 1 gramo. El polvo es prensado en el portamuestra y colocado en el goniómetro de rayos X. Allí recibe la radiación procedente del tubo generador de rayos a través de una ventana provista de los correspondientes filtros, para obtener radiación monocromática. Cuando los rayos inciden sobre la muestra, encuentran granos de la sustancia a analizar dispuestos en todas las direcciones posibles, ya que ésta se encuentra pulverizada. Aquellos granos con planos reticulares cuya orientación cumpla la ley de Bragg con respecto a la dirección de incidencia de los rayos, emitirán haces difractados, como si los rayos X se reflejaran en ellos. Una cámara de centelleo va recorriendo el goniómetro con velocidad doble de aquella con que gira

el portamuestra, de forma que recoge todos aquellos haces difractados que se "reflejan" en el plano del portamuestra. Cuando la cámara recibe radiación, un sistema electrónico, anota el ángulo  $\theta$ , de giro y la intensidad recibida, y un ordenador calcula el espaciado "d" correspondiente. Los espaciados así obtenidos se comparan con los de las sustancias conocidas y de esta forma se identifica la sustancias.

### **Instrumental**

El instrumental utilizado es un difractómetro Philips modelo PW 1729

El equipo está básicamente formado por:

- . Tubo de rayos X con anticátodo de Cu
- . Colimador Soller
- . Rendija de divergencia
- . Muestra
- . Rendija de entrada
- . Colimador Soller
- . Rendija analítica
- . Detector

El nivel de detección de una sustancia se encuentra por encima del 5%.

Los análisis realizados sobre las muestras se presentan en la siguiente tabla:

## ANALISIS POR DIFRACTOMETRIA DE RAYOS X

MINERALES	CALCITA	CUARZO	DOLOMITA	FELDESPATO
ROCA				
ESTEPA	***	*	-	-
BOÑAR	***	*	***	-
ESPERA	***	**	-	-
COLMENAR	***	-	-	-
CAMPASPERO	***	*	-	-
PALOMERA	***	***	-	-
OSTIONERA	***	***	-	*
NOVELDA	***	***	**	*
SEPULVEDA	***	*	-	-

LEYENDA:

***	Pico intenso
**	Pico débil
*	Trazas
-	No existente

#### 2.2.2.2. Microscopía óptica

##### **Fundamento**

Para la determinación mineralógica y microscópico-textural de la roca se ha utilizada la observación mediante luz transmitida con luz polarizada. Se basa esta técnica en la confección de secciones delgadas del material soportadas sobre un vidrio denominado portaobjetos. En secciones de algunas decenas de micras, la mayor parte de los minerales que componen las rocas son completamente transparentes a la luz. Estas secciones se observan por medio de un microscopio petrográfico, de esta forma se puede describir directamente la disposición de los minerales, morfología de los poros más grandes y las relaciones texturales. Para la identificación de las distintas especies se utilizan sus propiedades ópticas frente a la luz polarizada (color, índice de refracción, birrefringencia, indicatriz óptica, extinción, pleocroismo, etc.).

##### **Instrumental**

Microscopio Ortolux marca Leitz. con diversos objetivos de x 3.5, x 10, x 40, x 90 oil, y oculares de x 8, x 10, y x 12.

## **2.3. Caracterización Física**

### **2.3.1. INTRODUCCIÓN**

La caracterización física de una roca se basa en la realización de una serie de ensayos que van a determinar, por una parte, todas aquellas propiedades ligadas a la estructura física del material (densidad absoluta, densidad aparente, porosidad, porometría, etc.) y por otra, aquellas que evalúan su cohesión mecánica (resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia a la tracción), su resistencia superficial (resistencia al desgaste, resistencia al choque) y sus propiedades térmicas (expansión térmica).

## 2.3.2. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

### 2.3.2.1. Características Deformacionales Estáticas

#### A) ENSAYOS DIRECTOS GLOBALES.(DESTRUCTIVOS).

##### **Objetivos.**

Todos estos ensayos reproducen el comportamiento de la roca cuando está sometida a tensiones mecánicas externas. La resistencia de la roca frente a estos esfuerzos está directamente relacionada con sus constituyentes mineralógicos y sus enlaces intercristalinos.

El comportamiento de la piedra frente a estos ensayos sirve también para determinar el esfuerzo crítico, o tensión crítica, a la cual se produce la rotura o fisuración de la muestra. Esta resistencia a la rotura detecta además aquellos elementos defectuosos que existen en la estructura interna de la de la roca.

Así mismo, dichos ensayos permiten juzgar la cohesión de los materiales pétreos y su distribución, conocer si las propiedades físicas de la piedra son las más adecuadas para desempeñar las

funciones que tienen encomendadas, según su posición en el edificio, y obtener información acerca de la durabilidad de la piedra y de la extensión en que participan ciertos tipos de alteraciones.

#### a<sub>1</sub>) Ensayo de resistencia a la compresión.

##### Objetivo

El ensayo tiene como objetivo establecer el método y determinar la resistencia a la compresión de una probeta de roca no sometida a confinamiento.

##### Técnicas

Las técnicas empleadas se basan en los principios de de la teoría de la elasticidad enunciados por HOOKE, YOUNG y POISSON fundamentalmente. De esta manera definimos como un material elástico todo aquel que cumple la ley de HOOKE:

$$\sigma = \epsilon E$$

siendo

$\sigma$  = tensión aplicada.

$\epsilon$  = deformación unitaria.

E = Módulo de elasticidad o Módulo de YOUNG.

Aquellos materiales que se desvían de esta ley se les considera como de comportamiento plástico y en ellos siempre van a existir deformaciones permanentes una vez que se haya dejado de aplicar la carga. Esta deformaciones se deben en gran parte a la heterogeneidad de los materiales y a irregularidades de la superficie, en las cuales se concentran las tensiones porque la superficie de aplicación es muy

pequeña.

Los parámetros obtenidos por este ensayo son la resistencia a la rotura, completándose con la curva tensión - deformación, de la cual se obtiene el módulo de elasticidad o módulo de Young (Pendiente de la curva dentro del período elástico).

Otros parámetros que se pueden obtener también con estas técnicas, dirigidas hacia la clasificación y caracterización de rocas homogéneas e isótropas son el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) cuando se miden, simultáneamente a las deformaciones longitudinales, las perpendiculares a la de la caja. Ya que:

$$\nu = \frac{\text{acortam. o alargam. unitario perpend. a la caja}}{\text{alargamiento unitario}}$$

a partir del cual podríamos calcular también G, módulo de elasticidad transversal:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \text{ siendo } G = \frac{T}{\gamma} = \frac{\text{esfuerzo de cizalla}}{\text{desplazamiento angular unitario}}$$

Existe un gran número de normas referentes a este tipo de ensayos como son los siguientes:

DIN 52105

NF B 10509

UNE 22185-85

Resistencia a la compresión



	para mármoles y calizas ornamentales.
UNE 22187-85	Cálculo del módulo elástico para mármoles y calizas ornamentales.
UNE 22950-90	Parte 1. Resistencia a la compresión uniaxial.
UNE 22950-90	Parte 3. Determinación del módulo de elasticidad (Young) y del coef. Poisson.
UNE 7068	Ensayo de compresión de adoquines de piedra.
UNE 7-333-77	Identificación de la orientación de las probetas para ensayos mecánicos.
Rilem Test III.5	Resistencia de rotura a la compresión.

Entre ellas, hay que destacar la UNE 22950-90 Parte 1 que se ha elegido para este ensayo debido a su buena representatividad y disponibilidad en el laboratorio LOEMCO.

Aparatos utilizados.

Según la norma UNE 22950-90 se requiere una máquina adecuada para aplicar y medir la carga axial a la muestra. Deberá ser de suficiente capacidad y podrá aplicar la carga de forma tal que la rotura

se produzca entre los 5 y los 10 minutos desde el comienzo de la aplicación de la carga, o sea, entre 0,5 y 1 MPa/s.

La máquina utilizada para este ensayo, que cumple las especificaciones anteriormente mencionadas y localizada en el LOEMCO es de marca ELE International modelo Autotest 2000. Tiene una capacidad de carga hasta 2000 KN.

Los resultados obtenidos son la carga máxima sobre la muestra expresada en newtons con una precisión no menor del 1%, y la resistencia a compresión uniaxial de la probeta, calculada dividiendo la carga máxima por el área de la sección transversal inicial.

$$\sigma_c = \frac{P}{\pi D^2/4}$$

$\sigma_c$  = resist. comp. uniaxial (MPa)  
P = Carga máxima (rotura) (N)  
D = Diámetro probeta (mm)

#### Especificaciones de muestra.

Las probetas utilizadas en este ensayo según norma UNE 22950-90 deberán ser cilíndricas, con una relación altura/diámetro de 2,5 a 3, siendo el diámetro 10 veces superior al tamaño de grano mayor de la muestra y no inferior a 50 mm.

Es muy importante que todas las superficies de la probeta sean lisas y estén libres de irregularidades, sobre todo en las bases, por la

existencia de deformaciones permanentes anteriormente mencionadas.

Así mismo, la humedad de las probetas debe ser en lo posible similar a la de origen en cantera, ya que tiene un efecto significativo sobre la resistencia.

El número de probeta a ensayar se recomienda que sean cinco como mínimo.

a<sub>2</sub>) Ensayo de resistencia a la flexión.

#### Objetivo.

El ensayo tiene como objetivo establecer el método y determinar la resistencia a la flexión de mármoles y calizas ornamentales, así como va a permitir evaluar la resistencia de la piedra a la fuerza del viento, la carga de la nieve o cargas que puedan originarse por amontonamiento de losas de piedra.

#### Técnicas.

En este ensayo la técnica utilizada es muy similar a la basada en la teoría de vigas, de tal manera que se considera a la probeta como una viga apoyada en dos puntos a la cual se la somete a una carga centrada en el medio de la muestra. Así, la resistencia a la flexión respondería a la siguiente fórmula:

$$R = \frac{C W L}{b h^2} \text{ (N/cm}^2\text{)} = \frac{1}{100} \frac{C W L}{b h^2} \text{ (MPa)}$$

( Modulo de rotura )

C = Constante determinada por la geometría de la probeta

W = Carga de rotura ( N )

L = Distancia entre apoyos ( cm )

b = Anchura de la cara sometida al esfuerzo ( cm )

h = Altura de la probeta ( cm )

La normativa existente es la siguiente:

DIN 52112

NF B 10510

UNE 22186-85

Resistencia a la flexión para  
mármoles y calizas  
ornamentales.

Rilem Test III.6 Resistencia de rotura a la flexión.

La elegida para este ensayo a sido la UNE 22186-85 debido a su buena representatividad y disponibilidad en el laboratorio LOEMCO.

#### Aparatos utilizados.

La máquina apta para ensayos, como exige la norma UNE 22186-85, ha sido en este caso ELE International Digital Tritest 50, con una capacidad de carga entre 10 KN y 100 KN y la velocidad de carga puede variar de 0,00001 mm/min a 9,99999 mm/min.

En este dispositivo se coloca cada probeta ajustando las uñas de soporte y las de transmisión de la carga. Posteriormente se aplican cargas crecientes y uniformes a razón de 10 N/s a través de dos puntos situados a una distancia  $L/4$  mm de las uñas de soporte, hasta que se produzca la rotura, siendo la longitud entre apoyos  $L = 200$  mm.

De esta manera, la resistencia a la flexión por rotura calculada para el tipo de probetas estudiadas ha sido:

$$R = \frac{3 W L}{4 b h^2} \text{ (N/cm}^2\text{)}$$

#### Tipo de muestra.

Se encargarán, como mínimo, seis probetas prismáticas de dimensiones 300 x 25 x 40 mm en el caso de que se obtengan, como en este estudio de explotación minera, no de testigos de sondeos.

Es condición necesaria para la ejecución del ensayo según norma UNE 22-186-85 la inmersión en agua filtrada a  $20 \pm 5$  °C durante 48 horas como mínimo.

a<sub>3</sub>) Ensayo de resistencia a la tracción.

#### Objetivos

El ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia de rotura a la tracción. Además es un parámetro de gran interés para estimar la

resistencia de un material pétreo a la fuerza expansiva de las sales al hidratarse o del agua al congelarse.

### Técnicas

Las técnicas utilizadas para la realización de este ensayo se basan en los principios de la teoría de la elasticidad enunciada por HOOKE y ya expuesta en el apartado 1. Para los materiales elásticos obtendríamos de la misma forma una recta tensión - deformación hasta alcanzar la resistencia de rotura. En el caso de los materiales plásticos tendríamos también deformaciones permanentes debido a la heterogeneidad de los materiales y a la concentración de esfuerzos por la presencia de fisuras microscópicas en el material. Es tan importante la existencia de estas fisuras que se puede calcular un factor de ampliación del esfuerzo de tracción de valor  $m = 1 + 2 (L/R)^{1/2}$  siendo L la longitud de dicha fisura y R el radio de la curvatura interior al material.

Otra forma de calcular la resistencia de rotura a la tracción será utilizando un método indirecto denominado ensayo brasileño. Esta técnica se basa en la idea de que si sometemos una probeta cilíndrica de dimensiones determinadas a una compresión con confinamiento se obtendrá un esfuerzo de tracción en sentido transversal al de aplicación de la carga, por lo cual la fórmula que relaciona estos parámetros será la siguiente:

$$\sigma_t = \frac{2P}{De} \quad \text{siendo } \sigma_t = \text{resistencia a tracción (MPa)}$$

$P = \text{carga en rotura (N)}$   
 $D = \text{diámetro de la probeta (mm)}$

e = espesor de la probeta (mm)

las normas existentes sobre estos ensayos son las siguientes:

Rilem Test III.4      Resistencia a la rotura por tracción

UNE 22-950-90              Parte 2. Resistencia a  
tracción. Determinación  
indirecta ( ensayo brasileño).

Para este estudio no se ha efectuado el ensayo de tracción ya que no se disponía de aparatos en el LOEMCO y la técnica es bastante compleja y difícil de realizar.

#### Aparatos.

En el ensayo brasileño que determina la norma UNE 22-950-90 el aparato utilizado consta de varias partes: dos mandíbulas de acero para aplicación de la carga específica dimensionadas y descritas en la norma, máquina para aplicar y medir cargas de compresión en las probetas y un asiento esférico fijo colocado en la parte superior de la máquina.

### Tipo de muestras.

Las probetas del ensayo brasileño deben ser cilíndricas con irregularidades menores a 0,5 mm de diámetro superior a 50 mm y espesor de la misma igual al radio de la probeta. Las condiciones de humedad deben ser similares a las de origen ya que la humedad tiene un efecto significativo en la resistencia. El número de probetas debe ser mayor que 5.

### **B) ENSAYOS DIRECTOS DE SUPERFICIE. ( DESTRUCTIVOS)**

#### **Objetivos.**

Los ensayos tienen como objetivo fundamental predecir el comportamiento de la roca frente a agentes destructores que afectan especialmente a la superficie del material. De esta manera obtenemos la resistencia superficial de la piedra que a causa de posibles transformaciones producidas en su superficie puede tener una constitución distinta a la de la estructura interna de la piedra.



b.) Ensayo de resistencia al desgaste por rozamiento.

### Objetivo

El objetivo de este ensayo es la determinación de la resistencia al desgaste por rozamiento, que tiene muchísimo interés para establecer perfiles de resistencia mecánica en las cargas superficiales de piedra natural o alterada artificialmente.

### Técnica

La técnica de este ensayo es muy simple, basándose en la diferencia de volúmenes inicial y final, después de someter la probeta a un recorrido determinado sobre una pista de desgaste. Esta diferencia de volúmenes partido por la superficie de la cara de la probeta nos da como resultado el desgaste lineal.

La normativa existente es la siguiente:

ASTM C 448.64(72)      Porcelanas

DIN 52108

UNE 22-183-85      Resistencia al desgaste por rozamiento para mármoles y

calizas ornamentales.

UNE 22-173-85                      Resistencia al desgaste por rozamiento para granitos ornamentales.

UNE 7069                              Ensayo de desgaste por rozamiento en adoquines de piedra.

Rilem Test IV.2      Resistencia a la abrasión.

La norma utilizada en los ensayos efectuados para este estudio ha sido la UNE 22-183-85 debido a la buena representatividad de los resultados y a la disponibilidad del laboratorio LOEMCO.

Aparatos utilizados.

La máquina utilizada para el ensayo en base a la norma UNE 22-183-85 es una pista Dorri.

Esta máquina consta esencialmente de los siguientes aparatos:

- Un contador horario de vueltas.
- Dos palancas de embrague.
- Dos volantes de aproximación.
- Dos timones para el bloqueo de las palancas.

- Un peso y contrapeso.
- y de las siguientes características:
- Motorreductor de 3 CV a 220/380 V.
  - 30 r.p.m. de la plataforma.
  - 2 r.p.m. de los cabezales.
  - Recorrido de la probeta en una vuelta completa: 1,38 m.
  - Tiempo de selección para un recorrido de 1000 m: 24 min.

A parte de la máquina, habrá que disponer de una balanza hidrostática para la medida de los volúmenes inicial y final.

#### Especificaciones de muestra

Las muestras deben ser al menos 2, cúbicas de 7 cm de arista con una tolerancia de  $\pm 5\%$ .

b<sub>2</sub>) Ensayo de resistencia al choque.

#### Objetivo

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia al choque o rebote de una piedra como medida de su resistencia superficial.

#### Técnica

La técnica del ensayo se basa en el principio de que existe una relación entre la resistencia superficial de un material y el cociente

entre la energía cinética de la caída de una masa y la restituída elásticamente.

En la práctica se somete a las muestras al efecto de la caída vertical de una masa esférica de un peso determinado a distintas alturas, dándose como resistencia la altura en cm en la que se produce la rotura de la muestra.

Las normas existentes son las siguientes:

UNE 22-189-85	Resistencia al choque para mármoles y calizas ornamentales.
---------------	---

Rilem Test IV.3	Fuerza superficial medida por rebote.
-----------------	---------------------------------------

La norma elegida para la realización del ensayo ha sido la UNE 22-189-85 debido a la representatividad de los resultados y a la disponibilidad del laboratorio LOEMCO.

#### Aparatos utilizados.

El dispositivo para ensayos de choque consta de los elementos siguientes:

- Elemento de guiado de la masa que va a efectuar el impacto y de control de las alturas desde las que se deja caer.

- lecho de arena de 10 cm de espesor colocado en una caja de madera cuadrada, cuyo perímetro interno debe estar distante un mínimo de 10 cm de la muestra
- Dos esferas de acero de 1000 y 250 gr respectivamente.

#### Especificaciones de muestra

Este ensayo debe realizarse por duplicado utilizando como mínimo 4 muestras comerciales de 20 X 20 X 3 cm y 4 muestras de laboratorio de 12 X 5 X 1 cm.

### 2.3.2.2. Características Deformacionales Dinámicas

#### C) ENSAYOS INDIRECTOS. ( NO DESTRUCTIVOS )

Los ensayos indirectos que caracterizan mecánicamente una roca se basan en el hecho de que el comportamiento elástico de un material y, por consiguiente, su resistencia mecánica está exclusivamente relacionada con su íntima naturaleza, por lo cual será posible usar otras propiedades que no sean las tradicionalmente utilizadas, cuya respuesta tenga relación con la estructura interna de la materia. En este campo tenemos entonces la utilización de la propagación de las ondas sónicas y la determinación de la frecuencia fundamental de resonancia.

Poseen muchas ventajas en comparación con los ensayos directos globales. Entre otras la de ser no destructivos y, por ello, su gran aplicación en monumentos y en material de patrimonio histórico artístico. A la vez, su gran precisión y aplicabilidad "in situ" y, además, permite comparar los resultados obtenidos con otros ensayos directos como el de compresión.

c<sub>1</sub>) Ensayo de determinación del módulo de elasticidad dinámica por la medida de la frecuencia fundamental de resonancia.

### Objetivo

Este ensayo tiene como objeto determinar el módulo de elasticidad dinámico longitudinal, o módulo de Young, de flexión y torsión por la medida de la frecuencia fundamental de resonancia.

Pone en evidencia las cualidades elásticas del material y es, actualmente, el ensayo físico de laboratorio más sensible y más preciso para evaluar una modificación del mismo.

Es el método utilizado frecuentemente en el laboratorio para detectar las alteraciones debidas a las heladas.

### Técnicas.

Como ya se ha descrito anteriormente en los ensayos directos globales el módulo de elasticidad dinámico se define como la pendiente en el origen de la curva tensión-deformación para una gran velocidad de aplicación de cargas.

La determinación del módulo de elasticidad está basado en este ensayo en la investigación de la frecuencia de resonancia.

La frecuencia fundamental de resonancia corresponde a la frecuencia más baja para la cual se obtiene una amplitud máxima. De esta manera, si se aplica a una probeta una pulsación, la respuesta de esta probeta pasa por un máximo cuando la frecuencia de vibración

aplicada es igual a la frecuencia propia de la probeta.

La fórmula que permite calcular el módulo de elasticidad dinámico E a partir de la frecuencia de resonancia longitudinal  $f_0$  es la siguiente:

$$E = \frac{(2 L f_0)^2 P}{g} \cdot 10^{-6} \quad (\text{MPa})$$

E = Módulo de elasticidad dinámico

L = Longitud de la probeta ( m )

P = Peso volúmico (N/m<sup>3</sup> )

$f_0$  = Frecuencia de resonancia longitudinal ( Hz )

g = 9,81 ( m/s<sup>2</sup> )

En la actualidad sólo existe una norma, la Rilem Test III.1 para realizar este ensayo. En la cátedra de Física aplicada de la E.T.S. I. MINAS se está realizando el estudio de las probetas siguiendo esta norma.

#### Aparatos

Los aparatos utilizados para realizar este ensayo son los siguientes:

- Un oscilador de frecuencia variable que puede alcanzar



20 KHz y una precisión del 5%.

- Un vibrador electrónico de masa débil con relación a las probetas.
- Un receptor, un transductor electromagnético y un amplificador de masas débiles en comparación con las probetas. Las frecuencias de resonancia propias del vibrador y del receptor no deben situarse entre 0,5 y 20 KHz.
- Un aparato que indique la amplitud de la vibraciones ( un voltímetro, miliamperímetro u osciloscopio ).
- Un soporte muy estrecho sobre el cual reposa la probeta durante la medida, situado en el plano nodal, y que no debe estorbar la vibración longitudinal de la probeta.

#### Tipo de muestras

Las probetas, en un mínimo de tres y secadas a temperatura  $60 \pm 5$  °C hasta masa constante deben ser de forma cilíndrica o prismática, siempre que su esbeltez sea 4.

c<sub>2</sub>) Ensayo de determinación del módulo de elasticidad dinámico por la velocidad del sonido.

#### Objetivo

El objeto de este ensayo es el de determinar el módulo de elasticidad

dinámico o módulo de Young, midiendo la velocidad aparente de las ondas ultrasonicas longitudinales y transversales, como el cociente de la distancia minima entre emisor y receptor, partido por el tiempo transcurrido. Este ensayo detecta las zonas alteradas, antes de que las modificaciones sean visibles. Las medidas, no destructivas, tienen la ventaja de poder desarrollarse en laboratorio o "in situ".

### Técnicas

La velocidad de las ondas longitudinales o transversales caracteriza una roca, ya sea en estado original o como un bloque en un estado de alteración determinado, ya que existe una relación bastante estrecha entre esta velocidad y las características físicas o petrográficas del material. Además, como el ensayo no es destructivo, se puede seguir la evolución de ésta en el tiempo, cuando esta sometida a inclemencias "in situ" o cuando se están realizando sobre ella ensayos acelerados de alteración.

El ensayo se basa en el principio de que la propagación de una onda sónica o ultrasónica longitudinal en una barra prismática tiene una velocidad

$$v = (E/\rho)^{1/2}$$

siendo  $v =$  veloc. long. (m<sup>3</sup>/s)  
 $E =$  mód. elas. din. (Pa)

$\rho =$  masa volum. apa. (Kg/m<sup>3</sup>)

$$\text{además } v = \frac{L}{T}$$

siendo L (m) la distancia recorrida en el material por un impulso vibratorio en el tiempo T (s).

Si se determina por medio de emisores y receptores apropiados la velocidad de propagación de ondas longitudinales ( $v_L$ ) y transversales ( $v_s$ ),  $E_d$  se calcula según la fórmula siguiente:

$$E_d = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}$$

$$\text{siendo } \mu = \nu v_s^2$$

$$\lambda = \nu v_l^2 - 2 \nu v_s^2$$

existe también otra forma

$$E_d = \nu v_l^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

con

$$\nu = \frac{1}{2} \frac{(v_1/v_s)^2 - 2}{(v_1/v_s) - 1}$$

$$E_d = \nu v_1^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

siendo  $\nu$  = coeficiente de Poisson dinámico

Se pueden realizar varios tipos de medidas, basadas en los principios expuestos anteriormente y que reflejan resultados distintos; elección que en cada caso se llevará a cabo dependiendo de las características del material, su localización y resultados que deseamos alcanzar.

La medida en superficie indica aproximadamente el espesor de la alteración, cuando el material presenta alteraciones de espesor uniforme; la medida de transparencia permite auscultar el material en todo su espesor (por ejemplo, una columna) y es la medida que generalmente se realiza por ser la más simple y rápida; y la medida en ángulo, empleada cuando son accesibles dos caras perpendiculares, señala la homogeneidad del material a diferentes distancias de la superficie y permite descubrir alteraciones internas en las esquinas de los edificios.

La normativa existente en este ensayo es la siguiente:

NF B 10505

NF B 10511

NORMAL 22/86. Grupo F.

RILEM Test III.2.

El ensayo se ha realizado en la Cátedra de Física Aplicada de la E.T.S.I.M., de acuerdo con la norma RILEM Test III.2. modificada, ya que el aparato utilizado, mediante técnica de transparencia, sólo da como resultados las velocidades longitudinales y de esta forma no se puede calcular E.

#### Aparatos

El aparato está compuesto de las partes siguientes:

- un generador eléctrico de frecuencia constante o variable (50 kHz)
- un emisor que transforma la señal eléctrica en señal vibración mecánica
- un receptor que transforma la vibración mecánica en señal eléctrica

La precisión exigida en la lectura de los valores de temperatura es de 0,05 s.

Especificaciones de muestra

Las muestras ensayadas tienen forma prismática de 7 cm de longitud, o sea superior a 5 cm que es lo que recomienda la norma RILEM. Se han realizado sobre muestras secadas al aire, pero se puede realizar sobre cualquier estado de las probetas.

### 2.3.2.3. Resultados

#### Velocidad sónica

Los valores de velocidad de propagación de ondas obtenidos sobre los nueve tipos de piedra permiten determinar, junto con los valores de resistencia mecánica y compacidad, la calidad de la roca, que será más elevada cuanto mayor es la velocidad sónica y la compacidad (Ver diagramas de relación).

Del diagrama de relación Res. compresión-veloc. sónica se puede afirmar que existe correlación (recta de tendencia). Del análisis de dicho diagrama y teniendo en cuenta la resistencia a compresión se deduce que la calidad aceptable de estos materiales se alcanza con valores la velocidad sónica por encima de 4.500 m/s. Sólo las variedades de Colmenar, Campaspero y Estepa consiguen entrar dentro del grupo de rocas de calidad.

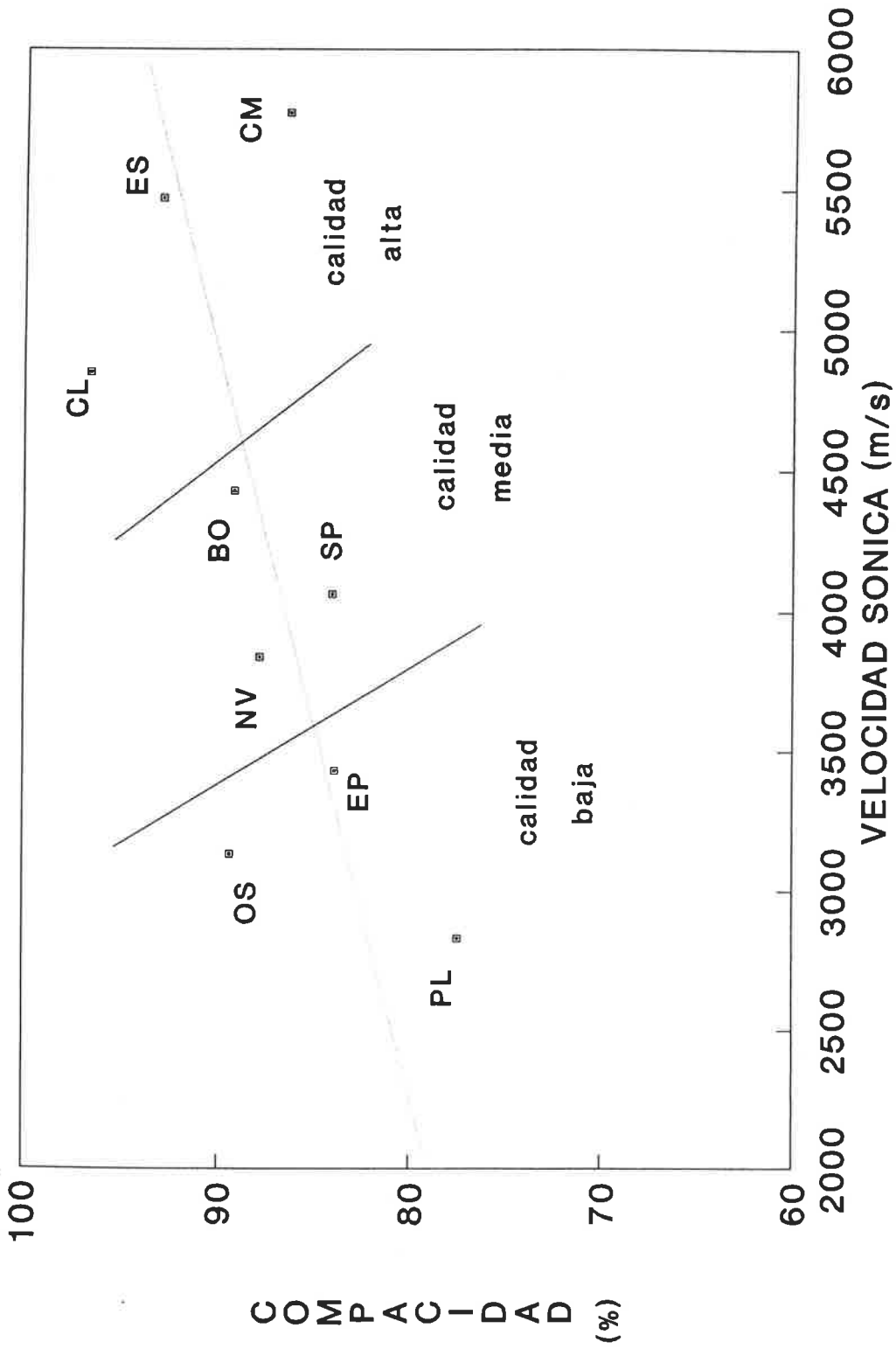
Del diagrama de relación velocidad sónica-compacidad se desprende igualmente que existe correlación lineal, si bien es menos discriminante que el diagrama anterior. Existiría una zona, a la derecha del diagrama, que limitaría la calidad de la roca. De este modo las variedades de piedra Ostionera, Palomera y Espera quedarían dentro de un grupo de baja calidad. El grupo que integra las

variedades de Novelda, Sepúlveda y Boñar quedarían dentro de un grupo de calidad intermedia. El grupo de alta calidad lo constituirían las piedras de Campaspero, Colmenar y Estepa.

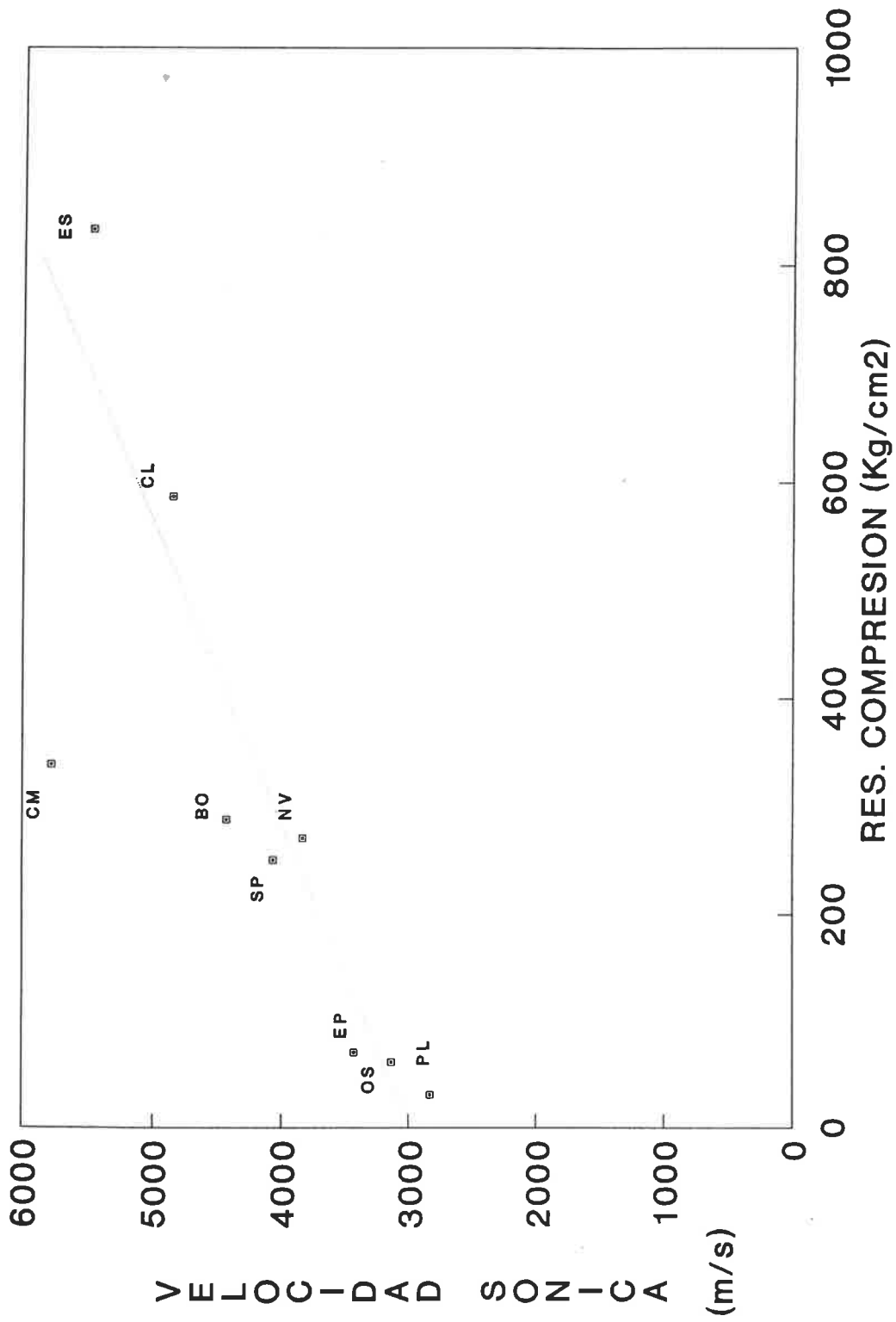


DENOMIN. MUESTRA	LONGITUD mm	TIEMPO DE TRANSITO $\mu$ S	VELOCIDAD $\text{ms}^{-1}$
CL-1	70,25	14,5	4845
OS-1	69,45	22,188	3130
EP-1	72,5	21,149	3428
NV-1	70,05	18,27	3834
SP-1	69,45	17,111	4059
BO-16	72,1	16,3	4423
ES-1	69,95	12,793	5468
CM-1	71,1	12,313	5774
PL-1	70,35	24,867	2829

# RELACION VELOC. SONICA-COMPACTIDAD



# RELACION R.MEC.COMPRESION-VELOC.SONICA



### Frecuencia de resonancia

Las medidas de frecuencia de resonancia (módulos longitudinal, transversal y torsión) junto con los valores de velocidad sónica son los que se presentan en el cuadro adjunto.

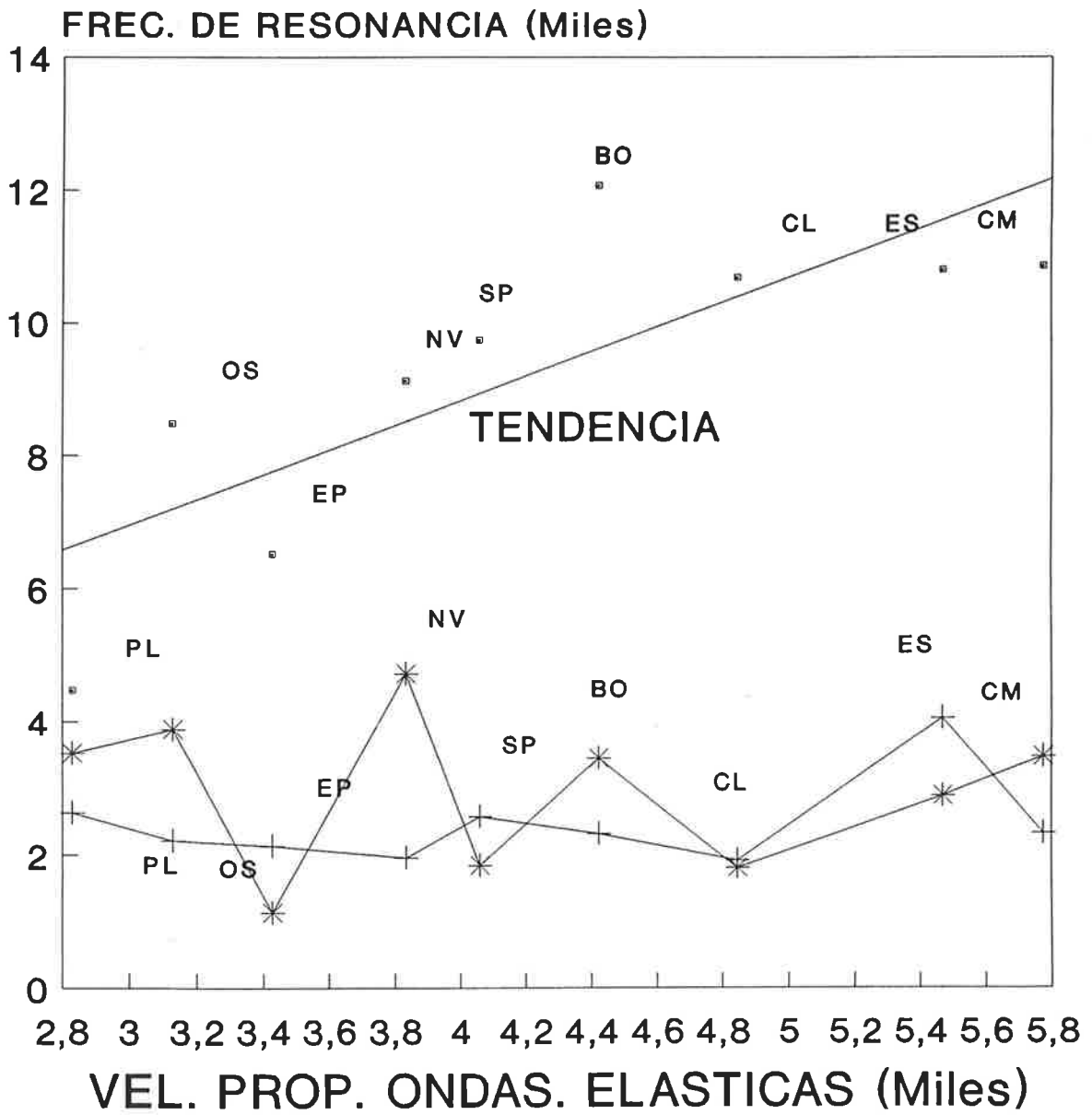
Se han obtenido los diagramas de relación entre los distintos módulos y la velocidad sónica (Ver diagramas).

De la observación de los resultados se desprende que existe cierta relación entre la Frecuencia de Resonancia longitudinal (en relación con el módulo de Young) y la compacidad, correspondiendo las rocas de mayor calidad con los valores más altos de este valor. Especialmente significativo es el bajo valor de la misma en las variedades de piedra de Espera y Ostionera, relacionados sin duda con una elevada macroporosidad (observable a simple vista en la var. ostionera) o una elevada fisuración.

No existe tanta relación con los módulos transversal y de torsión, por ello, y ante tan escasa información y el bajo número de ensayos realizados, se prefiere obviar el análisis de dichos parámetros.

NOMBRE	FRECUENCIA DE RESONANCIA			PESO gramos	TIEMPO TRANSITO
	LONG	TORSION	FLEXION		
CL	10679	1923	1805	272,5	41,5
OS	8477	2213	3884	179,8	53,3
EP	6526	2139	1129	161,3	70,1
NV	9119	1960	4727	201,9	51,8
SP	9731	2578	1842	197	46,7
BO	12066	2320	3450	565,7	40,2
ES	10800	4061	2892	715,7	40,6
CM	10869	2331	3472	211,3	41,8
PL	4466	2630	3520	147	94

# F. DE RESONANCIA EN FUNCION DE V.P.O.E.



—□— F.R.L.    —+— F.R.T    —\*— F.R.F.

### 2.3.3. CARACTERIZACION DEL SISTEMA POROSO

#### 2.3.3.1. Aspectos Generales

Los espacios vacíos - poros y fisuras - constituyen el camino a través del cual, el agua, agente de degradación en sí misma y vehículo de sustancias con poder degradante, se introduce en el material atravesando la superficie que lo limita, por tanto para predecir la alterabilidad o durabilidad de una roca se hace imprescindible conocer a fondo la compacidad de dicho material.

La porosidad forma también el medio por el que la piedra se deshace de la humedad interna. En su "epidermis" se produce la evaporación y se depositan las materias en solución. Esta función beneficiosa de la porosidad, ha de ser tenida muy en cuenta en los tratamientos superficiales, habiéndose cometido errores irreversibles al emplear productos hidrofugantes, en zonas ya húmedas en su interior, que, al impermeabilizar la superficie de transpiración, impiden que se elimine, por ejemplo, el agua de capilaridad. Vemos pues, que su conocimiento es útil para evaluar determinados tratamientos de impregnación.

Por último, es conocida la influencia que el sistema poroso posee sobre el comportamiento físico y químico de las rocas (dureza, resistencia mecánica, disolución, ...).

Por todo, la caracterización del sistema poroso es esencial para el estudio de envejecimiento y degradabilidad de los materiales pétreos.

#### 2.3.3.2. Técnicas de Estudio

El factor a tener en cuenta en el estudio del sistema poroso, no es únicamente el volumen de poros (porosidad), sino también su distribución por tamaños (porometría), es decir, la superficie específica (superficie/volumen), y su orientación y forma espacial (configuración del sistema poroso). La superficie es la parte activa de los poros, y su diámetro influye en los fenómenos de tensión superficial.

#### 2.3.3.3. Porosidad

### **I. Principios básicos**

Se entiende por **porosidad** de una roca la relación entre



el volumen de los poros y su volumen total, expresado en tanto por ciento.

Se tienen así distintos tipos de porosidad:

- a) **Porosidad abierta**, que es la porosidad accesible al agua, es decir la relación existente entre el volumen de poros "abiertos", que con un determinado tamaño permiten la intrusión de agua en ellos, y el volumen total de la roca, expresada en tanto por ciento. Se suele equiparar con el llamado **contenido de agua máximo**, al no considerar el volumen de los poros no accesibles al agua.
- b) **Porosidad real**, que representa la relación entre el volumen de vacíos de la roca y su volumen total, expresada en tanto por ciento.
- c) **Porosidad efectiva total**, que es la relación, expresada en tanto por ciento, entre el volumen total de poros determinado por intrusión de mercurio a alta presión (porosímetro de mercurio), y el volumen seco aparente de la muestra.

## **II. Métodos de Ensayo**

Los ensayos a realizar para determinar las distintas porosidades son:

- Medida de la **porosidad accesible al agua o porosidad abierta**, bajo presión atmosférica.
- Medidas de la **porosidad efectiva**.

### **II.1 Porosidad abierta**

#### **A) Objetivo**

Este ensayo permite determinar el volumen de poros accesibles al agua expresado como un porcentaje del volumen aparente de la probeta.

El volumen aparente de la probeta es el volumen limitado por la superficie exterior de la muestra, siendo aceptable su medida directa para muestras de morfología regular (cúbicas, cilíndricas, etc.).

#### **B) Aplicaciones**

El conocimiento de la porosidad abierta es una propiedad intrínseca de la roca que tiene una gran influencia en la durabilidad de la misma.

Así este ensayo permite detectar la intensidad de alteración de una roca, ya que muchos procesos de alteración implican un aumento de su porosidad. Del mismo modo permite determinar la eficacia de los tratamientos de impregnación ya que los mismos disminuyen la porosidad.

Este ensayo es apropiado para rocas con una uniformidad en la distribución de poros, no siendo aconsejado para rocas que presenten un gran número de cavidades, así como rocas muy cristalinas (compactas).

### **C) Metodología**

La determinación de la porosidad abierta o accesible al agua consiste, básicamente, en secar completamente una muestra de la roca en una estufa y pesar la muestra seca, para seguidamente introducirla en agua. A ciertos intervalos de tiempo, la muestra se extrae del baño y se pesa. El incremento de peso refleja el agua contenida en los poros. Cuando ya no se produce incremento de peso se dice que la muestra está saturada y un sencillo cálculo permite determinar el volumen de agua absorbida

Existen, para la realización de este ensayo, varias normas, definidas por los distintos comités y comisiones técnicas de normalización. Así, cabe señalar los siguientes:

- Test I.1 de la Comisión 25-PEM de la Rilem.
- Norma ASTM C 97-47.
- Norma DIN 5.103 y 52.113.
- Norma UNE 22.182 (AENOR)
- Norma NF B 10.504 (AFNOR)
- NORMAL 7/81 (CNR-ICR)

Por su sencillez, tanto de procedimiento (menos exigente en cuanto a condiciones de presión) como en la simplicidad de los aparatos necesarios para su realización, disponibles en cualquier laboratorio dedicado al tema, se ha escogido la Norma UNE 22.182 (AENOR, 1985) "MARMOLES Y CALIZAS ORNAMENTALES. ABSORCIÓN Y PESO ESPECÍFICO APARENTE"

<b>NORMA ESPAÑOLA</b>	<b>Mármoles y calizas ornamentales</b>  ABSORCION Y PESO ESPECIFICO APARENTE	<b>UNE</b> <b>22-182-85</b>
---------------------------	--	--------------------------------

**1 OBJETO**

Esta norma tiene por objeto fijar un método para delimitar la absorción y el peso específico aparente de los mármoles y calizas ornamentales.

Este ensayo se aplicará a todos los mármoles y calizas ornamentales (UNE 22-180).

**2 DEFINICION**

Se denomina coeficiente de absorción de agua al tanto por ciento en peso de agua absorbida, en el ensayo descrito a continuación, expresado en relación al peso de probeta en seco.

**3 APARATOS NECESARIOS**

Para la ejecución de este ensayo son necesarios los siguientes aparatos:

**3.1 Una balanza de precisión** con una sensibilidad de 0,01 g.

**3.2 Una Estufa de desecación.**

**3.3 Una Balanza hidrostática.**

**4 TOMA DE MUESTRAS**

El ensayo se efectuará sobre un mínimo de tres probetas cúbicas de 7 cm de arista. Las superficies de las caras deberán ser acabadas con abrasivo de carborundum cuyos granos estén comprendidos entre un tamiz 0,32 (UNE 7-050) y otro tamiz 0,63 (UNE 7-050).

*Continúa en páginas 2 a 3*

	Las observaciones relativas a la presente norma deben ser dirigidas al IRANOR — Fernández de la Hoz, 52 - 28010 Madrid	
--	---	--

## 5 METODO DE ENSAYO

### 5.1 Absorción

Antes del ensayo las probetas serán desecadas a la temperatura de 110 °C, hasta peso constante (diferencia entre dos pesadas consecutivas no difiera en más del 0,2%). Después del secado se determina el Peso en seco ( $G_s$ ).

Seguidamente se sumergen las probetas completamente en agua filtrada en laboratorio, a una temperatura de  $20 \pm 5$  °C durante 48 h. Transcurrido este tiempo se extraen del recipiente de agua, se secan con un paño húmedo y se mantienen protegidas hasta pesarlas nuevamente a peso constante, siendo la última pesada el Peso en húmedo ( $G_h$ ).

La cantidad de agua absorbida es la diferencia entre sus pesos  $G_h$  y  $G_s$ .

### 5.2 Peso específico aparente

Se utilizarán las mismas muestras que en el ensayo de absorción y una balanza hidrostática.

Se sumergen las muestras en agua filtrada en laboratorio a una temperatura de  $20 \pm 5$  °C, inmediatamente después que el ensayo de absorción ha finalizado, obteniéndose el peso de la muestra sumergida en agua ( $G_a$ ).

## 6 OBTENCION DE LOS RESULTADOS

### 6.1 Absorción

El cálculo del coeficiente de absorción de agua se hace según la fórmula siguiente:

$$C_a \text{ es el coeficiente de absorción de agua} = \frac{G_h - G_s}{G_s} \times 100$$

$G_h$  es el peso de la probeta después de la inmersión.

$G_s$  es el peso en seco.

Se tomará como resultado definitivo la media aritmética de los resultados de las tres probetas.

### 6.2 Peso específico aparente

El peso específico aparente se obtiene aplicando la fórmula siguiente:

$$P_e \text{ es el peso específico aparente} = \frac{G_s}{G_h - G_a}$$

$G_s$  es el peso en seco

$G_h$  es el peso de la probeta después de la inmersión

$G_a$  es el peso de la probeta sumergida en agua.

Se tomará como resultado definitivo la media aritmética de los resultados de las tres probetas.

**7 NORMAS PARA CONSULTA**

UNE 22-180 — *Mármoles y calizas ornamentales. Características generales.*

UNE 7-008 — *Determinación del coeficiente de absorción de agua en baldosas y baldosines de cemento.*

UNE 7-067 — *Determinación del peso específico de los materiales pétreos.*

UNE 7-050 — *Cedazos y tamices de ensayos.*

Así dicha norma exige únicamente disponer de los siguientes aparatos:

- Balanza de sensibilidad de 0,01 g.
- Estufa de desecación.
- Balanza hidrostática.

Posee, la ventaja de no exigir unas determinadas condiciones de presión (disponibilidad de equipo) y un procedimiento complicado de inmersión, tal y como propugnan las normas Rilem, DIN, ASTM y NORMAL. Es más, realizando el ensayo a presión atmosférica se define más exactamente las condiciones reales de impregnación, ya que esta es la presión que se ejerce de forma natural sobre el líquido para su penetración en la roca.

A cambio el valor obtenido pierde algo de precisión, si bien por el tamaño de probeta empleado (cubos de 7 cm de lado) y el procedimiento de medida (pesada final= peso constante en la muestra), se autocontrola en gran medida, resultando la pérdida de precisión aceptable.



#### D) Obtención de resultados

Según los parámetros definidos por la citada norma, la porosidad accesible agua (abierta) vendría determinada por la siguiente expresión:

$$p_a = \frac{G_h - G_s}{G_h - G_a} \times 100$$

Señalar como advertencia que, para muestras tratadas con compuestos orgánicos (hidrofugantes, consolidantes, etc.) se debe modificar el procedimiento de secado inicial de la muestra, recomendándose efectuar el secado de la probeta (para la medida de  $G_s$ ) a  $60 \pm 5^\circ\text{C}$ , con el fin de suprimir la alteración de los materiales orgánicos aplicados.

Con los valores obtenidos en este ensayo podemos determinar, además los siguientes parámetros:

- Contenido de agua o porosidad aparente (W)

Porcentaje del peso del agua absorbida por la probeta en relación a su peso seco, antes de la inmersión (a presión atmosférica), cuya expresión es:

$$W = \frac{G_h - G_s}{G_s} \times 100$$

- Volumen aparente ( $V_a$ ):

Viene determinado por la fórmula (Test I.2 Rilem):

$$V_a = Gh - Ga$$

- Volumen absoluto o del material pétreo ( $V_i$ ):

Viene determinado por la fórmula (Test I.2 Rilem):

$$V_i = Gh - Ga$$

- Masa volúmica aparente

Su valor viene determinado por el Test I.2 (Rilem)

$$Mv_a = \frac{G_s}{V_a} \times 10^3 = \frac{G_s}{Gh - Ga} \times 10^3$$

- Masa volúmica real

Su valor viene determinado por el Test I.2 (Rilem)

$$Mv_a = \frac{G_s}{V_a} \times 10^3 = \frac{G_s}{G_s - Ga} \times 10^3$$

- Densidad aparente (  $\rho_e$  )

Relación entre el peso de la muestra y su volumen aparente.

$$\rho_e = \frac{G_s}{G_h - G_a}$$

Teniendo en cuenta que la densidad del agua a 20° C es sensiblemente igual a 1. Viene expresado en gr/cm<sup>3</sup>.

- Densidad absoluta o del material impermeable (  $\rho_a$  )

Relación entre el peso de la muestra y su volumen impermeable.

$$\rho_a = \frac{G_s}{G_s - G_a}$$

Teniendo en cuenta que la densidad del agua a 20° C es sensiblemente igual a 1. Viene expresado en gr/cm<sup>3</sup>.

- Compacidad del material (C)

Relación porcentual entre la densidad aparente y la densidad real.

$$C = \frac{G_s - G_a}{G_h - G_s} \times 100$$

## II.2. Porosidad Real

La porosidad, medida según el apartado anterior (porosidad abierta), no puede ser asimilada, sin más, a la porosidad real, aunque representa la que es accesible al agua bajo presión atmosférica. Debido a la tensión superficial y a la existencia previa de aire relleno de poros en fondo de saco, el agua no puede penetrar, en estas condiciones, en aquellos poros cuyo tamaño se encuentre por debajo de un determinado diámetro.

A veces se acude, por esta razón, a efectuar la inmersión bajo vacío, o bien en ebullición con lo que se elimina el segundo factor de oposición a la penetración anteriormente descrito. Subsiste, sin embargo, el primero de ellos, por lo que sigue existiendo una cierta porosidad diminuta no accesible. Además, tampoco es posible determinar la distribución de poros por tamaños, sino únicamente su

volumen total.

Obviamente, el valor de la porosidad real posee menor interés en el comportamiento hídrico de las rocas que la porosidad abierta.

#### 2.3.3.4. Porometría

##### **I. Introducción**

La porometría estudia la distribución volumétrica de los poros abiertos, suponiendo que sean de sección circular, según su dimensión (radio o diámetro); generalmente se expresa como un porcentaje del volumen aparente o por unidad de peso de la muestra.

El estudio de la porometría es útil para la caracterización de las rocas ya que permite:

- Evaluar la extensión y grado de intensidad de ciertos tipos de degradación pétreo.
- Determinar la profundidad de penetración de un cierto tratamiento (por comparación de la muestra no tratada).
- Evaluar la durabilidad de las rocas (tratadas y/o no tratadas)

## II. Técnicas analíticas

Para la realización de estudios porométricos sobre la roca existen dos tipos fundamentales de ensayos:

- Métodos basados en la succión, es decir, en relacionar la presión negativa que retiene el agua en un poro capilar con su diámetro (relación inversa).
- Métodos basados en la intrusión a altas presiones de un líquido, apropiado (en este caso el mercurio) dentro de los poros, relacionando la presión ejercida sobre el líquido con su diámetro.

### a) Métodos de succión

Existen varios ensayos basados en este principio (Castro, E. de, 1979; Test I.4 Rilem), regidos por la expresión:

$$h = - \frac{R T}{P M . g} \ln \frac{H R}{100}$$

en donde:            h:    succión (cm de agua)  
                          R:    constante universal de gases

T: Temperatura absoluta  
PM: peso molécula del agua  
g: aceleración de la gravedad  
HR: humedad relativa

Por tanto, vemos que la succión (h) varía de forma continua con la humedad de la muestra, desde valor 0, para materiales saturados, hasta valores de miles de cm de agua, para los secos. Se adopta, debido a este amplio intervalo, una escala logarítmica de succión, en donde se define  $pF = \log_{10} h$ , en donde h representa la altura, en cm, de la columna de agua que la succión es capaz de soportar.

Para abarcar el intervalo desde pF 0 a pF 7, debe medirse h desde la saturación hasta el estado seco.

La relación entre la succión (h) y el radio de poro viene representada mediante la expresión:

$$h = \frac{4 \gamma \cos \Theta}{p_w g d}$$

siendo: h: succión  
 $\gamma$ : tensión superficial del agua

- $\Theta$ : ángulo de contacto  
 $p_w$ : densidad del agua  
g: aceleración de la gravedad  
d: radio del poro

Por tanto, a medida que se seca la roca, el agua es retenida en poros más estrechos.

Este método posee la dificultad de que para cubrir el amplio intervalo de succión, pF 0 a pF 7, equivalentes a diámetros de poro entre 3.000 y 0,0003  $\mu\text{m}$ , es necesario efectuar, siempre a temperatura estable de 20° C tres tipos diferentes de ensayo:

- Método de la placa de succión: intervalo de succión pF 0 a pF 3 (2,973 - 2,97  $\mu\text{m}$ ).
- Método de la membrana de presión: intervalo de succión pF 3 a pF 4,2 (2,97 - 0,19  $\mu\text{m}$ )
- Método del desecador de vacío: intervalo de succión Pf 4,5 a Pf 7 (0,09-0,0003  $\mu\text{m}$ ).

El instrumental es sencillo, si bien se requiere tener tres



instalaciones diferentes, con un tiempo de operación mucho mayor que el método de intrusión a alta presión de mercurio. Por este hecho, y teniendo presente que se cuenta con un porosímetro de mercurio, nos hemos decantado por éste último método para la realización de medidas de la distribución de poros.

b) Porometría de mercurio (Rilem I.5 y Normal 4.80)

El método más completo consiste en utilizar un líquido, más adecuado por sus características que el agua, y trabajar bajo diferentes presiones externas gradualmente aplicadas, es decir, con un porosímetro de mercurio. Con el fin de lograr la mayor información posible sobre la estructura interna de la roca este procedimiento ha sido el elegido en nuestro estudio de la porosidad. Ello no excluye la realización de los ensayos para determinar las características hídricas, por la información adicional que suministra sobre el comportamiento del material tratado y sin tratar frente a la alteración, y que se examinará en el capítulo siguiente, como ya se ha expuesto.

b1) Principio físico-químico.

El principio físico de la porometría a Hg está basado en la ley de Jurín, cuya fórmula fundamental es:

$$d = \frac{\gamma \cos \phi}{P}$$

donde:

d: Diámetro del poro en micras

$\gamma$ : Tensión superficial líquido-aire ( $\gamma$  Hg = 480 dinas/cm, a 250 ° C)

$\theta$ : Ángulo de contacto líquido-sólido ( $\theta$  Hg-piedra = 141,3 °)

P: Presión ejercida sobre el líquido en Kg/cm<sup>2</sup>

Es decir, para el caso del mercurio y materiales pétreos se tiene la expresión

$$d = \frac{15}{P}$$

El volumen de mercurio intruido es medido por la variación que experimenta el nivel del mercurio en un tubo capilar de sección conocida.

## b2) Metodología

Se han estudiado para este Proyecto, una muestra de cada tipo de piedra, realizándose el ensayo tres veces por muestra en modo automático de equilibrio.

Para la realización del ensayo, se cortaron las probetas en forma prismática, con base cuadrangular aproximada de 0,5 cm de lado, y unos 2 cm de altura, de acuerdo con las especificaciones del aparato. Las muestras se desecaron previamente en una estufa de vacío, a una temperatura de  $60 \pm 5^{\circ} \text{C.}$ , para evitar transformaciones en la estructura de los minerales.

El porosímetro de mercurio, determina la porosidad en función del volumen de mercurio inyectado en los poros bajo diferentes presiones. A mayores presiones menor diámetro de poros accesible al mercurio, existiendo una relación fija entre el diámetro accesible y la presión aplicada. El volumen de mercurio introducido es medido por el cambio en la capacitancia eléctrica de un capacitor cilíndrico formado por una coraza externa metálica alrededor del vástago del penetrómetro, en el capilar interior de mercurio.

El nivel de mercurio dentro del capilar decae tanto como los poros se rellenan en la muestra bajo incremento de presión, conduciendo a un decrecimiento lineal de la capacitancia eléctrica con el incremento del volumen. Los cambios en la capacitancia son convertidos en volúmenes mediante un factor de calibración del penetrómetro.

El ensayo de cada muestra consta de dos partes: Primero se introduce la muestra en un detector a baja presión para que se rellenen los poros de mayor diámetro y posteriormente se coloca

dentro de uno a alta presión, para que sean accesibles los poros más pequeños.

Para calcular la porosidad se ha utilizado la fórmula

$$P(\%) = 100 \cdot V_v/V_m$$

donde

$V_v$  = Volumen de vacíos

$V_m$  = Volumen de muestra

Para calcular el índice de poros se ha utilizado la fórmula

$$\Sigma = V_v/V_s = V_v/(V_m - V_v) = P/(1-P)$$

siendo P la porosidad.

### b3) Instrumental

El aparato utilizado ha sido un porosímetro de mercurio Micromeritics, modelo 9320, del Material Analysis Laboratory que dicha firma posee en EEUU, además de un equipo de similares características de la propia Cátedra de Mineralogía de la ETS de Ing. de Minas.

El método de análisis ha sido el de equilibrio por su mayor precisión de resultados.

El tipo de muestras analizadas han sido prismas rectangulares de sección cuadrada de aproximadamente 0,5 cms. de arista y 1,5 cms. de altura, con un peso aproximado de 3 gr. por muestra.

#### **b4) Resultados**

La información que proporciona el ensayo viene en forma de gráficos y tablas. En anexos se relacionan las medidas directas obtenidas.

Así tenemos cuadros de distribución del diámetro de poro en relación con la presión aplicada, el incremento de volumen y volumen total de la probeta, la variación del área superficial de poros y el área de poros acumulada.

Los gráficos obtenidos son curvas-diagramas relación diámetro de poro ( $\mu\text{m}$ ) volumen acumulado de intrusión (ml/g), incremento de intrusión (ml/g), diferencia en la distribución de espacios intruidos (ml/g -  $\mu\text{m}$ ) y área superficial específica de poros

acumulada ( $m^2/g$ )

#### **b5) Análisis de los Datos**

De los datos aportados por la porosimetría de mercurio, se desprenden una serie de factores que es necesario analizar, teniendo también en cuenta los estudios de petrografía previamente realizados.

En primer lugar se han determinado los porcentajes de macroporosidad y microporosidad en relación con la porosidad efectiva total, teniendo en cuenta, las siguientes definiciones:

Macroporo	Radio de poro $> 7,5$ micras
Microporo	Radio de poro $< 7,5$ micras

La macroporosidad, puede venir determinada por la presencia de microfisuración interclástica, huecos de disolución por microkarstificación (pitting), etc.

La microporosidad, por su parte, también llamada porosidad "fina", es la causante del mal comportamiento de la piedra alterada ante los fenómenos de circulación de agua, ya sea en fase sólida, líquida o gaseosa; y por consiguiente es culpable también de otros fenómenos que se observan en la porosimetría: la capilaridad y

la microfisuración intraclástica.

De la comparación entre las distintas distribuciones por tamaños, se observa que existen distintas familias en la población, debiéndose determinar la moda ó modas mayores.

En resumen, todos estos factores que hemos reseñado, se muestran gráficamente, en las tablas y diagramas presentados en los anexos,

#### 2.3.3.5. Configuración del Sistema poroso

La determinación tridimensional de la estructura interna de la roca es un objetivo perseguido desde hace una década por numerosos investigadores. En este sentido pueden señalarse los trabajos realizados por diversos autores, en el intento de visualizar mediante moldes el sistema poroso real de las rocas (Cassan, 1.978; Patsoules et al, 1.982).

El estudio conlleva la definición del tipo/-s de poro presentes (intracristalino, intercristalino, matriciales, ...) con el fin de determinar el modelo de red de vacíos (reticular, regular o irregular, planar, esférico, en nido de abeja, etc).

### a) Técnicas analíticas

No hay una técnica generalizada de carácter universal, sino que el estudio de la configuración se realiza mediante el empleo simultáneo de varias técnicas, a saber:

- Microscopía óptica por luz transmitida: Se basa en el estudio al microscopio petrográfico de láminas delgadas, bajo el estudio de luz polarizada. La observación es únicamente bidimensional.
- Microscopio de fluorescencia: Como en la técnica anterior se basa en el estudio de láminas delgadas, pero esta vez, teñidas con una sustancia fluorescente, que bajo luz ultravioleta definen con mayor claridad el modelo de red. Su información es igualmente bidimensional.
- Microscopía electrónica: Posee la ventaja de poder observarse, en los bordes o exterior de la muestra, su morfología de forma tridimensional. El tipo de muestras pueden ser probetas o lascas pulidas, o fragmentos de roca sin ningún tipo de elaboración.



- Porometría de mercurio (ver apartado anterior).

Un estudio exhaustivo sobre el tipo de información suministrada por cada técnica viene descrito por Haynes (1.973).

En el proyecto presente, se ha adoptado un método mixto petrografía-porometría de mercurio, teniendo en cuenta la accesibilidad a dichos equipos.

El aumento de la microporosidad va a favorecer, por un lado, las consecuencias negativas de los fenómenos de hielo-deshielo y de cristalización de sales y por otro el fenómeno de capilaridad, también muy negativo en los procesos de alteración por circulación de agua que en muchos casos lleva disueltas sales. Estas circunstancias explicarían la, típicamente, súbita degradación de los materiales pétreos una vez que esta se ha iniciado.

La macroporosidad, refleja el grado de microfisuración que ha sufrido la roca.

## 2.3.4. CARACTERIZACION DEL COMPORTAMIENTO HIDRICO

### 2.3.4.1. Introducción

La caracterización hídrica de un material pétreo persigue definir su comportamiento frente al agua, ya sea líquida o en forma de vapor.

La cinética hídrica incluye los procesos de absorción (tomo de agua) como de secado o evaporación (pérdida), consiguiéndose conocer así la evolución en el tiempo del contenido de agua de una roca, en unas determinadas condiciones.

### 2.3.4.2. Aplicaciones

El estudio del comportamiento hídrico presenta interés desde el punto de vista, de la caracterización del sistema poroso y su relación con el transporte de líquidos a través de medios porosos no saturados, por lo que es un estudio imprescindible a la hora de determinar la eficacia

de los tratamientos líquidos (consolid.,hidrofug., etc.), ya sea en superficie o en profundidad.

Igualmente es un aspecto importante desde el punto de vista de los procesos alterativos, ya que como ya se ha expresado en el capítulo de caracterización del sistema poroso, el agua juega un papel de primer orden en relación con la mayoría de los procesos de degradación, bien sea como agente agresor en sí misma (poder de disolución) o por ser el vehículo (en forma de agua higroscópica, de condensación y de capilaridad) de difusión de los agentes contaminantes (sales y gases).

#### 2.3.4.3. Técnicas de estudio. Ensayos.

Las técnicas utilizadas para controlar el comportamiento hídrico se puede clasificar según el sentido cinético del binomio agua-roca en :

- Ensayos de absorción: La roca "toma agua" dentro del sistema poroso.
- Ensayos de desorción: La roca "se desprende"

total ó parcialmente, del agua contenida en el sistema poroso.

a) Ensayos de absorción hídrica

Se pueden realizar los ensayos siguientes, en función de los diferentes mecanismos ó procedimientos de absorción:

a.1 - Absorción de agua al vacio : Saturación

a.2 - Absorción libre de agua: Inmersión libre

a.3 - Absorción de vapor de agua: Higroscopia

a.4 - Absorción de agua por capilaridad:  
Succión capilar.

- a1) **Absorción de agua al vacio** (ISRM, 1979, Test II.1, Test II.3 y Test II.4 RILEM, 1980): A partir de este ensayo se determina la masa de la roca saturada ( $m_s$ ), pudiéndose calcular el contenido en agua de saturación ( $w_s$ ). Analizados los diferentes contenidos de agua  $w_i(i)$ , pueden ser normalizados respecto a  $w_s$ . Dicho valor

expresado en % es denominado grado de saturación ( $S_i$ ), que es un contenido de agua relativo, y queda definido mediante la expresión:

$$S_i(t) = w_i(t)/w_s \times 100$$

Este valor depende fundamentalmente de las características del sistema poroso y de las condiciones ambientales (P-T-HR).

Para la determinación de  $w_s$ , o contenido de agua en saturación, se utiliza la porosidad accesible al agua, determinada por UNE 22.182, mediante la expresión ( $n_o$ ):

$$w_s \cdot p_d = n_o \cdot p_{\text{agua}}$$

siendo  $p_d$  la densidad de la roca seca y  $p_{\text{agua}}$  la densidad del agua, que en condiciones normales es igual a 1 gr/cm<sup>3</sup>.

- a2) **Absorción libre de agua:** determina la cantidad de agua que absorbe una roca en condiciones normales de presión y temperatura, la cual

depende de la configuración del sistema poroso (volumen de poros - porosidad - y conectividad entre ellos ó permeabilidad).

La evaluación y análisis de los datos obtenidos se pueden efectuar de forma cuantitativa y cualitativa.

a2.1) Cuantitativa: (NF B 10.504 AFNOR, Test II.1 RILEM, UNE 22.182-85 AENOR, Normal 7/81 CNR-ICR)

Se basa en la determinación del llamado contenido de agua ( $w_i$ ): generalizando, se define como la masa de agua absorbida por la roca, expresada independientemente del procedimiento de ensayo ( $i$ ), a partir de su estado seco, por unidad de masa de roca seca, (Alonso, F.J., 1986).

Su determinación sólo requiere conocer la masa de la roca seca ( $M_s$ ) y la masa para un cierto estado húmedo en las condiciones de ensayo " $i$ " ( $M_{h_i}$ ), generalmente, dependiente del tiempo  $M_{h_i}(t)$ .

La expresión de cálculo es:

$$w_i(t) = \frac{M_{h_i}(t) - M_s}{M_s} \times 100$$

Los tiempos más comunes de medida son:

- 1 hora (ISRM, 1979),
- 2 días (ASTM, RILEM Y AFNOR),
- Indefinido hasta peso constante: se alcanza el equilibrio cuando la variación entre 2 pesadas espaciadas 24 horas no supera el 0,1 %.

#### a2.2) Cualitativa: (Test II.5 RILEM)

El estudio cualitativo se traduce en la confección y análisis de las llamadas curvas de absorción

libre y de evaporación, relacionando el contenido de agua de la roca en función de la raíz cuadrada del tiempo (expresado en minutos).

A pesar de las diferencias existentes entre las distintas rocas, estas suelen presentar rasgos comunes (Alonso, 1.986).

- Un tramo inicial recto (coef. correlación superior a 0,99), de acusada pendiente.
- Un tramo medio, con cambio gradual de pendiente.
- Un tramo final de tendencia prácticamente lineal, con pendiente muy pequeña.

Se observa en algunas muestras cierto contenido inicial de agua. Se atribuye este fenómeno a un exceso de agua en la superficie, a pesar de haberlas limpiado con un paño húmedo. Este hecho es más acusado cuanto menor es el contenido en agua que admite la roca.



El ensayo adoptado es una modificación de la norma UNE 22.182, con medidas según el cuadro adjunto:

# ENSAYO DE ABSORCION-DESORCION

El ensayo se realizará según NORMA UNE 22.182-85, con las siguientes modificaciones:

## ABSORCION

- Además de las medidas inicial y a las 48 h. se realizarán medidas en la balanza a los siguientes tiempo de inmersión:
  - 5 minutos
  - 10 minutos
  - 15 minutos
  - 30 minutos
  - 1 hora
  - 2 horas
  - 4 horas
  - 7 horas
  - 15 horas (opcional)
  - 24 horas
  - 30 horas
  - 48 horas y así cada 6 horas hasta peso constante (variación menor del 0,2% entre dos medidas consecutivas)
  
- El secado de la muestra antes de la pesada se realizará con un paño húmedo.

## DESORCION

- Una vez saturada la muestra (finalización del ensayo de absorción se destinarán las probetas de dimensiones (5x 5 x 3 cm) al ensayo de desorción.
- El ensayo de sorción se realizará a Temp. controlada  $45 \pm 4^{\circ}\text{C}$  (ante la imposibilidad manifestada por LOEMCO de mantener la  $T^{\text{a}}$  constante por la noche).
- Se aconseja mantener un grado de humedad relativamente elevado (entre el 70 y 80%), pudiéndose conseguir este manteniendo un recipiente con agua dentro de la cámara o estufa de ensayo.
- Las muestras deberán ser colocadas sobre una rejilla poco tupida, para favorecer la evaporación por toda la superficie de la muestra.
- Los tiempos de medida en este ensayo serán:
  - 10 minutos
  - 30 minutos
  - 1 hora
  - 3 horas
  - 6 horas
  - 24 horas
  - 48 horas (2 días)
  - 72 horas (3 días) y así, cada 24 horas, hasta tener peso constante (Variación menor del 0,2%)

Todos los datos, para los distintos tipos de piedra, en forma de Tabla y Curvas de evolución vienen representados al final de este capítulo.

a3) **Absorción de vapor de agua:** (Test II.2 RILEM; NF B 10.512 AFNOR)

Determina la cantidad de agua higroscópica absorbida por la roca, en forma de vapor. Viene determinada por la mineralogía de la roca, así tiene gran influencia la presencia de arcillas tipo paligorskita, sepiolita, aumentan en gran medida su valor.

El ensayo, realizado en ambiente saturado, determina el coeficiente de absorción higroscópico, en función del tiempo.

a4) **Absorción de agua por succión o agua de capilaridad:** (Normal 11/82 CNR-ICR)

Viene regida por la ley de Laplace, en función de la tensión superficial ( $\sigma$ ), el radio de poro

supuestamente cilíndrico y vertical (R), y  $\alpha$  el ángulo de contacto entre el agua y el material sólido:

$$P = 2 \sigma \cos \alpha / R$$

La cuantificación de esta propiedad viene definida, fundamentalmente, por dos parámetros:

- **Coefficiente de absorción capilar (C)**, expresado en  $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ , y definido como la relación existente entre la cantidad de agua penetrada por capilaridad AM (kg) y el tiempo t ( $t^{1/2}$ ), por unidad de superficie S ( $\text{mm}^2$ ) perpendicular al sentido de flujo.

$$C \cdot t^{1/2} = AM(t)/S$$

- **Coefficiente de penetración capilar (A)**, que es la relación existente entre la distancia penetrada por el agua, H (m) y el tiempo ( $h^{1/2}$ ), según la expresión:

$$H(t) = A \cdot t^{1/2}$$

La medida de estos parámetros es útil para predecir la alterabilidad de la roca, ya que, gran parte de los procesos de degradación están vinculados al transporte de sustancias agresoras por ascensión capilar (compréndase así, la típica degradación de los niveles más bajos de los edificios).

b) Ensayos de desorción: (Test II.5 RILEM)

Es frecuente la realización de un único ensayo "desorción libre de agua" por vaporización del agua contenida en los poros del material. Se ha realizado el mismo, según lo indicado en el cuadro absorción desorción, obteniéndose la llamada curva de evaporación (disminución de la masa de agua (% sobre la masa de la probeta saturada (Gs), en función del tiempo ( $\text{min}^{1/2}$ ))

#### 2.3.4.4. Aparatos utilizados

Los instrumentos para la realización de los mencionados ensayos han sido los siguientes:

- Cubetas de poliestireno de dimensiones 50 x 30 x 30 cm.
- Balanza de precisión Meitz-Wetlar con precisión de 0,01 gr.
- Balanza hidrostática Sartorius con precisión de 0,1 gr.
- Estufa eléctrica Electrolux, calibrada, para el tramo 40-150° C, con ventilación forzada.

El agua utilizada en los ensayos ha sido previamente desmineralizada.

#### 2.3.4.5. Resultados obtenidos

A continuación se reflejan los cuadros de datos y las curvas de absorción por inmersión libre, evaporación y curvas absorción- evaporación:

CURVA DE ABSORCION VALORES ABSOLUTOS  
 \*\*\*\*\*

BOÑAR  
 80-35

\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	27	28	29	30	31	32
0	0	171.67	196.9	198.25	824.57	866.2	870.9
5	2.236067	182.11	204.14	204.64	880	907.29	909.55
10	3.162277						
15	3.872983						
30	5.477225						
60	7.745966	182.01	204.11	204.6	879.9	907.23	909.6
120	10.95445						
240	15.49193						
360	18.97366						
1440	37.94733	182.15	204.2	204.68	880.24	907.5	909.86
1800	42.42640						
2880	53.66563	182.34	204.31	204.76	880.71	907.78	910.08
7200	84.85281	182.65	204.5	204.92	881.55	908.25	910.5
8640	92.95160	182.75	204.58	204.97	881.83	908.5	910.75

CURVA DE ABSORCION VALORES RELATIVOS  
 \*\*\*\*\*

BOÑAR  
 80-35

T.A.	T.R.	27	28	29	30	31	32
0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	6.081435	3.676993	3.223203	6.722291	4.743708	4.437937
10	3.162277	-100	-100	-100	-100	-100	-100
15	3.872983	-100	-100	-100	-100	-100	-100
30	5.477225	-100	-100	-100	-100	-100	-100
60	7.745966	6.023184	3.661757	3.203026	6.710164	4.756781	4.443678
120	10.95445	-100	-100	-100	-100	-100	-100
240	15.49193	-100	-100	-100	-100	-100	-100
360	18.97366	-100	-100	-100	-100	-100	-100
1440	37.94733	6.104735	3.707465	3.243379	6.751397	4.767951	4.473533
1800	42.42640	-100	-100	-100	-100	-100	-100
2880	53.66563	6.215413	3.763331	3.283732	6.808397	4.800277	4.498794
7200	84.85281	6.395992	3.859827	3.364438	6.910268	4.854537	4.547020
8640	92.95160	6.454243	3.900457	3.389659	6.944225	4.883398	4.575726



CURVA DE ABSORCION TABLA DE VALORES PARA GRAFICO  
 \*\*\*\*\*

BOÑAR  
 80-35

T.A.	T.R.	27	28	29	30	31	32
0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	6.081435	3.676993	3.223203	6.722291	4.743708	4.437937
60	7.745966	6.023184	3.661757	3.203026	6.710164	4.736781	4.443678
1440	37.94733	6.104735	3.707465	3.243379	6.751397	4.767951	4.473533
2880	53.66563	6.215413	3.763331	3.283732	6.808397	4.800277	4.498794
7200	84.85281	6.395992	3.859827	3.364438	6.910268	4.854537	4.547020
8640	92.95160	6.454243	3.900457	3.389659	6.944225	4.883398	4.575726

MEDIAS ABSORCION  
 \*\*\*\*\*

BOÑAR  
 80-35

T.R.	MEDIAS	VARIANZA
0	0	0
2.236067	4.814261	1.536291
7.745966	4.796432	1.520285
37.94733	4.841410	1.537384
53.66563	4.894991	1.574564
84.85281	4.988680	1.633092
92.95160	5.024618	1.647832

CURVA DE EVAPORACION VALORES ABSOLUTOS  
 \*\*\*\*\*  
 BOÑAR  
 80-35  
 \*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	27	28	29
0	0	182.75	204.58	204.97
10	3.162277	182.62	204.48	204.87
53	7.280109	182.31	204.25	204.57
88	9.380831	182.04	204.02	204.33
178	13.34166	181.2	203.11	203.37
338	18.38477	179.92	201.86	202.16
1440	37.94733	173.49	198.25	199.45
2880	53.66563	172.04	197.4	198.76
4320	65.72670	171.84	197.18	198.54
7200	84.85281	171.82	197.09	198.44
8640	92.95160	171.8	197.08	198.43
17640	132.8156	171.8	197.08	198.43

CURVA DE EVAPORACION VALORES ABSOLUTOS  
 \*\*\*\*\*  
 BOÑAR  
 80-35  
 \*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	27	28	29
0	0	6.454243	3.900457	3.389659
10	3.162277	6.378516	3.849669	3.339218
53	7.280109	6.197937	3.732859	3.187894
88	9.380831	6.040659	3.616048	3.066834
178	13.34166	5.551348	3.153885	2.582597
338	18.38477	4.805731	2.519045	1.972257
1440	37.94733	1.060173	0.685627	0.605296
2880	53.66563	0.215529	0.253936	0.257250
4320	65.72670	0.099027	0.142204	0.146279
7200	84.85281	0.087376	0.096495	0.095838
8640	92.95160	0.075726	0.091416	0.090794
17640	132.8156	0.075726	0.091416	0.090794

MEDIAS EVAPORACION  
 \*\*\*\*\*  
 BOÑAR  
 80-35  
 \*\*\*\*\*

MEDIAS	VARIANZA	
8640	4.581453	1.797157
8630	4.522468	1.765885
8587	4.372897	1.714884
8552	4.241180	1.669333
8462	3.762610	1.654186
8302	3.099011	1.506276
7200	0.783699	0.039294
5760	0.242238	0.000358
4320	0.129170	0.000457
1440	0.093237	0.000017
0	0.085979	0.000052
0.085979	0.000052	

CURVA DE ABSORCION VALORES ABSOLUTOS  
\*\*\*\*\*

CAMPASPERO

CM-36

\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	20	21	22	31	32	33
0	0	745.28	727.75	748.82	178.51	175.94	180.13
5	2.236067	792.65	777.06	795.42	188.2	185.86	188.24
10	3.162277						
15	3.872983						
30	5.477225						
60	7.745966	792.55	777.03	795.32	188.19	185.85	188.2
120	10.95445	792.56	776.92	795.28	188.06	185.79	188.18
240	15.49193						
360	18.97366						
1440	37.94733	792.68	777.02	795.38	188.11	185.92	188.2
1800	42.42640						
2880	53.66563	792.85	777.15	795.52	188.19	186.07	188.2
7200	84.85281	792.9	777.28	795.66	188.36	186.1	188.24
8640	92.95160	792.91	777.33	795.65	188.36	186.19	188.38

CURVA DE ABSORCION VALORES RELATIVOS  
\*\*\*\*\*

CAMPASPERO

CM-36

T.A.	T.R.	20	21	22	31	32	33
0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	6.356000	6.775678	6.223124	5.428267	5.638285	4.502303
10	3.162277	-100	-100	-100	-100	-100	-100
15	3.872983	-100	-100	-100	-100	-100	-100
30	5.477225	-100	-100	-100	-100	-100	-100
60	7.745966	6.342582	6.771556	6.209770	5.422665	5.632602	4.480097
120	10.95445	6.343924	6.756441	6.204428	5.349840	5.598499	4.468994
240	15.49193	-100	-100	-100	-100	-100	-100
360	18.97366	-100	-100	-100	-100	-100	-100
1440	37.94733	6.360025	6.770182	6.217782	5.377849	5.672388	4.480097
1800	42.42640	-100	-100	-100	-100	-100	-100
2880	53.66563	6.382835	6.788045	6.236478	5.422665	5.757644	4.480097
7200	84.85281	6.389544	6.805908	6.255174	5.517898	5.774695	4.502303
8640	92.95160	6.390886	6.812779	6.253839	5.517898	5.825849	4.580025

CURVA DE ABSORCION

\*\*\*\*\*

MEDIAS ABSORCION

\*\*\*\*\*

TABLA DE VALORES PARA GRAFICO

\*\*\*\*\*

CAMPASPERO

CM-36

CAMPASPERO

CM-36

T.A.	T.R.	20	21	22	31	32	33	T.R.	MEDIAS	VARIANZA
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	6.356000	6.775678	6.223124	5.428267	5.638285	4.502303	2.236067	5.820610	0.547653
60	7.745966	6.342582	6.771556	6.209770	5.422665	5.632602	4.480097	7.745966	5.809878	0.553031
120	10.95445	6.343924	6.756441	6.204428	5.349840	5.598499	4.468994	10.95445	5.787021	0.564667
1440	37.94733	6.360025	6.770182	6.217782	5.377849	5.672388	4.480097	37.94733	5.813054	0.560839
2880	53.66563	6.382835	6.788045	6.236478	5.422665	5.757644	4.480097	53.66563	5.844627	0.563468
7200	84.85281	6.389544	6.805908	6.255174	5.517898	5.774695	4.502303	84.85281	5.874254	0.549625
8640	92.95160	6.390886	6.812779	6.253839	5.517898	5.825849	4.580025	92.95160	5.896879	0.515518

CURVA DE EVAPORACION VALORES ABSOLUTOS  
 \*\*\*\*\*  
 CAMPASPERO  
 CM-36  
 \*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	31	32	33
0	0	188.36	186.19	188.38
10	3.162277	188.24	186.11	188.29
54	7.348469	187.94	185.9	188.07
86	9.273618	187.71	185.73	187.88
176	13.26649	186.91	184.85	186.92
336	18.33030	185.73	183.58	185.46
1440	37.94733	180.19	177.49	181.29
2880	53.66563	179.21	176.62	180.71
4320	65.72670	178.97	176.45	180.55
7200	84.85281	178.86	176.36	180.46
8640	92.95160	178.84	176.36	180.47
17640	132.8156	178.85	176.36	180.47

CURVA DE EVAPORACION VALORES RELATIVOS  
 \*\*\*\*\*  
 CAMPASPERO  
 CM-36  
 \*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	31	32	33	T.I.
0	0	5.517898	5.825849	4.580025	
10	3.162277	5.450675	5.780379	4.530061	
54	7.348469	5.282617	5.661020	4.407927	
86	9.273618	5.153772	5.564396	4.302448	
176	13.26649	4.705618	5.064226	3.769499	
336	18.33030	4.044591	4.342389	2.958974	
1440	37.94733	0.941123	0.880982	0.643979	
2880	53.66563	0.392134	0.386495	0.321989	
4320	65.72670	0.257688	0.289871	0.233164	
7200	84.85281	0.196067	0.238717	0.183201	
8640	92.95160	0.184863	0.238717	0.188752	
17640	132.8156	0.190465	0.238717	0.188752	

MEDIAS EVAPORACION  
 \*\*\*\*\*  
 CAMPASPERO  
 CM-36  
 \*\*\*\*\*

MEDIAS	VARIANZA	
8640	5.307924	0.280724
8630	5.253705	0.279947
8586	5.117188	0.275390
8554	5.006872	0.276208
8464	4.513114	0.297915
8304	3.781984	0.353454
7200	0.822028	0.016453
5760	0.366873	0.001012
4320	0.260241	0.000539
1440	0.205995	0.000562
0	0.204111	0.000601
0.205978	0.000536	

CURVA DE ABSORCION VALORES ABSOLUTOS  
 \*\*\*\*\*

COLMENAR  
 CL-37  
 \*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	19	20	21	30	31	32
0	0	811.39	879.09	892.37	202.3	185.12	186.71
5	2.236067	838.63	891.25	901.93	203.63	186.34	188.05
10	3.162277						
15	3.872983						
30	5.477225						
60	7.745966	838.4	891.27	901.93	203.64	186.34	188.04
120	10.95445	838.28	891.37	901.84	203.65	186.35	188.03
240	15.49193						
360	18.97366						
1440	37.94733	838.85	891.37	902.03	203.69	186.39	188.07
1800	42.42640						
2880	53.66563	839.35	891.54	902.19	203.71	186.43	188.09
7200	84.85281	840.19	891.65	902.27	203.71	186.44	188.12
8640	92.95160	840.42	891.8	902.44	203.72	186.45	188.13

CURVA DE ABSORCION VALORES RELATIVOS  
 \*\*\*\*\*

COLMENAR  
 CL-37  
 \*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	19	20	21	30	31	32
0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	3.357201	1.383248	1.071304	0.657439	0.659031	0.717690
10	3.162277	-100	-100	-100	-100	-100	-100
15	3.872983	-100	-100	-100	-100	-100	-100
30	5.477225	-100	-100	-100	-100	-100	-100
60	7.745966	3.328855	1.385523	1.071304	0.662382	0.659031	0.712334
120	10.95445	3.314065	1.396899	1.061219	0.667325	0.664433	0.706978
240	15.49193	-100	-100	-100	-100	-100	-100
360	18.97366	-100	-100	-100	-100	-100	-100
1440	37.94733	3.384315	1.396899	1.082510	0.687098	0.686041	0.728402
1800	42.42640	-100	-100	-100	-100	-100	-100
2880	53.66563	3.445938	1.416237	1.100440	0.696984	0.707649	0.739114
7200	84.85281	3.549464	1.428750	1.109405	0.696984	0.713050	0.755181
8640	92.95160	3.577810	1.445813	1.128455	0.701927	0.718452	0.760537

CURVA DE ABSORCION

TABLA DE VALORES PARA GRAFICO

MEDIAS ABSORCION

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

COLMENAR

COLMENAR

CL-37

CL-37

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	19	20	21	30	31	32
0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	3.357201	1.383248	1.071304	0.657439	0.659031	0.717690
60	7.745966	3.328855	1.385523	1.071304	0.662382	0.659031	0.712334
120	10.95445	3.314065	1.396899	1.061219	0.667325	0.664433	0.706978
1440	37.94733	3.384315	1.396899	1.082510	0.687098	0.686041	0.728402
2880	53.66563	3.445938	1.416237	1.100440	0.696984	0.707649	0.739114
7200	84.85281	3.549464	1.428750	1.109405	0.696984	0.713050	0.755181
8640	92.95160	3.577810	1.445813	1.128455	0.701927	0.718452	0.760537

T.R.	MEDIAS	VARIANZA
0	0	0
2.236067	1.307652	0.908961
7.745966	1.303238	0.889758
10.95445	1.301820	0.879790
37.94733	1.327544	0.912638
53.66563	1.351060	0.945307
84.85281	1.375472	1.013963
92.95160	1.388833	1.029778

CURVA DE EVAPORACION VALORES ABSOLUTOS  
\*\*\*\*\*

COLMENAR  
CL-37  
\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	30	31	32
0	0	203.72	186.45	188.13
10	3.162277	203.64	186.39	188.05
53	7.280109	203.42	186.23	187.9
84	9.165151	203.33	186.15	187.8
174	13.19090	203.07	185.87	187.5
336	18.33030	202.9	185.69	187.32
1440	37.94733	202.59	185.39	186.99
2880	53.66563	202.47	185.27	186.87
4320	65.72670	202.41	185.21	186.81
7200	84.85281	202.34	185.15	186.74
8640	92.95160	202.34	185.14	186.73
17640	132.8156	202.33	185.14	186.73

CURVA DE EVAPORACION VALORES RELATIVOS  
\*\*\*\*\*

COLMENAR  
CL-37  
\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	30	31	32 T.I.
0	0	0.701927	0.718452	0.760537
10	3.162277	0.662382	0.686041	0.717690
53	7.280109	0.553633	0.599611	0.637352
84	9.165151	0.509144	0.556395	0.583793
174	13.19090	0.380622	0.405142	0.423116
336	18.33030	0.296589	0.307908	0.326709
1440	37.94733	0.143351	0.145851	0.149965
2880	53.66563	0.084033	0.081028	0.085694
4320	65.72670	0.054374	0.048617	0.053558
7200	84.85281	0.019772	0.016205	0.016067
8640	92.95160	0.019772	0.010803	0.010711
17640	132.8156	0.014829	0.010803	0.010711

MEDIAS EVAPORACION  
\*\*\*\*\*

COLMENAR  
CL-37  
\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	30	31	32 T.I.	MEDIAS	VARIANZA
0	0	0.701927	0.718452	0.760537	8640	0.726972 0.000608
10	3.162277	0.662382	0.686041	0.717690	8630	0.688704 0.000513
53	7.280109	0.553633	0.599611	0.637352	8587	0.596865 0.001171
84	9.165151	0.509144	0.556395	0.583793	8556	0.549777 0.000950
174	13.19090	0.380622	0.405142	0.423116	8466	0.402960 0.000303
336	18.33030	0.296589	0.307908	0.326709	8304	0.310402 0.000154
1440	37.94733	0.143351	0.145851	0.149965	7200	0.146389 0.000007
2880	53.66563	0.084033	0.081028	0.085694	5760	0.083585 0.000003
4320	65.72670	0.054374	0.048617	0.053558	4320	0.052183 0.000006
7200	84.85281	0.019772	0.016205	0.016067	1440	0.017348 0.000002
8640	92.95160	0.019772	0.010803	0.010711	0	0.013762 0.000018
17640	132.8156	0.014829	0.010803	0.010711	0.012115	0.000003



CURVA DE ABSORCION VALORES ABSOLUTOS  
\*\*\*\*\*

SEPULVEDA

SP-38

\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	19	20	21	30	31	32
0	0	682.94	693.98	687.34	161.1	157.39	151.18
5	2.236067	726.13	734.72	730.78	176	173	168.24
10	3.162277						
15	3.872983						
30	5.477225						
60	7.745966	725.55	734.54	730.98	175.99	172.96	168.12
120	10.95445	725.08	734.56	730.79	175.91	172.81	168.03
240	15.49193						
360	18.97366						
1440	37.94733	727.49	736.63	733.6	176.08	173.09	168.3
1800	42.42640						
2880	53.66563	728.63	738.46	735.14	176.43	173.3	168.55
7200	84.85281	730.16	739.8	736.23	176.78	173.66	169.05
8640	92.95160	730.39	739.94	736.48	176.89	173.8	169.17

CURVA DE ABSORCION VALORES RELATIVOS  
\*\*\*\*\*

SEPULVEDA

SP-38

\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	19	20	21	30	31	32
0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	6.324128	5.870486	6.320016	9.248913	9.918037	11.28456
10	3.162277	-100	-100	-100	-100	-100	-100
15	3.872983	-100	-100	-100	-100	-100	-100
30	5.477225	-100	-100	-100	-100	-100	-100
60	7.745966	6.239201	5.844548	6.349113	9.242706	9.892623	11.20518
120	10.95445	6.170380	5.847430	6.321471	9.193047	9.797318	11.14565
240	15.49193	-100	-100	-100	-100	-100	-100
360	18.97366	-100	-100	-100	-100	-100	-100
1440	37.94733	6.523267	6.145710	6.730293	9.298572	9.975220	11.32424
1800	42.42640	-100	-100	-100	-100	-100	-100
2880	53.66563	6.690192	6.409406	6.954345	9.515828	10.10864	11.48961
7200	84.85281	6.914223	6.602495	7.112928	9.733085	10.33737	11.82034
8640	92.95160	6.947901	6.622669	7.149300	9.801365	10.42632	11.89972

CURVA DE ABSORCION \*\*\*\*\* TABLA DE VALORES PARA GRAFICO \*\*\*\*\*

SEPULVEDA  
SP-38  
\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	19	20	21	30	31	32
0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	6.324128	5.870486	6.320016	9.248913	9.918037	11.28456
60	7.745966	6.239201	5.844548	6.349113	9.242706	9.892623	11.20518
120	10.95445	6.170380	5.847430	6.321471	9.193047	9.797318	11.14565
1440	37.94733	6.523267	6.145710	6.730293	9.298572	9.975220	11.32424
2880	53.66563	6.690192	6.409406	6.954345	9.515828	10.10864	11.48961
7200	84.85281	6.914223	6.602495	7.112928	9.733085	10.33737	11.82034
8640	92.95160	6.947901	6.622669	7.149300	9.801365	10.42632	11.89972

MEDIAS ABSORCION \*\*\*\*\*

SEPULVEDA  
SP-38  
\*\*\*\*\*

T.R.	MEDIAS	VARIANZA
0	0	0
2.236067	8.161023	4.339524
7.745966	8.128896	4.295280
10.95445	8.079217	4.218287
37.94733	8.332885	3.867471
53.66563	8.528005	3.764629
84.85281	8.753409	3.929173
92.95160	8.807881	4.025238

CURVA DE EVAPORACION				VALORES ABSOLUTOS				CURVA DE EVAPORACION				VALORES RELATIVOS				MEDIAS EVAPORACION			
*****				*****				*****				*****				*****			
SEPULVEDA				SEPULVEDA				SEPULVEDA				SEPULVEDA				SEPULVEDA			
SP-38				SP-38				SP-38				SP-38				SP-38			
*****				*****				*****				*****				*****			
T.A.	T.R.	30	31	32	T.A.	T.R.	30	31	32 T.I.	T.A.	T.R.	30	31	32 T.I.	T.A.	T.R.	30	31	32 T.I.
0	0	176.89	173.8	169.17	0	0	9.801365	10.42632	11.89972	8640	10.70913	0.773840							
10	3.162277	176.76	173.71	169.07	10	3.162277	9.720670	10.36914	11.83357	8630	10.64113	0.781049							
52	7.211102	176.41	173.46	168.83	52	7.211102	9.503414	10.21030	11.67482	8588	10.46284	0.817726							
82	9.055385	176.2	173.3	168.67	82	9.055385	9.373060	10.10864	11.56899	8558	10.35023	0.832866							
172	13.11487	175.32	173.41	167.7	172	13.11487	8.826815	10.17853	10.92737	8468	9.977574	0.755582							
334	18.27566	174.08	171.12	166.17	334	18.27566	8.057107	8.723552	9.915332	8306	8.898664	0.590832							
1440	37.94733	164.31	160.47	155.05	1440	37.94733	1.992551	1.956922	2.559862	7200	2.169778	0.076294							
2880	53.66563	161.63	157.2	151.51	2880	53.66563	0.328988	0	0.218282	5760	0.182423	0.018681							
4320	65.72670	161.26	156.87	151.21	4320	65.72670	0.099317	0	0.019843	4320	0.039720	0.001841							
7200	84.85281	161.24	156.86	151.19	7200	84.85281	0.086902	0	0.006614	1440	0.031172	0.001560							
8640	92.95160	161.23	156.87	151.21	8640	92.95160	0.080695	0	0.019843	0	0.033513	0.001178							
17640	132.8156	161.23	156.87	151.2	17640	132.8156	0.080695	0	0.013229	0	0.031308	0.001248							

CURVA DE ABSORCION VALORES ABSOLUTOS  
 \*\*\*\*\*

ESTEPA  
 ES-39  
 \*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	19	20	21	30	31	32
0	0	832.29	832.09	826.44	192.42	189.38	203.99
5	2.236067	856.33	858.13	850.6	197.91	194.66	209.47
10	3.162277						
15	3.872983						
30	5.477225						
60	7.745966	856.45	858.23	850.52	197.89	194.64	209.47
120	10.95445	856.27	858.12	850.48	197.88	194.64	209.47
240	15.49193						
360	18.97366						
1440	37.94733	856.49	858.25	850.69	197.94	194.71	209.52
1800	42.42640						
2880	53.66563	856.56	858.41	850.91	197.98	194.76	209.59
7200	84.85281	856.81	858.63	851.29	198.08	194.86	209.68
8640	92.95160	856.87	858.73	851.46	198.11	194.88	209.72

CURVA DE ABSORCION VALORES RELATIVOS  
 \*\*\*\*\*

ESTEPA  
 ES-39  
 \*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	19	20	21	30	31	32
0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	2.888416	3.129469	2.923382	2.853133	2.788045	2.686406
10	3.162277	-100	-100	-100	-100	-100	-100
15	3.872983	-100	-100	-100	-100	-100	-100
30	5.477225	-100	-100	-100	-100	-100	-100
60	7.745966	2.902834	3.141487	2.913702	2.842739	2.777484	2.686406
120	10.95445	2.881207	3.128267	2.908862	2.837542	2.777484	2.686406
240	15.49193	-100	-100	-100	-100	-100	-100
360	18.97366	-100	-100	-100	-100	-100	-100
1440	37.94733	2.907640	3.143890	2.934272	2.868724	2.814447	2.710917
1800	42.42640	-100	-100	-100	-100	-100	-100
2880	53.66563	2.916050	3.163119	2.960892	2.889512	2.840849	2.745232
7200	84.85281	2.946088	3.189558	3.006872	2.941482	2.893652	2.789352
8640	92.95160	2.953297	3.201576	3.027443	2.957073	2.904213	2.808961

CURVA DE ABSORCION

TABLA DE VALORES PARA GRAFICO

MEDIAS ABSORCION

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

ESTEPA

ESTEPA

ES-39

ES-39

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	19	20	21	30	31	32
0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	2.888416	3.129469	2.923382	2.853133	2.788045	2.686406
60	7.745966	2.902834	3.141487	2.913702	2.842739	2.777484	2.686406
120	10.95445	2.881207	3.128267	2.908862	2.837542	2.777484	2.686406
1440	37.94733	2.907640	3.143890	2.934272	2.868724	2.814447	2.710917
2880	53.66563	2.916050	3.163119	2.960892	2.889512	2.840849	2.745232
7200	84.85281	2.946088	3.189558	3.006872	2.941482	2.893652	2.789352
8640	92.95160	2.953297	3.201576	3.027443	2.957073	2.904213	2.808961

T.R.	MEDIAS	VARIANZA
0	0	0
2.236067	2.878142	0.018470
7.745966	2.877442	0.019894
10.95445	2.869961	0.018609
37.94733	2.896648	0.017449
53.66563	2.919276	0.016421
84.85281	2.961167	0.014824
92.95160	2.975427	0.014576

CURVA DE EVAPORACION VALORES ABSOLUTOS  
\*\*\*\*\*

ESTEPA

ES-39

\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	30	31	32
0	0	198.11	194.88	209.72
10	3.162277	198.04	194.83	209.64
52	7.211102	197.8	194.61	209.35
141	11.87434	197.59	194.47	209.19
232	15.23154	196.72	193.63	208.25
394	19.84943	195.52	192.36	206.76
1440	37.94733	192.64	189.56	204.17
2880	53.66563	192.41	189.35	203.95
4320	65.72670	192.39	189.34	203.94
7200	84.85281	192.39	189.34	203.94
8640	92.95160	192.39	189.34	203.95
17640	132.8156	192.39	189.34	203.95

CURVA DE EVAPORACION VALORES RELATIVOS  
\*\*\*\*\*

ESTEPA

ES-39

\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	30	31	32	T.I.
0	0	2.957073	2.904213	2.808961	
10	3.162277	2.920694	2.877811	2.769743	
32	5.656854	2.795967	2.761643	2.627579	
121	11	2.686830	2.687717	2.549144	
212	14.56021	2.234694	2.244165	2.088337	
374	19.33907	1.611059	1.573555	1.357909	
1440	37.94733	0.114333	0.095046	0.088239	
2880	53.66563	0	0	0	
4320	65.72670	0	0	0	
7200	84.85281	0	0	0	
8640	92.95160	0	0	0	
17640	132.8156	0	0	0	

MEDIAS EVAPORACION  
\*\*\*\*\*

ESTEPA

ES-39

\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	30	31	32	T.I.	MEDIAS	VARIANZA
0	0	2.957073	2.904213	2.808961		8640	2.890082 0.003756
10	3.162277	2.920694	2.877811	2.769743		8630	2.856083 0.004033
32	5.656854	2.795967	2.761643	2.627579		8608	2.728396 0.005278
121	11	2.686830	2.687717	2.549144		8519	2.641231 0.004240
212	14.56021	2.234694	2.244165	2.088337		8428	2.189065 0.005088
374	19.33907	1.611059	1.573555	1.357909		8266	1.514174 0.012443
1440	37.94733	0.114333	0.095046	0.088239		7200	0.099206 0.000122
2880	53.66563	0	0	0		5760	0 0
4320	65.72670	0	0	0		4320	0 0
7200	84.85281	0	0	0		1440	0 0
8640	92.95160	0	0	0		0	0 0
17640	132.8156	0	0	0		0	0 0

CURVA DE ABSORCION VALORES ABSOLUTOS  
\*\*\*\*\*

PALOMERA  
PL-40  
\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	19	20	21	30	31	32
0	0	573.88	591.17	573.22	135.49	153.77	144.27
5	2.236067	654.8	663.27	634.67	153.15	173.14	162.61
10	3.162277						
15	3.872983						
30	5.477225						
60	7.745966	654.13	662.17	635.95	153.32	173.65	163.05
120	10.95445	652.65	661.08	633.98	152.16	172.6	162.06
240	15.49193						
360	18.97366						
1440	37.94733	653.29	662.38	634.01	152.69	173.07	162.73
1800	42.42640						
2880	53.66563	653.96	663.26	634.96	152.98	173.48	162.4
7200	84.85281	654.4	664.07	635.88	153.16	173.74	162.98
8640	92.95160	654.46	664.2	636.2	152.83	173.69	162.79

CURVA DE ABSORCION VALORES RELATIVOS  
\*\*\*\*\*

PALOMERA  
PL-40  
\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	19	20	21	30	31	32
0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	14.10050	12.19615	10.72014	13.03417	12.59673	12.71227
10	3.162277	-100	-100	-100	-100	-100	-100
15	3.872983	-100	-100	-100	-100	-100	-100
30	5.477225	-100	-100	-100	-100	-100	-100
60	7.745966	13.98375	12.01008	10.94344	13.15964	12.92839	13.01725
120	10.95445	13.72586	11.82570	10.59976	12.30349	12.24556	12.33104
240	15.49193	-100	-100	-100	-100	-100	-100
360	18.97366	-100	-100	-100	-100	-100	-100
1440	37.94733	13.83738	12.04560	10.60500	12.69466	12.55121	12.79545
1800	42.42640	-100	-100	-100	-100	-100	-100
2880	53.66563	13.95413	12.19446	10.77073	12.90870	12.81784	12.56671
7200	84.85281	14.03080	12.33147	10.93123	13.04155	12.98692	12.96873
8640	92.95160	14.04126	12.35346	10.98705	12.79799	12.95441	12.83704

CURVA DE ABSORCION TABLA DE VALORES PARA GRAFICO

\*\*\*\*\*

PALOMERA

PL-40

\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	19	20	21	30	31	32
0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	14.10050	12.19615	10.72014	13.03417	12.59673	12.71227
60	7.745966	13.98375	12.01008	10.94344	13.15964	12.92839	13.01725
120	10.95445	13.72586	11.82570	10.59976	12.30349	12.24556	12.33104
1440	37.94733	13.83738	12.04560	10.60500	12.69466	12.55121	12.79545
2880	53.66563	13.95413	12.19446	10.77073	12.90870	12.81784	12.56671
7200	84.85281	14.03080	12.33147	10.93123	13.04155	12.98692	12.96873
8640	92.95160	14.04126	12.35346	10.98705	12.79799	12.95441	12.83704

MEDIAS ABSORCION

\*\*\*\*\*

PALOMERA

PL-40

\*\*\*\*\*

T.R.	MEDIAS	VARIANZA
0	0	0
2.236067	12.55999	1.023334
7.745966	12.67376	0.928247
10.95445	12.17190	0.842387
37.94733	12.42155	0.946163
53.66563	12.53543	0.910534
84.85281	12.71512	0.884206
92.95160	12.66187	0.822939



CURVA DE EVAPORACION VALORES ABSOLUTOS  
 \*\*\*\*\*  
 PALOMERA  
 PL-40  
 \*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	30	31	32
0	0	152.83	173.69	162.79
10	3.162277	152.77	173.65	162.72
52	7.211102	152.44	173.35	162.4
81	9	152.21	173.14	162.19
172	13.11487	151.19	172.1	161.3
334	18.27566	149.58	170.45	159.79
1440	37.94733	137.99	158.08	148.35
2880	53.66563	134.23	153.11	143.55
4320	65.72670	134.22	152.88	143.17
7200	84.85281	134.22	152.88	143.16
8640	92.95160	134.22	152.88	143.17
17640	132.8156	134.22	152.88	143.17

CURVA DE EVAPORACION VALORES RELATIVOS  
 \*\*\*\*\*  
 PALOMERA  
 PL-40  
 \*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	30	31	32	T.I.
0	0	12.79799	12.95441	12.83704	8640
10	3.162277	12.75370	12.92839	12.78852	8630
52	7.211102	12.51014	12.73330	12.56671	8588
81	9	12.34039	12.59673	12.42115	8559
114	10.67707	11.58757	11.92040	11.80425	8526
276	16.61324	10.39929	10.84736	10.75760	8364
1440	37.94733	1.845154	2.802887	2.828030	7200
2880	53.66563	0	0	0	5760
4320	65.72670	0	0	0	4320
7200	84.85281	0	0	0	1440
8640	92.95160	0	0	0	0
17640	132.8156	0	0	0	0

MEDIAS EVAPORACION  
 \*\*\*\*\*  
 PALOMERA  
 PL-40  
 \*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	30	31	32	T.I.	MEDIAS	VARIANZA
0	0	12.79799	12.95441	12.83704	8640	12.86314	0.004418
10	3.162277	12.75370	12.92839	12.78852	8630	12.82354	0.005699
52	7.211102	12.51014	12.73330	12.56671	8588	12.60338	0.008972
81	9	12.34039	12.59673	12.42115	8559	12.45276	0.011451
114	10.67707	11.58757	11.92040	11.80425	8526	11.77074	0.019024
276	16.61324	10.39929	10.84736	10.75760	8364	10.66808	0.037469
1440	37.94733	1.845154	2.802887	2.828030	7200	2.492024	0.209325
2880	53.66563	0	0	0	5760	0	0
4320	65.72670	0	0	0	4320	0	0
7200	84.85281	0	0	0	1440	0	0
8640	92.95160	0	0	0	0	0	0
17640	132.8156	0	0	0	0	0	0

CURVA DE ABSORCION VALORES ABSOLUTOS  
 \*\*\*\*\*

OSTIONERA

OS-41

\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	19	20	21	30	31	32
0	0	667.76	711.1	765.98	183.21	159.99	170.49
5	2.236067	712.87	744.02	808.43	189.13	166.88	176.84
10	3.162277						
15	3.872983						
30	5.477225						
60	7.745966	712.46	750.95	808.76	188.69	166.56	176.69
120	10.95445	707.46	741.54	798	188.48	165.49	175.75
240	15.49193						
360	18.97366						
1440	37.94733	708.37	741.65	798.22	188.48	165.48	176.34
1800	42.42640						
2880	53.66563	708.91	743.43	801.12	188.6	165.79	176.47
7200	84.85281	705.44	740.49	797.87	188.62	165.81	177.08
8640	92.95160	705.32	739.98	796.87	188.58	165.99	176.37

CURVA DE ABSORCION VALORES RELATIVOS  
 \*\*\*\*\*

OSTIONERA

OS-41

\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	19	20	21	30	31	32
0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	6.755421	4.629447	5.541920	3.231264	4.306519	3.724558
10	3.162277	-100	-100	-100	-100	-100	-100
15	3.872983	-100	-100	-100	-100	-100	-100
30	5.477225	-100	-100	-100	-100	-100	-100
60	7.745966	6.694021	5.603993	5.585002	2.991103	4.106506	3.636576
120	10.95445	5.945249	4.280691	4.180265	2.876480	3.437714	3.085224
240	15.49193	-100	-100	-100	-100	-100	-100
360	18.97366	-100	-100	-100	-100	-100	-100
1440	37.94733	6.081526	4.296160	4.208987	2.876480	3.431464	3.431286
1800	42.42640	-100	-100	-100	-100	-100	-100
2880	53.66563	6.162393	4.546477	4.587587	2.941979	3.625226	3.507537
7200	84.85281	5.642745	4.133033	4.163294	2.952895	3.637727	3.865329
8640	92.95160	5.624775	4.061313	4.032742	2.931062	3.750234	3.448882

CURVA DE ABSORCION  
\*\*\*\*\*  
TABLA DE VALORES PARA GRAFICO  
\*\*\*\*\*

OSTIONERA  
OS-41  
\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	19	20	21	30	31	32
0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	6.755421	4.629447	5.541920	3.231264	4.306519	3.724558
60	7.745966	6.694021	5.603993	5.585002	2.991103	4.106506	3.636576
120	10.95445	5.945249	4.280691	4.180265	2.876480	3.437714	3.085224
1440	37.94733	6.081526	4.296160	4.208987	2.876480	3.431464	3.431286
2880	53.66563	6.162393	4.546477	4.587587	2.941979	3.625226	3.507537
7200	84.85281	5.642745	4.133033	4.163294	2.952895	3.637727	3.865329
8640	92.95160	5.624775	4.061313	4.032742	2.931062	3.750234	3.448882

MEDIAS ABSORCION  
\*\*\*\*\*

OSTIONERA  
OS-41  
\*\*\*\*\*

T.R.	MEDIAS	VARIANZA
0	0	0
2.236067	4.698188	1.367006
7.745966	4.769534	1.658496
10.95445	3.967604	1.050709
37.94733	4.054317	1.059233
53.66563	4.228533	1.084810
84.85281	4.065837	0.660462
92.95160	3.974835	0.691611

CURVA DE EVAPORACION VALORES ABSOLUTOS  
\*\*\*\*\*  
OSTIONERA  
OS-41  
\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	30	31	32
0	0	188.58	165.99	176.37
10	3.162277	188.23	165.57	175.91
52	7.211102	187.47	164.91	174.82
81	9	186.99	164.51	174.49
173	13.15294	185.86	163.47	173.61
345	18.57417	184.19	161.88	172.13
1440	37.94733	182.21	159.44	170.31
2880	53.66563	182.06	159.4	170.31
4320	65.72670	182.03	159.37	170.24
7200	84.85281	182.03	159.36	170.24
8640	92.95160	182.03	159.37	170.24
17640	132.8156	182.04	159.38	170.24

CURVA DE EVAPORACION VALORES RELATIVOS  
\*\*\*\*\*  
OSTIONERA  
OS-41  
\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	30	31	32
0	0	2.931062	3.750234	3.448882
10	3.162277	2.740025	3.487717	3.179072
52	7.211102	2.325200	3.075192	2.539738
81	9	2.063206	2.825176	2.346178
173	13.15294	1.446427	2.175135	1.830019
345	18.57417	0.534905	1.181323	0.961933
1440	37.94733	0	0	0
2880	53.66563	0	0	0
4320	65.72670	0	0	0
7200	84.85281	0	0	0
8640	92.95160	0	0	0
17640	132.8156	0	0	0

MEDIAS EVAPORACION  
\*\*\*\*\*  
OSTIONERA  
OS-41  
\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	30	31	32	T.I.	MEDIAS	VARIANZA
0	0	2.931062	3.750234	3.448882	8640	3.376726	0.114443
10	3.162277	2.740025	3.487717	3.179072	8630	3.135605	0.094118
52	7.211102	2.325200	3.075192	2.539738	8588	2.646710	0.099469
81	9	2.063206	2.825176	2.346178	8559	2.411520	0.098901
173	13.15294	1.446427	2.175135	1.830019	8467	1.817194	0.088584
345	18.57417	0.534905	1.181323	0.961933	8295	0.892720	0.072038
1440	37.94733	0	0	0	7200	0	0
2880	53.66563	0	0	0	5760	0	0
4320	65.72670	0	0	0	4320	0	0
7200	84.85281	0	0	0	1440	0	0
8640	92.95160	0	0	0	0	0	0
17640	132.8156	0	0	0	0	0	0

CURVA DE ABSORCION VALORES ABSOLUTOS  
 \*\*\*\*\*

ESPERA  
 EP-43  
 \*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	6	7	8	26	27	28
0	0	698.37	718.63	746.37	140.24	148.06	149.25
5	2.236067	750.06	773.28	790.43	153.4	162.12	160.69
10	3.162277						
15	3.872983						
30	5.477225						
60	7.745966	750.01	773.67	790.48	153.4	162.42	160.81
120	10.95445	749.77	775.56	790.53	153.24	162.08	160.77
240	15.49193						
360	18.97366						
1440	37.94733	750.36	774.28	791.1	153.12	162.48	161.01
1800	42.42640						
2880	53.66563	751.05	775.41	791.75	153.9	162.79	161.23
7200	84.85281	752.22	776.92	792.97	154.25	163.08	161.47
8640	92.95160	752.42	776.96	792.99	154.17	163.15	161.49

CURVA DE ABSORCION VALORES RELATIVOS  
 \*\*\*\*\*

ESPERA  
 EP-43  
 \*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	6	7	8	26	27	28
0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	7.401520	7.604747	5.903238	9.383913	9.496150	7.664991
10	3.162277	-100	-100	-100	-100	-100	-100
15	3.872983	-100	-100	-100	-100	-100	-100
30	5.477225	-100	-100	-100	-100	-100	-100
60	7.745966	7.394361	7.659017	5.909937	9.383913	9.698770	7.745393
120	10.95445	7.359995	7.643710	5.916636	9.269823	9.469134	7.718592
240	15.49193	-100	-100	-100	-100	-100	-100
360	18.97366	-100	-100	-100	-100	-100	-100
1440	37.94733	7.444477	7.743901	5.993006	9.184255	9.739294	7.879396
1800	42.42640	-100	-100	-100	-100	-100	-100
2880	53.66563	7.543279	7.901145	6.080094	9.740444	9.948669	8.026800
7200	84.85281	7.710812	8.111267	6.243552	9.990017	10.14453	8.187604
8640	92.95160	7.739450	8.116833	6.246231	9.932972	10.19181	8.201005

CURVA DE ABSORCION

TABLA DE VALORES PARA GRAFICO

MEDIAS ABSORCION

\*\*\*\*\*

ESPERA

EP-43

\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	6	7	8	26	27	28
0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	7.401520	7.604747	5.903238	9.383913	9.496150	7.664991
60	7.745966	7.394361	7.659017	5.909937	9.383913	9.698770	7.745393
120	10.95445	7.359995	7.643710	5.916636	9.269823	9.469134	7.718592
1440	37.94733	7.444477	7.743901	5.993006	9.184255	9.739294	7.879396
2880	53.66563	7.543279	7.901145	6.080094	9.740444	9.948669	8.026800
7200	84.85281	7.710812	8.111267	6.243552	9.990017	10.14453	8.187604
8640	92.95160	7.739450	8.116833	6.246231	9.932972	10.19181	8.201005

ESPERA

EP-43

\*\*\*\*\*

T.R.	MEDIAS	VARIANZA
0	0	0
2.236067	7.909093	1.521189
7.745966	7.965232	1.618339
10.95445	7.896315	1.443740
37.94733	7.997388	1.474054
53.66563	8.206738	1.745856
84.85281	8.397964	1.804210
92.95160	8.404717	1.792548

CURVA DE EVAPORACION				VALORES ABSOLUTOS				CURVA DE EVAPORACION				VALORES RELATIVOS				MEDIAS EVAPORACION			
*****				*****				*****				*****				*****			
ESPERA				ESPERA				ESPERA				ESPERA				ESPERA			
EP-43				EP-43				EP-43				EP-43				EP-43			
*****				*****				*****				*****				*****			
T.A.	T.R.	26	27	28	T.A.	T.R.	26	27	28	T.I.	26	27	28	T.I.	MEDIAS	VARIANZA			
0	0	154.17	163.15	161.49	0	0	9.932972	10.19181	8.201005	8640	9.441930	0.781114							
10	3.162277	154.06	163.05	161.38	10	3.162277	9.854535	10.12427	8.127303	8630	9.368704	0.782664							
52	7.211102	153.81	162.8	161.07	52	7.211102	9.676269	9.955423	7.919597	8588	9.183763	0.812045							
81	9	153.65	162.6	160.82	81	9	9.562179	9.820343	7.752093	8559	9.044872	0.846745							
172	13.11487	152.7	161.63	159.9	172	13.11487	8.884768	9.165203	7.135678	8468	8.395216	0.806325							
334	18.27566	151.08	159.98	158.35	334	18.27566	7.729606	8.050790	6.097152	8306	7.292516	0.731640							
1440	37.94733	141.8	149.5	150.1	1440	37.94733	1.112378	0.972578	0.569514	7200	0.884823	0.052967							
2880	53.66563	140.1	147.47	148.67	2880	53.66563	0	0	0	5760	0	0							
4320	65.72670	139.89	147.25	148.47	4320	65.72670	0	0	0	4320	0	0							
7200	84.85281	139.87	147.23	148.42	7200	84.85281	0	0	0	1440	0	0							
8640	92.95160	139.92	147.26	148.47	8640	92.95160	0	0	0	0	0	0							
17640	132.8156	139.9	147.25	148.44	17640	132.8156	0	0	0	0	0	0							

CURVA DE ABSORCION VALORES ABSOLUTOS  
\*\*\*\*\*

CURVA DE ABSORCION VALORES RELATIVOS  
\*\*\*\*\*

NOVELDA

NOVELDA

NV-42

NV-42

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	18	19	20	30	31	32	T.A.	T.R.	18	19	20	30	31	32
0	0	771.36	776.83	783.97	171.26	175.34	167.98	0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	816.19	824.72	830.19	178.98	183.3	175.46	5	2.236067	5.811812	6.164797	5.895633	4.507765	4.539751	4.452911
10	3.162277							10	3.162277	-100	-100	-100	-100	-100	-100
15	3.872983							15	3.872983	-100	-100	-100	-100	-100	-100
30	5.477225							30	5.477225	-100	-100	-100	-100	-100	-100
60	7.745966	816.34	824.83	830.23	178.94	183.27	175.41	60	7.745966	5.831259	6.178958	5.900735	4.484409	4.522641	4.423145
120	10.95445	816.2	824.78	830.25	178.91	183.24	175.38	120	10.95445	5.813109	6.172521	5.903287	4.466892	4.505532	4.405286
240	15.49193							240	15.49193	-100	-100	-100	-100	-100	-100
360	18.97366							360	18.97366	-100	-100	-100	-100	-100	-100
1440	37.94733	816.48	825.16	830.57	178.95	183.3	175.4	1440	37.94733	5.849408	6.221438	5.944105	4.490248	4.539751	4.417192
1800	42.42640							1800	42.42640	-100	-100	-100	-100	-100	-100
2880	53.66563	816.66	825.39	830.84	178.98	183.32	175.46	2880	53.66563	5.872744	6.251045	5.978545	4.507765	4.551157	4.452911
7200	84.85281	817.01	825.69	831.21	179.02	183.38	175.5	7200	84.85281	5.918118	6.289664	6.025740	4.531122	4.585376	4.476723
8640	92.95160	817.08	825.8	831.31	179.03	183.39	175.51	8640	92.95160	5.927193	6.303824	6.038496	4.536961	4.591080	4.482676



CURVA DE ABSORCION TABLA DE VALORES PARA GRAFICO

\*\*\*\*\*

NOVELDA  
NV-42  
\*\*\*\*\*

T.A.	T.R.	18	19	20	30	31	32
0	0	0	0	0	0	0	0
5	2.236067	5.811812	6.164797	5.895633	4.507765	4.539751	4.452911
60	7.745966	5.831259	6.178958	5.900735	4.484409	4.522641	4.423145
120	10.95445	5.813109	6.172521	5.903287	4.466892	4.505532	4.405286
1440	37.94733	5.849408	6.221438	5.944105	4.490248	4.539751	4.417192
2880	53.66563	5.872744	6.251045	5.978545	4.507765	4.551157	4.452911
7200	84.85281	5.918118	6.289664	6.025740	4.531122	4.585376	4.476723
8640	92.95160	5.927193	6.303824	6.038496	4.536961	4.591080	4.482676

MEDIAS ABSORCION

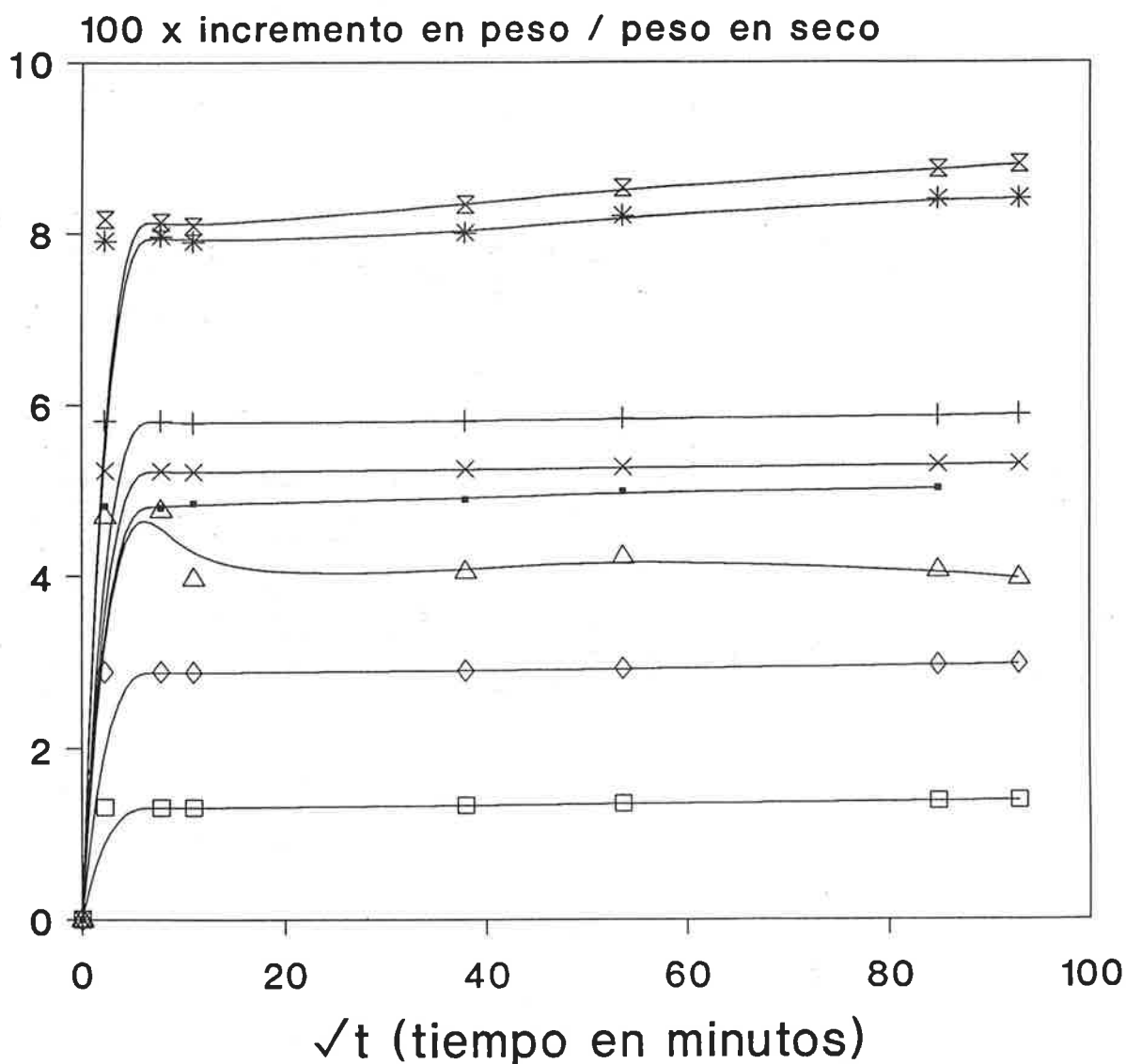
\*\*\*\*\*

NOVELDA  
NV-42  
\*\*\*\*\*

T.R.	MEDIAS	VARIANZA
0	0	0
2.236067	5.228778	0.542890
7.745966	5.223525	0.569823
10.95445	5.211104	0.577812
37.94733	5.243690	0.593294
53.66563	5.269028	0.598858
84.85281	5.304457	0.611288
92.95160	5.313372	0.616358

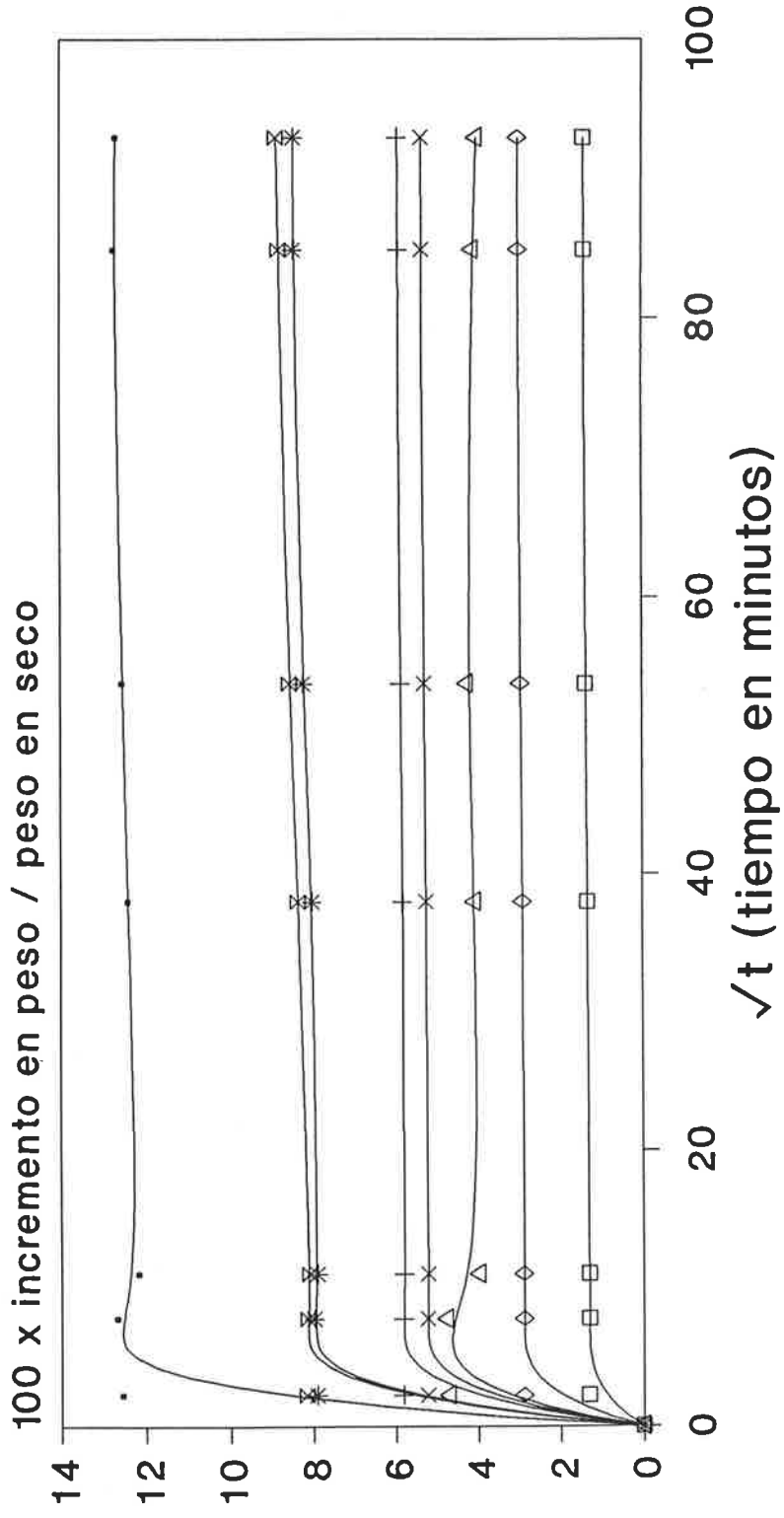
CURVA DE EVAPORACION				VALORES ABSOLUTOS				CURVA DE EVAPORACION				VALORES RELATIVOS				MEDIAS EVAPORACION			
*****				*****				*****				*****				*****			
NOVELDA				NOVELDA				NOVELDA				NOVELDA				NOVELDA			
NV-42				NV-42				NV-42				NV-42				NV-42			
*****				*****				*****				*****				*****			
T.A.	T.R.	30	31	32	T.A.	T.R.	30	31	32	T.A.	T.R.	30	31	32	T.I.	MEDIAS	VARIANZA		
0	0	179.03	183.39	175.51	0	0	4.536961	4.591080	4.482676	8640	4.536906	0.001958	8630	4.484381	0.002283	8589	4.326764	0.003750	
10	3.162277	178.95	183.3	175.41	10	3.162277	4.490248	4.539751	4.423145	8560	4.209893	0.006690	8468	3.677777	0.003002	8306	2.929892	0.001468	
51	7.141428	178.7	183.04	175.11	51	7.141428	4.344271	4.391468	4.244552	7200	1.437544	0.000893	5760	0.981013	0.000451	4320	0.786701	0.000428	
80	8.944271	178.54	182.85	174.86	80	8.944271	4.250846	4.283107	4.095725	1440	0.571053	0.000270	0	0.573038	0.000209	0.569107	0.000296		
172	13.11487	177.57	181.9	174.04	172	13.11487	3.684456	3.741302	3.607572										
334	18.27566	176.25	180.57	172.84	334	18.27566	2.913698	2.982776	2.893201										
1440	37.94733	173.71	177.93	170.34	1440	37.94733	1.430573	1.477130	1.404929										
2880	53.66563	172.93	177.11	169.59	2880	53.66563	0.975125	1.009467	0.958447										
4320	65.72670	172.59	176.77	169.27	4320	65.72670	0.776596	0.815558	0.767948										
7200	84.85281	172.23	176.38	168.91	7200	84.85281	0.566390	0.593133	0.553637										
8640	92.95160	172.23	176.38	168.92	8640	92.95160	0.566390	0.593133	0.559590										
17640	132.8156	172.22	176.38	168.91	17640	132.8156	0.560551	0.593133	0.553637										

## CURVAS DE ABSORCION TODOS LOS TIPOS DE ROCA



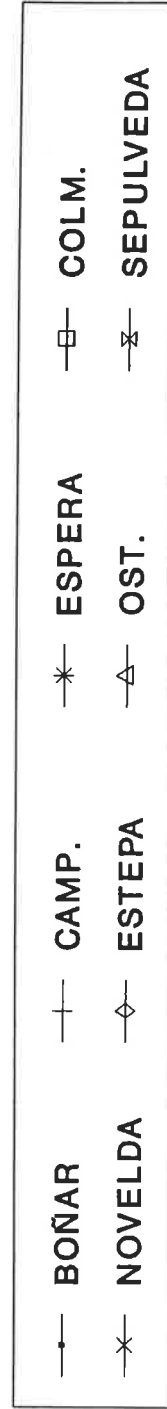
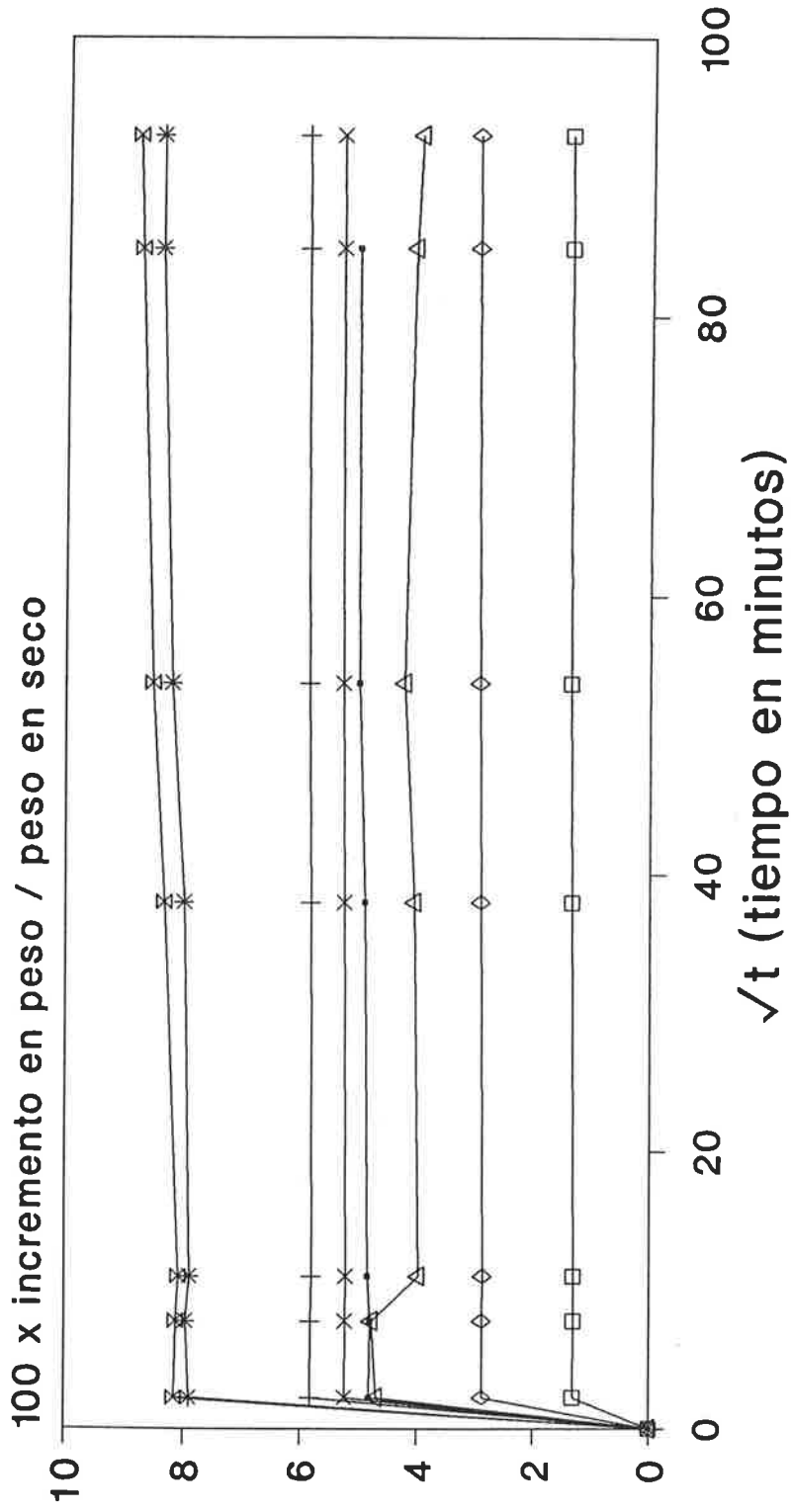
—●— BOÑAR	—+— CAMP.	—*— ESPERA	—□— COLM.
—x— NOVELDA	—◇— ESTEPA	—△— OST.	—x— SEPULVEDA

# CURVAS DE ABSORCION TODOS LOS TIPOS DE ROCA

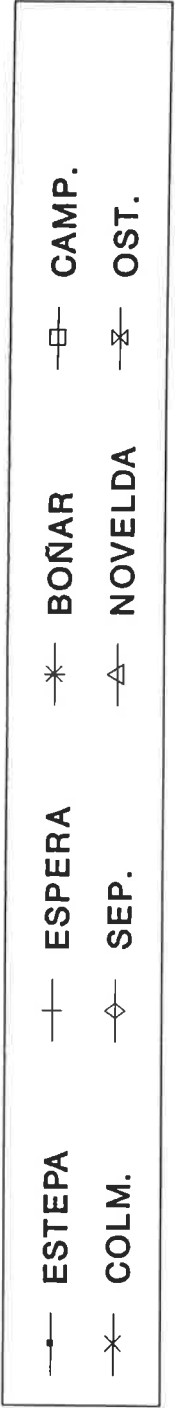
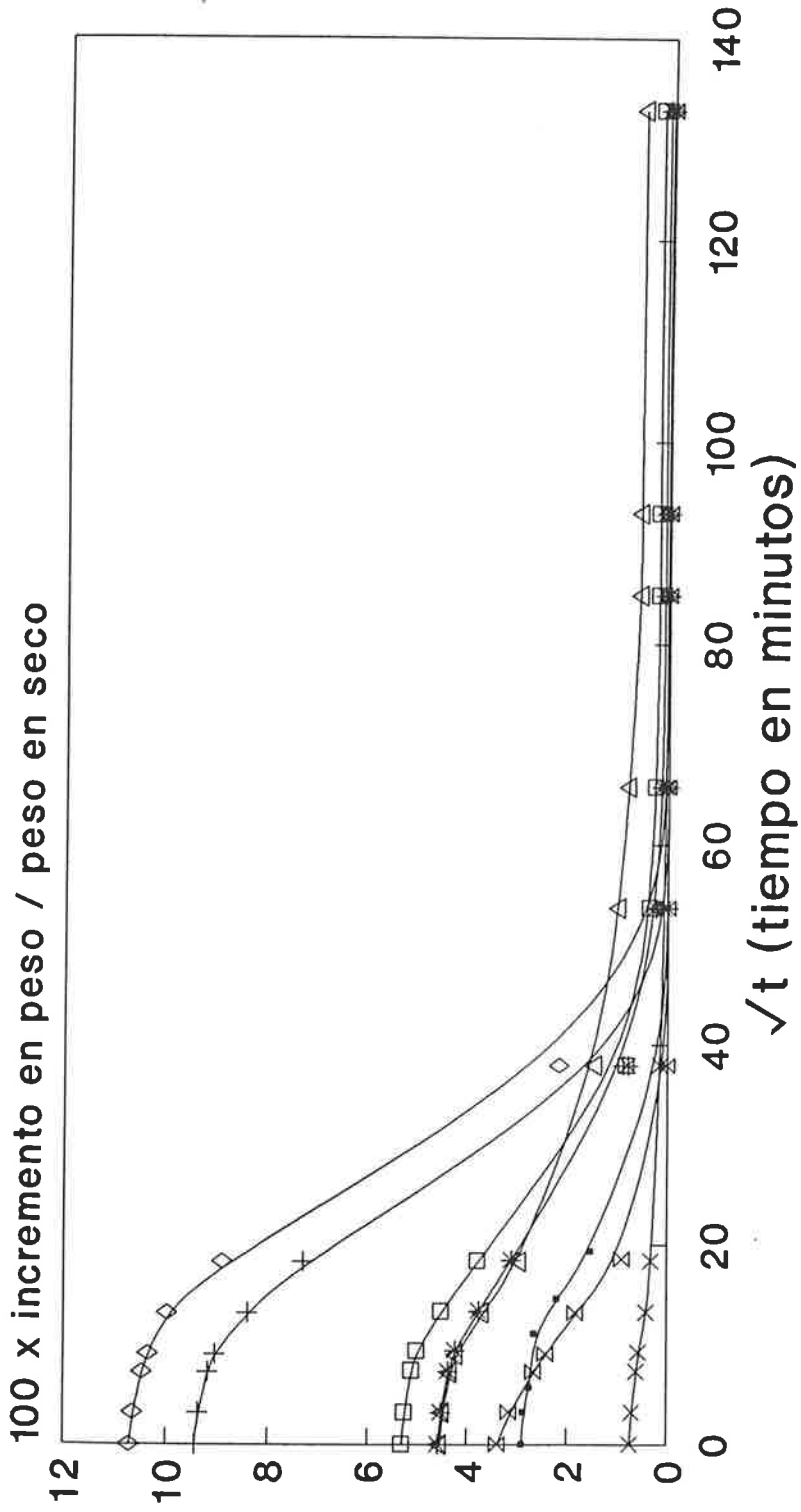


—●—	PAL.	—+—	CAMP.	—*—	ESTEPA	—□—	COLM.
—x—	NOVELDA	—◇—	OST.	—x—	SEPULVEDA		

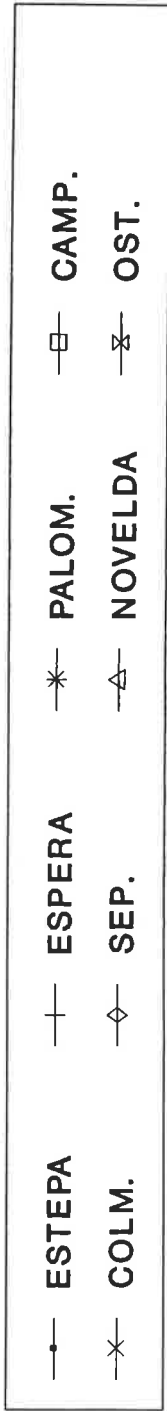
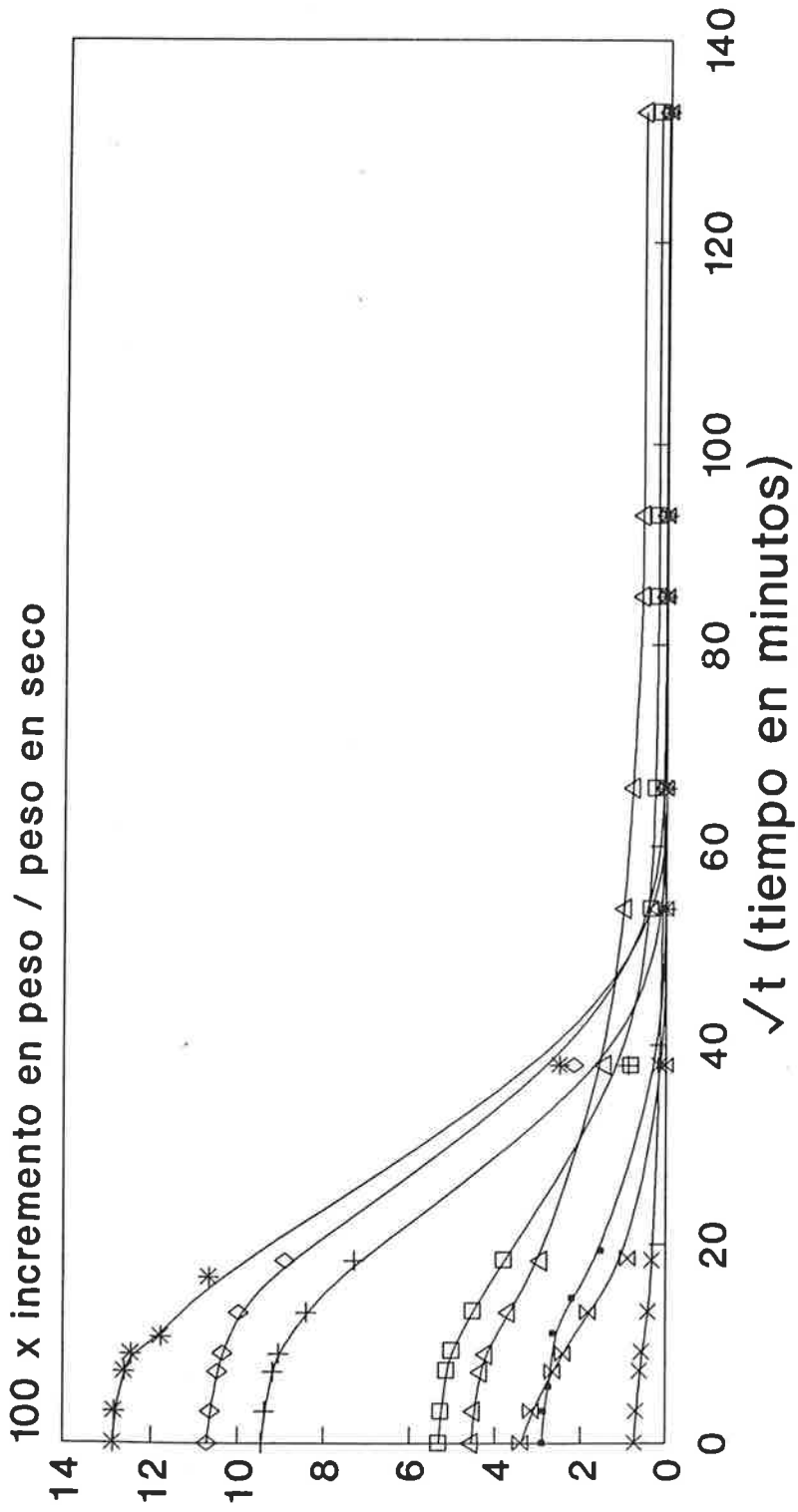
# CURVAS DE ABSORCION TODOS LOS TIPOS DE ROCA



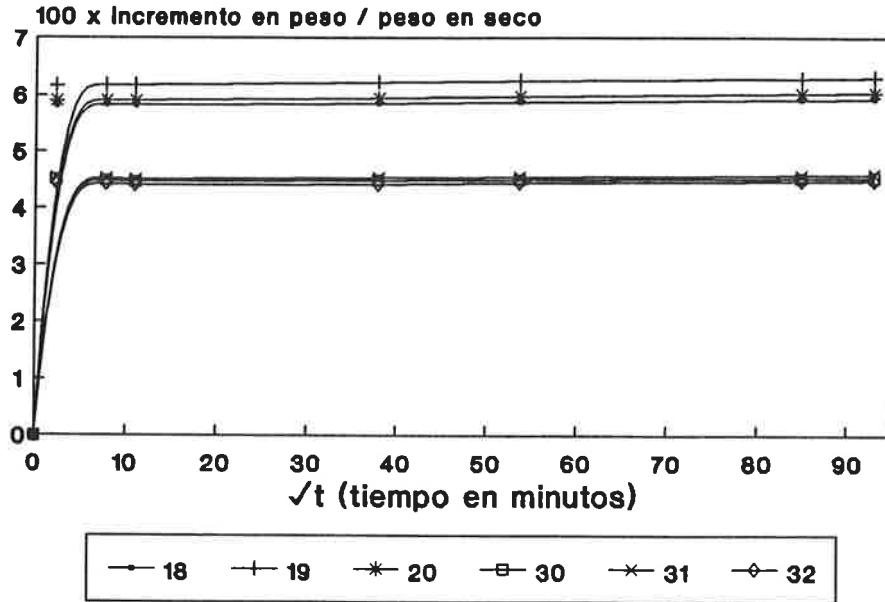
# CURVAS DE EVAPORACION TODOS LOS TIPOS



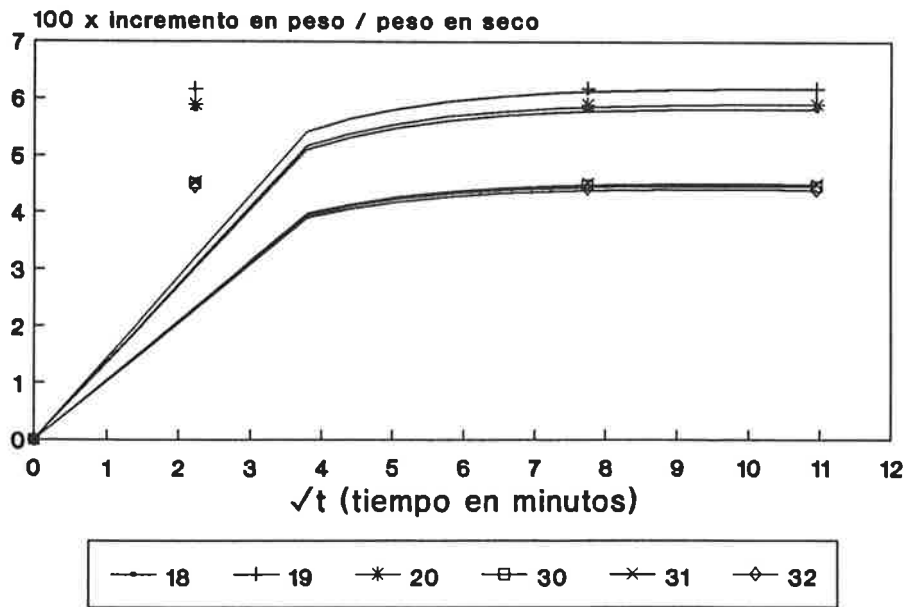
# CURVAS DE EVAPORACION TODOS LOS TIPOS



### CURVAS DE ABSORCION NOVELDA NV-42

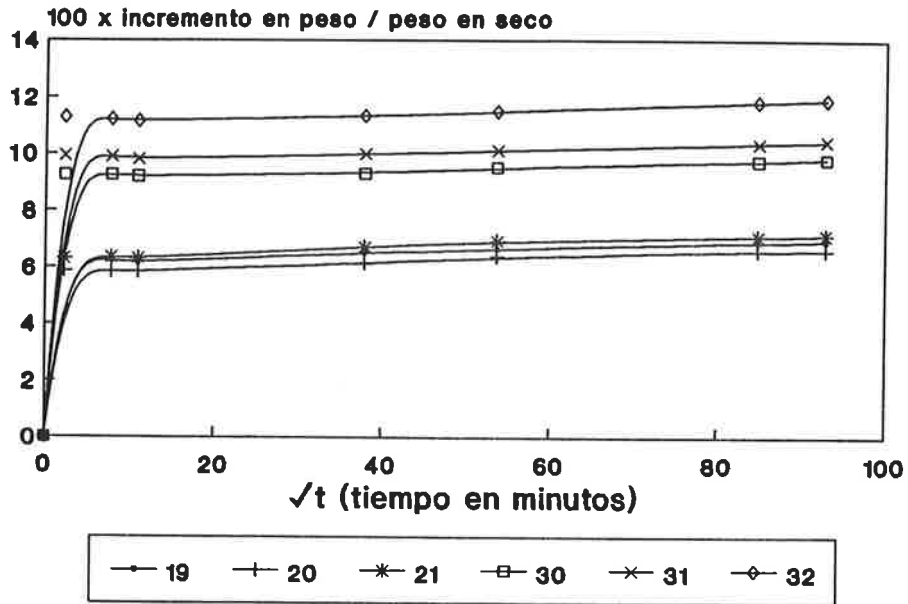


### CURVAS DE ABSORCION NOVELDA NV-42

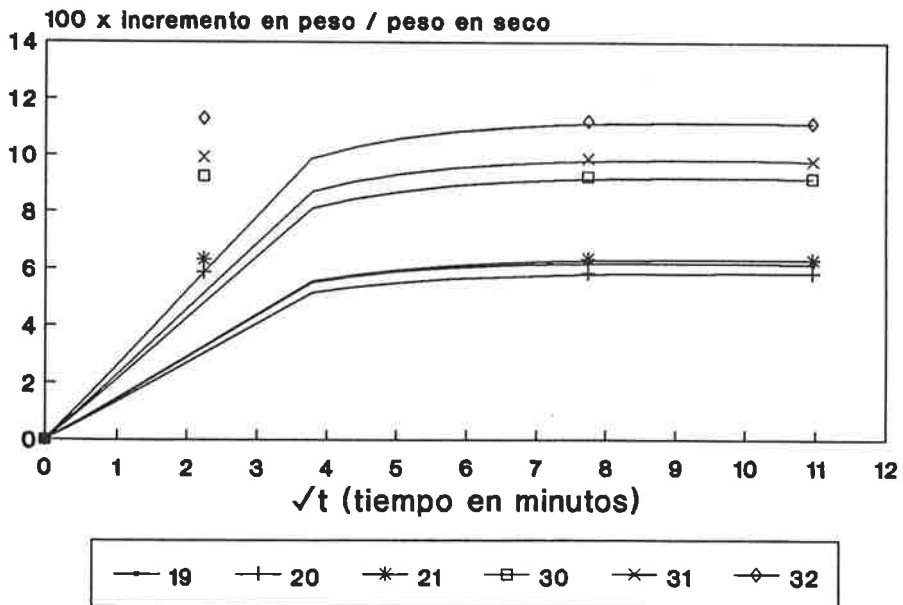




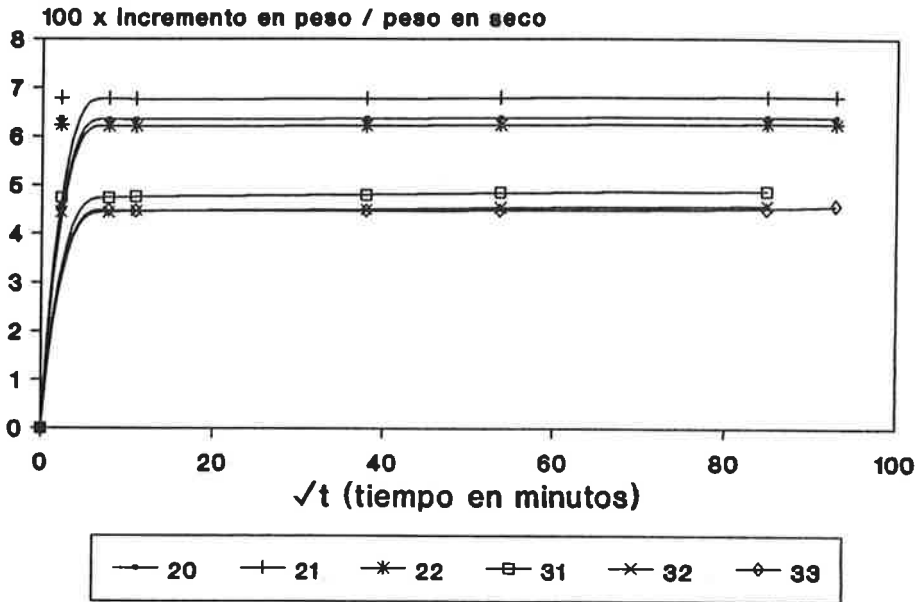
### CURVAS DE ABSORCION SEPULVEDA SL-38



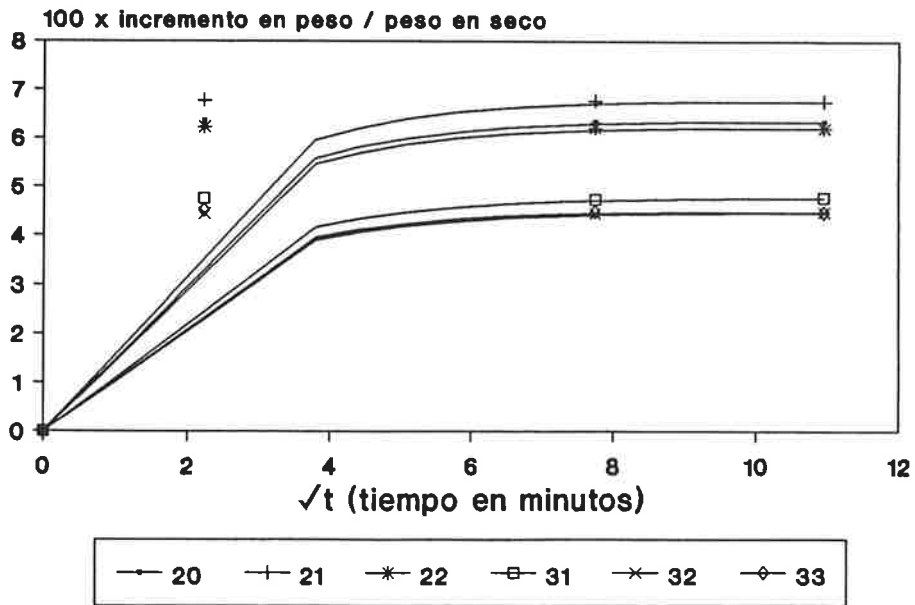
### CURVAS DE ABSORCION SEPULVEDA SL-38



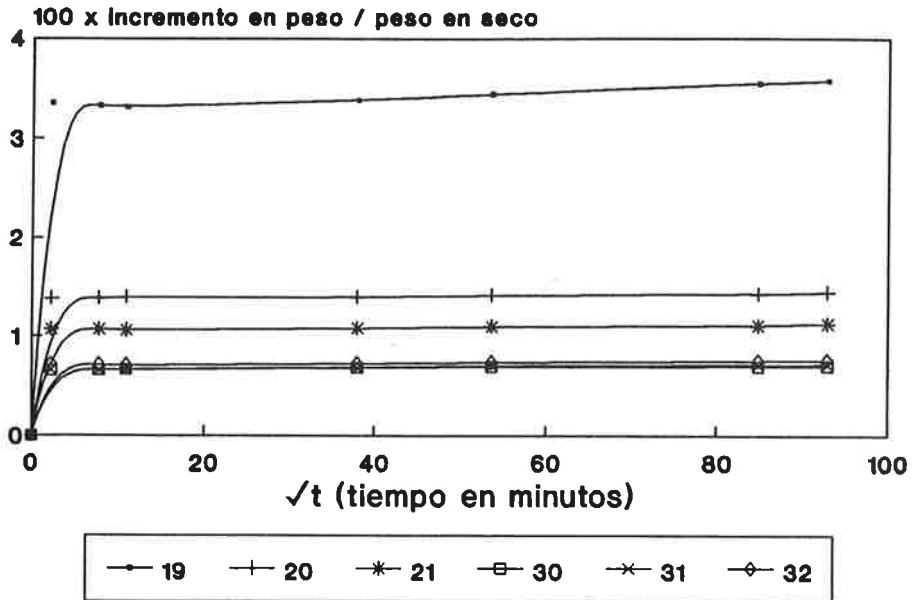
**CURVAS DE ABSORCION  
CAMPASPERO CM-36**



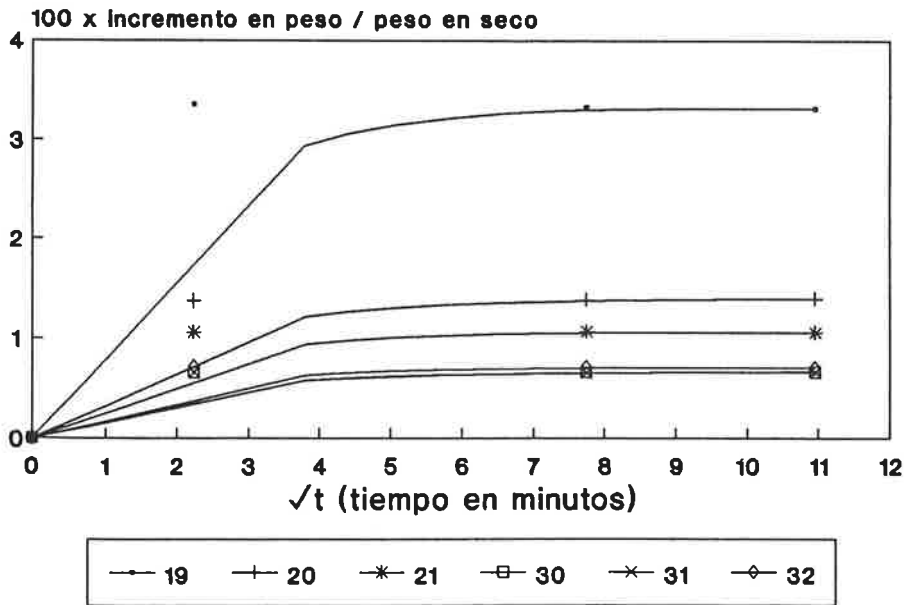
**CURVAS DE ABSORCION  
CAMPASPERO CM-36**



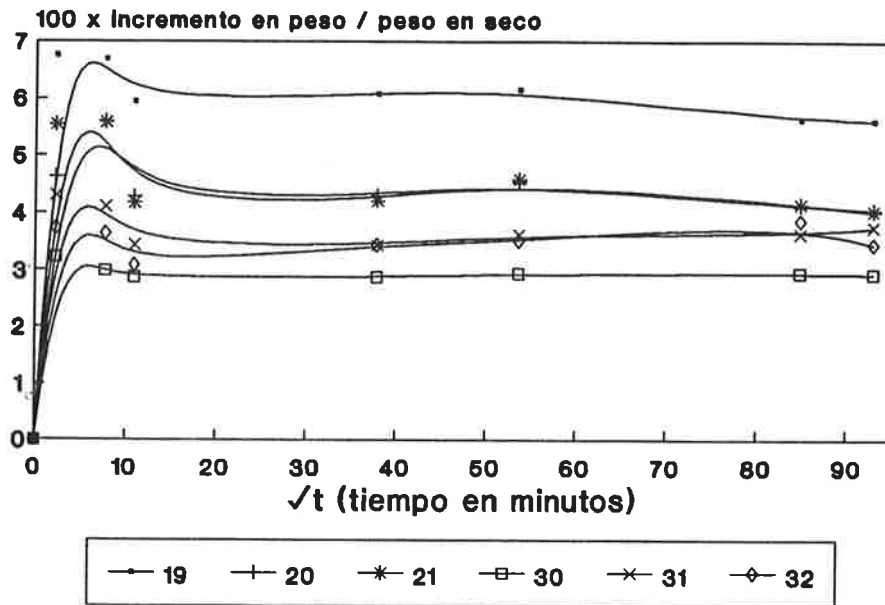
### CURVAS DE ABSORCION COLMENAR CL-37



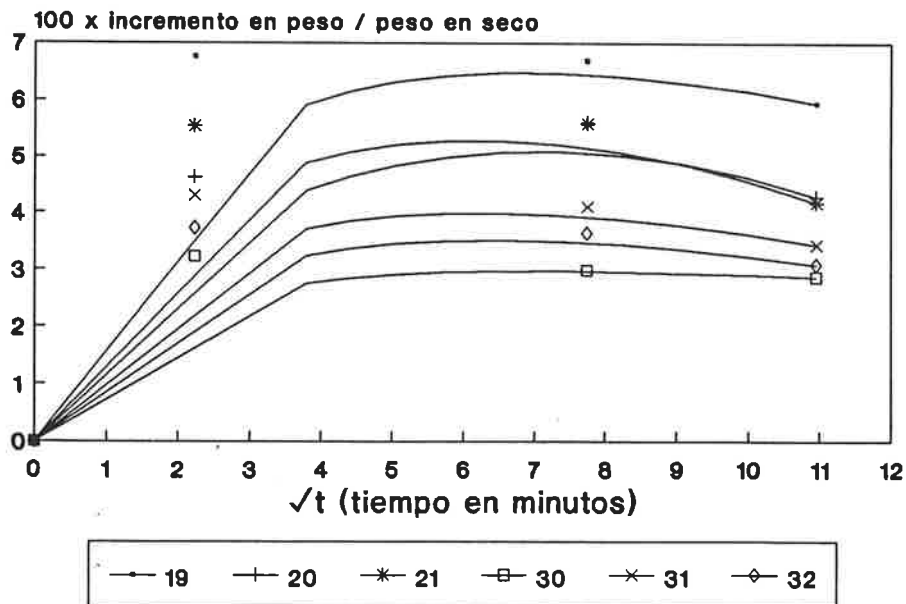
### CURVAS DE ABSORCION COLMENAR CL-37



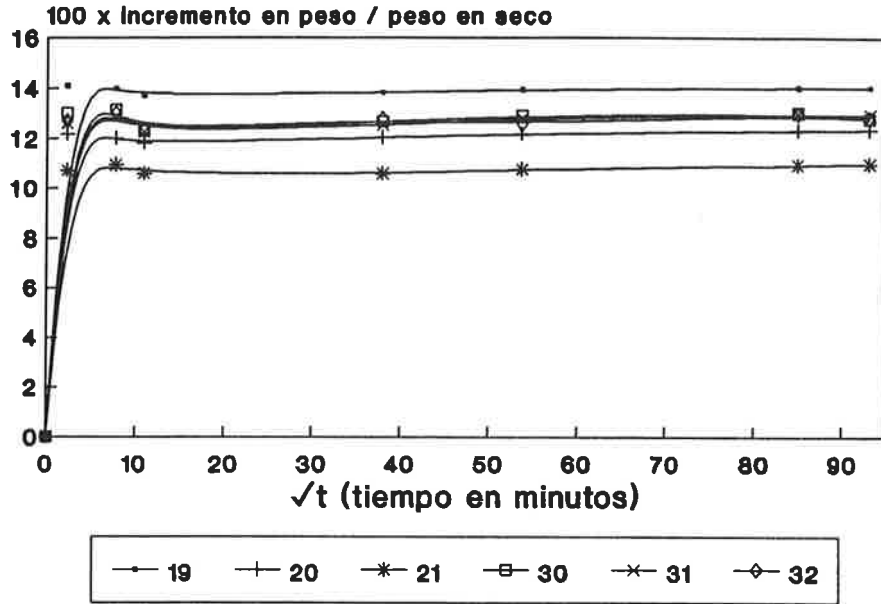
### CURVAS DE ABSORCION OSTIONERA OS-41



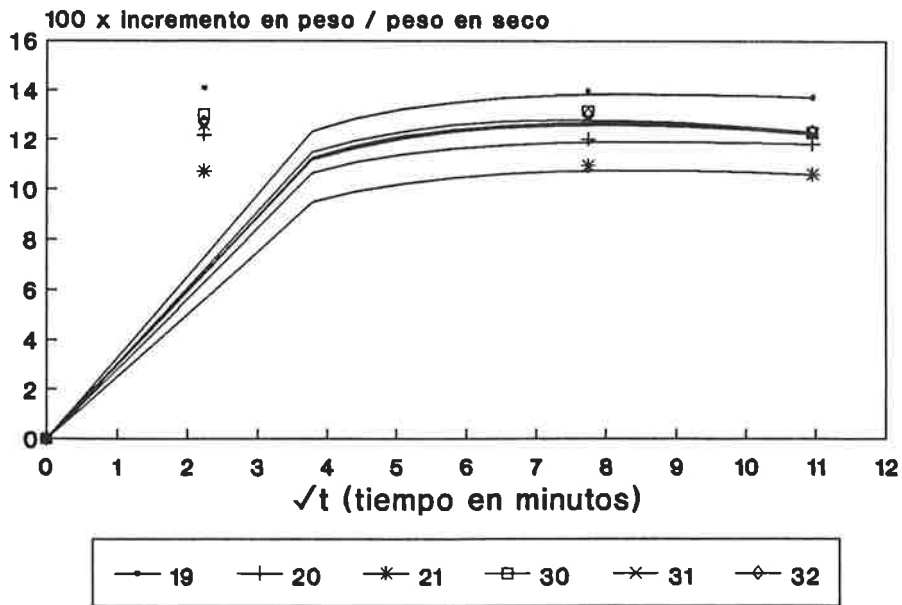
### CURVAS DE ABSORCION OSTIONERA OS-41



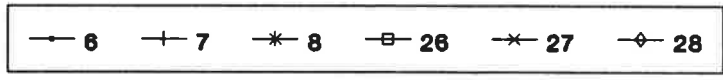
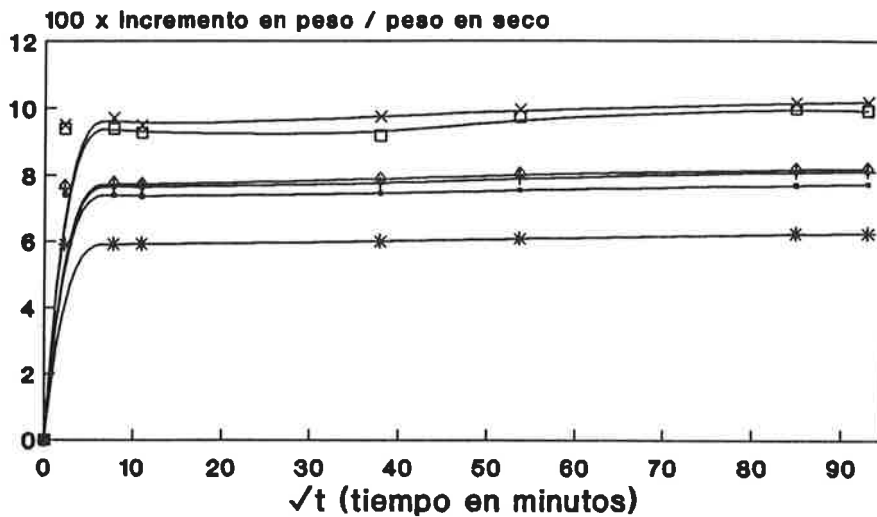
### CURVAS DE ABSORCION PALOMERA PL-40



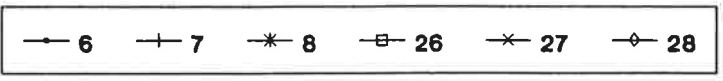
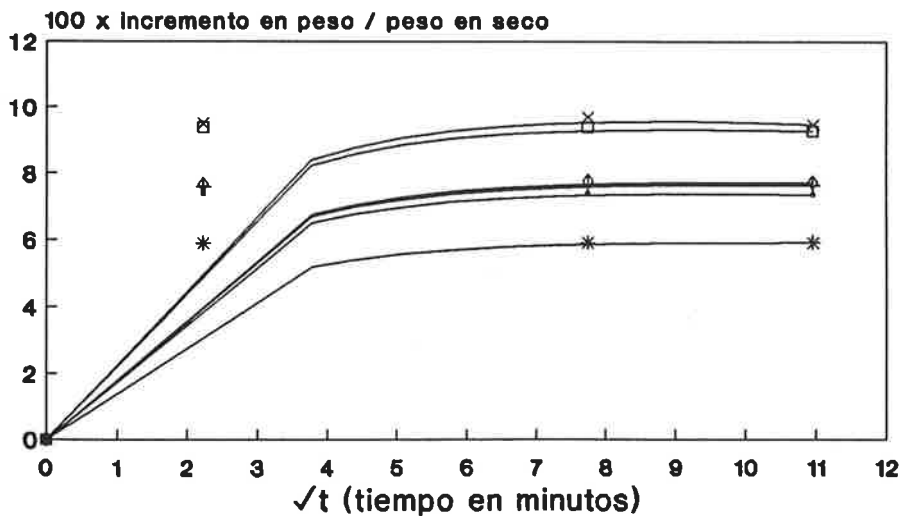
### CURVAS DE ABSORCION PALOMERA PL-40



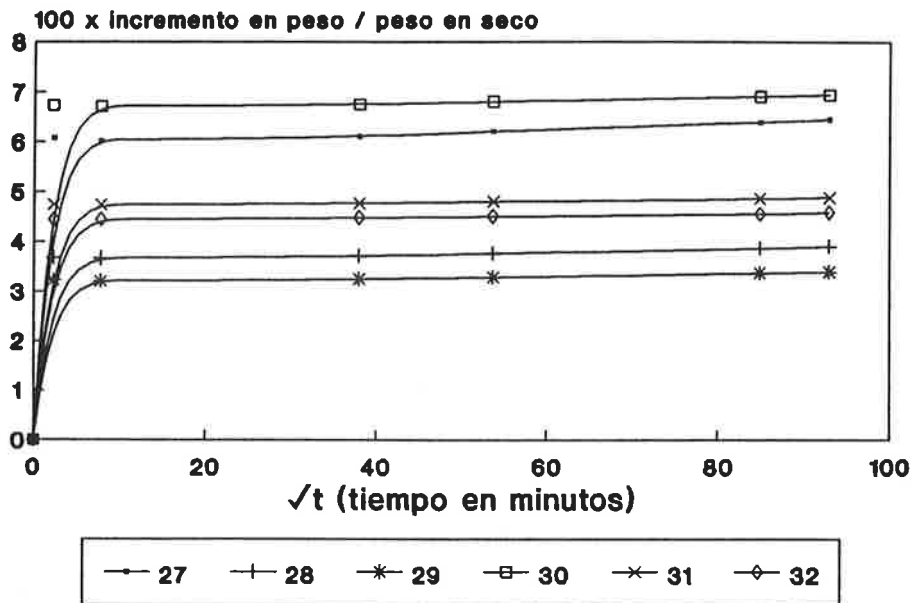
### CURVAS DE ABSORCION ESPERA EP-43



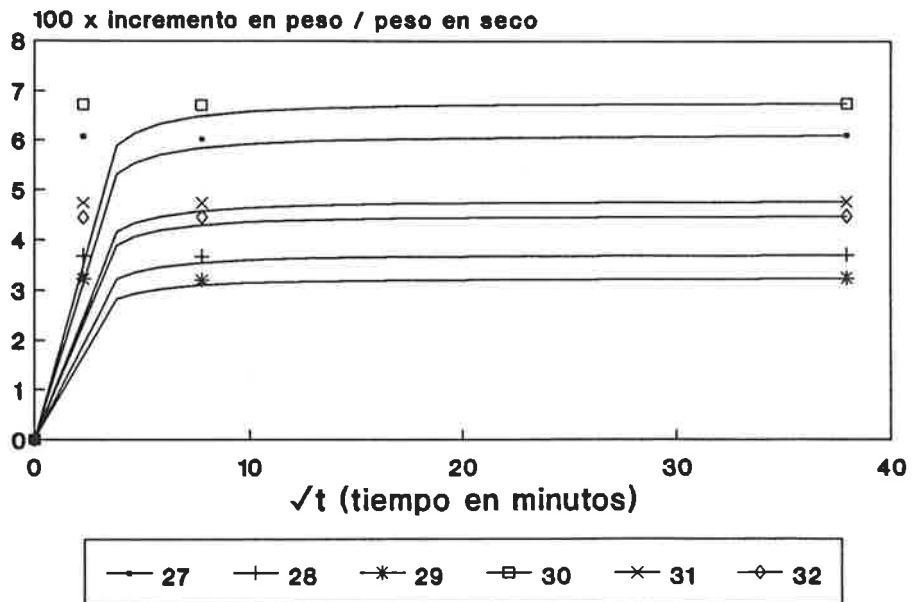
### CURVAS DE ABSORCION ESPERA EP-43



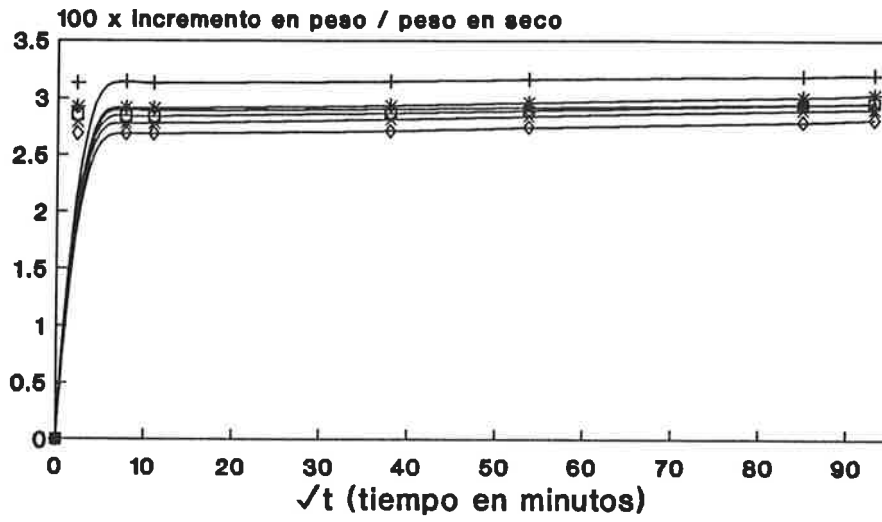
### CURVAS DE ABSORCION BOÑAR BO-35



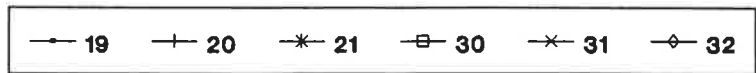
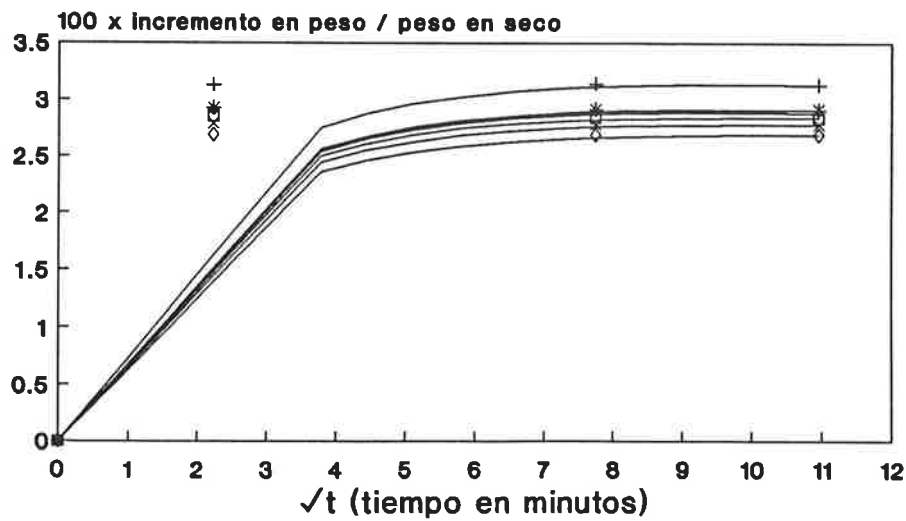
### CURVAS DE ABSORCION BOÑAR BO-35



### CURVAS DE ABSORCION ESTEPA ES-39

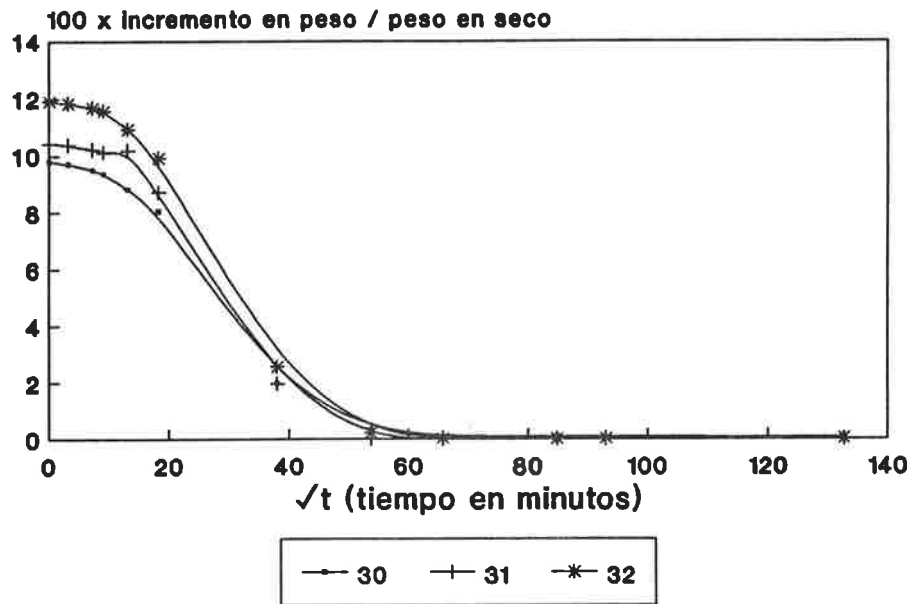


### CURVAS DE ABSORCION ESTEPA ES-39

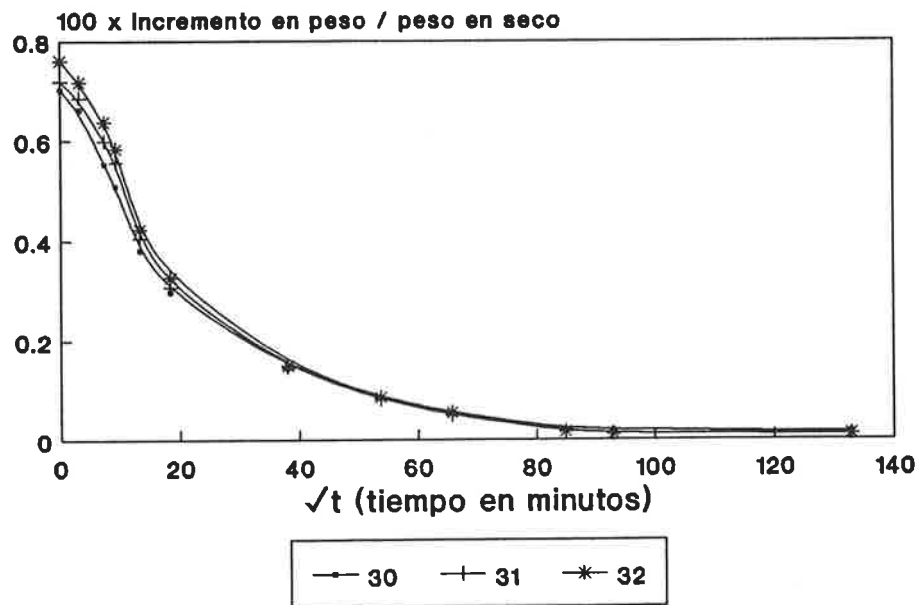




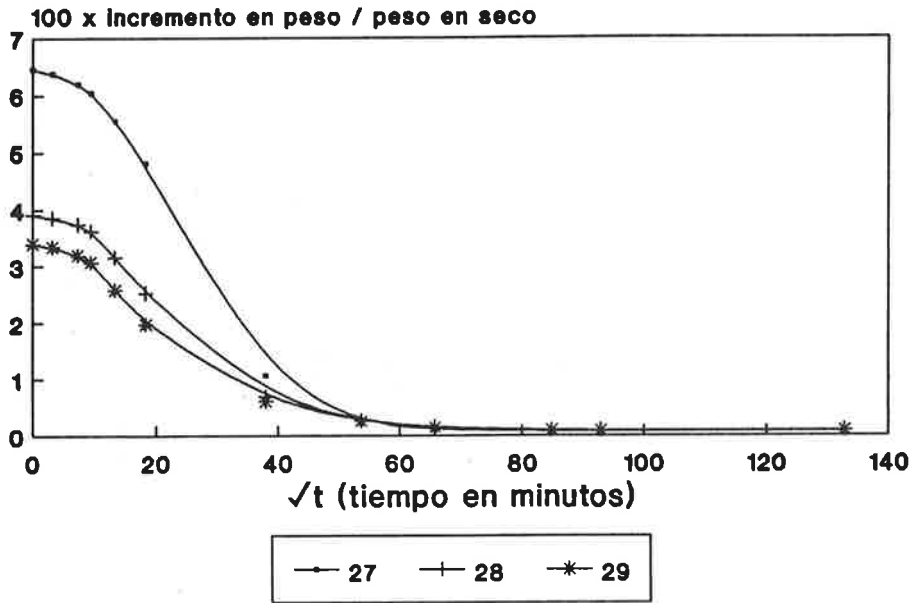
### CURVAS DE EVAPORACION SEPULVEDA SP-38



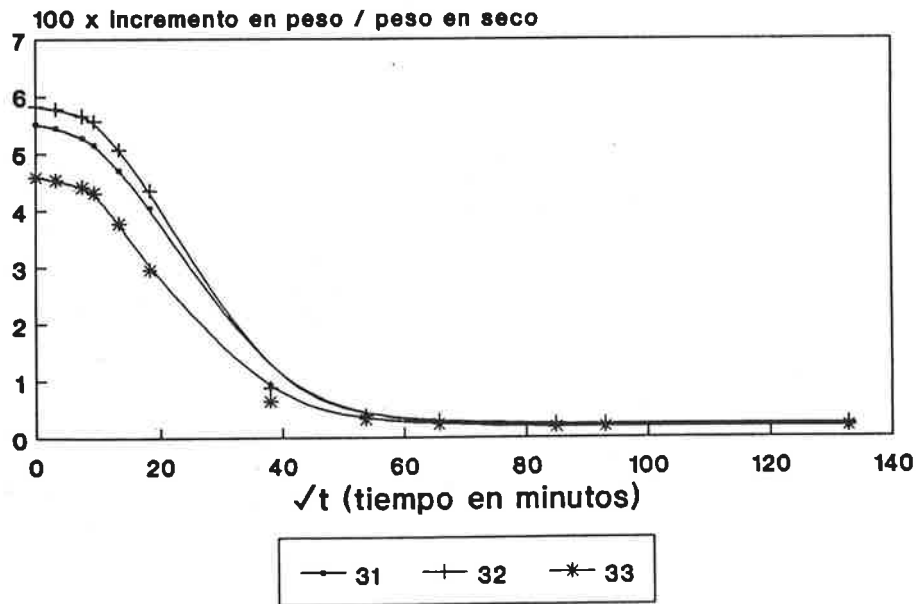
### CURVAS DE EVAPORACION COLMENAR CL-37



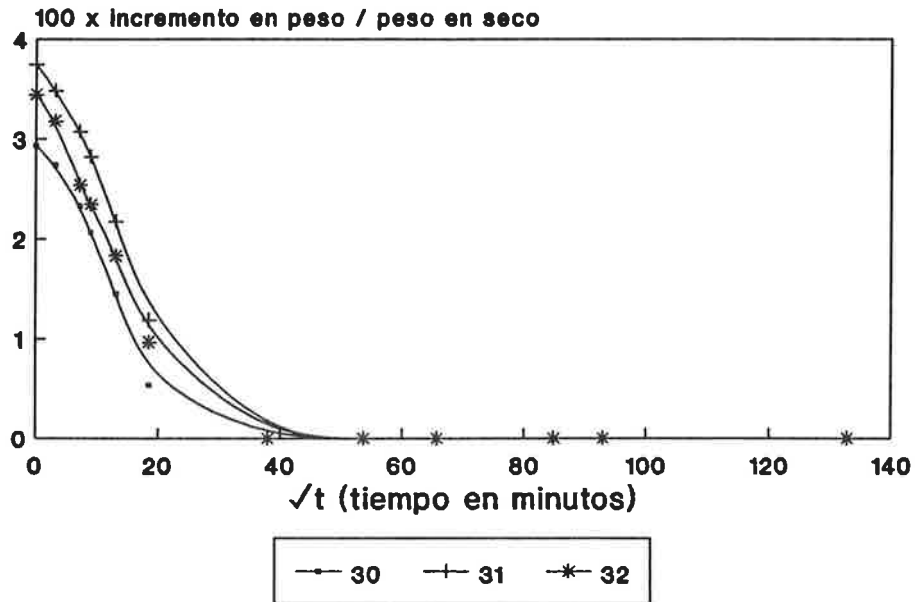
### CURVAS DE EVAPORACION BOÑAR BO-35



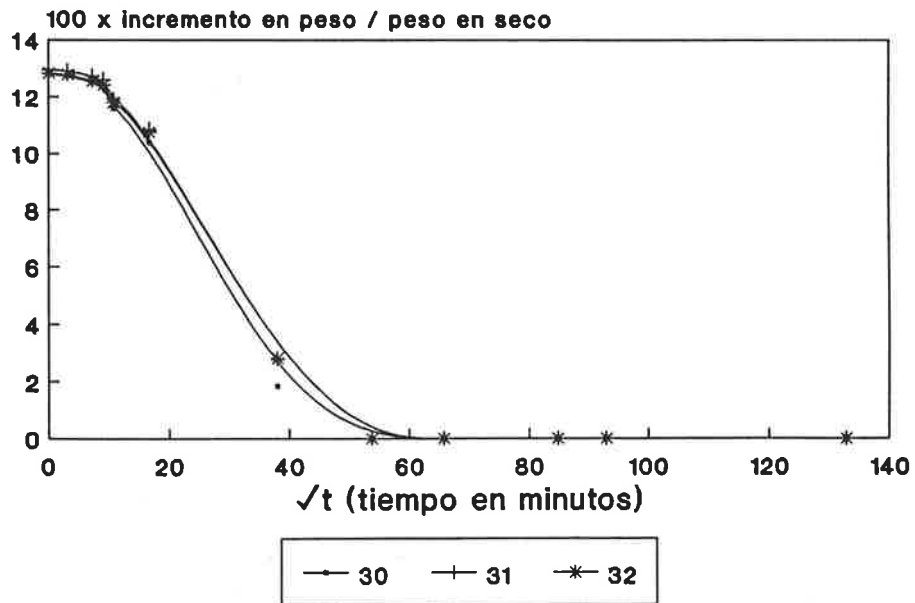
### CURVAS DE EVAPORACION CAMPASPERO CM-36



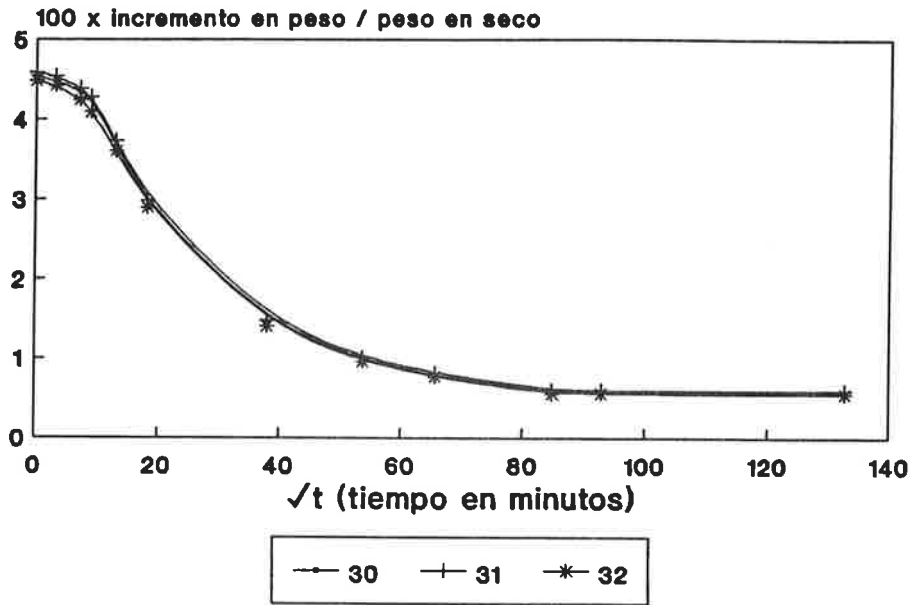
### CURVAS DE EVAPORACION OSTIONERA OS-41



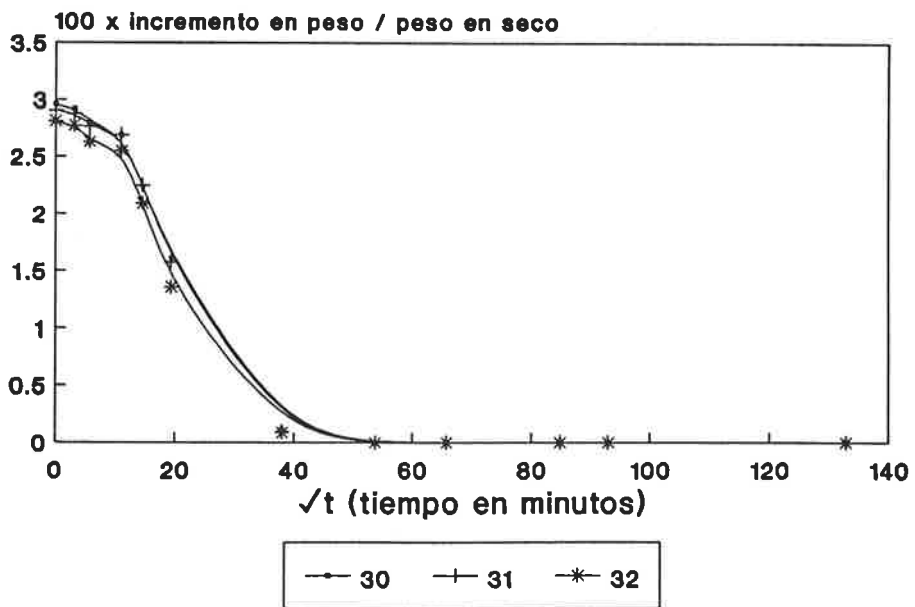
### CURVAS DE EVAPORACION PALOMERA PL-40



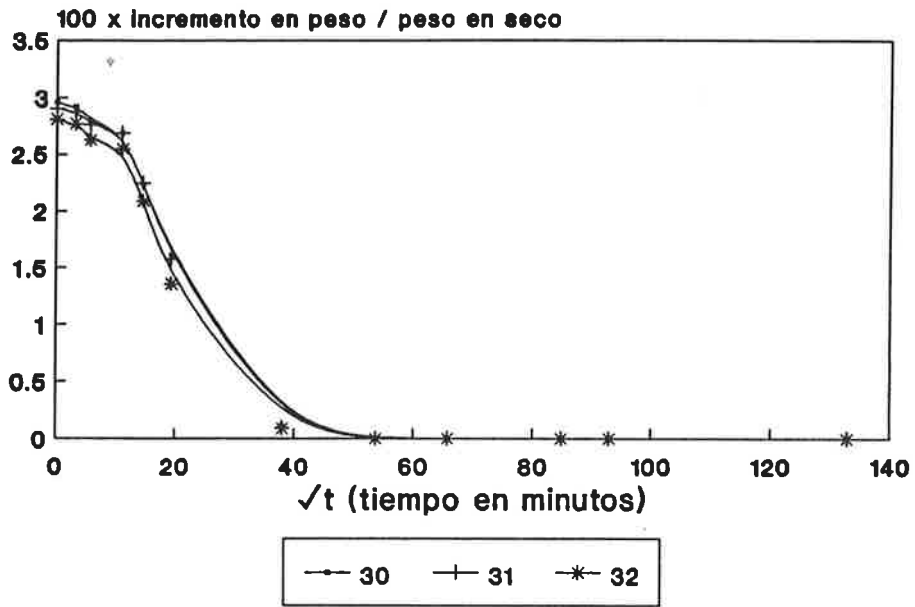
### CURVAS DE EVAPORACION NOVELDA NV-42



### CURVAS DE EVAPORACION ESTEPA ES-39



### CURVAS DE EVAPORACION ESTEPA ES-39



## 2.3.5. CARACTERIZACION CROMATICA

### 2.3.5.1. Introducción

Para la realización de la medida del color de las distintas especies se ha utilizado la denominada Carta Munsell de colores, publicada por la Geological Society of America (Rev. 1984), en la que la referencia cromática de la muestra viene representada en función de 3 parámetros: tinta, claridad e intensidad (grado de saturación) del color.

Este tipo de medida, si bien es subjetiva debido al procedimiento de observación humana (no cuantificable), es la más aceptada a nivel mundial en el mundo científico para la caracterización cromática, bien sea de rocas, suelos o cualquier otro material.

El método es especialmente válido e interesante para determinar los grados de alteración sufridos por una roca bajo ciertas condiciones de ensayo. En efecto, la variación cromática es un buen indicador de deterioro, ya que una alteración de los minerales de la roca, ya sea composicional o textural, implica la pérdida de brillo o la aparición de óxidos u otros minerales cromóforos.

### 2.3.5.2. Metodología

El color de cada una de las muestras, tres por cada tipo de variedad pétrea, ha sido determinado mediante la carta de colores Munsell, comparando el aspecto cromático de las mismas con las láminas referenciadas en dicha carta-modelo. Para eliminar grados de subjetividad se ha procedido a la medida del color por dos personas diferentes.

Como se ha mencionado anteriormente, el color viene definido en función de tres parámetros:

#### Tinta

Se diferencian, básicamente, diez dominios:

- Rojo (R)
- Rojo púrpura (RP)
- Púrpura (P)
- Azul púrpura (PB)
- Azul (B)
- Azul verdoso (BG)
- Verde (G)
- Verde amarillento (GY)

- Amarillo (Y)
- Rojo amarillento (RY)

### Claridad

La determinación de este parámetro se realiza sobre un eje vertical que va desde el blanco (1), en la parte superior, hasta el negro (10), en la parte inferior. Lógicamente, en las posiciones intermedias se sitúan distintos grises, más claros (hacia arriba) o más oscuros (hacia abajo).

### Intensidad

Una vez definidas la tinta y la claridad, se especifica la intensidad o grado de saturación: muy pálido (1), pálido (2), ...

#### 2.3.5.3. Resultados

Aplicando el método anteriormente descritos a los distintos tipos de piedra estudiados se han obtenido los resultados plasmados en la siguiente tabla:



TIPO DE PIEDRA	DESCRIPCION	REF. MUNSELL
BOÑAR	Pardo rojizo	10 YR 9/2
CAMPASPERO	Blanco grisáceo	8 (very light grey)
COLMENAR	Blanco rosáceo	10 YR 9/1
ESPERA	Amarillo ocre	10 YR 8/1
ESTEPA	Blanco rosáceo	9 (white)
NOVELDA (Var. Bateig Azul)	Amarillo grisáceo	7 (light grey)
OSTIONERA	Pardo rojizo	10 YR 6/6
PALOMERA	Blanco amarillento	10 YR 9/2
SEPULVEDA	Crema rosado	5 YR 9/2

## 2.4. Alterabilidad de la roca

### 2.4.1. GENERALIDADES

En términos generales, para establecer el grado de alteración de la piedra en una obra monumental, muchas veces es suficiente un minucioso examen visual, si bien en bastantes circunstancias, son necesarias medidas cuantitativas mediante ensayos "in situ" y, más frecuentemente, en el laboratorio, debido a que los ensayos a la "intemperie" requieren un excesivo período de realización. Esto a veces ofrece serias dificultades, pues las diversas piedras pueden presentar numerosos tipos distintos de alteración, y un ensayo apropiado para un tipo de piedra o de alteración puede no ser el más idóneo para otro.

En cualquier caso, para conocer el modelo de evolución (alterabilidad) de la roca frente a los distintos ambientes, que van a modificar el modelo de equilibrio inicial, es fundamental realizar ensayos de alteración acelerada y repetir algunos ensayos ejecutados previamente a la alteración (ensayos postalteración).

Para seleccionar estos ensayos postalteración es necesario guiarse de acuerdo con algunos criterios de recomendación. Por ejemplo, el proceso progresivo de alteración de la piedra ocurre en dirección perpendicular a la superficie expuesta de la misma, es decir

en profundidad. Como consecuencia, sólo serán de interés, en principio, aquellos ensayos capaces de valorar la diferente alteración en las diversas capas (superficial más alterada, media y zona interior sana), teniendo en cuenta que el espesor de la capa más alterada es muy pequeño, del orden de unos milímetros. No serán, pues, válidos ensayos que midan propiedades derivadas de la masa o que requieran un espesor de la capa de alteración superior al existente. Tal será el caso de ensayos como los de determinación de la densidad y del coeficiente de saturación, los ensayos mecánicos o aquellos que midan la dilatación térmica y debida al agua. Muchos de ellos necesitan o muestras más grandes o un número excesivo de ellas.

Los ensayos de alteración acelerada son imprescindibles para valorar el tipo y la intensidad de alteración, y conviene hacerlos en su totalidad.

#### 2.4.2. ENSAYOS DE ACELERADOS DE ALTERACION

En general, los ensayos de alteración consisten en la exposición sistemática de muestras de características específicas en un ambiente conocido, con el fin de estudiar las alteraciones o evaluar posibles tratamientos de protección. En un ámbito más amplio, cabría considerar las experiencias en atmósferas conocidas que englosarían, además, aquellas experiencias o ensayos que pretenden investigar los

mecanismos de alteración. Estos ensayos últimos se podrían clasificar en tres grupos:

- a) Ensayos a la intemperie o de exposición al exterior
- b) Ensayos a la intemperie o de acción acelerada
- c) Ensayos en atmósferas controladas

En éstos últimos se pueden distinguir en función del grado de alteración dos grupos:

- c<sub>1</sub>) Ensayos de simulación.
- c<sub>2</sub>) Ensayos de alteración acelerada

Los ensayos c<sub>2</sub>) se basan en una acción violenta y controlada en el tiempo de los principales factores de alteración. Son los ensayos que normalmente se realizan para evaluar la durabilidad de materiales tratados o sin tratar, así como la eficacia de los procedimientos utilizados en el tratamiento.

En la bibliografía consultada, existe unanimidad respecto a los principales tipos de ensayos de alteración acelerada, aunque no existe la misma concordancia respecto a las condiciones de realización de los mismos:

- a) Ensayo de heladicidad (resistencia al hielo-deshielo)
- b) Ensayo de cristalización de sales (resistencia a las

sales)

c) Ensayos de humectación-secado (resistencia al agua)

d) Ensayo de irradiación (resistencia a la radiación UV)

e) Ensayos termohigrométricos (resistencia a la variación de temperatura y humedades relativamente altas)

f) Ensayos de ataque químico (resistencia a soluciones ácidas y resistencia a atmósferas contaminadas)

#### 2.4.2.1. Ensayo de heladicidad

##### **Introducción**

Este ensayo, también denominado de ciclos hielo-deshielo permite determinar la resistencia o durabilidad de una roca frente a la acción progresiva y secuencial del hielo.

Este ensayo es útil para determinar, sobre todo, la durabilidad de aquellos tipos de piedra que van a estar expuestas a unos cambios climáticos fuertes (áreas de montaña, zonas sometidas a frecuentes e intensas escarchas, etc.)

### **Principio básico**

El ensayo reproduce, de forma acelerada, las variaciones climáticas naturales de humedad y temperatura, creándose así unas condiciones más severas que las naturales con el fin de obtener resultados en un menor intervalo de tiempo.

Los ciclos de ensayo incluyen por lo general una fase de hielo (al aire o en agua) y otra de deshielo (el medio suele ser aire o agua).

A la hora de definir el método de ensayo se han de tener en cuenta los siguientes factores:

- a) Procedimiento de la inmersión
- b) Condiciones P-T-HR.
- c) Número, forma y tamaño de las probetas
- d) Número de ciclos
- e) Procedimiento operacional

a) **Procedimiento de la inmersión.**

Previamente a la fase de hielo, la probeta debe estar saturada en agua, utilizándose para este menester la impregnación, hasta saturación de la roca (pesadas sucesivas menor del 1%), mediante inmersión total, libre, de la muestra en agua.

Se ha escogido el este procedimiento, inmersión libre, por su sencillez y mayor similitud con los procesos naturales de impregnación.

c) **Número, forma y tamaño de las probetas**

Para que el ensayo sea representativo se han de ensayar al menos 3 probetas, y por comodidad y rapidez se han aprovechado las probetas resultantes del ensayo de coeficiente de absorción.

Las probetas tienen así forma regular, cúbica, de 7 cm de lado.

d) **Número de ciclos**

Debe corresponderse con el menor número posible, siempre que garantice unos niveles de deterioro, variables, secuenciales y fácilmente detectables. Se ha adoptado un número de 25 ciclos, suficientes para lograr unas alteraciones macroscópicas o fácilmente detectables por la medida de los indicadores de alterabilidad.

b) **Condiciones P-T.**

Hemos mencionado anteriormente que se adopta el sistema de inmersión libre (presión atmosférica), adoptándose para la fase de impregnación inicial este mismo mecanismo, ya que representa mejor las condiciones naturales (monumento) de los procesos de deterioro. En la fase de hielo, al realizarse al aire, la probeta estará igualmente sometida a la presión atmosférica.

Por lo que respecta a la temperatura, es uno la variable más importantes en la fase de hielo, sometiéndose la probeta saturada durante un cierto número de horas a temperaturas de  $-15 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , dentro de un congelador, precisando que exista distribución uniforme de la temperatura.

Así mismo, en la fase de deshielo se ha elegido el medio líquido a temperatura ambiente ( $, 20-25^{\circ}\text{C}$ ), ya que se obtienen



ventajas tales como:

- El deshielo es simultáneo con la impregnación de la roca.
- Se logra mantener una temperatura más uniforme superficial para toda la muestra, pudiéndose incluso controlar más fácilmente la variación de temperatura para pasar de una fase a otra.

**g) Procedimiento operacional**

Si bien existen normativas y propuestas de ensayos al respecto, Rilem Test V.3, NF B 10.513, y ASTM C 67-80, entre otros, se ha adoptado un método específico para la realización del ensayo a los nueve tipos de roca estudiados, modificado de UNE 22.184 en el sentido de la periodicidad de los controles (variación de peso).

Dicho procedimiento es el reflejado en el siguiente cuadro:

El control simultáneo del ensayo se realiza mediante pesadas cada ciclo. Como indicador de alterabilidad típico, para este tipo de ensayo, se utiliza la medida de FR.

CICLOS HIELO-DESHIELO

HORA	MEDID	NORMA UNE 22.184
0		INMERSION EN AGUA a Tamb (15-20°C) (4 HORAS)
1		
2		
3		
		INICIO DEL CICLO 1 ER. DIA <i>MEDIDA</i>
4		CONGELACION A - 15 °C (20 HORAS)
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24=0		INMERSION EN AGUA a Temp. amb.
1		

**Observaciones:**

- \* Primeramente se desecarán las muestras en estufa a 110°C hasta peso constante (variación pesada consecutiva < 0,2%). **Pesada inicial seca.**
- \* Las muestras se saturarán previamente en agua mediante inmersión libre durante 5 días. **Pesada inicial húmeda.**
- \* **Medida cada ciclo (Húmedas a las que se secará con un paño húmedo).**

**Nº de probetas:** 3 probetas X-30-31-32 // **Tamaño:** 7x7x7 cms.

**Nº de ciclos:** 25 ciclos.

#### 2.4.2.2. Humedad-sequedad

##### Objetivo

El objetivo fundamental de este ensayo es reproducir las condiciones de humidificación de la piedra por la lluvia y por las variaciones climáticas de temperatura.

##### Técnica

La resistencia al agua de las piedras se caracteriza por la pérdida de peso o reducción del volumen aparente y por la resistencia mecánica de las piedras sometidas a un número determinado de ciclos de humidificación y secado.

De esta forma, la metodología de ensayo utilizada ha sido de nuestra elaboración, basada en la investigación del grupo de trabajo, ya que no existe ninguna norma que regule dicho ensayo. La duración del ensayo se estima en 25 ciclos y se realiza de acuerdo con la forma adjunta.

# CICLOS HUMEDAD-SEQUEDAD

HORA	MEDID	
0		ENFRIADO A TEMP. AMB. EN DESECADOR 1 HORA Y AL FINAL <i>PESADA CADA CICLO</i>
1		<i>INMERSION EN AGUA DESMINERALIZADA A 20±5°C durante 5 HORAS</i>
2		
3		
4		
5		
6		<b>SECADO DE PROBETAS EN ESTUFA A 60 ± 5° C  (18 HORAS)</b>
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24=0		ENFRIA A TEMP. AMB. 1 HORA Y PESADA <i>AL FINAL</i>
1		INMERSION EN AGUA DESMINER. (5 HORAS)

**Observaciones:**

- \* **Renovar agua desmineralizada diariamente.**
- \* **Pesada diaria.**

**Nº de probetas:** 4 probetas X-23-24 X-25-26 // **Tamaño:** 5 X 5 X 2 cms.

**Nº de ciclos:** 25 ciclos. 5 X 5 X 3 cms.

Hay que destacar, que la experiencia demuestra que en

ciertos casos, para un mismo número de ciclos, este ensayo produce más alteración que el de heladicidad, aunque en principio las condiciones sean más agresivas en este último.

#### Especificaciones de muestras

Las muestras utilizadas para este ensayo han sido de forma prismática y de dimensiones 5 x 5 x 2 cm y 5 x 5 x 3 cm, seleccionando dos muestras de cada dimensión por piedra.

#### 2.4.2.3. Ensayo de Cristalización de Sales

#### **Introducción**

Dentro de los ensayos acelerados de envejecimiento, el estudio de los daños experimentados por la muestra a partir de este ensayo proporciona una idea bastante aproximada de la vulnerabilidad de la roca frente a los fenómenos de hidratación y cristalización que tienen lugar, generalmente dentro del sistema poroso de la roca, bajo determinadas condiciones naturales del medio ambiente. Ejemplos de estas condiciones serían, bien la presencia de la roca dentro de un edificio en un ambiente salitroso, tal es su ubicación en una zona costera, o situación del monumento en una zona con una fuerte concentración en agentes contaminantes (límites altos de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO), que se corresponde con la ubicación del edificio en una gran ciudad o cercana a una zona con fuerte desarrollo industrial.

## **Principio básico**

El método se basa en generar la cristalización de sales, las cuales se aportan mediante la inmersión total o parcial de la roca en una determinada solución acuosa de una sal (fase de impregnación), dentro de la roca, propiciando a través de sucesivos ciclos de secado-inmersión, la sobresaturación (cristalización) e hidratación de la sal.

A la hora de definir el método de ensayo se han de tener en cuenta los siguientes factores:

- a) Naturaleza de la sal
- b) Composición de la solución salina.
- c) Procedimiento de la inmersión
- d) Número, forma y tamaño de las probetas
- e) Número de ciclos
- f) Condiciones P-T-HR.
- g) Procedimiento operacional

a) **Naturaleza de la sal**

Para que los efectos del ensayo sean perceptibles, y por consiguiente fácilmente mesurables, la sal disuelta en el agua (hidratada) debe presentar una notable variación de volumen con respecto a la fase anhidra.

Además, tienen que ser productos fácilmente manejables, no tóxicos ni corrosivos.

Son usadas frecuentemente soluciones de sales sódicas (generalmente en forma de sulfatos o cloruros), así como magnésicas y amónicas, pudiéndose incluso realizar ciclos sucesivos en una y otra sal (Rossi Manaresi, R., 1981).

El ensayo propuesto en este Proyecto contempla la utilización de sulfato sódico decahidratado ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ), el cual experimenta un cambio del 308% en volumen desde la fase hidratada a la anhidra, por lo que cumple las condiciones prescritas con anterioridad.

b) **Composición de la solución salina**

Las concentraciones de sales más frecuentemente utilizadas son las del 10% (Rossi Manaresi, R., Sleater, Marshner) y 14% (Rilem, Alonso, F.J. et al, Niesel), existiendo incluso ensayos que experimentan las rocas sobre soluciones saturadas (ASTM, Alessandrini et al).

Se ha adoptado una concentración del 10%, teniendo en cuenta que los ensayos realizados con soluciones por encima de esta concentración son muy agresivos (sobre todo a bajas

temperaturas) y se pretende, que si bien el ensayo se realice de manera rápida, la velocidad de deterioro tenga una secuencia lo más lineal (o menos exponencial) posible en el tiempo, con el fin de analizar las curvas dinámicas de deterioro.

c) **Procedimiento de la inmersión.**

Existen varios tipos de impregnación de la roca: por inmersión total (Test V.1. a y b - RILEM) o por inmersión parcial (Test V.2., RILEM), niebla salina y penetración.

La primera de ellas posee la ventaja de su accesibilidad, y autocontrol de alguna de las variables del ensayo, tal es la homogeneidad en la temperatura de la solución de ataque, difícil de controlar sobre la solución que asciende por los capilares de la roca, si esta se encuentra expuesta en parte al aire.

Así mismo, la impregnación puede desarrollarse mediante vacío, a presión atmosférica o superior. Se ha escogido el segundo procedimiento, inmersión libre, por su sencillez y mayor similitud con los procesos naturales de impregnación.

d) **Número, forma y tamaño de las probetas**

Para que el ensayo sea representativo se han de ensayar al menos 4 probetas, a ser posible variando en ellas el tamaño (relación de la superficie específica con la intensidad del deterioro).



Se han escogido probetas, de forma regular, paralelepédica, previamente secadas y pesadas, de tamaños, 5x5x2 y 5x5x3 cm.

e) **Número de ciclos**

Debe corresponderse con el menor número posible, siempre que garantice unos niveles de deterioro, variables, secuenciales y fácilmente detectables. Se ha adoptado un número de 15 ciclos, suficientes para cubrir las necesidades empíricas preestablecidas.

f) **Condiciones P-T-HR.**

Hemos mencionado anteriormente que se adopta el sistema de inmersión libre (presión atmosférica), adoptándose para la fase de secado este mismo mecanismo, ya que representa mejor las condiciones naturales (sobre monumento) de los procesos de deterioro.

Por lo que respecta a la temperatura, es una de las variables más importantes a la hora de realizar el ensayo ya que de ella depende que se logre o no el secado de la muestra y por consiguiente se origine la precipitación de la sal por sobresaturación de la solución. Por otro lado una variación en la temperatura de la solución en la fase de impregnado puede variar la composición media de la solución, variando de esta manera la densidad de la misma y por consiguiente no lográndose la impregnación uniforme de la probeta.

Las temperaturas de secado más frecuentes son  $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$  y  $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , dependiendo de que la disponibilidad de estufas sea elevada. Se ha escogido la temperatura menor ( $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ) ya que, aunque requiera mayor tiempo de secado, ésta simula mejor las condiciones naturales de secado. Además, dicha temperatura es compatible con el ensayo de muestras tratadas con productos orgánicos, lo que no sucede con  $105^{\circ}\text{C}$ .

Para la fase de impregnado se adopta una temperatura de  $20 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , con el fin de estabilizar la composición de la solución.

Igualmente es conveniente establecer un nivel constante de humedad dentro de la estufa (por ejemplo en atmósfera saturada- HR 100%), lográndose este valor por el procedimiento descrito por Martin, A (1.990), por el cual se introduce media hora antes del secado un recipiente con agua (80-100 ml) dentro de la estufa a la temperatura de ensayo.

**g) Procedimiento operacional**

Si bien existe normativas y propuestas de ensayos al respecto, NORMA ASTM C 218, DIN 52.111, Tests V.1 a y b , y V.2 Rilem, entre otros, se ha adoptado un método específico para la realización del ensayo a los nueve tipos de roca estudiados.

Dicho procedimiento es el reflejado en el siguiente cuadro:

# CRISTALIZACION DE SALES

HORA	MEDID	
0		SECADO EN HORNO a 60 +/- 5°C
1		
2		
3		ENFRIADO A TEM. AMB. EN DESECADOR (20°C-25°C) (1 hora) y al final LAVADO Y PESADA DE LA MUESTRA (CADA 3 CICLOS)
4		COMIENZO 1 ER. DIA
5		<i>INMERSION EN LA SOLUCION ACIDA (Temp. a 20± 5°C) durante 2 horas</i>
6		SECADO EN HORNO A 60 ± 5° C DURANTE 21 HORAS
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24=0		
1		

## Observaciones:

- \* Renovar la disolución de sulfato sódico (soluc. al 10% de  $\text{SO}_4\text{Na}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )
- \* Medida cada 3 ciclos. (ciclos 3, 6, 9, 12 y 15)
- \* Lavado con agua corriente y secado con paño húmedo.

\* Se recomienda poner en la estufa de secado media hora antes un recipiente con 300 ml. de agua para controlar humedad.

N° de probetas:	4 probetas X-19-20-21-22	Tamaño: 2 de 5x5x2 cms.
N° de ciclos:	15 ciclos.	2 de 5x5x3

El control simultáneo del ensayo se realiza mediante pesadas cada 3 ciclos.

#### 2.4.2.4. Ataque con soluciones

##### Objetivo

No es necesario insistir en la gran importancia de la contaminación en la alteración de monumentos, con efectos que vienen a sumarse a los de los agentes meteorológicos, multiplicando enormemente el envejecimiento; los contaminantes más perjudiciales son gases ácidos capaces de reaccionar con los componentes básicos de la piedra. Hasta el momento actual, la investigación se ha centrado casi exclusivamente en el anhídrido sulfuroso que, si bien en la atmósfera o sobre la superficie de la piedra, puede transformarse en ácido sulfuroso o sulfúrico que reacciona con el carbonato cálcico. Una primera aproximación, para reproducir los mecanismos implicados en el laboratorio, consiste en simular el ataque químico con soluciones.

##### Técnica

Al no existir normativa para este ensayo, se ha realizado con una metodología propia del LOEMCO, que en otros materiales como en las pizarras, había dado muy buen resultado.

De esta manera, y previamente sumergidas las muestras en agua durante 24 horas se dispusieron en un recinto cerrado con una solución de  $H_2SO_3$  al 5% durante 28 días. Al cabo de 14 días se realizó una pesada y a los 28 días se volvió a pesar, con lo cual determinaremos las variaciones en peso de las muestras y sus alteraciones cromáticas y morfológicas por estimación visual.

#### Especificaciones de muestra

Las probetas ensayadas tienen forma prismática de dimensiones 6 x 10 x 1 cm.

#### 2.4.3 INDICADORES DE ALTERABILIDAD

Para realizar el estudio de alterabilidad de una roca se ha de fijar, en primer término, los llamados indicadores de alteración, es decir, definir aquellas propiedades o parámetros que han de medirse para la caracterización y evaluación de los procesos de deterioro en las rocas provocados por las experiencias de alteración o ensayos de envejecimiento artificial.

Para la elección de los indicadores de alterabilidad de los diferentes tipo de roca estudiado se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- 1) Naturaleza de las muestras analizadas: rocas sedimentarias carbonatadas
- 2) Sintomatología de las alteraciones por el tipo de rocas: a favor de los planos de debilidad litológicos (heterogeneidad de los sedimentos o variación espacial en la composición) o físicos (fisuración - vías de acceso del agua y de los agentes agresivos).
- 3) Tipo de agresión generalmente sufrido por las diferentes rocas (observación del estado de conservación de la roca en cantera y monumentos).

La valoración, tanto cualitativa como cuantitativa, del deterioro experimentado por la roca viene determinado por los aspectos que se relacionan a continuación:

a) **Examen cualitativo**

a.1) **Examen visual general**

Se compara el aspecto general de la roca no alterada (tratada o no tratada) con el de la muestra ensayada.

Se establecerán, genéricamente, las variaciones de color y texturas sufridas por la roca, pudiéndose seguir NORMAL 1/80 (CNR-ICR).

a.1.1) **Alteración cromática:** Se manifiesta por la variación de uno o más parámetros que definen el color, a saber:

- Tinta
- Claridad
- Saturación

a.1.2) **Aparición de manchas:** Pigmentación accidental y localizada en la superficie, relacionada con la presencia de materiales extraños en la roca (presencia de óxidos metálicos, arcillas, etc).



a.2) Estudio de las morfologías de deterioro

Se ha definido la tipología de deterioro teniendo en cuenta NORMAL 1/80 (CNR-ICR).

Se tienen así los distintos tipos de alteración:

a.2.1) **Morfologías de degradación preferencial:** afecta con mayor intensidad a los niveles calcáreos más impuros y porosos. Son debidas a fenómenos de disolución y erosión selectivos.

a.2.2) **Presencia de depósitos superficiales. Eflorescencias y concreciones:** Es frecuente en los ensayos de cristalización de sales la aparición de depósitos salinos, por lo general, sulfatos y cloruros, en la superficie de la muestra. A veces, se depositan en el interior de la roca denominándose eflorescencias. Las concreciones se deben a la precipitación del carbonato (de neoformación) previamente disuelto por la acción del agua (ciclos humedad-sequedad).

### **a.2.3) Pérdida de material**

- a.2.3.1) **Desplacación:** Levantamiento y separación de placas de espesor variable (superior al milímetro) por la acción del hielo (ciclos hielo-deshielo).
- a.2.3.2) **Arenización:** Desagregación, grano a grano, por pérdida de la matriz cementante de la roca (disolución, reacción con el agente agresor, etc).
- a.2.3.3) **Alveolización:** Degradación que se manifiesta por la formación de cavidades de forma más o menos redondeada.
- a.2.3.4) **Descamación:** Desprendimiento de finas películas de material, generalmente a favor de planos de microdebilidad.

a.2.3.5) **Picado o "pitting":** Degradación puntiforme que se manifiesta por la aparición de numerosos huecos de escaso diámetro.

a.2.3.6) **Pulverización:** Descohesión de la roca que se manifiesta por la pérdida de material en forma de polvo.

#### a.2.4) Morfologías de deformación plástica

a.2.4.1) **Hinchamiento:** Levantamiento superficial y localizado del material. Pone de manifiesto la presencia dentro de la composición mineralógica de la roca de arcillas expandibles tipo montmorillonita.

a.2.4.2) **Vesiculación:** Se manifiesta por la aparición generalizada de numerosas ampollas sobre la superficie de la

muestra. Hinchamiento a una escala más reducida.

#### **a.2.5) Morfologías de deformación rígida**

a.2.5.1) **Fracturación:** Se manifiesta por la aparición de líneas (superficies) de discontinuidad en el material, sin desplazamiento de las partes. Es favorecida por la presencia de planos de despegue dentro de la roca (microestratificación, microfisuración debida a un arranque o transformación - elaboración inapropiada de la roca, etc).

a.2.5.2) **Fisuración:** Se manifiesta por la aparición de líneas (superficies) de discontinuidad en el material, con desplazamiento de las partes.

a.2.5.3) **Fragmentación:** Ruptura de la roca puesta de manifiesto por la pérdida

de material en forma de trozos más o menos compactos.

b) Examen cuantitativo

b.1) Cuantificación de la variación cromática

Se puede llegar a evaluar la variación del color experimentado por la probeta tras la realización del ensayo de alteración acelerada. La medida del color, realizada mediante la utilización de las Cartas Munsell, se verificará simultáneamente para las muestras ensayadas y no ensayadas, bajo las mismas condiciones de luz, previamente establecidas (uniforme y con una determinada intensidad - luxómetro).

Se ha establecido un método, adaptado del descrito por de Witte, E. et al (1985) para la variación de color por aplicación de tratamientos, consistente en establecer el rango de la alteración atendiendo a los siguientes niveles:

- Nivel de variación 1: No se produce cambio apreciable del color.
- Nivel de variación 2: Se originan pequeños cambios de coloración. Pérdida del brillo natural.
- Nivel de variación 3: Se produce un oscurecimiento o blanqueamiento acentuado de la roca.

b.2) Variación del peso de la muestra

Es uno de los indicadores más utilizados. Se expresa en porcentaje sobre peso inicial de la muestra en seco ( $G_s$ ), relacionando éste con el peso final, en seco (secado hasta peso constante), de la muestra ensayada ( $G_f$ ), según:

$$V.P = \frac{G_s - G_f}{G_s} \times 100$$

b.3) Variación del volumen aparente

Es un método rápido y eficaz, al utilizar un parámetro obtenido por la técnica de porometría de mercurio. Está basado en la comparación porcentual de los volúmenes aparentes (esquelético) inicial, y final de la muestra ensayada, mediante la expresión:

$$V.V_a = \frac{V_{ai} - V_{af}}{V_{ai}} \times 100$$

b.4) Pérdida de resistencia mecánica

Algunos tipos de deterioro no son visibles a escala macroscópica (percepción visual), debido bien a la sutileza de la lesión producida ( por ejemplo, microfisuración producida por ciclos hielo-deshielo) o a generarse el daño dentro de la estructura de la muestra (cristalización/hidratación de sales en el interior de la roca), por lo que deben evidenciarse evaluando

la variación de ciertos parámetros relacionados con la compacidad de la roca: límite de resistencia a compresión y frecuencia de resonancia fundamental longitudinal.

Así, dependiendo del parámetro a medir tendremos ensayos de carácter destructivo, el primero, en el que obviamente se realizan las medidas sobre diferentes probetas (menor precisión y requiriendo un análisis estadístico del estudio) y no destructivos, el segundo, realizándose en este caso las medidas de FR sobre la misma probeta.

**b.4.1) Variación del límite de resistencia a la compresión:**

Para que su análisis tenga una representatividad aceptable se ha de medir dicho parámetro sobre un mínimo de 12 probetas (6 vírgenes y 6 ensayadas bajo ciertas condiciones de envejecimiento artificial), todas ellas con las mismas dimensiones (cubos entre 5 y 7 cm de lado).

Se define así el **coeficiente de resistencia ( $C_{ea}$ )** de una roca a una determinada experiencia de



alteración como la relación existente entre el límite medio de resistencia a la compresión de la roca, en estado seco, después de un determinado número de ciclos en una experiencia alterativa dada ( $R_{ea}$ ) y el límite medio de resistencia a la compresión de la misma piedra, en estado seco, sin haber sufrido dicha experiencia de alteración acelerada ( $R_s$ ).

$$C_{ea} = R_{ea} / R_s$$

**b.4.2) Variación de la frecuencia fundamental de resonancia ( $C_{FR}$ )**

Poseé la ventaja frente al indicador anterior de requerir un menor número de medidas (6 probetas cúbicas de 5 a 7 cm de lado) al medir dicha magnitud sobre la misma probeta, en su estado inicial y final. Es de aplicación lo visto en el capítulo de "Determinación de características

deformacionales dinámicas" sobre determinación de Frecuencia de Resonancia - módulo longitudinal - (NF B 10.511 y Test III.1 Rilem).

Se define el **coeficiente de variación de la FR fundamental** ( $C_{FR}$ ) como la relación entre el valor  $FR_f$  (valor más bajo que proporciona una amplitud máxima, debido a la superposición de los efectos de los impulsos aplicados sobre la roca) de la probeta, seca, una vez realizado un ensayo de alteración dado, con un número de ciclos determinado, y el valor  $FR_i$  medido sobre la muestra, previamente a la realización del ensayo.

$$C_{FR} = FR_f / FR_i$$

## 2.4.4. RESULTADOS OBTENIDOS

### 2.4.4.1. Heladicidad

Para llevar a cabo el análisis de resultados de este tipo de ensayo se ha utilizado únicamente como indicador de alteración la variación porcentual en peso de las muestras (módulo de heladicidad).

La medida cuantitativa del indicador no sólo se ha realizado como la determinación del módulo de heladicidad, sino que ha consistido en la medida de valores intermedios

Los resultados de módulo de heladicidad son los que se presentan a continuación:

TIPO DE PIEDRA	VARIACION % PESO	ESTIMACION CUALITATIVA
BOÑAR	-0,07	NULO
CAMPASPERO	-0,12	BAJO
COLMENAR	-0,07	NULO
ESPERA	+0,72	BAJO
ESTEPA	+0,05	NULO
NOVELDA	+0,03	NULO
OSTIONERA	+0,74	BAJO
PALOMERA	+1,15	MEDIO
SEPULVEDA	+0,25	BAJO

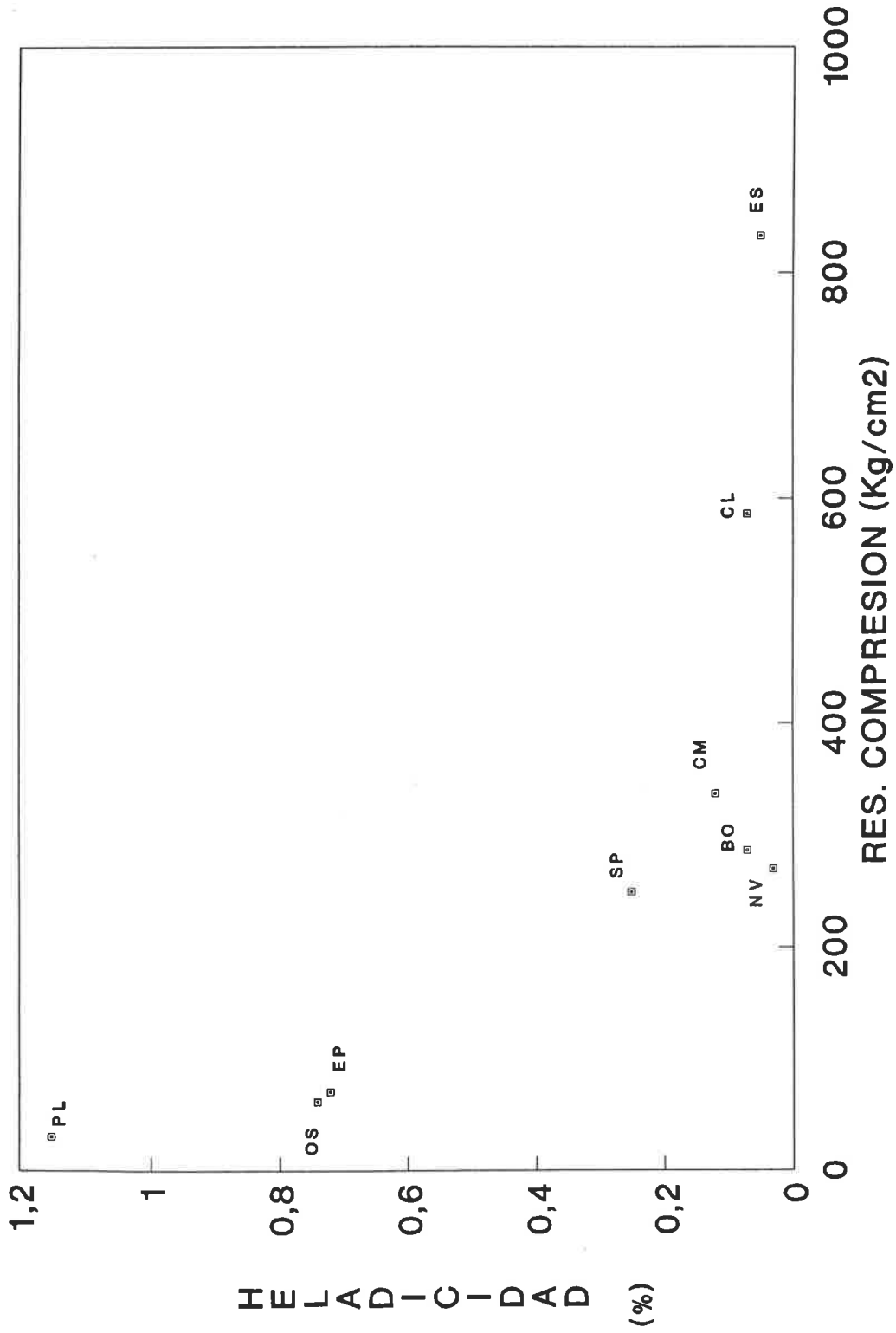
Se observa que la incidencia de este ensayo sobre los tipos de piedra estudiados es escaso, por lo que se puede afirmar que el empleo de dichas rocas no vendrá limitado por factores climáticos.

Del análisis del cuadro anterior se ve una relación directa entre alterabilidad por heladicidad y coeficiente de absorción, siendo la primera más acentuada cuanto mayor es el último parámetro.

Se evidencia además una ligera relación entre la alterabilidad por heladicidad y la resistencia a compresión, siendo mayor el primer parámetro a medida que disminuye el segundo.

En el siguiente cuadro se muestra la relación entre ambos parámetros:

# RELACION R.MEC.COMPRESION-HELADICIDAD



#### 2.4.4.2. Humedad-sequedad

De todos los ensayos de alterabilidad, este ensayo es el menos agresivo. Los daños producidos por este ensayo deben ser atribuidos a la variación en el contenido de humedad y a la variación térmica, producidos por las fases alternativas de calentamiento y enfriamiento. Por tanto, son estos dos factores los que van a condicionar el poder agresivo del ensayo.

Se moviliza así en cada ciclo, preestablecido en 24 horas, un contenido en agua entre el 60-80% del contenido máximo de agua (inmersión libre hasta saturación) de la roca, dependiendo básicamente del sistema poroso.

Los datos de estado de superficie producidos por este ensayo han sido, por lo general poco relevantes, máxime aún teniendo en cuenta el bajo número de ciclos desarrollado (se aconseja un número de ciclos mínimos de 50), por lo que se ha tomado como único indicador de alteración la variación porcentual de peso con respecto a la muestra seca, medidas en tramos parciales y final. (Ver curva de evolución). Aún así, cualquier dato de alteración morfológica adquiere un especial significado e importancia respecto al grado de alterabilidad de una determinada muestra.

De las observaciones del estado final de superficie lo único reseñable es un ligero oscurecimiento en las Piedra de Campaspero, Sepúlveda y Colmenar, atribuible a la acción de la temperatura más que a la del agua, ya que se ha observado, en consonancia con otros autores, que muestras calentadas a elevadas temperaturas presentan este mismo cambio cromático.

La piedra Palomera (variedad menos cohesionada) muestra una ligera desagregación granular, de escasa profundidad.

Los resultados son los que se presentan a continuación:

TIPO DE PIEDRA	VARIACION % PESO	ESTIMACION CUALITATIVA
BOÑAR	-0,08	NULO
CAMPASPERO	-0,16	BAJO
COLMENAR	-0,14	BAJO
ESPERA	-0,22	BAJO
ESTEPA	-0,08	BAJO
NOVELDA	-0,28	BAJO
OSTIONERA	-0,54	BAJO
PALOMERA	-0,42	BAJO
SEPULVEDA	-0,20	BAJO

Del análisis del cuadro anterior se desprende que las variaciones son escasas, no llegando en ningún caso al 0,6%, este último correspondiente a la piedra Ostionera, atribuible a la dificultad de medida en una roca con tan elevada macroporosidad, tal y como ocurre con el otro valor más elevado correspondiente a la piedra Palomera.

Por el contrario, en rocas donde el predominio de la microporosidad frente a la macroporosidad es más acentuado, el valor del indicador es menor, tal y como ocurre con las piedras de Estepa y Boñar, por lo que se supone una menor penetración, en función de un menor tamaño de poro, y por tanto una baja acción del agua, bien sea en procesos químicos de disolución.



#### 2.4.4.3. Cristalización de sales

Se han ensayado cuatro probetas por variedad de piedra, y al finalizar este se estudio para definir la caracterización degradativa frente a este tipo de experiencia de alteración.

Se tomaron como indicadores de alteración tres medidas: una absoluta, como es la variación porcentual de peso, y dos subjetivas, variación cromática y grado de alteración morfológica.

Los resultados obtenidos se presentan en las siguientes tablas:

RESULTADOS DEL ENSAYO DE CRISTALIZACION DE SALES

PIEDRA	REF. MUESTRA	INDICADOR DE ALTERACION		
		VARIAC. PESO (%)	VARIAC. CROMATICA	GRADO DE ALTERACION MORFOLOGICO
BOÑAR	BO/35-19	-0,90	MEDIA (2)	MEDIO
	BO/35-20	-0,60	MEDIA (2)	MEDIO
	BO/35-23	-0,96	MEDIA (2)	MEDIO
	BO/35-24	-0,54	MEDIA (2)	MEDIO
CAMPASPERO	CM/36-23	-1,97	BAJA (1)	BAJO
	CM/36-24	-0,21	BAJA (1)	BAJO
	CM/36-27	-1,99	BAJA (1)	ALTO
	CM/36-28	-1,96	BAJA (1)	ALTO
COLMENAR	CL/37-22	-0,24	BAJA (1)	MEDIO
	CL/37-23	-0,13	BAJA (1)	BAJO
	CL/37-26	-0,20	BAJA (1)	MEDIO
	CL/37-27	-0,10	BAJA (1)	BAJO

**RESULTADOS DEL ENSAYO DE CRISTALIZACION DE SALES**

PIEDRA	REF. MUESTRA	INDICADOR DE ALTERACION		
		VARIAC. PESO (%)	VARIAC. CROMATICA	GRADO DE ALTERACION MORFOLOGICO
SEPULVEDA	SP/38-22	-8,73	ALTA (3)	ALTO
	SP/38-23	-8,17	ALTA (3)	ALTO
	SP/38-26	-10,24	ALTA (3)	ALTO
	SP/38-27	-16,56	ALTA (3)	ALTO
ESTEPA	ES/39-22	+1,07	BAJA (1)	BAJO
	ES/39-23	+0,96	MEDIA (2)	BAJO
	ES/39-26	+1,45	BAJA (1)	BAJO
	ES/39-27	+1,41	MEDIA (2)	BAJO
PALOMERA	PL/40-22	+0,04	BAJA (1)	BAJO
	PL/40-23	+0,04	BAJA (1)	BAJO
	PL/40-26	-0,90	BAJA (1)	MEDIO
	PL/40-27	-1,34	BAJA (1)	MEDIO

**RESULTADOS DEL ENSAYO DE CRISTALIZACION DE SALES**

PIEDRA	REF. MUESTRA	INDICADOR DE ALTERACION		
		VARIAC. PESO (%)	VARIAC. CROMATICA	GRADO DE ALTERACION MORFOLOGICO
OSTIONERA	OS/41-22	-1,02	BAJA (1)	MEDIO
	OS/41-23	-0,69	BAJA (1)	BAJO
	OS/41-26	-2,70	BAJA (1)	MEDIO
	OS/41-27	-0,24	BAJA (1)	BAJO
NOVELDA (**)	NV/42-22	+0,67/-22,31	BAJA (1)	BAJO/ALTO
	NV/42-23	+0,62/-21,56	BAJA (1)	BAJO/ALTO
	NV/42-26	+0,63/-20,26	BAJA (1)	BAJO/ALTO
	NV/42-27	+0,65/-20,15	BAJA (1)	BAJO/ALTO
ESPERA	EP/43-18	-1,20	MEDIA (2)	MEDIO
	EP/43-19	-1,87	MEDIA (2)	ALTO
	EP/43-22	-0,60	MEDIA (2)	ALTO
	EP/43-23	-1,69	MEDIA (2)	ALTO

- (\*\*) Se presentan los resultados al final del ensayo preestablecido (1º) y los resultados tras la inmersión total (hasta saturación) de las muestras en agua (3 días).

### Comentario de resultados

En líneas generales se puede afirmar que el método de ensayo es válido, ya que discrimina con efectividad los grados de alteración sufridos por las distintas rocas, aconsejándose aumentar el número de ciclos a 20 ó 25.

Se aprecia una mayor incidencia de este ensayo en las rocas con un alto índice de la microporosidad frente a la macroporosidad, afectando en mayor grado, y en consecuencia con lo mencionado anteriormente, a las rocas con bajo coeficiente de absorción. Esto demuestra que los daños producidos por sales actúan de forma casi exclusiva en la epidermis de la roca, produciendo desplazación y arenización, y por tanto, en aquellas rocas donde el frente de sales avanza progresivamente con el número de ciclos. En ensayos con un número bajo de ciclos las alteraciones no pasarán de ser leves, como así ha sido en nuestro caso.

Por el contrario, en rocas con bajo coeficiente de absorción se concentran, a pesar de someterse a progresivos ciclos, las sales en su parte externa, y una vez alcanzadas determinadas concentraciones

(próximas a la saturación de los poros) se hidratan de tal manera que rompen la roca a favor de planos de debilidad. Este hecho se ha demostrado de forma clara en las muestras de piedra de Novelda, donde un aumento de peso al final del ensayo, preestablecido en 15 ciclos, llevó a pensar al equipo investigador en la existencia de una saturación epitelial de sales. Efectivamente, una hidratación total de las mismas mediante inmersión de las muestras hasta saturación hídrica, provocó la destrucción en capas de las muestras.

Se observa así mismo, una estrecha relación entre la microfisuración natural de la roca y la intensidad y morfología de los daños, pasando a ser las discontinuidades mucho más acentuadas. Este es el caso de los tipos de piedra de Sepúlveda, Espera y Campaspero. Por el contrario, no existe dependencia entre los macroporos (huecos o microkarstificación) y los procesos alterativos, donde el grado de afección es prácticamente nulo, como se puede apreciar en las variedades Ostionera y Palomera.

La caracterización morfológica de las agresiones, para cada muestra, viene referenciada en los anexos.

Los valores altos de alteración por cristalización de sales restringe el uso de estas piedras en exteriores, así como su aplicación en zonas con un alto índice de contaminación o zonas marinas (expuestas a una elevada concentración de aerosoles salinos).

#### 2.4.4.4. Ataque por SO<sub>2</sub>

La formación de ácido sulfúrico a partir del SO<sub>2</sub> es un proceso complejo, dependiente de muchos factores: concentración, luz solar, temperatura, humedad, presencia de catalizadores y características de la superficie de las rocas.

Las soluciones ácidas así formadas afectan de manera especial a los materiales carbonatados. Dichas soluciones son rápidamente neutralizadas, precipitando nuevos compuestos: sulfitos y sulfatos de Ca y Mg, con desprendimiento de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. El ataque de la roca tiene lugar de manera prioritaria y mayoritaria en superficie y se manifiesta por la formación de depósitos más o menos pulverulentos o coherentes (formación de costras).

Estos nuevos compuestos presentan solubilidades mucho mayores que la calcita (3 veces superiores para el sulfito cálcico y más de 100 para el yeso) y en consecuencia, periódicamente pueden ser disueltos y volver a precipitar, avanzando hacia el interior de la roca. Los mayores daños producidos por estos procesos son achacables a las presiones de cristalización junto a los incrementos de volumen que pueden tener lugar.

Finalmente, puede señalarse que los cristales formados

presentan gran variedad de hábitos, no reflejando siempre las características propias de la especie mineral. En este sentido destacan los hábitos prismáticos y aciculares, así como los tabulares, en las costras de yeso como proponen varios autores.

### Resultados obtenidos

La alteración producida por este ensayo ha sido evaluada a partir de la estimación visual del estado de la superficie y de las variaciones de peso producidas al finalizar el ensayo.

Los resultados son los que se presentan a continuación:



TIPO DE PIEDRA	VARIACION % PESO	GRADO DE ALTERACION MORFOLOGICO	VARIACION CROMATICA
BOÑAR	-1,14	MEDIO	3
CAMPASPERO	+0,31	BAJO	3
COLMENAR	+0,49	BAJO	2
ESPERA	+0,97	BAJO	2
ESTEPA	+0,22	BAJO	1
NOVELDA	+0,66	BAJO	2
OSTIONERA	+0,15	BAJO	1
PALOMERA	+3,86	ALTO	1
SEPULVEDA	+0,74	BAJO	2

Valores altos de ataque por SO<sub>2</sub> restringe el uso de estas piedras en exteriores, especialmente en ambientes contaminados.

#### Observación del estado final de superficie

En todas las muestras ensayadas se ha observado la formación de una capa más o menos variable en cuanto a continuidad y espesor (generalmente de 1 mm como máximo), constituida por cristalitas de yeso. Dichos cristalitas presentan algunas décimas de milímetro de tamaño, hábito prismático más o menos alargado y frecuente

disposición en roseta. Todas estas características confieren en conjunto un aspecto satinado superficial a las rocas, observable sobre todo en las calizas más cristalinas.

Además, en todas se presentan alteraciones de tipo cromático, en las Piedras de Campaspero y Colmenar se observó un ligero oscurecimiento, más pronunciado en Campaspero y un blanqueamiento no uniforme en la Piedra de Espera; también se observaron enrojecimientos en la Piedra de Boñar.

Como alteración morfológica más reseñable cabe destacar el pitting no uniforme, con descamación concéntrica a escala milimétrica, en la dolomía de Boñar (Ver apartado de fotos).

#### Variaciones de peso

En primer lugar, hay que destacar que todas las muestras consideradas han presentado ganancias de peso. Esto es explicable dado que tiene lugar una sustitución de calcita por yeso, cuya relación de pesos moleculares es 1:1,7. Aunque es importante indicar que los aumentos de peso observados (y paralelamente las disminuciones de porosidad) no guardan relación con el espesor de las costras observadas en superficie. Los mayores daños se producen cuando el

depósito tiene lugar bajo la superficie.

La ganancia de peso más acentuada (3,86 %) la presenta la Piedra de Palomera, cuyas características del sistema poroso (una gran porosidad abierta) la hacen la más vulnerable a este tipo de agresión, al ser el nivel de intrusión mucho más elevado. Le sigue en importancia de este indicador la dolomía de Boñar con una ganancia en peso del 1,14 %, atribuido probablemente a la formación en este caso de sulfatos de Mg (epsomita) que en sus diversos estados de hidratación son mucho más dañinos para la piedra que el sulfato cálcico, ya que se produce un mayor aumento de volumen que en este último.

La porosidad es otro factor de dependencia, presentando una menor alteración los tipos de piedra con una elevada macroporosidad, que en el caso de la piedra ostionera se acompaña del condicionante mineralógico (menor proporción de calcita frente al cuarzo - inerte -).

## **2.5. Relaciones entre los parámetros**

### **2.5.1. INTRODUCCIÓN**

El estudio de las relaciones entre los parámetros que caracterizan los tipos de piedra, es fundamental para establecer que tipo de ensayos son relevantes para definirlos y cuales son dependientes de aquellos, y en alguna medida superfluos. Este análisis es, por consiguiente, una de las bases para establecer una normativa tendente a caracterizar el material con el mínimo número de ensayos, siendo elegidos, de entre aquellos dependientes unos de otros, los de menor coste y mayor sencillez.

Para significar las posibles relaciones existentes entre los diversos parámetros que definen las características de los tipos de piedra estudiados se ha llevado a cabo un análisis de la correlación entre los mismos. Este estudio consta de los siguientes pasos:

1. Obtención de los coeficientes de correlación lineal entre los parámetros por parejas, y a partir de ellos la matriz de implicación entre los mismos.
2. Definición de las parejas de parámetros que muestran algún tipo de correlación entre sí.

TIPOS	RESISTENCIA Kg/cm <sup>2</sup>	COEF ABS.	DENS. APAR	DENS. ABS.	COMP.	POROS. ACC.A.
CL	585,08	1,30	2,51	2,60	96,56	3,44
OS	61,60	4,70	2,16	2,41	89,32	10,68
EP	69,40	7,83	2,02	2,41	83,90	16,10
NV	270,15	5,24	2,27	2,58	87,82	12,18
SP	249,03	8,01	2,08	2,47	84,02	15,98
BO	286,02	4,80	2,39	2,68	89,18	10,82
ES	832,33	2,88	2,46	2,65	92,91	7,09
CM	337,82	5,94	2,26	2,62	86,37	13,63
PL	29,83	12,56	1,81	2,34	77,45	22,55

Tabla de los principales parámetros analizados en los diferentes tipos de piedra

3. Definición de grupos de parámetros relacionados.
4. Cálculo de los datos de regresión lineal entre los parámetros relacionados y definición del tipo de correlación (positiva ó negativa).
5. Trazado de gráficos con las rectas de regresión y los puntos representativos de los valores de cada tipo de piedra. La inspección visual de estos gráficos permite, en una primera aproximación, establecer si la correlación más adecuada es efectivamente la lineal.
6. Establecimiento de conclusiones.

#### 2.5.2. MATRIZ DE IMPLICACION

El cálculo de los coeficientes de correlación al cuadrado, permite establecer un cuadro de doble entrada que expresa el grado de relación entre los distintos parámetros y que se conoce como matriz de implicación.

También se ha considerado oportuno confeccionar el mismo gráfico, esta vez simplemente para los coeficientes de correlación. Naturalmente, este cuadro se deriva del otro sin más que obtener las raíces cuadradas de los guarismos.

**MATRIZ DE IMPLICACION**  
**Coefficientes de correlación al cuadrado**

	ALTER.	F.R.F.	F.R.T.	F.R.L.	V.P.O.E.	IMPACT	R.D.	R.COMPR.	C.A	D.AP.	D.AB.	P.A.A.
ALTER.	1,00	0,15	0,06	0,02	0,09	0,09	0,00	0,05	0,06	0,05	0,01	0,08
F.R.F.		1,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,23	0,01	0,00	0,00	0,03	0,00
F.R.T.			1,00	0,01	0,13	0,40	0,00	0,34	0,00	0,02	0,04	0,01
F.R.L.				1,00	0,63	0,17	0,70	0,44	-0,61	0,77	0,84	-0,55
V.P.O.E.					1,00	0,00	-0,50	0,66	0,37	0,57	0,71	0,34
IMPACT						1,00	0,31	0,05	0,12	0,09	0,12	0,06
R.D.							1,00	0,30	0,54	-0,55	-0,53	0,45
R.C.								1,00	-0,52	0,67	0,56	-0,56
C.A.									1,00	-0,90	-0,53	0,98
D.AP.										1,00	0,80	-0,89
D.AB.											1,00	-0,48
P.A.A.												1,00

\* Los signos negativos de algunos coeficientes al cuadrado significan que la correlación es negativa

RD:	RESISTENCIA AL ROZAMIENTO POR DESGASTE	DAB:	DENSIDAD ABSOLUTA
CA:	COEFICIENTE DE ABSORCION	P.A:	POROSIDAD ACCESIBLE AL AGUA
DAP:	DENSIDAD APARENTE	RC:	RESISTENCIA A LA COMPRESION
IMPAC:	RESISTENCIA AL IMPACTO	FRL:	FRECUENCIA DE RESONANCIA LONGITUDINAL
		FRT:	FRECUENCIA DE RESONANCIA TRACCION
		FRF:	FRECUENCIA DE RESONANCIA FLEXION
		VPOE:	VEL. DE PROP. DE ONDAS ELASTICAS
		ALTER:	ALTERABILIDAD

MATRIZ DE IMPLICACION  
Coeficientes de correlación

PARAM.	ALTER.	F.R.F.	F.R.T.	F.R.L.	V.P.O.E.	IMPACT	R.D.	R.C.	C.A.	D.AP.	D.AB.	P.A.A.
ALTER.	1,00	0,38	0,24	0,15	0,30	0,30	0,01	0,22	0,24	0,23	0,09	0,28
F.R.F.		1,00	0,03	0,06	0,08	0,23	0,48	0,12	0,02	0,03	0,17	0,07
F.R.T.			1,00	0,12	0,36	0,63	0,02	0,58	0,05	0,15	0,20	0,07
F.R.L.				1,00	0,79	0,41	0,84	0,66	-0,78	0,88	0,91	-0,74
V.P.O.E.					1,00	0,00	-0,71	0,81	0,61	0,75	0,84	0,58
IMPACT						1,00	0,56	0,22	0,35	0,30	0,34	0,25
R.D.							1,00	0,55	0,74	-0,74	-0,73	0,67
R.C.								1,00	-0,72	0,82	0,75	-0,75
C.A.									1,00	-0,95	-0,73	0,99
D.AP.										1,00	0,89	-0,94
D.AB.											1,00	-0,69
P.A.A.												1,00

\* Los signos negativos de algunos coeficientes al cuadrado significan que la correlación es negativa

RD: RESISTENCIA AL ROZAMIENTO POR DESGASTE      DAB: DENSIDAD ABSOLUTA      FRT: FRECUENCIA DE RESONANCIA TRACCION  
 CA: COEFICIENTE DE ABSORCION      FAA: POROSIDAD ACCESIBLE AL AGUA      FRF: FRECUENCIA DE RESONANCIA FLEXION  
 DAP: DENSIDAD APARENTE      R.C.: RESISTENCIA A LA COMPRESION      VPOE: VEL. DE PROP. DE ONDAS ELASTICAS  
 IMPAC: RESISTENCIA AL IMPACTO      FRL: FRECUENCIA DE RESONANCIA LONGITUDINAL      ALTER: ALTERABILIDAD

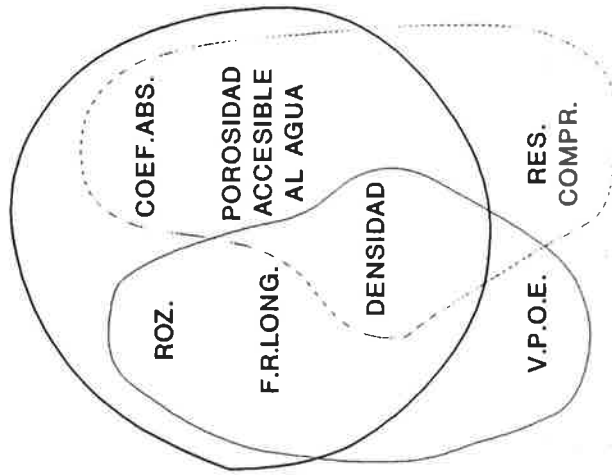


Se han considerado como significativos los valores del coeficiente de correlación mayores ó iguales a 0,5 y, en el cuadro, aparecen remarcados con trazo grueso. Con signo negativo se han expresado aquellos coeficiente cuya correlación, el estudio posterior que aquí se describe, ha permitido establecer como negativa.

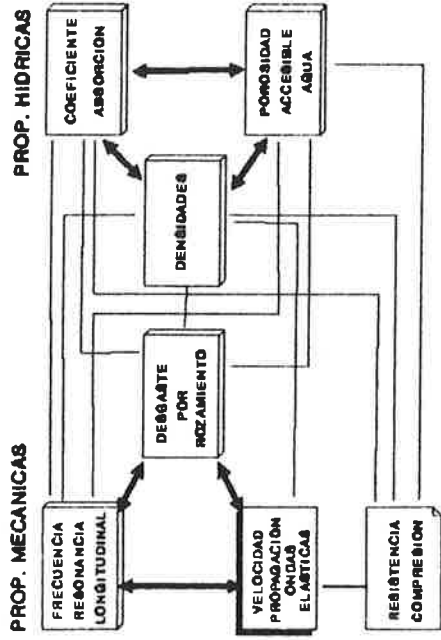
### 2.5.3. GRUPOS DE PARAMETROS RELACIONADOS

Las relaciones existentes se han representado en un esquema significando mediante líneas y dobles flechas los parámetros relacionados. Además, para poner de manifiesto los grupos de propiedades relacionadas se ha confeccionado otro esquema, donde las propiedades pertenecientes a un mismo grupo de relación se han rodeado con líneas cerradas, de esta forma, un rápida inspección ocular, permite obtener un cuadro de las relaciones existentes entre los parámetros. Estos esquemas aparecen en la página siguiente y en ellos se observa que existen seis parámetros relacionados: El Desgaste por Rozamiento, la Frecuencia de Resonancia Longitudinal, las Densidades Absoluta y Aparente, el Coeficiente de Absorción y la Porosidad Accesible al Agua.

# RELACIONES ENTRE PROPIEDADES



# RELACIONES ENTRE PROPIEDADES



La Velocidad de Propagación de Ondas Elásticas se relaciona por una parte con las Densidades, la Frecuencia de Resonancia Longitudinal y el Coeficiente de Desgaste al Rozamiento, y por otro con la Resistencia a la Compresión. Esta última, a su vez, muestra las relaciones con los parámetros contorneados por línea de trazos.

#### 2.5.4. DATOS Y RECTAS DE REGRESION EN PAREJAS RELACIONADAS

Queda por investigar, sin embargo, la naturaleza de esta relación: si es efectivamente lineal y si es positiva ó negativa. Para ello se han calculado los parámetros que definen las rectas de regresión (datos de la regresión en el cuadro correspondiente) y se han trazado las rectas de regresión. Sus gráficos aparecen en las páginas siguientes, junto con el cuadro que expresa los datos de regresión.

Salvo en el caso de la relación entre la frecuencia de resonancia longitudinal y la resistencia a la compresión, cuya correlación se podría quizá ajustar mejor a una exponencial ó a una parábola, en todos los demás la correlación aparece como lineal. Como positivas aparecen las correlaciones entre parámetros, dentro del

## DATOS DE REGRESION

	RD-CA	RD-DAP	RD-DAB	RD-PAA	RC-CA	RC-DAP	RC-DAB	RC-PAA	CA-DAP	CA-DAB	CA-PAA
Constant	2,91	2,42	2,64	7,90	8,62	2,01	2,43	17,24	2,60	2,69	2,60
Std Err of Y Est	2,37	0,16	0,09	4,40	2,44	0,14	0,09	3,94	0,08	0,09	0,85
R Squared	0,54	0,55	0,53	0,45	0,52	0,67	0,56	0,56	0,90	0,53	0,98
No. of Observations	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Degrees of Freedom	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
X Coefficient(s)	0,48	-0,03	-0,02	0,74	-0,01	0,00	0,00	-0,02	-0,07	-0,03	1,67
Std Err of Coef.	0,17	0,01	0,01	0,31	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,09

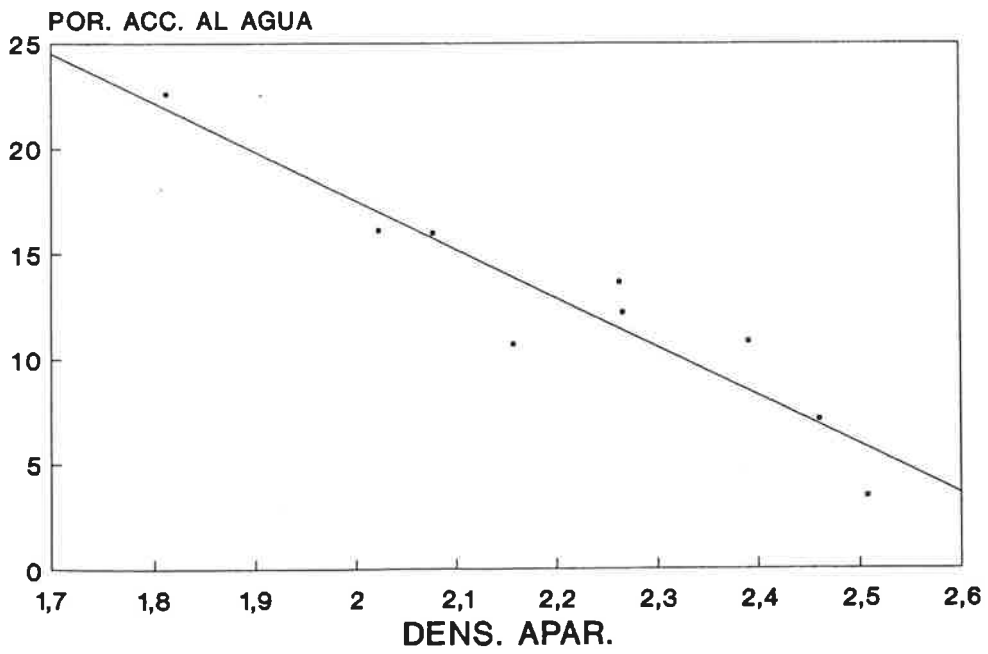
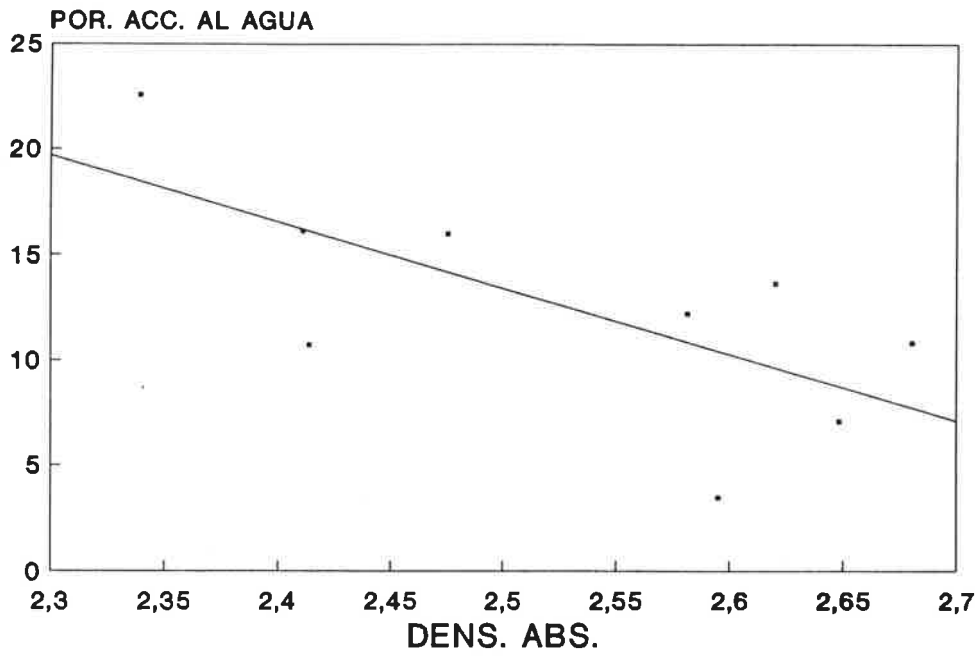
  

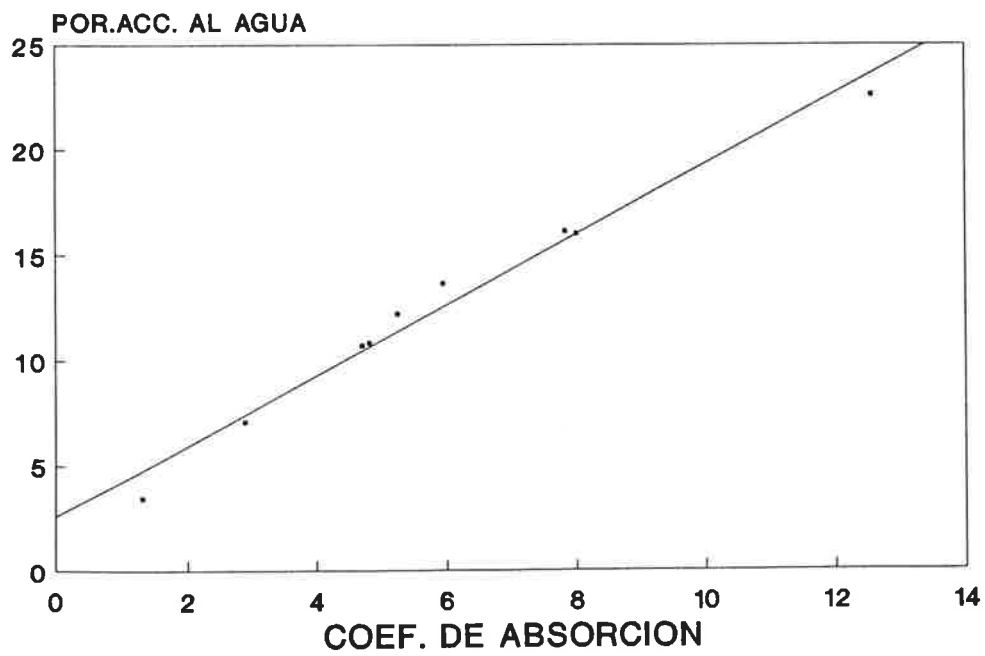
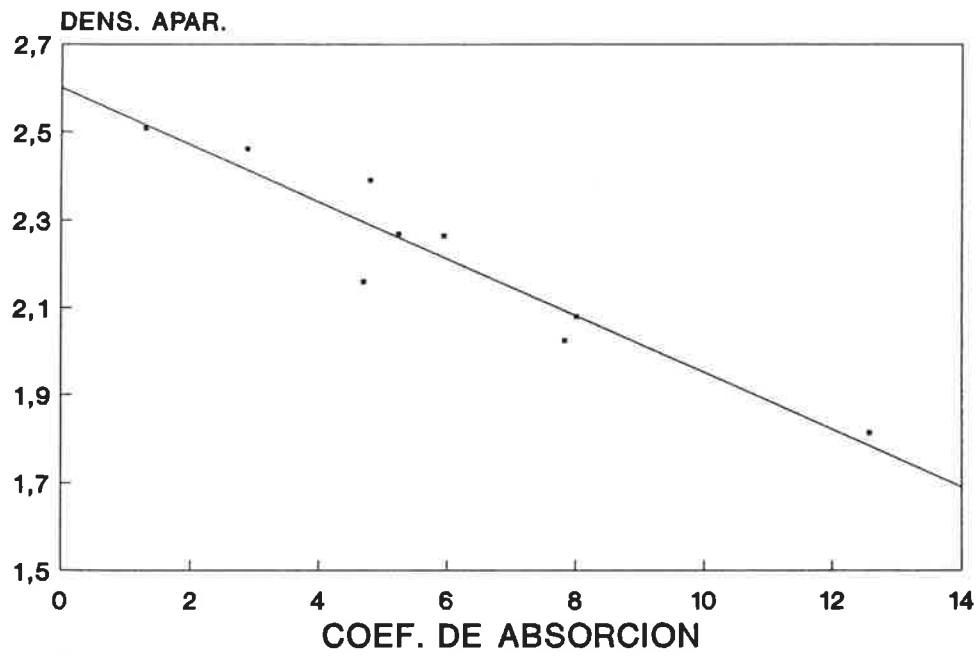
	DAP-DAB	DAP-PAA	FRL-VPOE	FRL-RD	FRL-RC	FRL-CA	FRL-DAP	FRL-DAB	FRL-PAA	VPOE-RD
Constant	1,46	64,00	1103,03	22,17	-363,35	15,75	1,46	2,10	28,25	20,69
Std Err of Y Est	0,06	2,00	664,90	2,90	210,73	2,17	0,11	0,05	3,96	3,76
R Squared	0,80	0,89	0,63	0,70	0,44	0,61	0,77	0,84	0,55	0,50
No. of Observations	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Degrees of Freedom	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
X Coefficient(s)	0,48	-23,23	0,34	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Std Err of Coef.	0,09	3,15	0,10	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

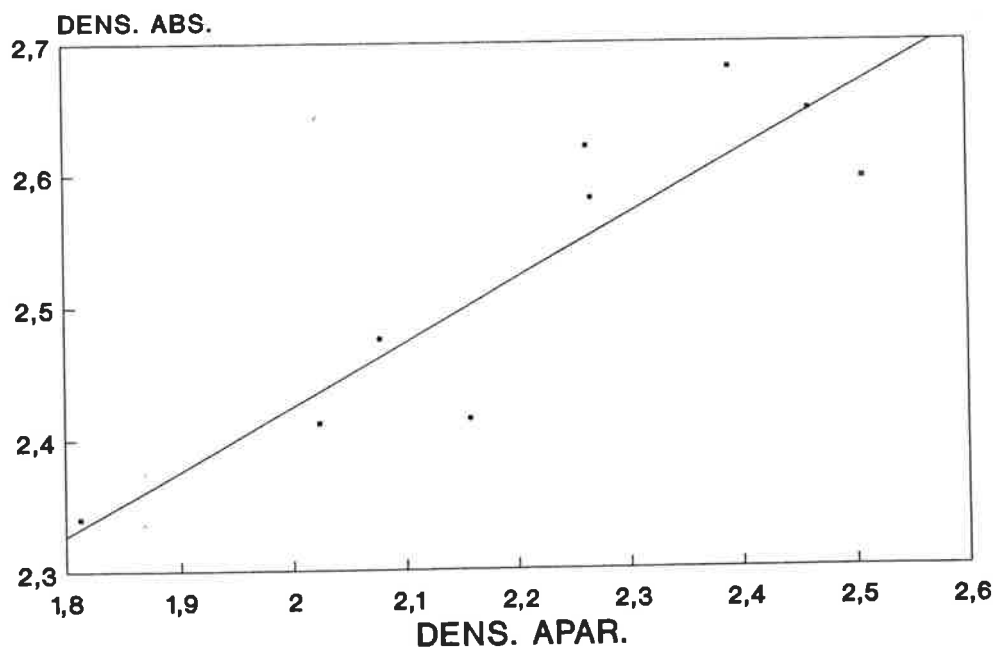
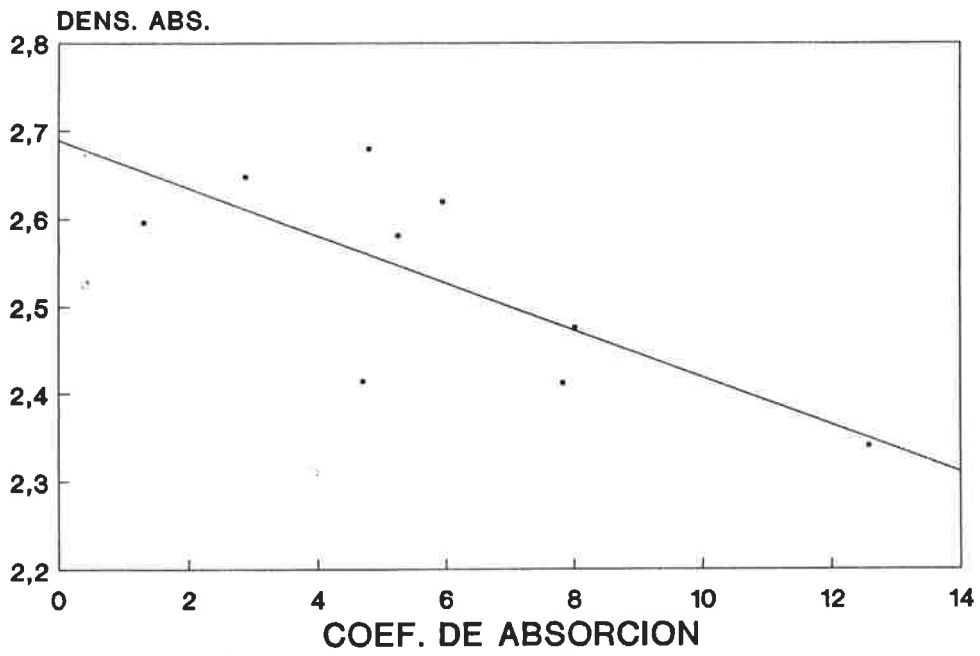
  

	VPOE-RC	VPOE-DAP	VPOE-DAB	DAB-PAA	I-FRT	FRT-RC	VPOE-CA	VPOE-PAA	I-RD	RD-RC
Constant	-573,65	1,52	2,11	92,25	469,64	-280,62	14,17	25,76	18,89	9,33
Std Err of Y Est	164,90	0,16	0,07	4,27	55,92	228,39	2,77	4,81	4,42	4,45
R Squared	0,66	0,57	0,71	0,48	0,40	0,34	0,37	0,34	0,31	0,30
No. of Observations	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Degrees of Freedom	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
X Coefficient(s)	0,21	0,00	0,00	-31,53	-0,07	0,24	0,00	0,00	-0,04	-0,01
Std Err of Coef.	0,06	0,00	0,00	12,44	0,03	0,12	0,00	0,00	0,02	0,01

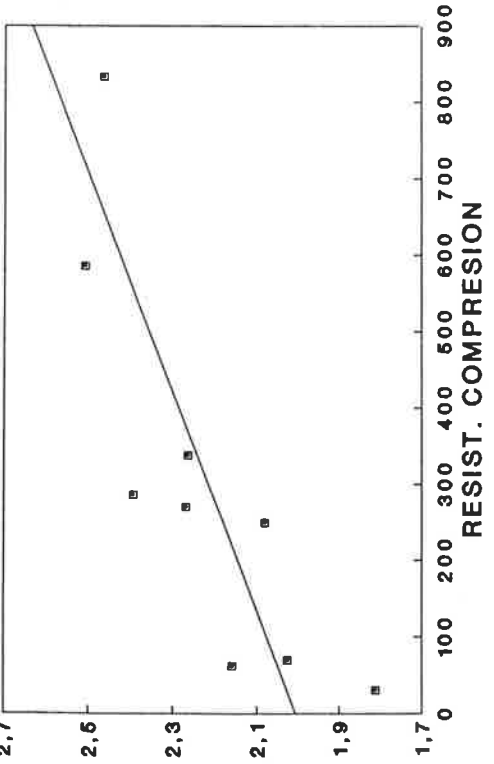
**RD:** RESISTENCIA AL ROZAMIENTO POR DESGASTE      **DAB:** DENSIDAD ABSOLUTA      **FRL:** FRECUENCIA DE RESONANCIA LONGITUDINAL  
**CA:** COEFICIENTE DE ABSORCION      **PAA:** POROSIDAD ACCESIBLE AL AGUA      **VPOE:** VEL. DE PROP. DE ONDAS ELASTICAS  
**DAP:** DENSIDAD APARENTE      **RC:** RESISTENCIA A LA COMPRESION      **I:** RESISTENCIA AL IMPACTO



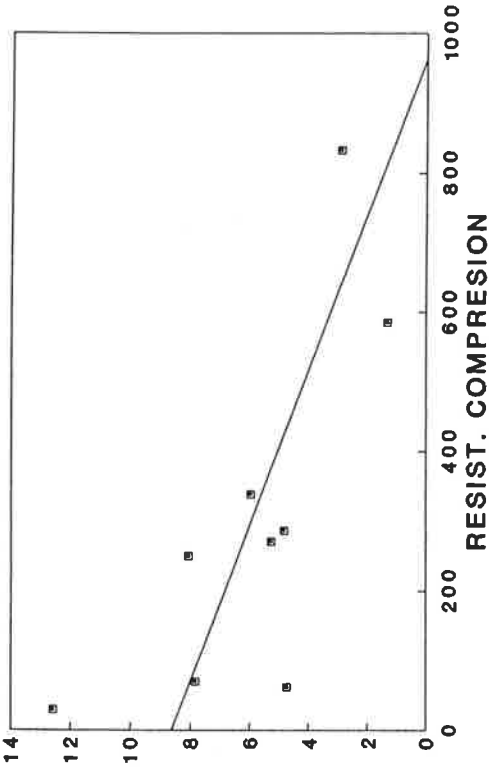




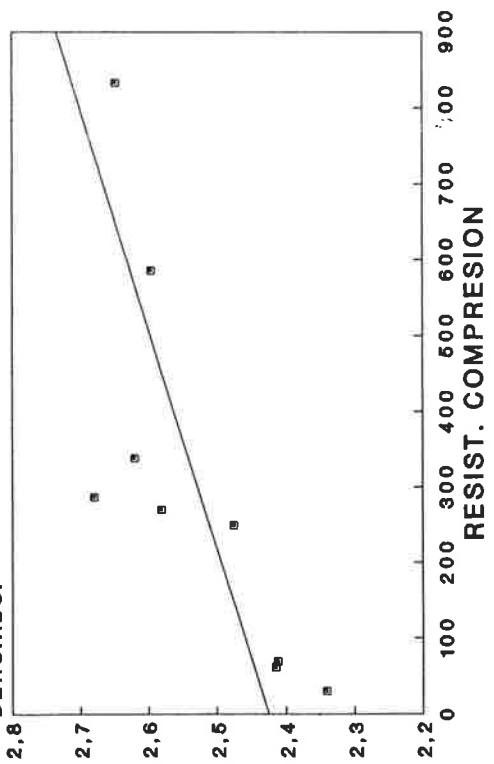
DENS. APAR.



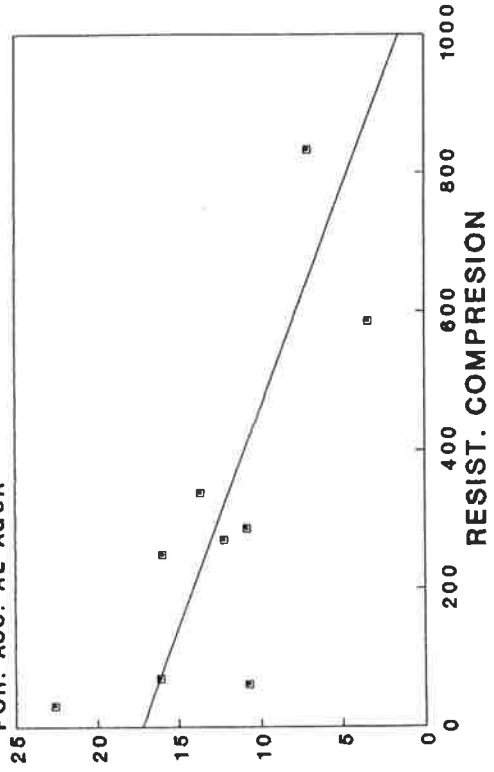
COEF. DE ABSORCION



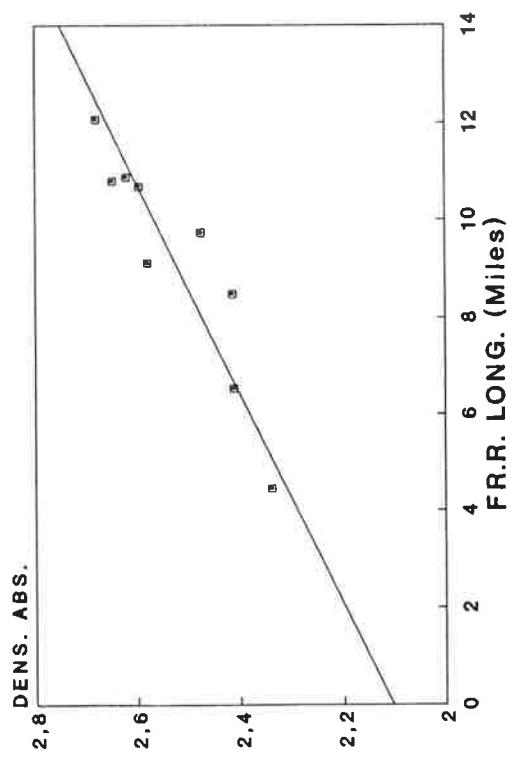
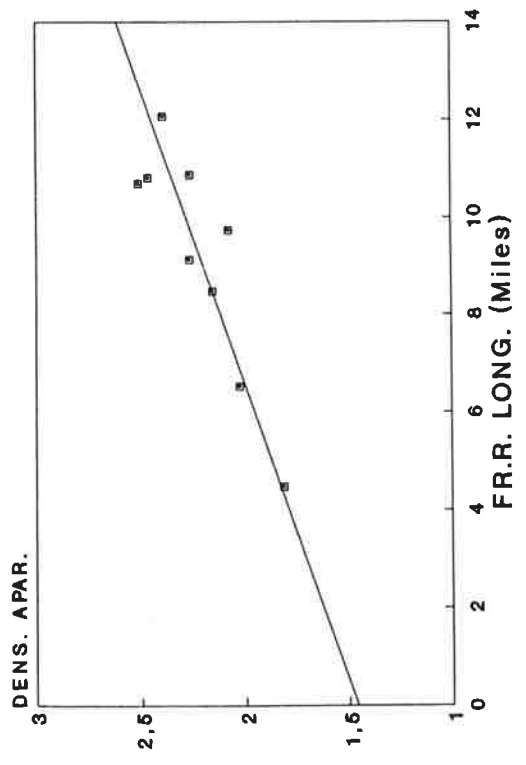
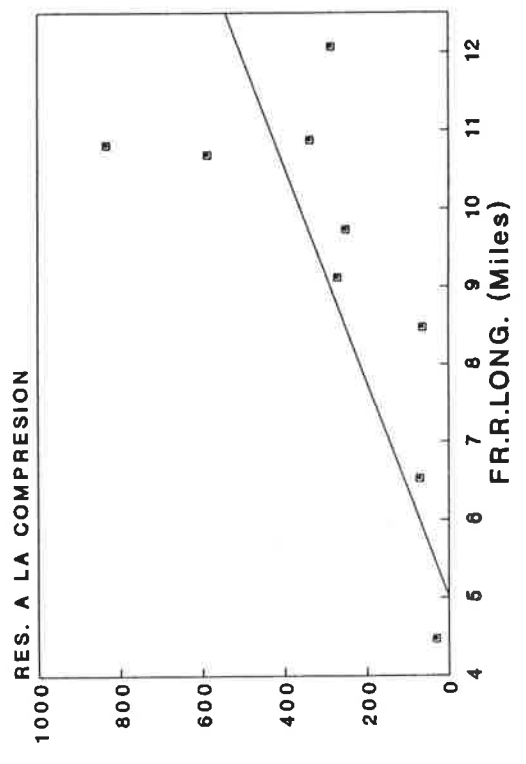
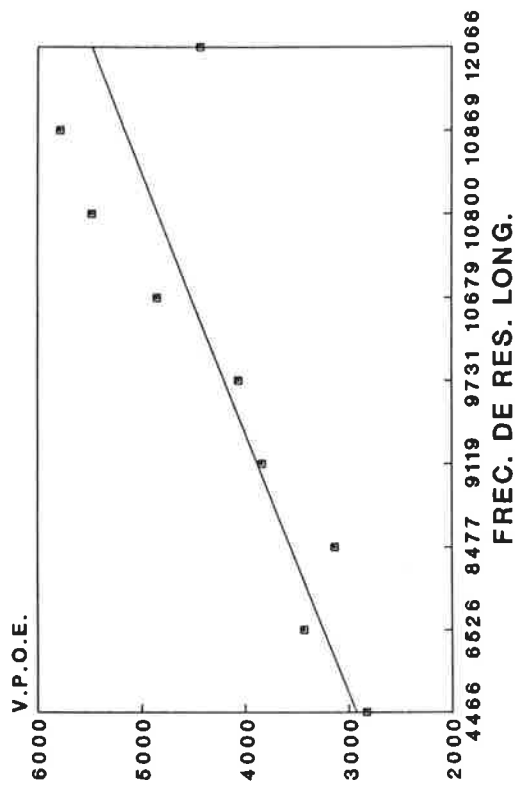
DENS. ABS.

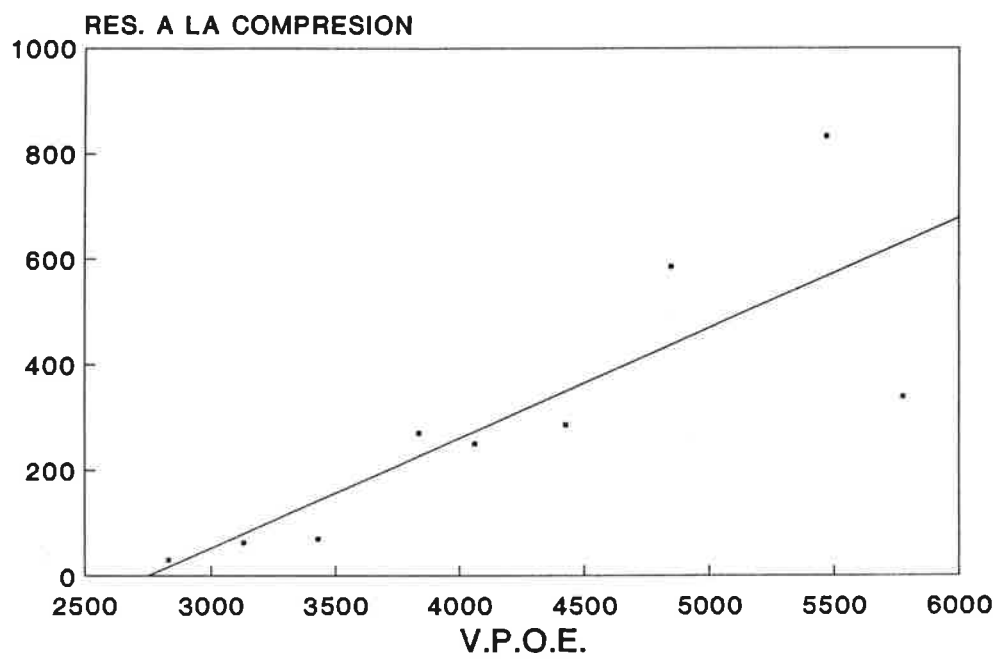


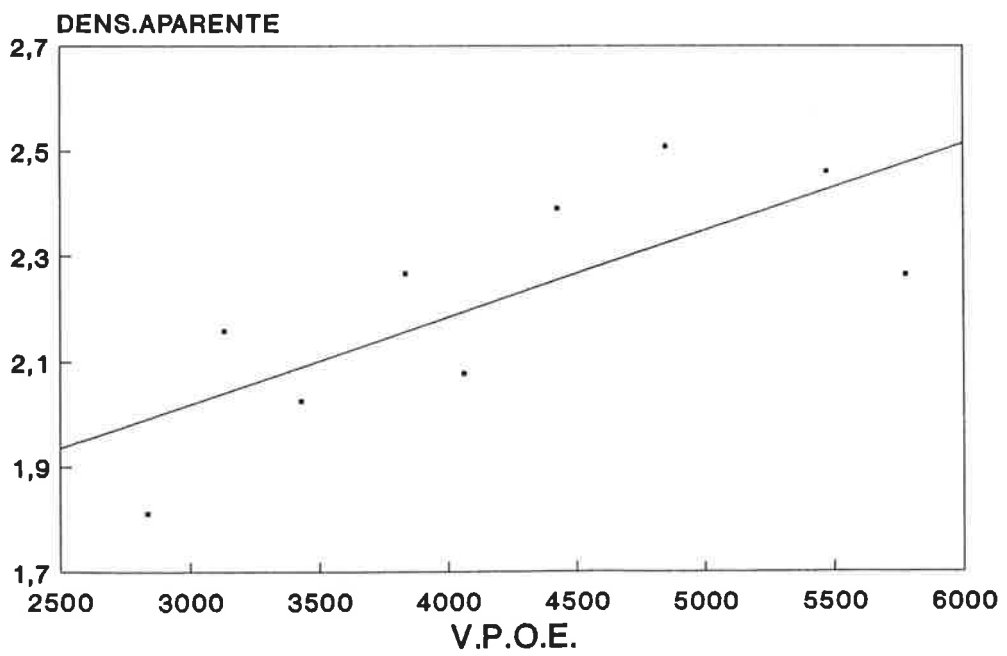
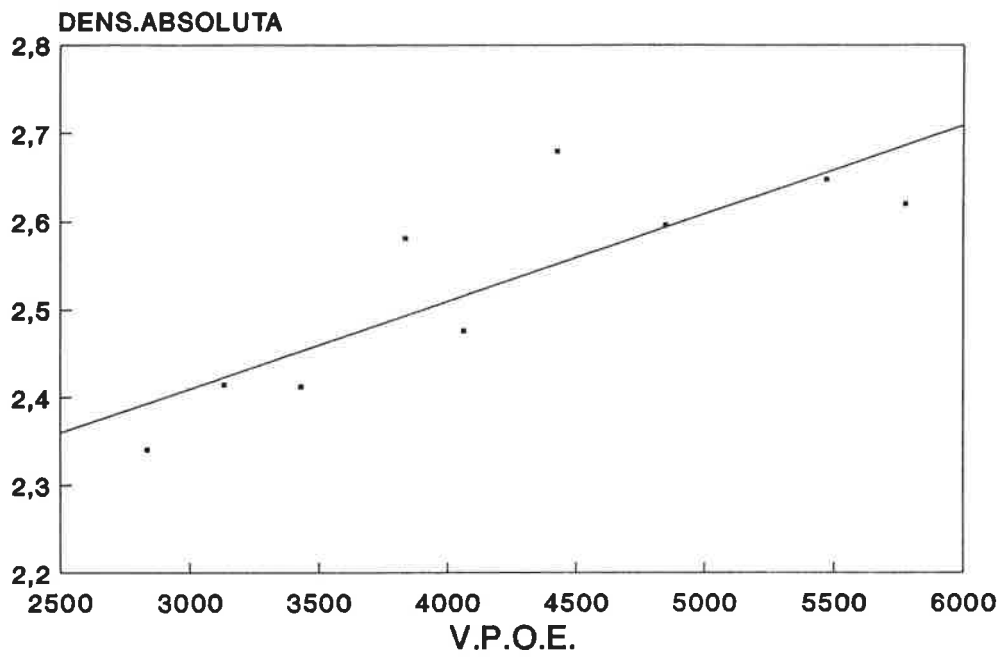
POR. ACC. AL AGUA

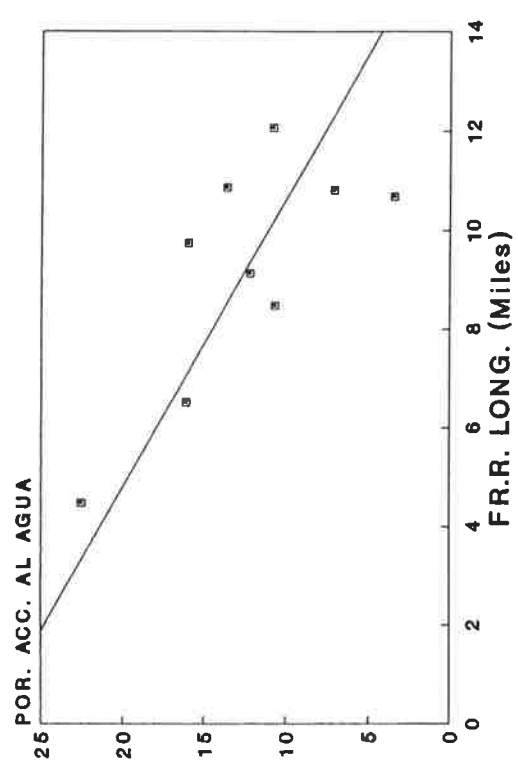
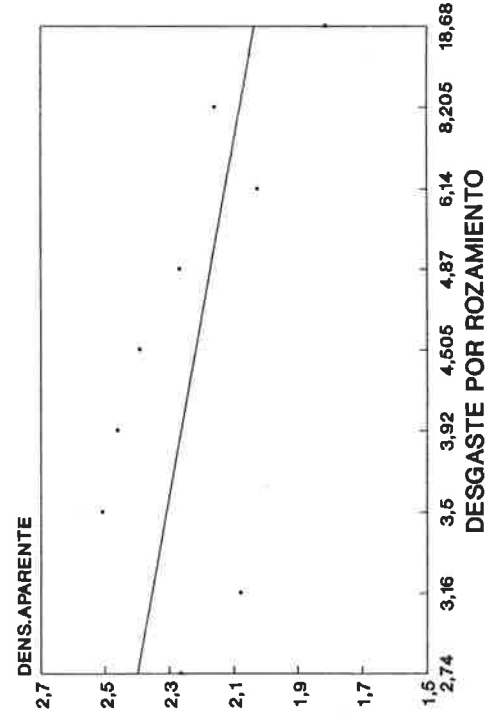
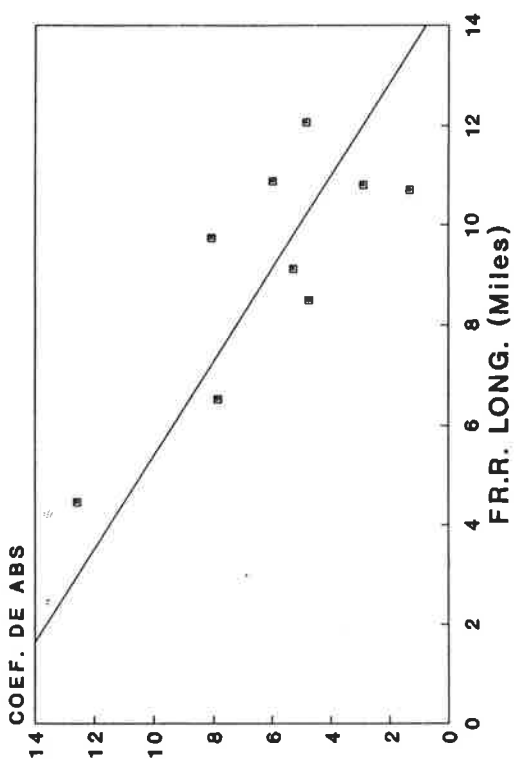
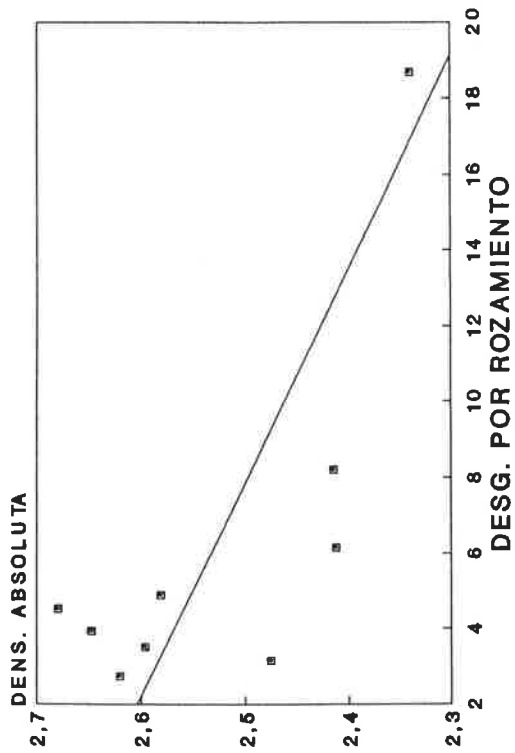


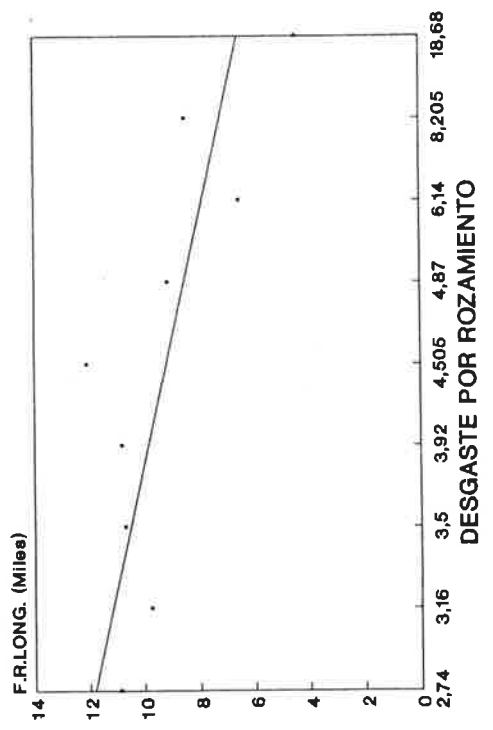
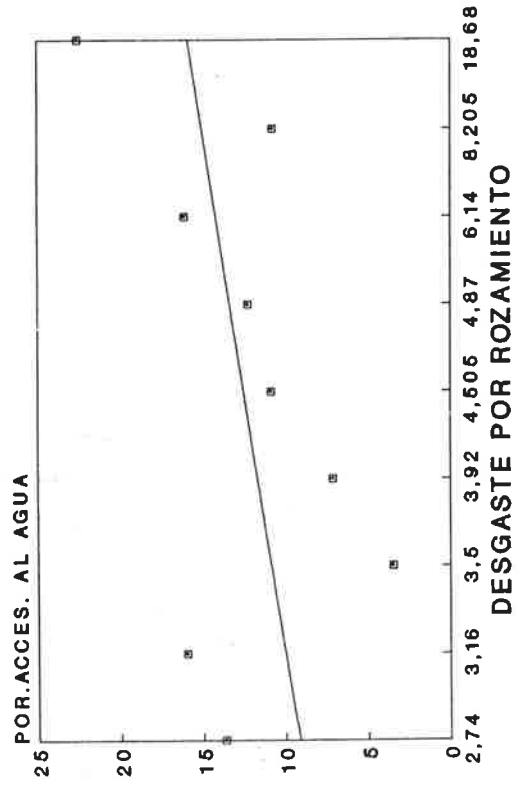
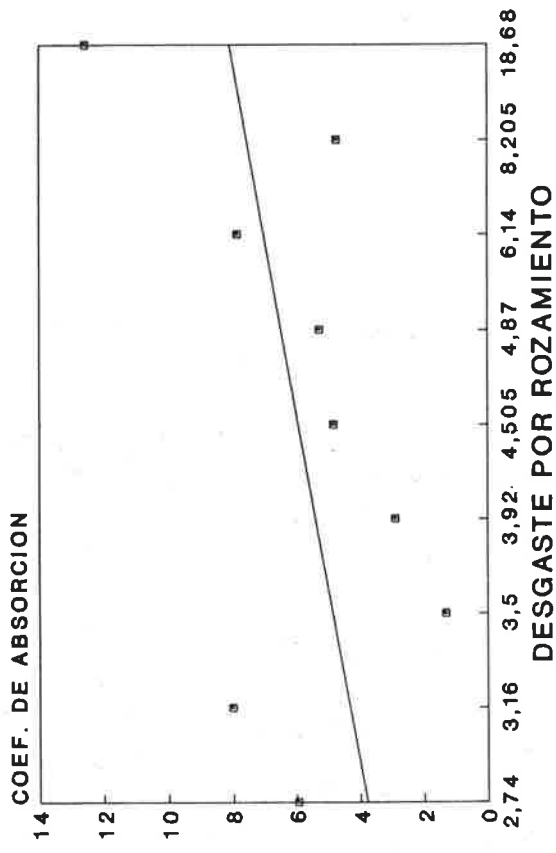
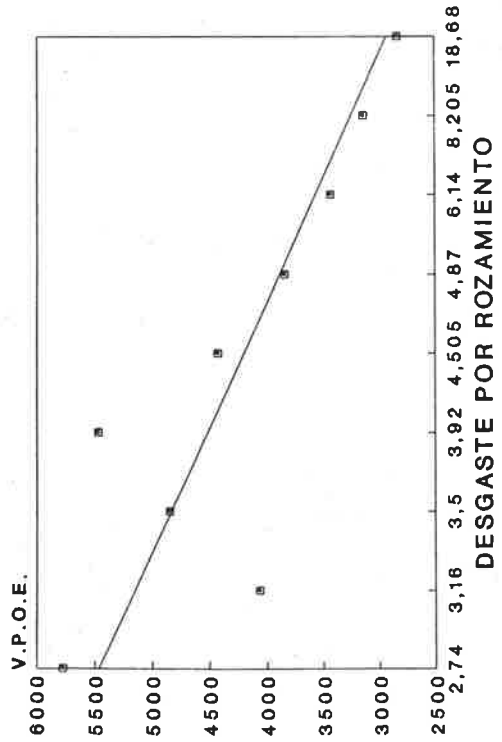


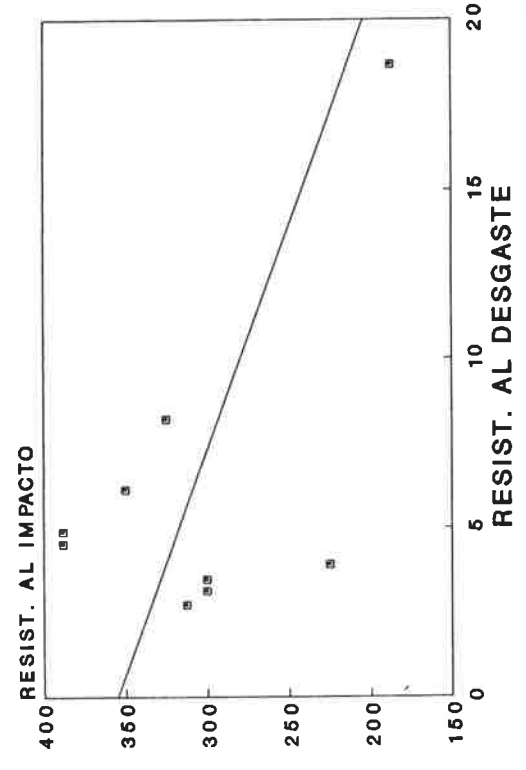
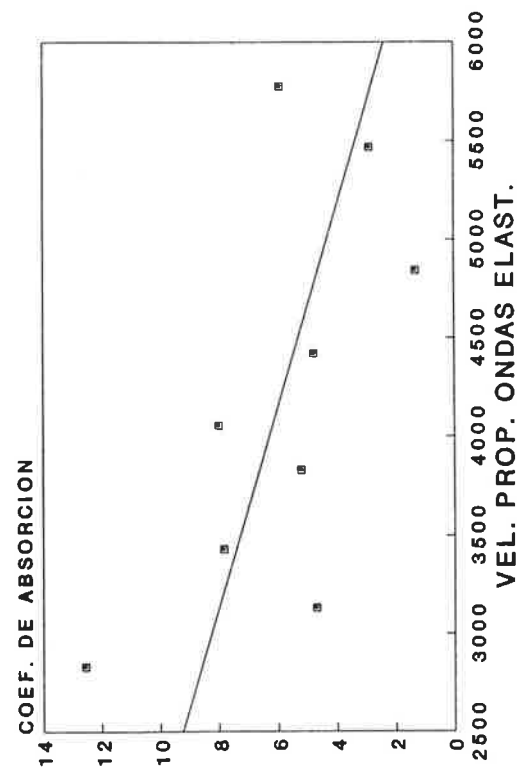
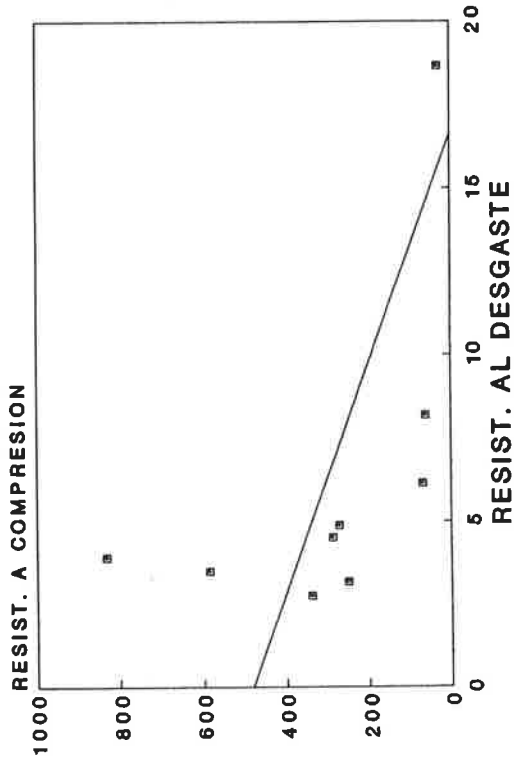
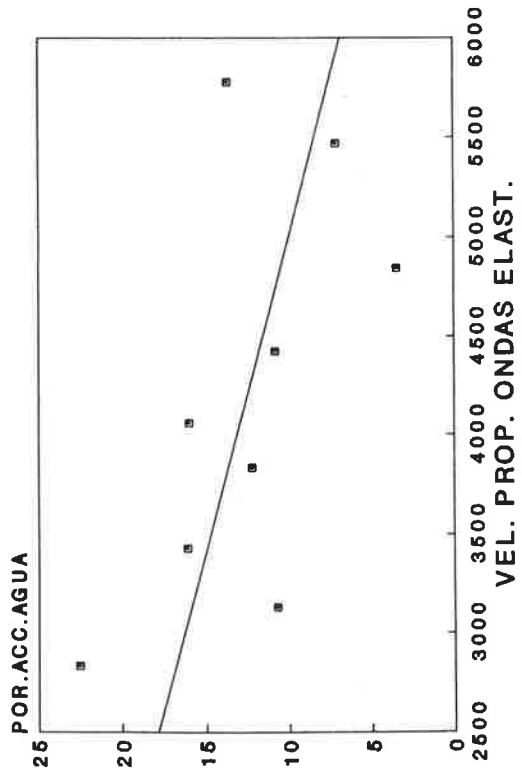


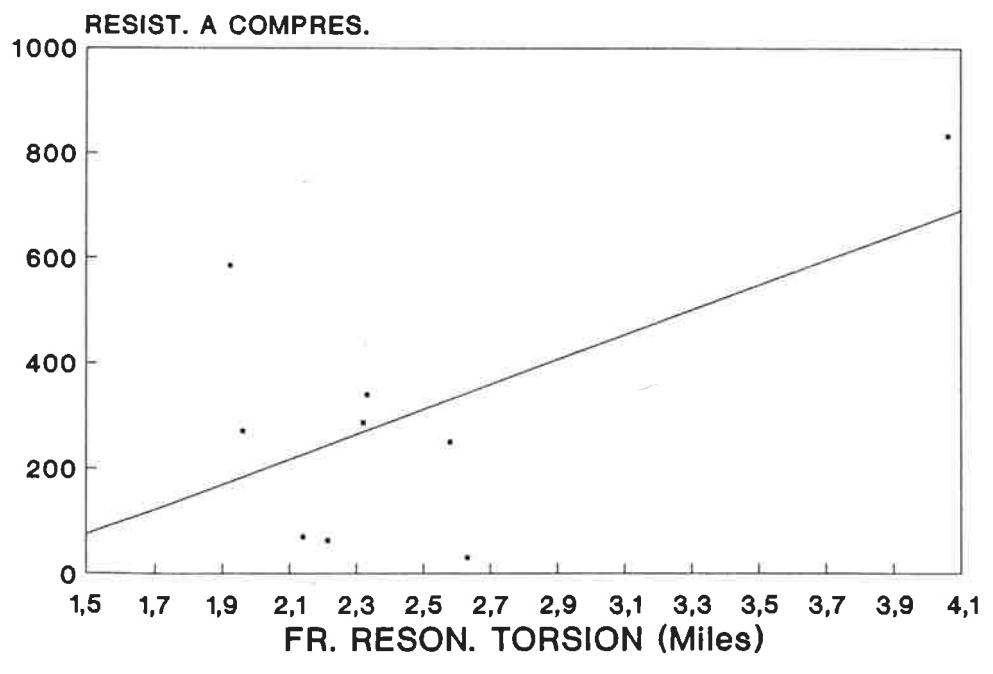
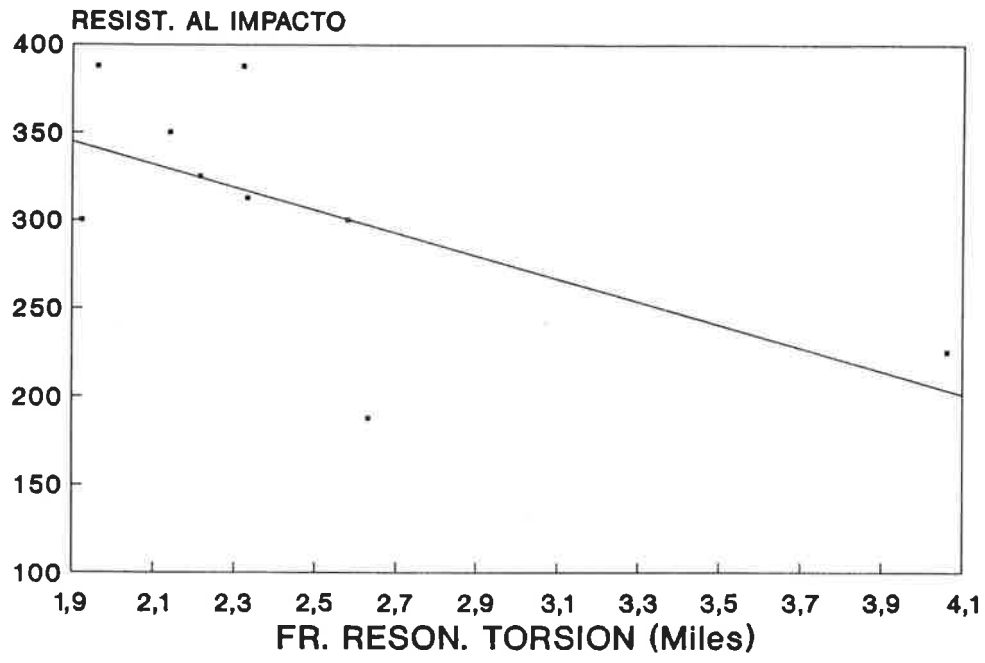












grupo, formado por las Densidades, Frecuencia de Resonancia, Velocidad de Propagación de Ondas Elásticas. Y lo mismo se puede afirmar dentro de otro grupo constituido por el Desgaste por Rozamiento, el Coeficiente de Absorción y la Porosidad Accesible al Agua. Entre parámetros de grupos diferentes, la correlación es negativa. Estas relaciones se esquematizan en el siguiente cuadro:

**Grupos de correlación positiva entre parámetros siempre que exista correlación**

<u>Grupo 1</u>	<u>Grupo 2</u>
Densidad absoluta	Desgaste por roz.
Densidad aparente	Coeficiente de abs.
Fr. res. longitudinal	Por. acc. al agua
Vel. prop. ondas el.	
Res. a la compresión	

Las relaciones entre los parámetros hídricos admiten una justificación teórica como se verá a continuación:

Sea

$G_h$  = Peso muestra saturada en humedad

$G_s$  = Peso muestra seca

$G_a$  = Pesada hidrostática

$G_v$  = Volumen de la parte sólida de la muestra



$G_p$  = Volumen de poros

$G_T$  = Volumen total de la probeta

$$G_a = G_s - G_v \quad \text{de donde} \quad G_v = G_s - G_a \quad [1]$$

$$G_h = G_s + G_p \quad \text{de donde} \quad G_p = G_h - G_s$$

$$G_T = G_v + G_p \quad \text{de donde} \quad G_T = G_h - G_a$$

$D_{ap}$  = Densidad de la probeta + poros

$D_{ab}$  = Densidad de la parte sólida de la muestra

$$D_{ap} = G_s/G_T = G_s/(G_h - G_a) \quad [2]$$

$$D_{ab} = G_s/G_v = G_s/(G_s - G_a)$$

$$D_{ab}/D_{ap} = (G_h - G_a)/(G_s - G_a) = 1 + G_p/G_v \quad [3]$$

CA = Coeficiente de absorción (Peso en agua en saturación, sobre peso en seco en %)

PAA = Porosidad accesible al agua (% en volumen ocupado por poros a volumen total)

$$CA = 100 \times G_p/G_s = 100 \times (G_h - G_s)/G_s \quad [4]$$

$$PAA = 100 \times G_p/G_T \quad [5]$$

de [4] y [5] se deduce que

$$PAA/D_{ap} = 100 \times G_p/G_s$$

y teniendo en cuenta [4]

$$CA = PAA/D_{ap}$$

donde se observa que existe una relación directa entre la porosidad accesible al agua y el coeficiente de absorción, mientras que existe relación inversa entre aquella primera magnitud y la densidad aparente.

Ahora bien, de [1] y [3] se deduce que

$$D_{ap}/D_{ab} = 1 - G_p/G_T$$

y teniendo en cuenta [3]

$$D_{ap}/D_{ab} = 1 - PAA/100$$

de donde

$$D_{ab} = D_{ap} \times 100 / (100 - PAA)$$

que muestra la relación directa entre las densidades.

## 2.5.5. CONCLUSIONES

Resumiendo a modo de conclusión, se puede afirmar, que a partir de los datos extraídos de los nueve tipos de piedra estudiados, se encuentra que:

- No parece existir relación entre la alterabilidad de la roca y el resto de los parámetros estudiados.
- No parece existir relación entre las Frecuencias de Resonancia de Torsión, ni Flexión, así como tampoco la Resistencia al Impacto, ni entre sí, ni con los demás parámetros estudiados.
- Existe correlación lineal positiva por un lado entre Densidades y Frec. de Res. Long. y por otro entre Resist. al Desgaste, Coef. de Absorción y Por. Accesible al Agua.
- Existe correlación lineal negativa entre los parámetros anteriores pertenecientes a diferentes grupos.
- Otros parámetros se relacionan entre sí de la forma en que se representa en el diagrama de conjuntos

correspondiente.

- Todas las correlaciones son lineales salvo la existente entre la Rest. a la Compresión y la Vel. de Prop. de Ondas Elásticas.

Naturalmente, y aunque estos datos no dejan de ser significativos, las relaciones encontradas que no tienen una justificación teórica, para ser generalizadas deben ser comprobadas en un número de tipos de piedra mucho mayor.

## 2.6. Conclusiones y recomendaciones

El proyecto objeto de este informe constituye la base de partida de futuras investigaciones en dos sentidos:

1. Establecimiento de una normativa de ensayos para caracterizar las rocas.
2. Creación de un catálogo de características de los tipos de materiales pétreos utilizados en la construcción en España.

Respecto al primero de estos puntos, en el transcurso de los trabajos realizados se ha encontrado que la normativa existente es en muchos casos ambigua, y en otros demasiado prolija. Es preciso definir con precisión cual va a ser el uso u objetivo de la normativa. Si esta va a ser utilizada para comparar resultados de investigación a nivel científico, se debe cuidar que las condiciones de los ensayos normalizados garanticen la validez de los resultados en términos absolutos y a ser posible que estos ensayos y los valores que de ellos se deriven, encuentren una justificación teórica. No es preciso prestar demasiada atención al hecho de que los ensayos sean fáciles de realizar.

Por ejemplo, en el ensayo de resistencia a la

Cristalización de Sales, se justifica la concentración salina normalizada en función ¿Quizá de la concentración media ó máxima que existe en el interior de los muros? ¿O de que el ensayo discrimine la alterabilidad de los diferentes materiales en un tiempo razonable?. Cualquier elección racional requiere estudios dilatados para saber el valor medio ó máximo de esta concentración en muros ó el tiempo de alteración de los diferentes materiales con distintas concentraciones. Lo mismo ocurre con las demás condiciones y parámetros a estimar (por ejemplo ¿Se determinara la alterabilidad mediante el tiempo requerido para que la muestra reduzca a la mitad su peso? ¿O sería más conveniente determinar la pérdida de peso tras un cierto número de ciclos como se viene haciendo?). En el ensayo de absorción de agua, es evidente la influencia, por ejemplo, del tamaño de la probeta. La absorción se establece a lo largo de la superficie y la superficie específica del material es un parámetro que debería ser tenido en cuenta. Todo abre un amplio campo de investigación si se tiene en cuenta el número de parámetros a estimar por ensayo, y el número de ensayos necesarios para caracterizar la roca.

Si lo que se pretende en cambio es caracterizar el material en orden a su uso industrial, el problema se simplifica. Aquí no es necesario cuidar la validez de los ensayos en términos absolutos, ni su justificación teórica. Basta, en efecto, que los ensayos estén lo suficientemente definidos como para obtener valores comparables con unos valores standard que definan calidades y usos de una forma pragmática. No obstante, lo cual, el problema todavía es

suficientemente complejo requiriendo investigación para determinar los ensayos y parámetros más significativos, debiendo cumplir además la condición de que sean fáciles de realizar, en orden a que la recomendación de normativa tenga una aplicabilidad en la práctica, dentro de la industria.

Los estudios aquí realizados han constituido en primer paso en ambos sentidos: Se han determinado numerosos parámetros en nueve tipos de roca y se han realizado estudios de la relación de unos parámetros con otros. Algunos son independientes y otros interdependientes, lo que de confirmarse estas observaciones, permitiría prescindir de los interdependientes siempre y cuando se conozca la ley de relación de una forma suficientemente precisa.

En cuanto al segundo de los puntos más arriba señalados, se recomienda el establecimiento de un catalogo de las características de los materiales de construcción de mayor uso en España (tanto en construcción histórica como actual) de forma que el arquitecto y/o restaurador sepan que material adquieren y con que material trabajan y, a su vez, el cantero que lo produce y vende conozca que material comercializa, donde y como encontrar elementos para reposiciones y que va a suceder con las piedra con que se está construyendo en la actualidad ó con que se está restaurando. Se da el caso de que hoy día, se está utilizando piedra en construcción monumental de edificios actuales y en restauración de edificios históricos, que los estudios aquí realizados muestran como de baja calidad y fácil alterabilidad en las

condiciones que van a soportar.

Las investigaciones objeto de este informe permiten conocer las características de nueve de los más importantes materiales de construcción histórica y actual. Sería conveniente extender estos estudios (si bien con menos parámetros previamente seleccionados) al resto de los más importantes tipos pétreos, tal como se ha llevado a efecto por el antiguo Instituto Geológico y Minero de España para Rocas Ornamentales ó por el Centre Scientifique et Technique de la Construction para diversos materiales de cantería europeos utilizados en Bélgica.



