UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID

TESIS

**MODELO TEORICO
DE COMPORTAMIENTO MECANICO
DEL YESO**

Por

FELIX LASHERAS MERINO

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Madrid, Abril de 1989

MODELO TEORICO
DE COMPORTAMIENTO MECANICO
DEL YESO

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID

TESIS

MODELO TEORICO
DE COMPORTAMIENTO MECANICO
DEL YESO

POR

FELIX LASHERAS MERINO

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

MADRID, ABRIL DE 1.989

TITULO: Modelo teórico de comportamiento mecánico del yeso.

AUTOR: Félix Lasheras Merino

DIRECTOR: Luis de Villanueva Domínguez

TRIBUNAL: Presidente Dr. D. _____

Vocales   Dr. D. _____

Dr. D. _____

Dr. D. _____

Dr. D. _____

FECHA: _____

CALIFICACION: _____

*A Inés, Raquel y Olga,
injustas víctimas
de mi empeño.*

RESUMEN

El yeso es un material de amplia utilización en las fábricas y revestimientos de albañilería pues, en prácticamente todo nuestro entorno cultural, no hay edificación ni local habitado donde no esté presente. Su abundancia, facilidad de obtención, calcinación y aplicación, han hecho de él, tal vez, el conglomerante de más antiguo empleo en la construcción, como atestiguan numerosos restos arqueológicos. Sin embargo, el comportamiento mecánico de éste material ha sido postergado, fundamentalmente por su falta de empleo estructural.

En sus aplicaciones más habituales, el yeso, una vez fraguado y colocado, está sometido a esfuerzos mecánicos directos, como en el caso de la pasta de agarre de tabiques y tableros horizontales; a roces e impactos, como en el caso de los guarnecidos; y a esfuerzos indirectos al tener que acompañar, en su deformación, a los elementos estructurales del edificio. Estos requerimientos hacen aconsejable conocer la respuesta de nuestro material frente a éste tipo de acciones.

Pero la falta de conocimientos sobre el comportamiento mecánico del yeso está acompañada por la carencia de estudios en los que se haya aplicado la metodología estadística conocida como "Diseño de Experimentos". Estas técnicas, desarrolladas en el mundo anglosajón, se empezaron a utilizar en la investigación experimental de problemas agrícolas, aunque ya se están usando ampliamente en investigación biomédica y en numerosos problemas ligados a la fabricación industrial, sin que hasta la fecha, que sepamos, se hayan empleado en la investigación aplicada a los materiales de construcción.

Así pues, con el tema del comportamiento mecánico y las técnicas estadísticas del diseño de experimentos, se ha planteado la conveniencia de diseñar y desarrollar unos modelos matemáticos que nos permitan avanzar en el conocimiento teórico, y experimental, del yeso como material de construcción.

Esta Tesis, limitada al estudio de yesos naturales sin adiciones ni aditivos, salvo los que ya vengan incorporados de fábrica, se ha desarrollado dentro de un Proyecto de Investigación más amplio, financiado por la C.A.I.C.Y.T., en el que se estudian también los compuestos de yeso con fibras y polímeros, razón de la anterior limitación. Por otro lado, la abundancia del yeso natural en nuestro país ha desechado la utilización de yesos sintéticos que, al aportar una problemática muy específica, han permanecido al margen de nuestra investigación.

Partiendo de todo un conjunto de ideas que atañen a los aspectos epistemológicos del conocimiento científico y experimental, se ha diseñado un concepto del sistema "Yeso como Material de Construcción" que ha permitido clasificar y ordenar, sistemática y sistémicamente, a las variables más importantes que tienen influencia en el comportamiento mecánico del yeso.

A partir de aquí, teniendo en cuenta que el yeso es un material cuya porosidad adquiere un papel de primera importancia, se ha diseñado un modelo geométrico de cuerpo poroso. Sobre la base de que el comportamiento mecánico de un material de porosidad elevada depende del número, tipo y

circunstancias de las superficie de contacto entre las partículas elementales que conforman al material, antes que de la propia resistencia intrínseca de estas partículas, consideradas individualmente, se ha estudiado el comportamiento de este modelo teórico, comprobando el papel que juegan las diferentes variables. En este sentido ha sido fundamental comprobar el papel de la porosidad total y del tamaño de los poros en las superficies de contacto intergranular.

La prolongación del estudio geométrico del cuerpo poroso y su visión en términos estadísticos nos ha llevado a definir algunos conceptos teóricos como el "tamaño experimental mínimo", como aquel que es representativo del material al abarcar toda la diversidad de tamaños de sus partículas y poros, del "tamaño equivalente" de un modelo geométrico en relación al cuerpo real, como aquel que mantiene sus mismas superficies y volúmenes. Además, aprovechando las leyes formales de homomorfismo y homotecia, se ha comprobado la viabilidad de la sustitución de cualquier forma real por un conjunto de formas regularizadas que mantengan constantes las superficies y volúmenes originales y, en consecuencia, todas las características del material que dependan de estas dos propiedades.

Por otro lado, como los diferentes factores que definen el comportamiento mecánico de un material dependen del conjunto de sus propiedades estructurales, es posible encontrar las relaciones matemáticas que los ligan entre sí, y aprovechar toda la serie de resultados experimentales para calcular un factor de resistencia mecánica que, sin ser respuesta a ningún tipo de acción particular, sea representativa de todas ellas.

El planteamiento experimental se ha desarrollado a partir de las prescripciones del diseño de experimentos. Para ello se han utilizado, como variables de posible control en obra y más significativas, el tipo de yeso, la cantidad de agua de amasado, el tipo de amasado, el tipo de curado y la humedad interna del yeso. Con éstas variables se han estudiado las respuestas mecánicas a tracción, compresión, cortante, flexión, durezas y módulo de elasticidad. Además se han estudiado las variaciones de porosidad y capilaridad, así como la influencia de éstas variables en los coeficientes de dilatación por humedad y por temperatura.

Se han observado algunas deficiencias en las normas y procedimientos de ensayo, por lo que se propone su modificación y, especialmente, se ha comprobado la dificultad de obtención del módulo de elasticidad a través del ensayo de flexión, puesto que la deformación que se puede medir está, en su práctica totalidad, impuesta por el indentado que sufren las probetas en éste ensayo. El desarrollo de un ensayo específico y las aplicaciones del mismo han servido para comprobar este extremo.

Finalmente, gracias al empleo masivo de un conjunto de aplicaciones de hojas de cálculo informático, específicamente diseñadas para este trabajo de investigación por su autor, se ha desarrollado un modelo matemático que, a partir de los factores estudiados, permite estimar el valor de cualquiera de las variables de comportamiento mecánico habituales, es decir de los diferentes tipos de resistencias, durezas y módulo de elasticidad en compresión, habiéndose realizado, complementariamente, un relativo avance en el conocimiento de los factores que influyen en los coeficientes de dilatación y capilaridad así como de sus posibles variaciones.

AGRADECIMIENTOS.

En primer lugar a la C.A.I.C.V.T., que financió el Proyecto de Investigación sobre un "Modelo Teórico de Comportamiento Mecánico del Yeso y sus Compuestos Fibrosos y Poliméricos" que me ha permitido realizar la presente investigación. Y, además, a las muchas personas, que con su estímulo y ayuda han contribuido, a veces sin saberlo, al desarrollo de éste trabajo. Citarlas a todas es imposible aunque no puedo dejar de mencionar a las que más cerca de mí han estado.

Un ejemplo de amabilidad exquisita me lo facilitó el personal de las bibliotecas del ICYT, IETCC, ETSAM y COAM, con una dedicación anónima injustamente poco valorada. Me ayudaron y, a veces, orientaron en la búsqueda de la bibliografía.

A mis amigos y familiares que han soportado algunos años de aburridas conversaciones con estoica resignación, mostrando interés por cuestiones que no les importaban. A mi hermano Miguel Angel, que me facilitó la documentación y los conocimientos iniciales sobre Symphony, pues sin ésta hoja de cálculo mi trabajo hubiera sido radicalmente diferente, y me permitió aclarar con él algunas cuestiones relacionadas con los modelos matemáticos y los problemas estadísticos. También a mi hermano Alfonso, que me facilitó documentación e interesantes puntos de vista asociados a la problemática de los cuerpos porosos desde la ciencia geológica.

A las alumnas, Marta García Refusta y Ana María Venegas Valladares, que me ayudaron en las primeras etapas de investigación del problema del indentado.

Y a todos mis compañeros en el Laboratorio y en la Cátedra de Materiales de Construcción de la ETSAM, particularmente a D.José García, que me enseñó los primeros pasos en los métodos de ensayo, y a D.José María Álvarez y D.Fernando Egido que, cuando pudieron, me ayudaron a realizar algunos ensayos. Muy importante fué la ayuda que me proporcionó la discusión y contraste de opiniones con el profesor D.Rafael Lleónart y con el Dr.D.Alfonso García-Santos, con los que he compartido el Proyecto de Investigación que abarca nuestras tres Tesis Doctorales. Me apoyaron constantemente, así como el resto de los profesores. El Dr.D.José Schnell me ha motivado, con su interés y estímulo, a implementar las técnicas de Diseño de Experimentos por su constante inquisición, que me facilitó fértiles ideas, y tuvo la infinita paciencia de ayudarme a corregir el manuscrito. Tampoco puedo dejar de mencionar al catedrático D.José Antonio Arenillas (q.e.p.d) que mostró un cariñoso interés por mi trabajo. Siento que no lo pudiera ver terminado, aunque lamento más su irreparable pérdida. Finalmente, y a pesar de la opinión de Umberto Eco, deseo dar las gracias a mi Director de Tesis, el catedrático D.Luis de Villanueva, por trascender su papel y honrarme con su amistad.

INDICE ANALITICO.

SECCION I. EL PROLOGO.

1. INTRODUCCION.	2
1.1 Un cuento que nunca empezó.	2
1.2 Definición del tema de investigación.	3
1.3 Justificación del tema elegido.	4
1.4 Situación actual.	5
1.5 Temas principales y periféricos.	6
1.6 Estructura del trabajo.	7
1.7 Referencias bibliográficas y sistema de notación.	10

SECCION II. EL ANALISIS.

2. EL MARCO CONCEPTUAL DE REFERENCIA	13
2.0 Introcucción.	13
2.1 El método científico.	13
El problema del conocimiento.	13
La metodología de la ciencia.	15
La epistemología de la ciencia.	16
Las teorías y las hipótesis. La explicación causal.	17
La observación experimental.	20
2.2 La concepción sistémica.	23
La idea de sistema.	23
Conceptos generales sobre sistemas.	25
Elementos de un sistema.	28
Relaciones entre los elementos de un sistema.	29
Clases de sistemas.	30
2.3 El papel de los modelos.	32
El concepto de modelo. Definición y tipos.	32
Modelos de caja negra vs. caja transparente.	35
La concepción determinista vs. probabilista.	35
Modelos matemáticos.	36
2.4 Visión estructural integrada del YMC.	42
Procesos, estados y comportamientos.	42
El sistema de actuación. Operaciones.	45
El sistema de estado. Transiciones.	47
El sistema de comportamiento. Reacciones.	47
2.5 Recapitulación.	49
3. EL YESO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCION.	50
3.0 Introducción.	50
3.1 El proceso de formación geológica del aljez.	51
Distribución y edad geológica de los yacimientos.	55
3.2 La piedra de yeso como materia prima: El aljez.	57
Propiedades químicas.	57
Propiedades físicas.	59
Textura cristalina.	59
Humedad de cantera.	61
Yesos químicos como materias primas.	63

3.3 El sistema de fabricación - calcinación.	63
Extracción.	64
Extracción de las canteras.	64
Trituración.	65
Homogeneización.	66
Calcinación.	67
Precalentado.	67
Calcinación.	67
Refino.	73
Expedición.	73
Mezclado y composición.	73
Ensilado y envejecimiento.	73
Expedición.	74
3.4 Deshidratación del material.	76
Papel del sistema de fabricación- calcinación.	78
Papel del estado del aljez.	79
Las impurezas.	79
La estructura cristalina.	80
La granulometría.	80
3.5 Características del yeso.	81
Composición química. El sistema de fases.	81
El Dihidrato.	82
El Semihidrato.	82
La anhidrita-III.	83
La anhidrita-II.	83
Formas alotrópicas.	83
Semihidrato alpha.	84
Semihidrato alpha de baja presión.	84
Semihidrato beta.	86
Estructura física.	86
Granulometría.	86
Superficie específica.	87
3.6 El sistema de amasado- ejecución.	88
Técnicas de aplicación.	89
Vertido.	89
Relación A/Y.	89
Temperatura de amasado.	91
Calado.	92
Batido.	92
Puesta en obra.	93
Compactación y vibrado.	94
Decantación y rebatido.	95
Curado y secado.	95
3.7 Hidratación y fraguado del yeso.	96
Fenomenología del fraguado.	96
Reología de la pasta.	96
Reactividad. Calor de hidratación.	98
Expansión de fraguado.	98
Retracción.	99
Secado.	100
Mecanismo de la hidratación.	100
Disolución.	100
Periodo de inducción y nucleación.	101
Precipitación y crecimiento cristalino.	102
Endurecimiento y recristalización.	102
Hidratación retardada de la anhidrita.	102
Modelos cinéticos.	102

3.8 El yeso rehidratado.	103
Composición química.	103
Impurezas.	103
El agua del rehidrato.	105
Papel de la humedad.	106
Estructura cristalina.	106
Granulometría.	106
Porometría.	107
Circunstancias ponderales.	108
3.9 El sistema de utilización requerimientos mecánicos.	108
3.10 Comportamiento mecánico del yeso.	110
Resistencia.	110
Deformabilidad.	110
3.11 Recapitulación.	110

4. EL ESTADO DE LA CUESTION. 111

4.0 Introducción.	111
4.1 Comportamiento mecánico del yeso.	111
El tipo de yeso.	113
La relación agua/ yeso.	115
Condiciones de amasado.	118
El proceso de curado.	121
La humedad del yeso.	122
Densidad y porosidad.	124
4.2 Los métodos de ensayo.	127
Ensayos mecánicos.	128
Ensayos físicos.	132
El yeso.	132
Las pastas.	133
El rehidrato.	133
Análisis químicos.	137
4.3 El análisis matemático.	139
Descripción de los resultados.	139
La inferencia estadística.	140
El análisis de la varianza.	140
El diseño de experimentos.	142
El análisis de correlación.	145
4.4 Recapitulación.	145

SECCION III. LAS HIPOTESIS.

5. GEOMETRIA DE LOS CUERPOS POROSOS. 148

5.0 Introducción	148
5.1 Características generales. Parámetros de estado.	148
Atributos ponderales y volumétricos.	149
5.2 Geometría de los cuerpos porosos.	152
Superficies específica y volumétrica.	152
La realidad de la superficie y del volumen.	153
Homomorfismo y homotecia.	155
Constantes de forma y volumen.	156
Superficie volumétrica en complejos formales.	160
5.3 Porometría y capilaridad.	164
5.4 Dimensiones geométricas.	170
Dimensión experimental mínima.	170
5.5 Recapitulación.	173

6. MODELOS GEOMETRICOS DE CUERPOS POROSOS.	175
6.0 Introducción.	175
6.1 Resistencia mecánica.	175
6.2 Modelos geométricos ideales.	176
Modelos de granos esféricos.	176
Modelos perforados reticulares.	178
El modelo de cubos escaqueados.	181
6.3 Propiedades físicas del modelo geométrico.	183
6.4 Ampliaciones a los modelos geométricos.	187
Particiones aleatorizadas.	187
Modelo dendrítico.	189
6.5 Modelo matemático probabilista.	190
Modelo matemático general.	190
6.6 El caso del yeso.	195
Cálculo teórico de la densidad aparente.	195
El grado de hidratación. Análisis de sensibilidad.	197
El contacto intergranular.	198
Distintos tipos de contacto.	200
La importancia del tamaño granular y del poro.	201
Isotropía estructural vs. anisotropía granular.	202
El papel de la porometría.	202
6.7 Recapitulación.	

SECCION IV. LA ANTITESIS.

7. LOS METODOS DE ENSAYO.	205
7.0 Introducción.	205
7.1 Las normas UNE.	205
Determinación de la relación A/Y a saturación.	206
Determinación de los tiempos de fraguado.	206
Confección de las probetas.	209
Conservación de las probetas.	210
7.2 El ensayo de flexión y el módulo de elasticidad.	211
Deformación intrínseca de la maquinaria.	212
La separación entre apoyos.	212
7.3 El ensayo de indentado.	216
Deformación teórica por indentado en flexión.	219
7.4 Determinación del módulo de elasticidad en compresión.	224
7.5 El ensayo de cortante.	228
7.6 La dureza Shore-C.	230
7.7 Dureza Brinell.	236
7.8 Ensayos físicos y ponderales.	238
7.9 Ensayos de succión capilar.	241
7.10 Reacpitulación.	245
8. DESARROLLO DEL PLAN EXPERIMENTAL.	246
8.0 Introducción.	246
8.1 El experimento factiorial.	246
Selección de las variables.	246
El plan factorial 2 ^a .	247
Selección de niveles.	250
Extensión del plan experimental.	252

8.2 Pautas de actuación.	255
Aleatorización y temporización.	255
Amasado y ejecución de las probetas.	257
Curado de las probetas.	259
Ensayos mecánicos.	259
Ensayos físicos.	260
8.3 Presentación de resultados.	262
Modelo de ficha.	262
8.4 Análisis de resultados.	263
Modelo de análisis de la varianza.	264
8.5 Recapitulación.	267
 9. PRESENTACION DE LOS RESULTADOS.	 266
9.0 Introducción.	266
9.1 Fichas de ensayo. Resultados.	266
9.2 Resistencias mecánicas.	271
El caso de la dureza Shore.	272
Cálculo del factor de resistencia mecánica.	275
9.3 Variables de estado.	282
9.4 Tiempos de fraguado.	287
9.5 Una comprobación externa.	289
9.6 Recapitulación.	291

SECCION V. LA TESIS.

10. LOS MODELOS MATEMATICOS FINALES.	293
10.0 Introducción.	293
10.1 Estudio de la porosidad y de la densidad aparente.	293
La porosidad.	293
La densidad aparente.	295
10.2 El coeficiente de capilaridad.	296
10.3 El modelo experimental. Resistencias mecánicas.	297
10.4 El modelo de caja transparente.	300
10.5 El modelo de caja negra.	302
Influencia del tipo de yeso.	303
Influencia de la dosificación.	305
Influencia del tipo de amasado.	306
Influencia del curado.	307
Influencia de la humedad.	307
El modelo de caja negra.	310
10.6 Los coeficientes de dilatación.	311
Dilatación por absorción de agua.	311
Dilatación por temperatura.	312
10.7 Recapitulación.	313

SECCION VI. EL EPILOGO.

11. CONCLUSIONES.	315
11.0 Introducción.	315
11.1 Aspectos metodológicos.	315
11.2 Aspectos teóricos.	319
11.3 Aspectos experimentales.	324

11.4 Aspectos prácticos.	329
11.5 Proyección en futuros trabajos de investigación.	330

SECCION VII. LA BIBLIOGRAFIA

12. BIBLIOGRAFIA POR AUTORES.	336

SECCION VIII. LOS ANEXOS (VOLUMEN 2).

A-1. NORMATIVA.	368

A-1.1 Pliego RY'85.	369
A-1.2 Pliego RY'72.	371
A-1.3 Recomendaciones INCE para control de yesos y escayolas.	375
A-1.4 UNE 41.169/73. Aljez o piedra de yeso.	378
A-1.5 UNE 102.010. Yesos de construcción. Especificaciones.	379
A-1.6 UNE 102.011. Escayolas de construcción. Especificaciones.	380
A-1.7 UNE 102.031. Métodos de ensayo físicos y mecánicos.	381
A-1.8 UNE 102.032. Métodos de análisis químicos	383
A-1.9 Método INCE para análisis de fases.	389
A-1.10 Disposiciones reguladoras del sello INCE.	390
A-1.11 Recomendación RILEM GP-1. Nomenclatura.	394
A-1.12 Recomendación RILEM GP-2. Medida de la dureza.	395
A-1.13 Recomendación RILEM GP-3. Comportamiento de los metales.	396.

A-2. DESCRIPCION DEL INSTRUMENTAL.	399

A-3. GRAFICAS DE INDENTADO.	402

A-3.1 Ensayo de indentado.	403
A-3.2 Ensayo de flexión.	405

A-4. VALORES GRAFICOS DEL MODULO E.	408

A-5. DISTRIBUCION DE LA DUREZA SHORE-C.	411

A-6. FICHAS DE RESULTADOS.	419

A-7. RESULTADOS DE SUCCION.	490

A-7.1 Altura de agua.	491
A-7.2 Absorción de agua.	494

A-8. PROGRAMAS DE SOFTWARE.	498

A-8.1 Análisis del diseño 2 ^a .	499
A-8.2 Análisis del diseño 2 ^a .	509
A-8.3 Análisis del diseño 2 ^a .	519

A-9. ANALISIS DE CORRELACION.	528
A-10. GRAFICAS DE CORRELACION.	537
A-11. ANALISIS DE REGRESION PARA LA DUREZA SHORE-C.	543
A-11.1 Regresión entre FLX y SHR.	544
A-11.2 Regresión entre RCUAD(FLX) y SHR.	548
A-12. ANALISIS DE LOS TIEMPOS DE FRAGUADO.	553
A-12.1 Principios de fraguado.	554
A-12.2 Relaciones entre PF y FF.	557
A-13. CORRELACION EN EL FACTORIAL 3X4.	561
A-14. ESTUDIO DE LA POROSIDAD.	566
A-14.1 Diseño factorial 2 ⁵ .	567
A-14.2 Diseño factorial 2 ³ .	569
A-15. ESTUDIO DE LA DENSIDAD APARENTE.	573
A-16. ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE CAPILARIDAD.	578
A-16.1 Coeficiente de capilaridad ponderal.	579
A-16.2 Coeficiente de capilaridad gráfico.	581
A-16.3 Diseño factorial 2 ³ .	583
A-17. ESTUDIO DE LAS RESISTENCIA MECANICAS.	587
A-17.1 Diseño factorial 2 ⁵ .	588
A-17.2 Diseño factorial 2 ⁴ .	590
A-18. ESTUDIO DE LOS COEFICIENTES DE DILATACION.	594
A-18.1 Coeficientes de dilatación por humedad.	595
A-18.2 Coeficientes de dilatación por temperatura.	597

LISTA DE SIMBOLOS Y VARIABLES

A	Agua de amasado (g); Codificación numérica de [A]
An	Anhidrita
a	longitud de un arco; dimensión; contenido en SO ₃
atg(...)	arco-tangente
B	Codificación numérica de [B]
BRN	Dureza BRiNell
b	ancho de la probeta; contenido en agua combinada
C	Codificación numérica de [C]
CA	Coeficiente de Absorción
CC	Coeficiente de Capilaridad
CD	Coeficiente de DESecación
COM	resistencia a COMpresión
CP	Compacidad (coeficiente de densidad)
CTE	resistencia a CorTantE
CV	Coeficiente de Variación
Ca	Coeficiente de amasado
C(f)	función de Compresión
C _c (f _c)	función de Compresión para tracción
c	cuerda de un arco; dimensión; grado de confianza
cc	centímetro cúbico
D	Densidad (genérica); Codificación numérica de [D]
DA	Densidad Aparente
DF	Dilatación del Fraguado
DH	DiHidrato
DN	Densidad Neta ("real")
DUR	DUReza de indentado
Da	Densidad del agua
Dh	Densidad del agua
Dy	Densidad del yeso (en polvo)
d	diámetro de esferas; luz de malla; dimensión; flecha de un arco; deformación de indentado
dM	diferencial de M
d _c	deformación en el centro de la probeta
d _i	deformación de indentado; variable estadística
dr	dimensión regularizada
df	diferencial de f
E	Módulo de Elasticidad; Codificación numérica de [E]
Ec	Módulo de Elasticidad en compresión
Err	Error absoluto
E _s	Error experimental total para "s"
e	error relativo a la media; error experimental aleatorio
e _s	error experimental para la sollicitación "s"

F	Fuerza o Carga
FF	Final del Fraguado
FLX	resistencia a FLeXión
$F^{-1}(\cdot)$	Función inversa (no inversa de la función)
$F(PR)$	Función de la PoRosidad
$F(f)$	función de Flexión
$F(\beta)$	Función del factor β
f	flecha; frecuencia de resonancia
G	Peso total de una muestra
GH	Grado de Hidratación
g	tamaño de grano; gramo(s); constante universal de gravitación (0.980665)
g_i	variable estadística ponderal
H	Humedad
h	altura; profundidad de huella Brinell
I	Momento de Inercia
IA	Indice de Absorción
IH	Indice de Huecos; Indice de Hidratación.
IND	resistencia a INDentado
IP	Indice de Pureza
i	subíndice de sumatorio
j	subíndice de sumatorio
K	constante
K_b	Constante de proporcionalidad FLX/BRN
K_e	Constante de proporcionalidad FLX/ E_c
K_s	Constante de proporcionalidad FLX/SHR
k	subíndice de sumatorio; constante
k_s	constante superficial
K_v	constante volumétrica
k'	constante
L	separación entre apoyos
LEm	longitud experimental mínima
l	subíndice de sumatorio; litro(s); densidad de un líquido; longitud de onda
M	Masa de agua absorbida; Masa (g); expresión a Minimizar
MS	Módulo de Saturación
m	media
m_m	media de muestras
N	Número total de elementos
N_{eq}	Número equivalente
n	constante; número de elementos
n_s	número de resultados experimentales (ensayos) para "s"
P	Peso (g)
PE	Peso Específico (densidad relativa)
PF	Principio de Fraguado
PR	PoRosidad
PS	Perímetro Superficial
P_a	Coefficiente de Proporcionalidad de la variable [A]
P_c	Pendiente de la curva f/compresión
P_e	Peso embebido

Pf	Pendiente de la curva f/flexión
Ps	Peso sumergido
Pt	Pendiente de la curva f/tracción
Po	Peso seco
Pv	Pendiente de la curva f/cortante
P1	Peso deshidratado
p	perímetro; radio de un poro
Q	Carga
Q _v	Carga de cortante
R	Radio de bola Brinell; Recorrido; Radio del cilindro
RCUAD(...)	Raíz CUADrada
RCUB(...)	Raíz CUBica
RM	Resistencia Mecánica
RMN	Resistencia Mecánica Normalizada.
RMS	Resistencia Mecánica a la Sollicitación "s"
RMe	RM de la escayola
RMy	RM del yeso
RM _e	Resistencia Mecánica de la escayola
RM _c	Resistencia teórica a compresión
RM _f	Resistencia teórica a flexión
RM _t	Resistencia teórica a tracción
RM _v	Resistencia teórica a cortante
RM _y	Resistencia Mecánica del yeso
R ²	Coefficiente de Determinación
r	radio
S	Superficie; Superficie cilíndrica; Sección de una probeta
SA	Superficie Accesible (al Aire)
SC	Superficie de Contacto
SE	Superficie Específica
SEc	Superficie Específica de Contacto
SEg	Superficie Específica de grano
SG	Superficie de Grano
SH	SemiHidrato
SH _H	Semihidrato Hidratado
SH _O	Semihidrato Original
SHR	Dureza SHoRe-C
SV	Superficie Volumétrica
SVC	Superficie Volumétrica de Contacto
SUM(...)	Sumatorio
S'	derivada de la función S
S(f)	función de una Sollicitación genérica
s	desviación típica; sollicitación genérica
sen(...)	seno
S _m	desviación típica de las medias muestrales
T	Tiempo
TF	Tiempo (duración) del fraguado.
TRC	Resistencia TRaCción
TS	Tensión Superficial.
TUE	Tamaño Unico Equivalente
TE _m	Tamaño experimental mínimo
T(f)	función de Tracción
t	Estadístico de Student; factor constante
tg(...)	tangente

V	Volumen
VE _m	Volumen Experimental mínimo
VP	Volumen Poroso
VP _a	Volumen Poroso accesible
VP _c	Volumen Poroso cerrado
VP _m	Volumen Poroso representativo mínimo
VS	Volumen Sólido
VT	Volumen Total
VT _m	Volumen Total mínimo de una muestra
V _a	Volumen de agua
V _p	Volumen de la pasta de yeso
V _y	Volumen del yeso (en polvo)
V(f)	función de cortante
v	volumen; distancia a la media; velocidad del ultrasonido
v ₁	variable estadística volumétrica
x	altura de agua
x ₁	variable estadística
Y	Yeso de amasado (g)
z ₁	variable estadística tipificada N(0,1)
[A]	Tipo de yeso: (a)= Escayola E-35
[B]	Agua de amasado: (b)= 0'7
[C]	Tipo de batido: (c)= Batido a máquina
[D]	Tipo de curado: (d)= Curado en cámara húmeda
[E]	Tipo de rotura: (e)= Rotura en seco
[M]	Media de un diseño experimental.
2 ⁵	Diseño experimental con 5 variables a 2 niveles
(+)	Nivel superior de una variable a dos niveles
(-)	Nivel inferior de una variable a dos niveles
Ø	diámetro
π	3'141592
β	ángulo; factor de escala

I

PROLOGO

CAPITULO 1.

INTRODUCCION.

...me interesan la ciencia y la filosofía exclusivamente porque quisiera saber algo del enigma del mundo en que vivimos y del otro enigma del conocimiento humano de este mundo.

(K. Popper: La lógica de la investigación científica. 1.958).

1.1 UN CUENTO QUE NUNCA EMPEZO.

Toda tesis tiene su "historia" y la de ésta, tal vez como la de muchas otras, es como aquélla del personaje que se quiso subir a una montaña para observar y comprender mejor al mundo que le rodeaba. El día que empezó su camino hacia la montaña era despejado y, en el horizonte, se veía con claridad la cima, e incluso la orientación del camino a recorrer ya que, desafortunadamente, no existía el camino. Al ir avanzando surgieron algunas dificultades. Arroyos a vadear y bosques que rodear, pero la cumbre seguía viéndose con claridad y todo desvío momentáneo era corregido con facilidad. Los verdaderos problemas empezaron cuando la montaña estaba más cerca. En la ascensión las estribaciones de la cordillera, y las copas de los árboles, tapaban a la montaña principal y más de una vez desorientaron al caminante que, afortunadamente, comprendía que todo era cuestión de seguir ascendiendo. Sin embargo no siempre la dirección era correcta. Nuestro personaje se cayó más de una vez resbalando entre las piedras, se arañó y tuvo que tomar respiro, pero pudo seguir ascendiendo.

Un buen día, casi sin darse cuenta, notó que estaba en el punto más alto de su montaña, y desde allí oteó el horizonte, disfrutando del paisaje. Sin embargo tenía que volver y contar a los demás cómo llegar a la cima. Esta vez fué más cauto y, observando con atención desde la cima, decidió el camino por el que podía bajar y que, por supuesto, era más cómodo y directo que el anteriormente abierto.

Todavía en el camino de descenso tuvo que volver más de una vez sobre sus pasos, subiendo y bajando, para asegurarse de que, ahora sí, era el suyo un correcto recorrido, tomando buena nota de su trazado y de los atajos que encontró.

De regreso a su casa notó que su visión del paisaje se había transformado y que apreciaba aspectos nuevos en los objetos familiares. Puso por escrito lo que recordaba, dibujó mapas y describió paisajes y, aunque hubo temas que no pudo recoger, lo más importante creyó dejarlo reflejado, aún con la duda de haberlo hecho en forma comprensible. Intentó aclarar como se llegaba a la montaña y el panorama que, por el camino y desde allí, se observaba. Pero, en realidad, nunca empezó así esta historia.

Hace algo más de cinco años, recién terminado el CEMCO-82, curso impartido por el IETCC y destinado a la Patología de la Edificación, empecé a madurar la idea de iniciar una Tesis sobre un tema relacionado con la patología de los materiales de construcción. Mi asistencia al curso de doctorado del Dr. Villanueva sobre "El yeso: sus aplicaciones y derivados" me indujo, definitivamente, a dirigir hacia el yeso mi interés, básicamente, por tres razones. En primer lugar me llamó la atención encontrar tantas posibilidades a un material que, anteriormente, me habían pasado inadvertidas; era un material con una complejidad físico-química relativamente manejable para un arquitecto y, por último, era notoria la carencia de investigadores, especialmente en nuestro país, tanto sobre los aspectos generales de este material como sobre sus aspectos mecánicos en particular.

En los dos años sucesivos, a la vez que fui ampliando mis conocimientos sobre éste material, empecé a estudiar las posibilidades de la utilización de herramientas estadísticas, y su derivación hacia modelos matemáticos. Sin embargo, una vez decidida su utilización, el cambio de mentalidad necesario para asimilar este progreso fué, y es, bastante más lento. Unicamente el estudio constante y la elaboración y reelaboración escalonada de ideas y experiencias me ha permitido ir asimilando estas técnicas que, sin ser originales en el mundo científico, no es frecuente encontrar en el campo de los materiales de construcción, en el que sólo se perciben algunos ecos. También durante éstos años ha sido fundamental el estudio de diferentes problemas de índole literalmente "metafísica" (mas allá de la física) para comprender el papel de la investigación y del conocimiento científico y, especialmente, de la concepción sistémica de la realidad previa a su posible modelización matemática.

Así pues, detectadas dos carencias, una temática y la otra metodológica, únicamente restaba iniciar el intento de rellenarlas. El resultado lo tiene el lector entre sus manos.

1.2 DEFINICION DEL TEMA DE INVESTIGACION.

El título de este trabajo, "Modelo Teórico de Comportamiento Mecánico del Yeso", pretende resumir su contenido, pero conviene ampliarlo y expresar con amplitud los temas que comprende.

Empezando por el final del título, pretendemos estudiar el comportamiento mecánico de un material de construcción tan conocido como antiguo, cual es el yeso. Pero este estudio lo haremos guiados por planteamientos "teóricos", y lo pretendemos resumir y concretar en formulaciones matemáticas. Siendo el matemático un mundo de abstracción y "teoría", también en este sentido tratamos con modelos teóricos. Pero ¿por qué modelo?

La explicación de lo que entenderemos por "modelo", y la justificación de su empleo, la veremos más adelante. Como introducción puede bastar con la explicación de que un "modelo" es un ente, en nuestro caso "teórico", "conceptual" o "matemático", que pretende resumir y parecerse a algunos aspectos de la realidad. En concreto un modelo matemático del comportamiento mecánico del yeso se comportará en forma análoga, o similar, a como la haría el yeso. Lógicamente no se pueden tener en cuenta la

infinidad de circunstancias que, en la completa realidad natural, actúan en torno al yeso, pero su conceptualización y estudio pasa por su comprensión como "sistema". Si vemos al material de construcción "yeso" como un sistema, podemos buscar su imagen como un "modelo", por lo que todo modelo, como una maqueta, supone una simplificación de la realidad, aunque lo que se pierde en detalle se gana en comprensión de la misma al separar, o seleccionar, únicamente los aspectos más relevantes y más significativos del objeto estudiado. A ello nos dedicaremos desde el primer momento.

1.3 JUSTIFICACION DEL TEMA ELEGIDO.

Todos los materiales que se emplean en edificación están sometidos a acciones mecánicas. Unas veces porque éstas actúan directamente sobre ellos, como es el caso de los elementos estructurales y también el de un revestimiento que tenga que soportar fricciones. Pero a veces las acciones mecánicas aparecen como resultado indirecto de movimientos impuestos o coartados, como es el caso de los tabiques que acompañan en su deformación a los forjados de una estructura y también el de un panel que al secar intenta retraer y no puede hacerlo por estar rígidamente unido en sus bordes, quedando traccionado.

En general, hay un campo inmenso de conocimientos sobre el comportamiento mecánico de los materiales de construcción no estructurales que está esperando ser investigado. Lógicamente, la importancia y repercusión de las carencias mecánicas de materiales que, desde un punto de vista estructural, son secundarios es, la mayor parte de las veces, de fácil solución. Sin embargo, la extensión y cantidad de estos materiales puede hacer que problemas cualitativamente nimios crezcan hasta tener repercusiones económicas verdaderamente importantes. Pensemos, por ejemplo, en el caso de las fisuraciones de la tabiquería, por deformaciones impuestas por los forjados y por falta de juntas de dilatación. Cualitativamente el problema no representa ningún riesgo pero ¿está el usuario dispuesto a vivir en una casa con los tabiques fisurados?. Puede ser que el coste de reparación de este problema sea muy elevado.

El yeso, y muy especialmente en nuestro país y zona geográfica, es el material que, podemos decirlo, nos encontramos en todas las edificaciones, y en todas las habitaciones. Su presencia en el techo y en las paredes, bien como guarnecido o bien como prefabricado (placas de techo y paneles para tabiques) es, prácticamente, omnipresente. Sin embargo nos falta mucho por conocer sobre su comportamiento mecánico, especialmente sobre los factores que más le ayudan o que más le afectan y, de modo muy particular, sobre su comportamiento frente a deformaciones impuestas que, junto con los aspectos de dureza, son los que pueden responder mejor a las solicitaciones habituales para los empleos del yeso.

1.4 SITUACION ACTUAL.

A pesar de que el yeso, como material de construcción, se lleva utilizando desde hace mas de 10.000 años, únicamente en los últimos 200 se ha investigado con carácter científico este material. Sabemos que el yeso es un sulfato cálcico parcialmente hidratado que proviene de la deshidratación incompleta de la piedra de yeso (aljez), si bien en los últimos años se han desarrollado diferentes procesos de obtención por vías químicas o de síntesis de este material, en muchos casos como subproducto

de otros procesos. Tal es el caso de los fosfoyesos, resultantes de la fabricación del ácido fosfórico, de los desulfoyesos, que proviene de la desulfuración de los gases de combustión de las centrales térmicas, titanoyesos y varios mas. En líneas generales, que posteriormente detallaremos, es sabido que el componente principal del yeso es el denominado sulfato cálcico semihidrato (abreviadamente "SH") formulado químicamente como $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$, aunque frecuentemente va acompañado de sulfato cálcico anhidro, o anhidrita, (abreviadamente "An") de formulación SO_4Ca , y de restos de materia prima cruda, que conserva su composición original como sulfato cálcico doblemente hidratado, o dihidrato (abreviadamente "DH") al que corresponde la fórmula $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

El yeso, al mezclarse con agua recupera el agua perdida en su calcinación, formando dihidrato químicamente igual al original aunque con una densidad bastante menor causada por la evaporación del agua utilizada en el amasado que, por razones de trabajabilidad de la pasta, es mucho mayor que la estrictamente necesaria. Así, mientras que la densidad de la materia prima (aljez) es del orden de 2.3 t/m^3 , la del yeso fraguado, dependiendo del agua utilizada en su amasado y de otras circunstancias que iremos viendo mas adelante, varía entre 0.5 y 1.5 t/m^3 , siendo los valores mas normales los situados en torno a la unidad, lo que viene a representar que más o menos la mitad del volumen aparente sea, en realidad, aire.

Los dos fenómenos anteriores, la deshidratación y la rehidratación, junto con los procesos a ellos asociados, conforman la base de toda la tecnología del yeso como material de construcción, y los podemos reflejar, en resumen como:

Deshidratación:

Rehidratación:

Como veremos, la investigación científica en torno al yeso se ha volcado en aspectos físico-químicos que han repercutido, y mejorado ostensiblemente, en la tecnología de fabricación industrial de este material que, en los últimos 50 años, ha pasado de ser un producto artesanal a ser uno de los más controlados en la industria de la construcción. Sin embargo, su preparación y ejecución de unidades de obra, salvo en aplicaciones prefabricadas y mecanizadas, sigue haciéndose casi exactamente igual desde hace siglos, situación que por la transformación de la mano de obra va desapareciendo, si no lo ha hecho ya, en los países mas desarrollados, donde los elementos prefabricados van sustituyendo aceleradamente a los tradicionales. Un caso muy significativo a este respecto es el de los tabiques, pues entre los prefabricados a base de cartón-yeso y los montados con paneles de yeso o escayola, han hecho desaparecer al tabique tradicional de ladrillo guarnecido con yeso en prácticamente toda la Europa Comunitaria, EE.UU., Países Nórdicos y Australia.

En la actualidad la mayor parte de las investigaciones están volcadas hacia aspectos de aplicación industrial y desarrollos de nuevos productos, siendo mínima la información relevante en torno a cuestiones de comportamiento mecánico como las que aquí nos plantearemos. Francia es el país que mas se distingue por sus trabajos en torno al yeso pues es un país rico en este material y con una gran tradición en sus múltiples aplicaciones, además de haber proporcionado los pioneros científicos, lo que le ha valido para introducirse, con una política muy acertada, en todo el mercado de los países en vías de desarrollo, especialmente norteafricanos, con abundancia de este material. La sigue Alemania, donde su industria es una de las más perfeccionadas. En Gran Bretaña y otros países sajones y escandinavos, incluyendo EE.UU y Canadá, la investigación se encamina hacia los problemas derivados de las aplicaciones del cartón-yeso y materiales compuestos, línea en la cual también se sitúan los investigadores de Israel y Australia. Ultimamente Japón ha dedicado numerosos recursos a estos temas, si bien aplicados a yesos de origen químico pues apenas si poseen yacimientos naturales. En fin, otros países del área mediterránea, y cada uno por diversas razones, como Argelia, Egipto, Italia y España, tienen una cierta presencia más como usuarios que como investigadores. En este último grupo, los primeros tienen abundancia de yeso, pero escasez de recursos científicos, en Italia ocurre la situación contraria, y en España, donde la mitad del país son suelos yesíferos, con yacimientos de inmejorable calidad y producción importante y competitiva, el actual proceso de incorporación al grupo de países más avanzados, permite mantener las esperanzas de continuidad de los escasos trabajos en estas líneas de investigación que, curiosamente al contrario que en el resto de los países, han sido desarrollados por personas más directamente ligadas a la construcción que a la química industrial. Es el caso, entre pocos más, de Conill Montobío, Arredondo, Fernandez París, y el director de esta Tesis. Particularmente, el presente trabajo ha sido posible gracias a su incorporación a un Proyecto de Investigación financiado por la C.A.Y.C.I.T.

1.5 TEMAS PRINCIPALES Y PERIFERICOS.

Ya hemos anunciado que nuestro objetivo es el estudio de los factores más significativos a la hora de comprender, y en definitiva controlar, el comportamiento mecánico del yeso. Pero antes tendremos que recorrer un ancho camino.

Deberemos estudiar qué variables son las que mejor definen el comportamiento mecánico de un material, es decir la manera de cómo se puede cuantificar este comportamiento. Y que acciones son las que pueden actuar e influir en él. Toda Tesis implica una Hipótesis y una Antítesis. Estudiaremos con detalle los problemas asociados al trabajo experimental en laboratorio, los métodos de ensayo y su implementación práctica.

También tendremos que saber cómo diseñar un plan experimental en función de unos objetivos y, lo que es más importante, conocer los objetivos. Estos van implicados en la definición de las hipótesis de trabajo. Estas hipótesis no pueden elaborarse sino desde el conocimiento previo del problema a tratar y su planteamiento y desarrollo teórico. La visión teórica de un problema lo condiciona de tal modo que los ensayos experimentales sólo se revelan capaces de contestar a lo que se les haya preguntado y para ello es imprescindible la formulación correcta de la pregunta.

El estudio de las investigaciones previas, y su reformulación en función del planteamiento teórico específico del problema investigado se revela como un paso imprescindible para conocer, o al menos intuir, el camino a recorrer.

Sin embargo, antes aún, nos hará falta disponer de un mapa general de la situación, tanto del proceso general de la investigación científica como del propio material de construcción sobre el que nos vamos a volcar. Conocerle y estructurar sus particularidades es, así, uno de los puntos de partida.

Visto de esta forma, el camino a recorrer parece claro y directo. Sin embargo cuestiones marginales, o de detalle, nos obligarán a detenernos momentáneamente en cuestiones que conviene aclarar para ver su posibilidad de repercusión posterior. Serán desvíos momentáneos, pero contribuirán a la comprensión del paisaje que rodea al camino por el que avanzamos. En concreto, la forma de entender un proceso de investigación, el diseño de los planes experimentales y de la forma de comprender sus resultados, el estudio del yeso desde su origen geológico hasta que termina colocado en un edificio, su consideración general como cuerpo poroso, la solución de problemas específicos de los métodos de ensayo y de la operativa experimental, y los métodos generales de análisis matemático de los resultados, serán cuestiones que habrá que desgarnar detalladamente para dar entidad y significación al objetivo que nos hemos planteado.

1.6 ESTRUCTURA DEL TRABAJO.

Esta tesis (nos referimos al documento escrito) está desarrollada en cuatro secciones que siguen el esquema dialéctico de Análisis, Hipótesis, Antítesis y Tesis, a las que se han añadido un Prólogo y un Epílogo, además de los Apéndices que recogen algunas cuestiones complementarias pero necesarias. Así pues seguiremos el esquema que aparece en la página siguiente.

En el capítulo 2 planteamos una serie de cuestiones previas y necesarias en todo proceso de investigación científica. Implican a la ideología del investigador y sin este marco de referencia no es posible entender correctamente muchas de las cuestiones posteriores. Pasamos a continuación a tratar el concepto de "modelo", para lo cual entramos en la concepción como "sistema" de la realidad estudiada y que se pretende modelar. La filosofía anterior nos permite estructurar una realidad compleja, como es la que afecta al yeso como material de construcción, y empezar a comprender las líneas generales del papel que sus distintos elementos juegan en el comportamiento mecánico del yeso.

El tercer capítulo está dedicado a resumir, con brevedad, los problemas asociados al yeso como material de construcción. Siguiendo las directrices diseñadas en el capítulo anterior pasamos revista a las variables más significativas que afectan al yeso, aprovechando la documentación bibliográfica y estructurándola en función de nuestro objetivo. Veremos como los sucesivos factores van dejando su marca que, según avanza el proceso del yeso, permanece y se ve reflejada en las etapas posteriores, lo que facilita su consideración implícita en la identidad del material.

ESQUEMA DE LA TESIS:

I. PROLOGO:

1. Introducción.

II. ANALISIS DEL TEMA.

2. Los marcos de referencia.
3. El yeso como material de construcción.
4. El estado de la cuestión.

III. HIPOTESIS. PLANTEAMIENTO TEORICO.

5. Problemática de los cuerpos porosos.
6. Los modelos matemáticos.

IV. ANTITESIS. CONTRASTE EXPERIMENTAL.

7. Implementación de los métodos de ensayo.
8. Diseño del plan experimental.
9. Resultados.

V. TESIS.

10. Modelos matemáticos de comportamiento mecánico.

VI. EPILOGO.

11. Conclusiones.

VII. BIBLIOGRAFIA.

VIII. ANEXOS.

1. Normativa.
2. Instrumental.
3. Gráficas de indentado.
4. Valores de E.
5. Dureza Shore.
6. Fichas de resultados experimentales.
7. Ensayo de succión.
8. Software.
- 9 a 18. Contrastes estadísticos.

En el siguiente capítulo pasaremos revista al conocimiento científico actual del comportamiento mecánico del yeso, las variables estudiadas y las conclusiones establecidas. Comprobaremos que el estudio del comportamiento mecánico de nuestro material necesita tener en cuenta su condición de cuerpo poroso. Se verá a continuación el panorama de las técnicas experimentales desarrolladas, aunque no podamos disponer de todas ellas, pero que nos faculta el abordaje de un plan experimental. Finalmente, de forma análoga, reflejaremos las líneas generales del análisis matemático estadístico que efectuaremos con los resultados numéricos obtenidos en la parte experimental.

El capítulo quinto, primero de los dos dedicados al planteamiento de las hipótesis, se apoya en el primer postulado básico de nuestra Tesis,

replantea los problemas asociados al yeso en su aspecto físico, desde su visión como cuerpo poroso, a partir de la consideración de la repetición homomorfa de la estructura formal de un material. Se expone una visión ordenada y significativa de parámetros experimentales más interesantes para definir sus circunstancias físicas y, a partir de leyes formales, nos iremos introduciendo en su problemática general. Finalizaremos planteando un modelo teórico para el cálculo de la porosidad de un yeso.

En el sexto capítulo planteamos el recurso a un modelo geométrico formal para comprender la relación estructural entre el tamaño de los poros y de los granos, así como de la superficie de contacto intergranular a la que, en definitiva, suponemos responsable de justificar la resistencia mecánica de un cuerpo poroso, lo que constituye el segundo postulado básico de nuestra Tesis. Veremos, sobre la base de modelos estadísticos, como es posible referir todas las variables de comportamiento mecánico, por ejemplo los diferentes tipos de resistencias, a un único factor, que llamaremos "factor de resistencia mecánica", y como es posible utilizar todos los resultados de los ensayos mecánicos para estimarlo con mayor precisión.

Ya en el capítulo 7 se inicia el contraste experimental, para lo que se verá un análisis detallado de cada uno de los métodos de ensayo que utilizaremos después, así como los ensayos de puesta a punto de estos métodos lo que, marginalmente, nos va a permitir llegar a conclusiones no exentas de interés. Se propondrá alguna modificación de los métodos de ensayo normalizados, así como la utilización de un nuevo tipo de ensayo, al que llamaremos "ensayo de indentado" que nos permite conocer la respuesta del yeso a esta acción, implicando mecanismos de dureza que, desde un punto de vista teórico, se formulan en perfecta coincidencia con los resultados experimentales. Además de observar la respuesta de diferentes tipos de yesos amasados en diferentes condiciones a los diferentes tipos de acciones mecánicas, se estudiarán aspectos muy concretos de los ensayos de dureza, recientemente normalizados en nuestro país, concluyendo sobre las mejores formas de realizarlos. Finalmente estudiaremos los ensayos físicos ponderales que tienden a conocer algunos aspectos relacionados con la estructura física porosa del yeso.

En el siguiente capítulo, octavo, se desarrolla y justifica el plan experimental utilizado, a la vez que se explican con detalle los pasos seguidos en el mismo, condición imprescindible para permitir su interpretación y asegurar, en su caso, su futura repetibilidad, condición absolutamente necesaria en todo trabajo que aspire a considerarse como "científico". Terminaremos con una presentación, mínimamente elaborada, de los resultados obtenidos.

El noveno de los capítulos está dedicado a la elaboración primaria de los resultados experimentales, a partir de comparaciones internas que, mediante estudios de correlación, nos van a permitir concretar, y calcular, los factores de resistencia mecánica propuestos en el capítulo 6. Estudiaremos, pues, la relación (correlación) que existe entre las resistencias a tracción, compresión, cortante, flexión e indentado, tanto entre sí como con las durezas Shore, Brinell y de indentado, e igualmente con el módulo de elasticidad en compresión.

En el capítulo décimo, dedicado a la Tesis o conclusión de nuestra investigación, llegaremos al final de nuestro recorrido planteando, a partir de los factores de resistencia mecánica calculados anteriormente, las relaciones causa-efecto entre las diferentes variables estudiadas, enunciando tres tipos de modelos teóricos. En primer lugar los basados en el propio plan experimental, a continuación el basado en las consideraciones teóricas de los capítulos 5º y 6º, para terminar con el

modelo matemático que, a partir de las variables utilizadas en el amasado del yeso, nos permite estimar su futura resistencia mecánica, en cualquiera de sus manifestaciones, estudiando su comportamiento teórico al variar estos factores.

Finalmente, el undécimo capítulo, a modo de epílogo, resume las conclusiones más interesantes y originales que se han encontrado a largo de nuestra investigación, incidiendo en los aspectos metodológicos, teóricos, experimentales y prácticos de éste trabajo. Además, puesto que una Tesis, como toda investigación científica, no es un punto de llegada sino otro de partida, se proponen los posibles desarrollos futuros que sería interesante seguir.

Se completa la documentación escrita con un conjunto de apéndices que recopilan los temas que, aún siendo importantes, su inclusión en el texto principal distraería su seguimiento en continuidad.

1.7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS Y SISTEMA DE NOTACION.

Para las referencias a la bibliografía hemos seguido el sistema de señalarla entre corchetes. Al nombre del autor le sigue, después de un apóstrofe, el año de publicación de su trabajo y, en su caso, después de una coma la página en la que está la cita. Al final de cada capítulo se recogen las referencias que le corresponden, aunque de una forma resumida. En el caso de los trabajos publicados en revistas únicamente reflejamos el título, abreviado según la costumbre internacional, el año (a continuación del apóstrofe) y, entre paréntesis el volumen, en números romanos, el número, con guarismos arábigos, y el mes, con abreviatura alfabética. Terminado el paréntesis aparecen las páginas del trabajo. Por ejemplo:

Holdridge, Walker: Trans.Br.Cer.Soc.'67 (LXVI,10,OC)485-509

es la referencia del trabajo de D.A.Holdridge y E.G.Walker publicado el volumen LXVI de las "Transactions of the British Ceramic Society", en el mes de Octubre del año 1.967, número 10, y en la páginas 485 a 509.

Para distinguirlos rápidamente, los libros se referencia utilizando mayúsculas para nombrar sus títulos. Les sigue la editorial, la ciudad y el año de edición.

En un Anexo se resume toda la bibliografía, ordenada alfabéticamente, y con los títulos completos de los trabajos, entre comillas, así como de las circunstancias de edición que sea necesario reseñar, en su caso, para una completa identificación.

Por otro lado, para la expresión de las fórmulas y de las variables hemos seguido una notación de tipo abreviado, en lugar de utilizar otra de tipo simbólica. Esta decisión está motivada por dos razones. En primer lugar la escritura informatizada no permite, con facilidad, recurrir al alfabeto griego ni a símbolos matemáticos como sumatorios y raíces cuadradas y, en segundo lugar, cada vez se impone más, por la complejidad de los problemas y la utilización de lenguajes informáticos, designar a sus variables con abreviaturas nemotécnicas que faciliten su seguimiento. La expresión de las fórmulas, tal vez, no resulte tan elegante, pero ganan en

comprensión y ahorran el esfuerzo de la constante memorización que permita asociar instantáneamente al símbolo con el concepto representado.

En todo caso siempre hemos utilizado las letras mayúsculas para los símbolos de operaciones matemáticas, como:

SUM(...) para el sumatorio de una serie de elementos, y
RCUAD(...) y RCUB(...) para las raíces cuadrada y cúbica de la expresión que aparezca incluida en el paréntesis a continuación.

Para la designación de variables se utilizan tanto mayúsculas como minúsculas, habiendo procurado siempre elegir una denominación fácil de asociar al concepto correspondiente.

II

ANALYSIS

CAPITULO 2.

EL MARCO CONCEPTUAL DE REFERENCIA.

La razón, en fin, es el instrumento que nos permite construir sistemas con la pobre materia prima de los sentidos y de la intuición. Ninguno de los componentes del trabajo científico - la observación, la intuición y la razón - puede, por sí solo, darnos a conocer lo real.

(M. Bunge: Teoría y Realidad. 1.972).

2.0 INTRODUCCION.

Abordamos en este capítulo las cuestiones de carácter general que, como constantes marcos de referencia, nos van a revelar la clave epistemológica de toda la actividad investigadora que desarrollaremos en los capítulos sucesivos. Estudiaremos, primero, una serie de ideas sobre la visión actual de la metodología científica, para pasar después a la problemática asociada a la concepción sistémica del objeto a investigar, lo que nos permitirá, más tarde, trazar un "mapa" de referencia de las variables a considerar y de sus relaciones mutuas, para pasar después a exponer los conceptos de "modelos" con los que trabajaremos de aquí en adelante. Veremos como se desarrolla el "Sistema- Yeso- Material de Construcción", con la tipología de las variables más significativas para su comportamiento, terminando con la exposición de lo que entenderemos por un "Modelo Teórico de Comportamiento Mecánico", y como puede llegar a definirse, a la luz de todas las ideas anteriores.

2.1 EL METODO CIENTIFICO.

EL PROBLEMA DEL CONOCIMIENTO

El hombre es un "animal racional", con cuerpo y alma, parte material y parte espiritual, que recibe impresiones sensoriales del mundo exterior (Naturaleza) e intenta assimilarlas en su mundo interior (Cultura). Existen, pues, dos vías de conocimiento; una exterior, usando la parte material, o sensorial del hombre, en forma de experiencia, y otra interior, gracias a su parte intelectual o racional, en forma de teoría. El conocimiento asociado a la primera vía, que asciende de la experiencia a la teoría, es de tipo inductivo, mientras que el asociado a la segunda vía, desde la teoría a la práctica, es de tipo deductivo. Sin embargo todo funciona como si la persona que observara la realidad estuviera bajo una escafandra de concepciones teóricas, en forma tal que su visión siempre se hiciera a través de este envoltorio que, a su vez, es constantemente modificado por las reflexiones que la realidad provoca en el observador.

Estas ideas, desde Platón, no son nuevas. También Galileo [Feyerabend'70,61] opinaba que los sentidos por sí solos, sin la ayuda de la razón, nunca podrían darnos una descripción verdadera de la naturaleza, y lo que se necesita para llegar a esa descripción verdadera son los sentidos acompañados del razonamiento. En este mismo sentido se pronunciaba Hume [Feyerabend'70,50], para quien las Teorías no pueden derivarse únicamente de los hechos.

Fig.2-1: La observación del mundo exterior resulta filtrada por los conceptos teóricos que, a su vez, resultan alterados por los resultados de la observación.

Este punto de vista, especialmente en los últimos años, tiene capital importancia para comprender la actividad de investigación científica. Para Brown [’77,105], uno de los puntos de partida de la nueva filosofía de la ciencia es el ataque a la teoría empirista de la percepción. Así, en respuesta a la opinión de que la percepción nos proporciona hechos puros, se arguye que el conocimiento, las creencias y las teorías que ya sustentamos juegan un papel fundamental en la determinación de lo que percibimos. Para deducir alguna información de la percepción, es necesario que seamos capaces de identificar los objetos que encontramos, y para identificarlos es necesario tener disponible un cuerpo de información relevante. Un observador que carezca del conocimiento relevante no obtendrá la misma información frente a un experimento que otro observador más experimentado, y hay, por tanto, un aspecto importante en el que el lego y el experto ven cosas diferentes aún cuando presencien los mismos fenómenos.

El conocimiento de la Naturaleza es simultáneo a su conceptualización, cuando no posterior. Primero se aprende, y luego se comprende. Como señala Kuhn [’62,292], sobre el aprendizaje de los niños: "Naturaleza y palabras son aprendidas simultáneamente". Feyerabend [’70,19] insiste en la misma idea: "Los niños usan palabras, las combinan, juegan con ellas hasta que atrapan un significado que hasta ese momento ha permanecido fuera de su alcance... La creación de una "cosa", y la creación más el completo entendimiento de una "idea correcta" de la cosa, son muy a menudo partes de un mismo e indivisible proceso y no pueden separarse sin llevar el proceso a un estancamiento."

La observación de un objeto, tiene dos componentes, que son la percepción y la interpretación. Una comienza donde termina la otra, y lo que la percepción deja para complementar la interpretación, depende drásticamente de la naturaleza, la cantidad de experiencia previa y del adiestramiento del observador [Kuhn’69,302]. Respecto a la interpretación, todavía resulta más clara la dependencia subjetiva del observador. Así pues, la idea de que la "experiencia" pudiera constituir una base para nuestro conocimiento se desecha inmediatamente desde el momento en que

"debe haber discusión para mostrar como tiene que interpretarse la experiencia" [J.S.Mill en Feyerabend'70,28], cuando además ésta discusión lo es sobre términos teóricos.

Feyerabend [70,102] resume perfectamente ésta situación: "Mucho de nuestro pensamiento surge de la experiencia, pero hay amplias zonas que no surgen en absoluto de la experiencia, sino que están firmemente basadas en la intuición, o incluso en reacciones más profundamente asentadas. Es cierto que frecuentemente contrastamos nuestras teorías con la experiencia, pero invertimos el proceso igualmente a menudo; analizamos la experiencia con la ayuda de los puntos de vista más recientes y la cambiamos de acuerdo con esos puntos de vista. A menudo confiamos en la experiencia de un modo que sugiere que tenemos aquí una fundamentación sólida del conocimiento, pero tal confianza resulta ser en realidad un truco psicológico. Confiamos de manera igualmente firme en principios generales de tal modo que nuestras más sólidas percepciones, y no solo nuestros supuestos, llegan a ser indistintos y ambiguos cuando entran en conflicto con estos principios."

LA METODOLOGIA DE LA CIENCIA

La tradición científica, tal y como se la entiende hoy en día, se forma en el Renacimiento con la confluencia de la tradición artesana medieval y la nueva ciencia aportada por la lectura de las filosofías griegas a través de la influencia musulmana, especialmente a partir del S.XVI con las investigaciones de mecánica aplicada desarrolladas por ingenieros y arquitectos [Mason II,35], pero es recientemente, en especial desde los últimos 50 años, cuando la investigación científica empieza a concebirse como un intento de interpretación de la Naturaleza, o Realidad, en términos de un marco teórico presupuesto. [Brown'77,11,35]. Bajo este punto de vista la investigación científica no puede reducirse, como en la anterior tradición decimonónica derivada del enciclopedismo y la tradición naturalista, a la mera recopilación de datos, sino que, por el contrario, necesita partir de un conjunto de suposiciones acerca de como se comporta la naturaleza, indicando al observador qué datos recoger y luego como interpretarlos. Junto a esto, el antiguo ideal científico de un conocimiento absolutamente seguro y demostrable ha demostrado ser una quimera. La petición de objetividad científica hace inevitable que todo enunciado científico sea provisional para siempre. "Lo que hace al hombre de ciencia no es su posesión del conocimiento, de la verdad irrefutable, sino su indagación de la verdad persistentemente y temerariamente crítica" [Popper'32,261]

Entendemos la ciencia como la combinación de teoría y experiencia, pero experiencia planeada, desarrollada e interpretada bajo planteamientos derivados de las teorías [Bunge'72,5]; en caso contrario, la experiencia no puede adjetivarse como científica.

Para Pérez de Laborda [85,26], el objetivo de la Ciencia, es la organización y clasificación del conocimiento siguiendo principios explicativos que pongan en relación las proposiciones que de otra forma aparecerían sin conexión mutua, lo que se consigue mediante las hipótesis, siempre y cuando estas proposiciones sean referidas a las consecuencias lógicas de la experimentación.

La supeditación de las observaciones experimentales a las "pre-visiones" teóricas no reduce, en absoluto, la importancia de la experimentación y podemos decir, con Popper [38,250] que "aunque en la historia de la ciencia es siempre la teoría y no el experimento, la idea y no la observación, lo que abre paso a nuevos conocimientos, es siempre el

experimento, lo que nos saca de las sendas que no llevan a ninguna parte, lo que nos ayuda a salir de los atolladeros y nos desafía a encontrar nuevas rutas."

Así es posible la progresiva mejora en el conocimiento del mundo que nos rodea gracias al desarrollo de las teorías científicas, lo que ha sido decisivo para el espectacular avance científico de los últimos años. Lo bueno de un procedimiento científico, nos dice Eco [77,53], es que "nunca hace perder tiempo a los demás: también trabajar siguiendo el surco de una hipótesis científica para descubrir después que hay que refutarla es hacer algo útil bajo el impulso de una propuesta precedente". Para Popper [38,250] "El avance de la ciencia no se debe al hecho de que se acumulen más y más experiencias perceptivas con el correr de los tiempos, ni al de que hagamos cada vez mejor uso de nuestros sentidos. No es posible destilar ciencia de experiencias sensoriales sin interpretar, por muy industriosamente que las acumulemos y escojamos; el único medio que tenemos de interpretar la Naturaleza son las ideas audaces, las anticipaciones injustificadas y el pensamiento especulativo: son nuestro solo "organon", nuestro único instrumento para captarla...el experimento es una acción planeada, en la que todos y cada uno de los pasos están guiados por la teoría."

Frente a los problemas de tipo técnico, que cada vez avanzan hacia una mayor especialización, la Ciencia se plantea su mayor generalización, englobando mayores y más cantidad de problemas mediante su incorporación a concepciones coherentes que faciliten su explicación. Mientras que la Técnica concreta los problemas, la Ciencia los generaliza.

Los campos de la actividad científica, continuamente en expansión, pueden agruparse, siguiendo a Kepler, en 5 partes:

- La física o metafísica de la Ciencia.
- Las hipótesis que explican las observaciones.
- La observación experimental.
- El cálculo matemático.
- La mecánica de los instrumentos. [Mason II,19]

Los aspectos relativos a los dos últimos de estos campos los trataremos a su debido tiempo, estudiando a continuación algunos de los problemas asociados a los tres primeros.

LA EPISTEMOLOGIA DE LA CIENCIA

Es precisamente el problema del conocimiento científico, y de como se adquiere, el que estamos tratando en la primera parte de este capítulo. La verdad es que como dice P. de Laborda [85,156]: "En cuanto uno se pone a reflexionar sobre la ciencia, sobre sus fundamentos, sobre sus ideas maestras, sobre sus procedimientos, sobre la validez de sus reducciones simplificadoras, nos encontramos en pleno campo filosófico", lo que aunque necesario, haremos sin excesiva extensión para no distraernos del fin que nos hemos trazado en nuestra Tesis.

La correcta comprensión de la actividad desarrollada para elaborar esta Tesis exige fijar su contexto, lo que podemos llamar sus "marcos de referencia". Estos marcos, como piel de cebolla, los vamos exponiendo de lo más general a lo más particular, y nos van servir de guía permanente para explicar el sentido último de nuestro trabajo.

La Ciencia no puede, ni debe, renunciar a planteamientos filosóficos más trascendentes que ella misma y, aunque el científico es pragmático y propone enunciados, o sistemas de enunciados, y los contrasta paso a paso con la experiencia por medio de observaciones y experimentos, hay que reconocer con Popper [35,38] que "la investigación científica es imposible sin fe en algunas ideas de una índole puramente especulativa (y, a veces, sumamente brumosas): fe desprovista enteramente de garantías desde el punto de vista de la ciencia, y que, en esta misma medida, es "metafísica".

Fig.2-2: Los marcos de referencia del trabajo intelectual, como cajas unas dentro de otras, dan sentido y coherencia a los planteamientos teóricos.

LAS TEORIAS Y LAS HIPOTESIS. LA EXPLICACION CAUSAL.

Estamos viendo como la ciencia se desarrolla a partir de teorías y experimentos. Las teorías son entidades complejas compuestas a partir de hechos, de hipótesis basadas sobre los hechos, de leyes teóricas, descripciones de los dispositivos de medida, interpretaciones, observaciones, etc. [García'70,116], y este complejo de hipótesis, leyes, y técnicas instrumentales debe satisfacer, para ser considerada científica, dos requisitos básicos (ya enunciados por Copérnico):

- Concordancia con lo observado.
- Coherencia con el resto del corpus teórico admitido.[Mason II]

La concordancia con lo observado ya hemos visto que, aunque esencial, no es definitiva, puesto que la propia teoría se encarga de buscar una interpretación de estas observaciones, mientras que la coherencia con otras teorías se mantiene en un delicado equilibrio de apoyos mutuos que puede venirse abajo, como un castillo de naipes, cuando surgen teorías revolucionarias que obligan a la reconstrucción del "corpus" científico y a la reinterpretación de las observaciones experimentales [Kuhn'62].

Ocurre que la investigación científica es como la construcción de un "puzzle". Debemos buscar las piezas (de conocimiento) y colocarlas en su lugar adecuado, ajustado e interrelacionado con las piezas vecinas. Pero para colocar estas piezas necesitamos un "modelo" o "mapa integrador" que nos indique, aunque sea aproximadamente, donde colocar las piezas, cuales son las que faltan y que forma pueden tener. En efecto, en el transcurso de todo proceso de investigación, y en última instancia en todo proceso intelectual, nos vamos encontrando con opiniones, hechos y situaciones que debemos recordar y valorar adecuadamente, ubicándolos en un esquema mental coherente, en relación con el resto de nuestros conocimientos. Precisamente la dificultad estriba en conocer, o al menos intuir, las relaciones entre las distintas parcelas de nuestro conocimiento que, a modo de caminos de interconexión, facilitan el tránsito de unas a otras. Así el

"conocimiento" se va tornando en "saber" cuanto más nítido y ordenado está nuestro mapa de conocimientos [Hofstadter] siendo aquí donde las teorías, en un sentido general, juegan su papel, pues nos suministran, cuando menos, un croquis de la situación y nos permiten ubicar diferentes "parcelas" de conocimiento y trazar sus "vías" de conexión. Aunque con un matiz más subsidiario, las teorías juegan el papel señalado por Kuhn [1,173] para un "paradigma"; con sus propias palabras: "...su función (de los paradigmas) es la de decir a los científicos qué entidades contiene y no contiene la naturaleza y como se comportan estas entidades. Esta información proporciona un mapa cuyos detalles son elucidados por medio de las investigaciones científicas avanzadas. Y puesto que la naturaleza es demasiado compleja y variada como para poder estudiarla al azar, este mapa es tan esencial como la observación y la experimentación para el desarrollo continuo de la ciencia".

La elaboración de hipótesis es labor inexcusable para la ciencia pues, como dice Bunge [72,9], "el fin de la investigación no es la acumulación de hechos sino su comprensión, y ésta solo se obtiene arriesgando y desarrollando hipótesis precisas."

Con relación a las leyes, P. de Laborda [85,128] nos dice que "no son tanto leyes que predicen comportamientos individuales, cuanto marcos de referencia de comportamientos y normas generales de obligado cumplimiento, pero que no tienen ni la pretensión ni la aspiración de llegar a poder hacer predicciones individuales."

Es curioso señalar que el primero que utiliza el concepto de ley (de la Naturaleza) en forma coherente es Descartes [Mason II,65] sobre la base de una analogía con las prácticas de la sociedad civil. Anteriormente las reglas cuantitativas, desde los antiguos griegos, se denominaban como "principios".

Más interés tiene dedicarnos, aunque sea brevemente, a intentar comprender lo que debemos entender por explicación, y más concretamente por "explicación causal". La estructura y la forma de lo que se ha entendido por explicación ha variado considerablemente a lo largo de la historia [Halbwachs'70,77] aunque, en la más común de sus acepciones, explicar es responder a la pregunta ¿por qué?. Esta operación implica, como dice Piaget [70,11] "comprender y no solo constatar", puesto que sólo la comprensión tiene carácter explicativo, mientras que la mera constatación no sobrepasa el carácter descriptivo de una definición.

Para entender el carácter comprensivo de una explicación nos interesa señalar el que un determinado aspecto de la realidad puede ser descrito a diferentes niveles. Según Popper [38,117], en un enunciado, que dispone de un sujeto y un predicado, podemos ver que la universalidad del enunciado afecta al número de sujetos que comprende, mientras que la precisión del mismo afecta a la extensión del predicado; si comparamos diferentes enunciados, que compartan sujetos o predicados, el menos universal, o el menos preciso, podrá ser deducido del más universal o del más preciso (salvo que uno sea más universal y el otro más preciso). La labor del científico queda marcada por la metodología de no dejar nada sin explicar, recurriendo a enunciados de mayor universalidad (de un nivel lógico superior), o de mayor precisión (en un nivel empírico superior). Una teoría científica debe aspirar a los máximos niveles de universalidad y precisión que pueda alcanzar, estando su posibilidad de corroboración en relación directa con estos niveles.

Un nivel lógico inferior, y empírico superior, implica especificar detalladamente la situación de los elementos y variables que intervienen en

el problema lo que, ocasionalmente, puede dificultar la comprensión global del problema y de su importancia. Una descripción a nivel superior implica, por ejemplo, especificar que circunstancias pueden desencadenarse por qué otras circunstancias [Hofstadter,362]. Los niveles superiores, más generales, son más explicativos, menos eruditos pero más comprensivos. Como dice Popper [38,116], a un grado más elevado de universalidad, o de precisión, corresponde un contenido lógico, o empírico, mayor, y por ello un grado de contrastabilidad más elevado. Así, partiendo de la base de que una misma realidad puede explicarse a varios niveles, una vez que nuestro discurso intelectual se desarrolla, por razones de sus propios objetivos, en un determinado nivel, únicamente el recurso a niveles lógicos o empíricos superiores de la realidad investigada permite explicar causalmente esta realidad. Estos cambios de nivel se continúan hasta que se encuentre un acuerdo coherente con el resto de teorías científicas admitidas. Es así como se puede comprender la cadena de infinitos ¿por qué? que se puede plantear ante cualquier problema no acotado en sus niveles descriptivos.

Los conocimientos científicos se apoyan y sujetan mutuamente formando un cuerpo internamente coherente. Unos hacen referencia a otros en una enmarañada cadena sin fin, pero puede bastar, como vimos, la rotura de algún eslabón crítico para desmoronar todo un cuerpo de conocimientos que en apariencia estaba "sólidamente fundado".

Ahora bien, como señala Piaget [70,15], toda explicación causal acaba por incorporar la noción de estructura al sentido lógico-matemático, y lo que es en realidad "explicativo" no son las ideas intuitivas que se pueden asociar a los conceptos involucrados, sino más bien las relaciones estructurales entre estos conceptos [García'70,109], su adecuada asimilación a estructuras objetivadas. "La explicación exige, para ser lo que la misma etimología de la palabra sugiere, una capacidad de explicitar, de "entender" el dominio al que concierne, en suma, exige una toma de visión sobre la estructura del objeto" [Henriques'70,182].

Para Bertalanffy [72,33], "las propiedades y naturaleza de los procesos en los niveles superiores no son explicables por la suma de las propiedades y naturaleza de los procesos de sus componentes, si éstos se toman aisladamente. Ahora bien, los niveles superiores son deducibles a partir de sus componentes si conocemos el conjunto de estos y las relaciones que los ligan."

Otra de las peculiares circunstancias de una explicación es su aparente carácter cíclico. Es frecuente dar un inmenso rodeo intentando explicar una cuestión para volver, paradójicamente, al mismo punto de partida. Sin embargo, apreciando mejor el camino recorrido, podemos comprobar que ya no estamos en el nivel inicial sino que, normalmente, estamos observando el problema planteado situados en un nivel (lógico o empírico) superior al inicial. El camino, pues, no ha sido exactamente circular sino más bien en espiral, como la ascensión a través de una escalera de caracol.

Cuando una explicación se expresa en el mismo nivel en el que se han definido los términos del problema, estamos ante una explicación "homogénea" que, en puridad, no es más que una mera "descripción" del fenómeno (definición), de acuerdo con Apostel [70,203], quien opina que la descripción y la explicación son subespecies de una actividad más genérica que él llama "proyección". Ahora bien, cuando el problema planteado se explica apelando a sus causas externas, ascendiendo en el nivel representacional de la realidad es cuando, mediante una explicación "heterogénea", estamos elaborando una explicación más científica del

fenómeno estudiado, por cuanto es necesario el acuerdo de esta explicación con las teorías científicas correspondientes a este nivel superior. Algo análogo ocurre si descendemos de nivel, elaborando una explicación "batígena" [Halbwachs'70,78] (del griego "bathus", profundo). Sin embargo, y esto es importante, como señala Halbwachs[70,80], "cada uno de estos tipos de explicación es unilateral y está limitado por el otro, cada uno contiene en potencia una contradicción cuyo desarrollo no puede resolverse si no es apelando al tipo opuesto" y, podemos añadir, a la coherencia interna con el resto de teorías implicadas. Fijémonos en el hecho que, desde el momento en que un fenómeno es expresado o descrito, esta descripción, o definición, ya tiene un ligero carácter explicativo con relación a los fenómenos que acontecen tanto en un nivel superior como en otro inferior.

Fig.2-3: Una "explicación" se desarrolla recurriendo a niveles lógicos superiores y/o a niveles empíricos inferiores, mientras que la "definición" se desarrolla al mismo nivel descriptivo de la realidad observada.

La definición, al desarrollarse en un único nivel descriptivo, y como dijo Menger [cit. en Popper'38,53], es un dogma: "solo las conclusiones pueden otorgarnos alguna perspectiva nueva". En general, podemos afirmar que toda definición es una tautología, un concepto axiomático.

LA OBSERVACION EXPERIMENTAL.

Si sobre un objeto material inciden un grupo de acciones, el objeto responderá con otro conjunto de reacciones. Siguiendo a Klir, llamamos suceso al conjunto formado por el grupo de acciones, más el grupo de reacciones, más la especificación temporal del instante al que se refiere su actuación sobre el material. Al conjunto formado por la coincidencia de uno o más sucesos y uno o más objetos le denominamos acontecimiento. Un experimento es un acontecimiento que se desarrolla en condiciones controladas, en las que se observan las respuestas del objeto a las acciones previstas por el investigador.

Una condición esencial para todas las observaciones experimentales es su carácter de "repetibilidad". Como dice Popper [738,44], sólo cuando se da la recurrencia de ciertos acontecimientos de acuerdo con reglas, o regularidades, pueden ser contrastadas nuestras observaciones por cualquiera. Así, en una observación experimental, puede definirse el "efecto físico" científicamente significativo, como aquel que cualquiera puede reproducir con regularidad sin más que llevar a cabo el experimento apropiado del modo prescrito. Únicamente este tipo de efectos se pueden considerar como datos o resultados de una observación experimental si son repetibles.

Desde el punto de vista de la Ciencia, las observaciones experimentales establecen "hechos" cuya validez sobrepasa la singularidad de una experiencia individual, por lo que la posibilidad de repetición del experimento, en diferentes lugares y ocasiones, tiene que ser garantizada por la metodología utilizada en los procedimientos experimentales que, por tanto, queda indisolublemente ligada a los hechos observados.

Las observaciones experimentales no solo son el resultado de una interacción entre la realidad física y el observador, sino también, y sobre todo, el resultado de una "interpretación" de esta interacción, interpretación que descansa, a su vez y en la mayoría de los casos, sobre otras teorías [García'70,116] pues, como dice Popper, el investigador que hace una observación experimental es un hombre que pone la teoría a prueba, pero además para hacerlo necesita de una masa de otras teorías auxiliares concurrentes ligadas a los procedimientos experimentales utilizados, lo que demuestra, como nos dice este autor, que somos mucho menos observadores que pensadores.

Nos recuerda P. de Laborda ['85,32] que colocar lo observado experimentalmente en la base de todo el conocimiento científico (conocimiento empírico-inductivo), es algo demasiado sencillo que no se corresponde, ni de lejos, con la realidad, que resulta más compleja y ambigua. Los datos no son tales, sino que son datos-de-una-teoría. "Solo unos ojos acostumbrados a mirar son capaces de ver lo observable". El objeto de nuestra investigación no es la "realidad objetiva", que no podemos definir, sino la realidad tal y como se nos presenta a través de los aparatos de medida. Así, hay en la labor del investigador dos momentos muy distintos que P. de Laborda denomina de "recopilación" y de "reconstrucción" de los datos [138], que son las dos caras de una misma moneda, puesto que todo dato supone una elección, es decir ser visto desde una reconstrucción pero, a su vez, una reconstrucción lo es verdaderamente cuando se apoya en los datos. Para Kuhn ['62,192] el papel del paradigma es fundamental, hasta tal punto que "en virtud de un paradigma aceptado, el científico sabe qué es un dato, que instrumentos pueden utilizarse para ubicarlo y que conceptos son importantes para su interpretación".

Los datos "primarios", obtenidos directamente de las observaciones experimentales, suelen no ser utilizables directamente. Por un lado su obtención implica el recurso a teorías y tecnologías que, en condiciones normales, no son objeto de la investigación que las utiliza (teorías "subsidiarias") [Monge'72,212...], aunque los datos observables tienen que interpretarse de acuerdo a éstas y no deben aparecer incoherentes con el resto de formulaciones teóricas implicadas y desarrolladas por la investigación en curso. Por otro lado estos datos experimentales deben ser "elaborados" para poder quedar incorporados, mediante teorías o "modelos", a formulaciones generales de carácter atemporal, lo que nos permitirá una expresión más simple y abstracta de la realidad observada. Pero además frecuentemente estamos interesados en "explicar" las relaciones encontradas de forma que no sólo describamos la realidad, sino que explicándola mediante el recurso a "Teorías" podamos incorporarla al cuerpo de conocimiento científico del mundo que habitamos.

Sin embargo, no podemos dejar de recordar que la ciencia no tiene necesidad de certidumbre definitiva, sino solamente de corregibilidad. [Bunge'72,257].

Feyeraben ['70,30] nos insiste: "El apoyo que una teoría recibe de la observación puede ser muy convincente, sus categorías y principios básicos pueden aparecer bien fundados; el impacto de la experiencia misma puede estar extremadamente lleno de fuerza. Sin embargo, existe siempre la

posibilidad de que nuevas formas de pensamiento distribuyan las materias de un modo diferente y conduzcan a una transformación incluso de las impresiones más inmediatas que recibimos del mundo."

El método científico se apoya en la Teoría y en la Experiencia. Sin embargo, aunque las previsiones teóricas y las observaciones experimentales nos facilitan el conocimiento del objeto investigado, ninguna de las dos puede pronunciar veredictos finales sobre su veracidad. El conocimiento es hipotético, perfectible por tanto, y sujeto a revisión permanentemente. Como afirma Popper, no se puede demostrar que es cierto, aunque, al menos, se podrá demostrar que no es falso. El método científico no puede conseguir la "verificación" de sus teorías, aunque sí su "falsación".

Popper [38,32] distingue entre cuatro posibles procedimientos para llevar a cabo la contrastación de una teoría:

En primer lugar se pueden utilizar la comparación lógica entre las conclusiones de diferentes teorías, contrastando su coherencia interna.

También podemos comprobar la forma lógica de la teoría para determinar su carácter, si es empírica (científica) o por el contrario es una tautología.

En tercer lugar se puede comparar con otras teorías intentando averiguar si la teoría examinada constituye un adelanto científico respecto a las anteriores.

Finalmente, se puede contrastar por medio de la aplicación empírica de las conclusiones que de la teoría se dedujeran.

Para Popper, las teorías no pueden ser "verificadas" (las teorías no son nunca verificables empíricamente), sino tan solo "falsadas", pero mientras que éstas resistan los contrastes científicos, la teoría permanece "corroborada" por la experiencia [33]. Siendo cualitativa la importancia de la corroboración, no importa tanto el número de casos corroborados cuanto la dureza de las diversas contrastaciones a que puede someterse una hipótesis científica [249].

Por nuestra parte, podemos ver que la observación o estudio científico de un objeto, o fenómeno, puede ser realizada de varias formas. Puede ser repetido o puede ser imitado, diferenciándose estas dos posibilidades en su grado de aproximación a la realidad estudiada. Mientras la "repetición" reproduce exactamente el fenómeno que se pretende observar, la "imitación" recurre a la analogía y simplifica las variables que inciden en el fenómeno, con objeto de facilitar su control y comprensión. Desde un punto de vista práctico tiene más interés la imitación por cuanto permite el trabajo de laboratorio en condiciones mejor controladas. La imitación puede ser "teórica", en cuyo caso estamos en la modelación de la que hablaremos más adelante, o "experimental". Si nos centramos en materiales de construcción, las observaciones experimentales pueden ser, básicamente de dos tipos:

- De representación. Donde se imitan las condiciones reales en forma lo más adecuada posible, dentro de las limitaciones de la experimentación. Forma el grupo que, normalmente, conocemos por el nombre de ensayos. Así, concebimos el ensayo como un "test" al que se somete el material, intentando reproducir las condiciones a las que este estará sometido en la edificación real, con el fin de conocer sus pautas de comportamiento. Distinguimos dos tipos de ensayo:

De simulación. Se enfrenta al material contra acciones del mismo tipo, pero con distinta forma de actuación, que en la realidad. Por

ejemplo los ensayos de resistencia mecánica. Es el tipo de trabajo experimental que desarrollaremos a partir del capítulo 7.

De emulación. Se imita la naturaleza y forma de actuación de los elementos externos en forma más precisa y controlada y, por tanto, supone una imitación más cercana a la realidad. Por ejemplo, los ensayos de envejecimiento acelerado.

- De reproducción. En donde tanto las acciones externas como el conjunto de condiciones son las reales, con la salvedad de que se controlan las variables que se supone, o se conoce, que interviene en forma significativa. Se conocen, normalmente, con el nombre de pruebas.

En relación con la interpretación de los datos y el papel del observador, hoy día está ampliamente aceptado el principio de indeterminación de Heisenberg, enunciado por este científico a mediados de los años veinte, según el cual, teniendo en cuenta que toda medición física entraña un intercambio de energía entre el objeto medido y el aparato de medida, se altera el estado del objeto, que se encontrará, después de haber sido medido, en un estado diferente al que tenía antes de su medición, por lo que la medición hace algo así como darnos a conocer un estado que acaba de ser destruido por el proceso mismo de medición, aunque, afortunadamente, en objetos macroscópicos puede desprejarse esta interferencia. Se da además la circunstancia que cuando dos magnitudes están fuertemente correlacionadas, no pueden ser medidas con precisión simultáneamente, aunque si pueden serlo separadamente [Popper'38,204].

Respecto a los posibles valores que pueden adquirir los datos para ser aceptados, para Popper [32,118] las técnicas de medición utilizables determinan ciertos "ámbitos" o regiones en las cuales las teorías en contrastación permiten una discrepancia entre las observaciones, por lo que el requisito, esencial para Popper, de que las teorías han de poseer el más alto grado posible de contrastabilidad, entraña que han de tolerar un mínimo ámbito, lo que obliga a elevar cuanto sea posible el nivel de precisión de las mediciones. Por otro lado, no sirve de nada dar los extremos del intervalo, o ámbito, salvo que sea posible fijarlos con un grado de precisión mucho mayor que el que esperamos para la medición original.

2.2 LA CONCEPCION SISTEMICA.

LA IDEA DE SISTEMA.

Desde hace ya un cierto tiempo, se viene hablando de "Sistemas" en la metodología científica y aunque un Sistema se concibe ya desde la antigüedad como un conjunto de elementos en interacción, por ejemplo el Sistema Solar [Mason II,92], ha sido en los años posteriores a la Segunda Guerra Mundial cuando la necesidad de investigar ciertos problemas complejos de forma unificada, integrando diferentes ciencias experimentales para intentar explicar la realidad sobre la base de un estudio de la totalidad, y la posibilidad de trabajar con herramientas informáticas que han elevado el nivel del cálculo matemático, ha llevado al desarrollo de concepciones teóricas de la realidad concreta bajo el nombre de "Sistemas". Klir, uno de los investigadores de la "Teoría General de Sistemas", nos recuerda que "El método de los sistemas se ha desarrollado en la ciencia con el propósito de tener en cuenta todas las interacciones entre los elementos de un sistema, cuya conducta se pretende predecir", lo que

contrasta con el método clásico "newtoniano" que concebía el objeto de investigación científica como colección de componentes aislados, de cuyas propiedades intentaban deducirse inductivamente las propiedades de todo el objeto, estudiando aisladamente las interacciones individuales para superponerlas más tarde, sin considerar las interacciones entre estas partes [Klir '72,9,15]. Volveremos a hablar de este problema cuando tratemos las técnicas estadísticas de "diseño de experimentos".

La Teoría General de Sistemas (TGS), desarrollada por numerosos investigadores, especialmente Bertalanffy y Klir (discípulo independiente del anterior), parte de una definición de sistema como un "complejo de elementos en interacción" o "un conjunto de elementos interrelacionados entre sí y con el medio circundante", consecuencia de una conceptualización analógica de los más relevantes rasgos universales de los objetos observados ['68,33,262], o también como una disposición de componentes interrelacionados para combinarse en un todo.

Hablar de Sistemas implica un cierto grado de abstracción y ambigüedad aparente, siendo como hacerlo de "conjuntos" o "entidades". Los Sistemas están compuestos por elementos que a su vez también pueden ser vistos como sistemas (subsistemas) y formando parte de otros sistemas (supersistemas) en una cadena teóricamente infinita que únicamente se limita por su finalidad práctica. Por ello, paradójicamente, tal vez su mejor definición implica la heterodoxa inclusión del elemento definido y, retocando la anterior definición de Bertalanffy, podemos decir que "un Sistema es un conjunto de sistemas, con las relaciones que los ligan, y en relación con otros sistemas". Sin ser una definición formalmente correcta, nos sirve para señalar los puntos más importantes de la concepción sistémica:

- Los elementos que conforman un Sistema pueden tratarse, a su vez, como nuevos Sistemas y sólo convencionalmente, en función de nuestros intereses, definiremos los objetos a investigar como Sistemas o como Elementos de los Sistemas. Allá donde decidamos parar la subdivisión de elementos y relaciones integrantes de un Sistema estará el límite entre elemento y sistema. La frontera será, pues, de conveniencia.

- Los elementos de un sistema pueden ser enormemente variados, objetos materiales u objetos ideales; homogéneos o heterogéneos, pero siempre son "objetos de investigación".

- El estudio de un sistema implica estudiar por un lado los elementos componentes de este sistema y, por otro, las múltiples relaciones en las que se implican estos elementos (inter-relaciones) de tal forma que la visión de un problema científico en forma "sistémica" nos lleva a realizar tanto una definición de los elementos del sistema (análisis) como una definición de las relaciones planteadas (síntesis) teniendo en cuenta la visión conjunta de todo el sistema.

- Finalmente, otra de las características fundamentales de una visión sistémica de la investigación científica es la consideración como "ambiente" de todo aquello no incluido en el Sistema. Como señala Klir ['72,61], cuando investigamos y observamos la Realidad, limitamos nuestro examen a la parte que, en ese momento, nos interesa (el objeto que investigamos). El resto no estudiado, y que queda al margen de nuestro trabajo, es lo que llamamos "Ambiente", con la particularidad de que no por no ser objeto de nuestra atención deje de tener influencia en el Sistema, lo que en muchos casos dificulta la delimitación exacta y precisa entre el objeto y su ambiente, llevándonos a que también nos interese la relación que exista entre ambos. Frecuentemente el investigador tiene que decidir si forma, o no, parte del Sistema o del Ambiente, e incluir su relación con

Sin embargo, la explicación causal de este comportamiento, como ya vimos, solo podrá hacerse si recurrimos a niveles descriptivos diferentes de aquel en el cual se desarrollan acciones y reacciones. El acceso a un nivel inferior, penetrando en el interior del sistema, nos permitirá ver las transformaciones materiales que sufren sus componentes, mientras que desde un nivel superior, incorporándolo a otras cuestiones, adquiriremos una comprensión más global del problema. Si el sistema exhibe un comportamiento particular y determinado será porque posee ciertas particularidades que producen tal comportamiento. A este conjunto de circunstancias se le llama Organización del sistema y la estudiaremos más adelante. A la parte constante de esta Organización, se la llama Estructura del sistema, siendo la Textura la parte variable (lo que Klir [ ] llama Programa). Pensando en el sistema que puede formar una asociación de individuos, vemos que su actividad será fiel reflejo de su Organización, la que dispondrá de una Estructura fija (departamentos y sus funciones y relaciones) y de una parte variable (las personas concretas que la forman) que siempre pueden ser sustituidas por otras sin grave alteración en su actividad social.

A partir de la terminología que nos proporciona Klir, podemos ver que a los elementos del sistema se les caracteriza mediante una serie de variables, es decir entidades que puedan ser medidas o valoradas. En un instante determinado, al conjunto de valores de todas las variables del sistema, en ese momento, se le llama Estado del sistema y no debe confundirse con lo que, posteriormente, llamaremos "Sistema de Estado" y que recoge todo el grupo de elementos del sistema relativos al estado del material. Igualmente debemos evitar incurrir en confundir el comportamiento del Sistema con el Sistema de comportamiento.

El paso de un estado a otro lo llamaremos transición, y al conjunto de estados y transiciones, actividad del sistema. La investigación científica de un Sistema trata de abstraer, del conjunto teóricamente infinito de elementos, un conjunto finito de propiedades y características, que consideradas aisladamente definen lo que se denomina "estado del sistema" [Halbwachs'70,79], para lo cual interviene sobre el sistema, controlando su sistema de actuación y observando las modificaciones que éstas acciones provocan.

Las relaciones genéricas entre elementos del sistema (que se particularizarán, mediante una serie de atributos, en sus correspondientes variables), las denominaremos acoplamientos. El comportamiento del sistema queda determinado por un conjunto de valores de las variables y sus acoplamientos.

La Estructura del sistema puede quedar definida por el conjunto de elementos y de sus relaciones así como por el conjunto de estados y sus transiciones.

En concreto, para Klir, los rasgos particulares de un Sistema son:

- El conjunto de variables que intervienen en los acoplamientos entre los elementos incluido, en su caso, el ambiente, junto con sus niveles de resolución.

- La Actividad del Sistema, como camino concreto dentro de la estructura Estado/ Transiciones.

- El Comportamiento del sistema, como camino definido dentro de la estructura Elementos/ Acoplamientos.

- La estructura de Elementos - Acoplamientos.
- La estructura Estados - Transiciones.

La descripción más simple de un Sistema es asimilarlo a una caja, con una serie de entradas y otra de salidas. Un sistema puede describirse de una forma "externa", o bien de modo "interno" [Bertalanffy'68,265]. Una descripción externa supone la consideración del sistema como una "caja negra" en cuyo interior desconocemos lo que ocurre, observando únicamente sus entradas ("inputs") y sus salidas ("outputs") y, como veremos más adelante, la descripción matemática de las funciones que relacionan las variables de salida en función de las entradas da lugar a los correspondientes "modelos de caja negra", y a sus ecuaciones se las denomina "funciones de transferencia" [Bertalanffy'72,43], o "funciones técnicas". Este tipo de descripción externa es eminentemente "funcional" y se aplica a la descripción del "comportamiento" del sistema por la actuación de ciertas operaciones externas sobre el sistema.

Fig.2-5: La caja negra. Observamos las entradas y las salidas del sistema, pero no lo que ocurre en su interior.

Por el contrario, una descripción interna del sistema recurre a la definición de una serie de "variables de estado" y sus interdependencias, cuya evolución se estudia en función de las entradas al sistema. Este tipo de descripción es esencialmente "estructural", y da lugar a modelos de "caja transparente", o "translúcida", y cuando el estudio se hace para ver la evolución del sistema a lo largo del tiempo a "modelos dinámicos".

Fig.2-6: La caja transparente. Mediante la hipótesis científica se explican los mecanismos de actuación de las entradas al sistema que dan lugar a las salidas observadas.

Así como las teorías de caja negra se desarrollan especialmente para

comprender la conducta, o comportamiento, de los sistemas, concentrándose en sus entradas y salidas observables, las teorías de caja transparente intentan explicar el comportamiento del sistema recurriendo a sus variables internas, en términos de constitución y estructura (estado), desarrollando construcciones hipotéticas que establecen vínculos (funciones) entre las variables de entrada y las de salida. [Bunge'72,58].

ELEMENTOS DE UN SISTEMA.

Estudiaremos los elementos, o unidades constituyentes de un sistema, agrupándolas de acuerdo a sus clases o "especies" [Bertalanffy'68,54], para, posteriormente, establecer las relaciones entre estos elementos. Ya hemos hablado de comportamiento y estado del sistema, así como de las acciones externas que pueden intervenir. Podemos ver con facilidad que las clases básicas de los elementos de un sistema pueden definirse haciéndolas corresponder con estos tres grupos, es decir según que estos elementos correspondan a su estado (interno) o a su comportamiento (externo), además de considerar las operaciones (externas) sobre el sistema que provocan la manifestación del correspondiente comportamiento.

Como ya hemos señalado, un elemento es un subconjunto del sistema cuya organización no nos interesa desde el nivel de observación adoptado. Por ejemplo, la "dureza" será un elemento del sistema definido por el subsistema que forma el conjunto resultado-técnica experimental utilizada en su determinación, mientras que la resistencia a tracción, aunque se obtenga con un procedimiento experimental especificado, no se ligará a él, adquiriendo así un aire de mayor generalidad. Definiremos así los **elementos operativos** del sistema como conjunto de elementos activos, los **propios** como esenciales del material, y los **característicos** o elementos pasivos que surgen como respuestas del sistema a los elementos activos.

Sobre los elementos del sistema, sometidos a observación, nos fijamos en la apariencia o manifestación de ciertos **atributos**, que fijamos asignándoles determinados **valores**, bien en forma **constantes** o en forma de **variable**. En ambos casos pueden concebirse como **adjetivos** (valoraciones cualitativas) o como **magnitudes** (valoraciones cuantitativas). Los atributos valorados correspondientes a los elementos operativos, mediante los cuales es posible actuar sobre el sistema, los llamaremos **operadores**, mientras que a los correspondientes a los elementos propios de su estado los llamaremos **propiedades**, y a los que corresponden a los elementos característicos de su comportamiento los llamaremos **características**. Por ejemplo podemos considerar la "trabajabilidad" de una pasta de yeso como uno de sus atributos, pudiéndola valorar cualitativamente (adjetivar), en forma de característica, como "árida" o "magra", o podemos considerar la "plasticidad" que, cuantitativamente, la valoraremos a través de un ensayo normalizado que nos dé la magnitud del diámetro que adquiere un cono de pasta sometido a una serie de sacudidas.

Como ejemplo de la anterior terminología podemos ver que la dureza será un elemento "característico" del material, pues se manifiesta como el atributo de una reacción a otra acción de penetración. Su valoración puede hacerse en términos cualitativos como "duro" o "blando", o cuantitativos, por ejemplo mediante un índice Shore-C. La dureza es, así, una variable del sistema. Pero, por ejemplo, la densidad real del yeso, es una "propiedad" constante del yeso que, aunque en hipotéticas condiciones pudiera variar, no será el caso en las condiciones en las que se desarrollará nuestro trabajo.

LAS RELACIONES ENTRE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA.

Al contrario que las operaciones, a las que queda sometido un sistema como "inputs" al mismo, y las respuestas de comportamiento de éste, como "output" del sistema, que son ambas observables, las interacciones entre los elementos del sistema, o más generalmente sus interrelaciones, no se ven o perciben nunca directamente; son construcciones conceptuales e hipotéticas que se conjeturan para explicar el funcionamiento del sistema en consideración [Bertalanffy'72,47].

Así pues, los distintos elementos del sistema, caracterizados por sus atributos, valorados mediante constantes y/o variables, cualitativas o cuantitativas, se les supone interrelacionados en función de consideraciones teóricas previas. En unas condiciones fijadas por el investigador estas relaciones pueden ser concretadas mediante la investigación experimental que, recordemos, es interpretada para "ver" estas relaciones conjeturadas. Sin embargo no interesan tanto las relaciones circunstanciales particulares ligadas a unas condiciones espacio-temporales determinadas, sino lo que Klir denomina "relaciones atemporales" de carácter genérico que nos permitan avanzar en la comprensión de la realidad observada y prever su comportamiento o evolución futura.

Cuando dos elementos de un sistema tienen en común uno o más atributos externos (observables), supondremos que existen relaciones entre los valores de algunas de las variables con las que los podemos definir, y entonces es cuando decimos que existe un **acoplamiento** entre estos elementos. Por ejemplo, si el batido de la pasta de yeso, que puede ser un elemento del sistema, se refleja en un tamaño cristalino determinado, pues cuanto mejor es el batido menor es el tamaño de los cristales de yeso que resultan del fraguado, y si a su vez la resistencia a compresión, otro posible elemento del sistema, aumenta cuando el tamaño del grano disminuye, ésta circunstancia nos permitiría hacer que las condiciones de amasado y la resistencia a compresión aparecieran "acopladas" en nuestro sistema.

El estudio bibliográfico de los conocimientos surgidos a lo largo de la Historia nos marcará las pautas para elegir los principales elementos del sistema, así como para predefinir sus interrelaciones. Sin embargo tanto los elementos como sus relaciones deberán ser reordenados, adaptados y filtrados por los objetivos de nuestra investigación y visión de los problemas implicados. La exposición "sistemizada", ordenada y coherente del cuadro de conocimientos actuales, nos señalará las carencias y puntos oscuros o nebulosos que nuestra investigación deberá aclarar. Lo veremos en el capítulo siguiente.

Posteriormente recurriremos al uso de **Modelos matemáticos** en una operación que implica una serie de transformaciones, entre ellas:

- Diseñar una correspondencia entre elementos y variables independientes del sistema y variables cuantitativas del modelo.
- Hallar la correspondencia entre los valores de las variables independientes del modelo y los valores de los elementos independientes del sistema según la correspondencia anterior.
- Realizar la operación análoga entre variables y elementos dependientes.

CLASES DE SISTEMAS.

Hemos dicho que para la definición de un sistema se seleccionan los aspectos que se suponen más relevantes en el objeto investigado, lo que nos permite definir los elementos constitutivos del sistema y las relaciones que los unen, que son las que nos describen la estructura del sistema. Una concepción "estática" del sistema supone que su estado, definido por el conjunto de valores adoptado por las variables asociadas a sus elementos, permanece constante durante la observación del sistema, de manera que el comportamiento del sistema se entiende determinado por el "input" del mismo junto con su estado interno, a la vez que el sistema cambia a un nuevo estado. [Rapoport'72,63]

En un sistema estático resulta fundamental comprender la noción de "histéresis" asociada a su estado. Según ésta, el estado del sistema en un momento determinado es fiel reflejo de todas las etapas y estados por los que anteriormente ha pasado el sistema. El sistema "recuerda" como si dispusiera de "memoria" los estados precedentes, reflejándose estos en el actual. Esta idea es importante para entender que podamos prescindir, a partir de un estado conocido, de toda la historia anterior a ese estado, y a partir de aquí, proyectarnos predictivamente hacia el futuro. Es decir, los procesos anteriores a un momento dado, son importantes para comprender el estado del sistema en ese instante, pero ya no son capaces de provocar otros comportamientos en el sistema que los que en su momento incitaron. A partir de ese instante, solo nuevas acciones pueden provocar nuevas reacciones que, únicamente, serán función de estas acciones y del estado del sistema en esa situación. Como vemos, el comportamiento mecánico del yeso, desde nuestra óptica, puede quedar perfectamente descrito por el estado del yeso, a su vez derivado de anteriores procesos de fabricación, y las acciones mecánicas que actúen, por lo que no buscaremos el efecto individual de operadores anteriores a la llegada del yeso a una obra, salvo para una mayor comprensión de todo el problema.

Frente a la concepción estática de los sistemas, se ha desarrollado en los últimos años la llamada "Dinámica de Sistemas", o teoría general de los sistemas dinámicos. Así como en el primer caso se conciben, entre los elementos del sistema, unas relaciones, o acoplamientos, de tipo lineal, o arborescente, convergentes en la mayoría de los casos en forma que podríamos llamar "co-incidente", bajo una concepción dinámica la relación más interesante es la "retroalimentación" (feedback) que forma bucles de entrada y salida en un mismo elemento, en forma "re-incidente" que, así, tiene la oportunidad de evolucionar alterando su comportamiento en función del mismo desarrollado en una etapa anterior. Frente a una concepción estática, en dinámica de sistemas las mismas variables nos sirven para definir el comportamiento y el estado de un sistema, independientemente de la fase evolutiva en la que se encuentre, cuando en el caso anterior (estático) se recurre normalmente a diferentes variables específicamente adaptadas a cada situación del sistema.

En el interior de un sistema retroalimentado se suelen distinguir [Bertalanffy'68,43] tres elementos específicos que se denominan, según su función, "receptor", "unidad de control" y "efector". El primero recibe el "input" que transforma en señal adecuada para su control, que a su vez actúa sobre el elemento encargado de proporcionar un efecto, o "output" adecuado a la señal de entrada.

El comportamiento de un sistema dinámico se determina como diferencia entre un estado inicial y otro final. En uno estático se utilizan los valores de las variables características en una situación determinada.

Fig.2-7: Los sistemas estáticos se diferencian de los dinámicos por la existencia de bucles de retroalimentación que permiten la evolución del sistema en función de su propia respuesta.

Fig.2-8: Mecanismo de autocontrol de un sistema retroalimentado [Bertalanffy '68, 43].

Esta diferenciación es importante para entender la manera de concebir y realizar un trabajo de investigación experimental. Por ejemplo, en el caso del fraguado del yeso, una consideración estática del sistema nos puede llevar a estudiar los tiempos de trabajabilidad de la pasta en función de la cantidad de agua utilizada en el amasado. Por el contrario, una concepción dinámica nos hace, por ejemplo, estudiar la evolución de la trabajabilidad en función del tiempo, cuando la relación Agua/Yeso ya la hemos fijado.

Suele ser posible concebir un sistema de las dos formas, siendo la finalidad perseguida por el investigador la que determina la forma más adecuada. Los sistemas con una clara dependencia temporal son los más adecuados para su estudio mediante Dinámica de Sistemas, aunque este estudio, por otros medios, puede hacerse mediante técnicas de "Series Temporales", especialmente si aparecen motivaciones cíclicas. Casi todos los organismos con capacidad evolutiva se adaptan mejor a un estudio mediante dinámica de sistemas. Nosotros seguiremos la concepción que hemos llamado "estática" lo que no impide, como veremos más adelante, estudiar la evolución del sistema. Simplemente no se utiliza el concepto de retroalimentación, al contrario que el de histéresis, y se eligen como variables más significativas las más apropiadas a cada una de las fases por las que pasa el yeso como material de construcción.

2.3 EL PAPEL DE LOS MODELOS.

EL CONCEPTO DE MODELO. DEFINICION Y TIPOS.

Para Bertalanffy [1968,19], un modelo es una "definición de un sistema", lo que podemos entender como una determinada concrección del Sistema conceptual. Esta definición (concrección) podemos hacerla de diversas maneras. Un poco más adelante, nosotros utilizaremos tres de las posibles vías de definición. La primera, de carácter analógico, supondrá reflejar esquemáticamente la organización y estructura del sistema. La segunda, de carácter geométrico formal, supondrá representar físicamente al material de construcción, mientras que la tercera, de carácter lógico-matemático, inspirada por las dos anteriores, supondrá la selección de las características más esenciales del sistema que definiremos más adelante, y nos servirá para estudiar las propiedades o el comportamiento del material, mediante su expresión matemática y en función, solamente, de aquellas características seleccionadas.

Utilizaremos, pues, tres versiones del concepto de "modelo". En este mismo capítulo, más adelante, veremos una primera concepción de los modelos como concrección (definición) más práctica e inmediata de un Sistema. Al trasladar la definición de los elementos del sistema a la valoración de sus atributos, y fijar sus relaciones mediante preformulaciones matemáticas, tenemos esta primera versión de lo que es un modelo (en este caso relacional), aunque en este capítulo nos limitaremos a su exposición teórica sin concretar ninguna formulación particular. Mas adelante, en los capítulos 5 y 6 veremos con detalle como el recurso instrumental a un modelo geométrico nos permite avanzar en el conocimiento teórico de la realidad física de los cuerpos porosos. Finalmente, con los datos suministrados por los resultados experimentales, expresaremos en forma matemática las relaciones de correspondencia entre las diferentes variables elegidas a la luz de los criterios expuestos a largo de esta Tesis.

Los Modelos son la compañía natural de los Sistemas y suponen una formulación concreta de éstos. Anteriormente ya explicamos como la visión sistémica implica la consideración de los múltiples elementos objeto de investigación y de sus interrelaciones. Como dice Bunge [1972,24], un modelo es "una representación de un objeto: a veces perceptible, a veces imperceptible, siempre esquemática y, en parte al menos, convencional", para poder ser interpretada como modelo de un objeto concreto que puede ser tanto una cosa como un hecho. Sin embargo, una simple imagen o esquema del objeto o sistema a representar, si bien puede sernos útil y comprensivo, no es suficiente como modelo, porque no puede insertarse en una teoría, puesto que los componentes de las teorías son las ideas, no las imágenes.

La idea de Modelo implica una imagen concreta de un sistema que, por esta razón, puede imaginarse a partir de diferentes modelos. Frente a la realidad conceptualizada que supone un sistema, está la realidad imaginada que implica su modelo. Mientras que un Sistema es un modo de concepción (del objeto investigado), el modelo lo es de representación. De uno a otro puede haber muy poca distancia, aunque el modelo implica valorar los elementos del sistema y formalizar sus relaciones lo que, por ejemplo, un simple grafo de un sistema no explicita. El modelo aparece en el pensamiento científico como abstracción y simplificación de la realidad sistémica, facilitando su comprensión y estimulando su control.

Las Teorías no deben confundirse con los modelos. Cada uno pertenece a un diferente nivel descriptivo de la realidad, situándose las primeras en

un nivel superior a los modelos, que se utilizan para explicar los mecanismos de actuación subyacentes en los sistemas. Los modelos, frente al carácter especulativo de las teorías, adoptan un carácter instrumental mucho mas inmediato, renunciando, además, a la aspiración de "Verdad" que persiguen las teorías, aunque mantienen, al menos, la aspiración de "verosimilitud" (similares a la verdad), y no pretenden tanto la "explicación" como la "representación" de los mecanismos implicados en los fenómenos estudiados.

A partir de la revolución científica del Renacimiento, los modelos analógicos (maquetas) empiezan a ser usados por Leonardo y Galileo para sus investigaciones estructurales [Mason II,36], aunque no ha sido hasta tiempos muy recientes, en los que la cibernética y la informática han posibilitado el desarrollo de modelos lógico-matemáticos, cuando se intenta simular el comportamiento complejo de la realidad concebiéndola de forma sistémica. En la actualidad, la gran potencia de cálculo que permite la utilización de grandes ordenadores, especialmente los de proceso vectorial, ha posibilitado la proliferación de "modelos matemáticos" apoyados en el cálculo por métodos numéricos de ecuaciones diferenciales, desarrollado mediante transformadas de Fourier. Sin embargo, no ha sido este, como se verá, el camino que seguiremos en esta Tesis, en la que se ha perseguido una línea de trabajo mas experimental que de cálculo teórico, a pesar de haber sido el ordenador una herramienta usada con carácter primordial.

Los modelos matemáticos, entendidos como expresión (matemática) de los mecanismos de relación entre los elementos de un sistema, se han utilizado desde los primeros tiempos de desarrollo de las ciencias. Los primeros fueron utilizados por la escuela pitagórica para intentar explicar el movimiento planetario [Mason I,32], siendo el de Ptolomeo el primer ejemplo de modelo matemático plenamente desarrollado [Mason I,68] al que siguió Guillermo de Rodas [Ibid.,80]. Más tarde es A.Osiander, en la nota preliminar a la obra de Copérnico, el que utiliza la teoría de éste como modelo matemático con carácter exclusivamente instrumental, renunciando a su valor de Verdad para no enfrentarse a la concepción cosmológica de la época [Mason II,9]. Son precisamente Copérnico y Kepler los que consideran a las matemáticas como mera herramienta intelectual al servicio de una teoría e independiente de ella [Mason II,34]. El camino de la Ciencia se desarrolla mediante una creciente "cuantificación" de problemas definidos inicialmente en sus aspectos "cualitativos", lo que facilita la experimentación y "optimización" de sus soluciones, entrando en el dominio de la Técnica.

En un Modelo, como nos dice García [70,112], hay funciones que ligán variables por medio de operaciones lógico-matemáticas en las que, además, intervienen ciertas constantes. También existen esquemas deductivos que nos permiten transformar las funciones, relacionarlas y calcular sus valores. Son los "algoritmos". Pues bien, a las constantes y variables del modelo se les suele hacer corresponder, en el mundo físico real, los atributos, características y propiedades, de los objetos, mientras que a las funciones corresponden las uniones "reales" entre esos atributos, y a los esquemas deductivos las relaciones causales.

Por "Modelo Teórico" entendemos, en general, aquel que incorpora toda o parte de una Teoría, diseñado a partir de planteamientos teóricos, amparándose en ella a la vez que la sirve de apoyo. Sin embargo nosotros lo entenderemos en un sentido más restringido como el recurso a una determinada concepción teórica previa del Sistema al que se refiere.

Al trabajar con modelos, nos dice Bunge [72,14], se desprecian buena parte de las complejidades inherentes a la realidad, pero en compensación

se obtienen soluciones (a los problemas planteados) más fáciles de interpretar, a la vez que vamos abriendo caminos para abordar posteriormente problemas más complejos. Necesariamente, para apreciar la realidad, tenemos que empezar por apartar información, seleccionando la más relevante, agregando posteriormente elementos hipotéticos. Con esta mezcla construimos un modelo esquemático de la realidad que, para dar sus frutos, se deberá insertar en una teoría susceptible de ser confrontada con los hechos experimentales.

Para nosotros, un modelo de comportamiento será aquel que recogiendo las variables de comportamiento de un sistema (reacción vs. acción), las "relaciona" con las acciones que las provocan y/o la "correlaciona" entre sí.

Una de las primeras cuestiones que debemos tener en cuenta, como indica Halbwachs [70,100], es que si sabemos hacer corresponder, mediante una "función de estado" el estado de un sistema determinado por un "operador" (conjunto de variables operativas) a un "comportamiento" del sistema derivado de su "estado" se le puede hacer corresponder el "operador" que actúa sobre la función de estado, obteniendo así, según hayamos planteado un modelo determinista u otro estocástico, un valor o una serie de valores posibles para el comportamiento del Sistema. Esta operación, sin embargo, no conduce tanto al conocimiento de este comportamiento como al de su medida. De aquí la importancia de conocer y explicitar las formas de medición, así como su relación con el comportamiento del sistema estudiado, y el papel e interacción del observador en esta medición.

Debemos señalar además la falta de identidad entre conceptos o elementos del sistema, y su valoración matemática en el modelo [Monge'72,188]. Aunque los "atributos" se concretan en "variables" no son, exactamente, lo mismo que ellas. Cada atributo puede definirse, delimitarse o valorarse, de muy diversas maneras, siendo importante hacerlo en la forma más significativa y apropiada a la finalidad del modelo a establecer.

En definitiva, nuestro trabajo de investigación se va a desarrollar a caballo entre las ciencias puramente experimentales, como la Ciencia de Materiales, y la Tecnología, como la Construcción. Desde ambas ópticas se puede investigar un material de construcción, sin embargo los problemas que surgen con la óptica adoptada son diferentes. Desde la Ciencia de Materiales, a partir de relaciones particulares encontradas experimentalmente y mediante su interpretación a la luz de planteamientos teóricos, pretendemos descubrir las relaciones estructurales entre las distintas variables. Sobre el material investigado, del que se conocen y controlan en lo posible sus condiciones de elaboración, se miden los valores de las variables que se pretende relacionar, y se buscan las relaciones particulares que se ajusten a la forma general impuesta por planteamientos teóricos. Con este planteamiento se pretende elaborar una explicación causal de cierto comportamiento observado, recurriendo a mecanismos internos del propio material.

En el caso de la Construcción, las relaciones entre las variables del modelo se consideran fijadas por planteamientos derivados de la Teoría y la Práctica, buscando la forma de llevarlas a cabo con los recursos técnicos disponibles. Este tipo de problemas se nos plantean, por ejemplo, para obtener un comportamiento mecánico deseado a partir del material y las técnicas de ejecución.

Hemos visto ya lo que significa, en líneas generales, el proceso de modelización de un sistema. Nos interesa ahora señalar que, una vez realizada esta modelización, tendremos un conjunto de variables independientes (las alterables directamente por el experimentador) en relación con el conjunto de variables dependientes (las respuestas del sistema frente a las anteriores), expresado en una serie de ecuaciones matemáticas donde aparecerán las constantes y parámetros del modelo que reflejan el estado del material y el conjunto de condiciones implícitas con las que se han desarrollado los trabajos experimentales. Una vez establecido el modelo pertinente, el interés radica en conocer como varían estas constantes y parámetros en función de las diversas condiciones de aplicación del modelo.

Lo anterior implica diferentes niveles de desarrollo para un modelo. En el más general se desarrolla un modelo-tipo de carácter "cualitativo" en el que aparecen las constantes y que, en el siguiente paso, se ajusta y define "cuantitativamente" mediante el recurso a las observaciones experimentales, lo que permite dar un valor concreto a los parámetros del modelo. Finalmente el estudio de los datos experimentales permitirá sacar conclusiones sobre la forma de posible variación de los valores adquiridos por estos parámetros cuando se alteran las condiciones experimentales.

MODELOS DE CAJA NEGRA VS. CAJA TRANSPARENTE.

Sobre el esquema de organización de un sistema se puede concebir un modelo de "caja negra" si pasamos directamente desde la variables "operativas" a las de "comportamiento", puentando el subsistema de estado del material, por lo que no nos será posible conocer lo que está ocurriendo dentro de él. Esta concepción, eminentemente utilitarista e inmediata, que podríamos llamar "técnica", es suficientemente asequible, pero su capacidad explicativa es limitada y su campo de validez puede resultar particularizado. El resultado es un modelo exclusivamente predictivo de carácter fenomenológico en el que se observa la conducta mediante variables externas al sistema. [Bunge'72,22].

Pero también podemos pretender diseñar un modelo de "caja transparente", lo que resulta mucho más interesante desde el punto de vista científico. Conociendo como varía el sistema de estado desarrollamos un mejor, y más universal, conocimiento del material. El modelo así diseñado será a la vez explicativo y predictivo, con carácter representacional del mecanismo implicado en la actividad estudiada. Se observa la estructura del material mediante variables internas. [Bunge'72,56].

El planteamiento de un modelo de caja negra, a pesar de lo anterior, tiene algunas ventajas muy interesantes, como son: Alto grado de generalidad, carácter global o general, sencillez, precisión y seguridad [Bunge'72,76], lo que hace aconsejable su uso en la resolución de problemas técnicos.

LA CONCEPCION DETERMINISTA VS. PROBABILISTA.

Es bien conocida la variabilidad de los resultados derivados de la observación de un sistema, variabilidad debida a infinidad de factores de los cuales unos pueden ser identificados y otros no. El conjunto de factores no identificados se suele denominar "Azar" y su consideración dentro del sistema da lugar a su concepción en términos "probabilísticos". Recientemente Popper ha formulado una teoría de las "Propensiones" que reúne las tendencias de los sistemas a actuar en un determinado sentido

mediante "probabilidades sesgadas", dando un sentido a estas "propensiones" análogo al que las "fuerzas" tienen en la física newtoniana, es decir, en último término, causas teóricas de los comportamientos observados de un Sistema, con la salvedad de incluir al Azar, lo que resultaba proscrito en la física determinista de Newton.

Un modelo, o el sistema al cual se refiera, es "determinista" cuando el conocimiento de los valores de las variables relevantes, en un momento dado, nos permite deducir el estado, o el comportamiento, del sistema en cualquier instante precedente o posterior. Al contrario, el modelo es "probabilista" o "estocástico" cuando el conocimiento de los valores de las variables en un momento dado nos permite predecir sólo las probabilidades de distribución de estas variables en algún instante futuro, o explicarlas a partir de un instante anterior. [Rapoport'72,62].

Estas diferencias conceptuales, además de afectar al sentido último de los modelos planteados, lo hacen a los planes y diseños experimentales utilizados en la contrastación de las hipótesis teóricas, por lo que interesa decidirse, desde un primer momento, por la óptica a adoptar. En nuestro caso nos situaremos en la óptica probabilista por considerarla mucho más cercana a la realidad que la determinista, lo que nos obligará a planificar las observaciones experimentales y el tratamiento matemático de sus resultados bajo técnicas estadístico-matemáticas que trataremos más adelante.

MODELOS MATEMATICOS.

Aunque un modelo matemático, en general, es una representación, o descripción, matemática adecuada a un fenómeno dado [Rapoport'72,69], o a lo que nosotros estamos tratando como Sistema, y hay diversas ramas de la Matemática que se pueden utilizar para el desarrollo de modelos, nos vamos a referir a cuestiones fundamentalmente numéricas. En el capítulo 6 veremos un modelo matemático de tipo geométrico, y será entonces cuando veamos su relación con las cuestiones generales que tratamos a continuación.

Una vez definido un Sistema, su correcta trasposición a un modelo matemático con el que se corresponda nos obliga a seleccionar, de entre todos los elementos del sistema, a los más significativos y, en especial, a eliminar las variables redundantes. Si estudiamos los acoplamientos de correlación que puedan existir entre las variables definidas dentro de un grupo homogéneo de elementos del sistema pertenecientes a cada uno de los tres subsistemas básicos de los que hemos hablado (operaciones, estado o comportamiento), podemos eliminar todas aquellas variables que presenten fuerte correlación con otras, que las seleccionaremos como más significativas. Por ejemplo, si pudiéramos afirmar con certeza que la resistencia a compresión es el triple de la de tracción, nos bastaría conocer y tratar una de ellas, pues la otra iría implícita en esta. El estudio teórico de las correlaciones lo estudiaremos en los próximos capítulos, mientras que el experimental lo veremos en los capítulo 9 y 10.

Desde el punto de vista teórico, hemos definido el comportamiento de un sistema como conjunto de reacciones del mismo a unas acciones externas que sobre él actúan, y hemos previsto que dependa funcionalmente tanto del estado del sistema como de las acciones, u operaciones, que sobre el sistema desarrollemos. Denominaremos genéricamente como **función técnica** (transferencia) a la formulación, o expresión matemática, de la correspondencia entre una variable dependiente de uno de los subsistemas de estado o de comportamiento, y el conjunto de variables independientes

significativas de otros. En concreto, podemos expresar la forma de estas funciones en la forma:

a/ Función técnica de Comportamiento (Fc) ó:

$$\text{Comportamiento} = F_c (\text{Estado} + \text{Actuación})$$

b/ Función técnica de Estado (Fe) ó:

$$\text{Estado} = F_e (\text{Estado ant.} + \text{Actuación})$$

c/ Función técnica de Intervención (Fi ó F'i):

$$\begin{aligned} &\text{Actuación} = F_i (\text{Estado act.} + \text{Estado futuro}) \\ \text{ó} &\text{Actuación} = F'_i (\text{Estado act.} + \text{Comportamiento}) \end{aligned}$$

Las funciones de intervención, que también llamaremos de producción, son, en realidad, combinaciones de las funciones inversas resultantes de despejar, en las anteriores, las variables de actuación y expresarlas como función del estado de partida y del estado final deseado para el producto.

Un ejemplo del primer tipo de función (función de comportamiento) puede ser una fórmula que nos dé la resistencia a compresión (variable de comportamiento) en función del tipo de yeso (variable de estado) y de la cantidad de agua de amasado (variable de actuación). Como ejemplo del segundo tipo de función (función de estado) podemos ver aquella que nos diera el contenido en semihidrato de un yeso (estado) en función del aljz de partida (estado anterior) y de la temperatura de calcinación (producción). Finalmente, como ejemplo del tercer tipo de función (función de intervención, o de producción) podemos tener una que nos indique la cantidad de agua de amasado (intervención) a utilizar con cada yeso (estado actual) para obtener determinada porosidad (estado futuro deseado), o bien para obtener un determinado tiempo de trabajabilidad (comportamiento). Quede claro que, a partir de ahora y en lo sucesivo, nos iremos refiriendo paulatinamente a funciones específicas de comportamiento.

En los anteriores ejemplos aparecerían implícitamente en los coeficientes o parámetros de las fórmulas matemáticas, el resto de variables no explicitadas en cada ecuación. El tipo general de una función técnica puede ser de la forma:

$$V_r = F_t (V_i; Q_j; C_k; K)$$

Donde: V_r .: Variable respuesta o dependiente. (vg.: Ø máx. de grano).

F_t .: Forma general de expresión de una función técnica.

V_i .: Variables independientes (vg.: Ø del grano introducido en el molino y tiempo de molido)

Q_j .: Cantidades representativas de los "factores paramétricos". (vg.: r.p.m. del molino de bolas)

C_k .: Parámetro representativo de la calidad de los factores (vg.: potencia y capacidad del molino)

K .: Parámetro representativo de la organización y rendimiento del proceso. (vg.: grado de desgaste del molino, u horas de uso del mismo)

El primero de los factores del segundo miembro de la anterior expresión aparece siempre, y lo hace explícitamente, mientras que los tres

restantes lo suelen hacer implícitamente. Además hemos hablado de parámetros (factores paramétricos); sabemos que la cantidad de variables (factores técnicos) que pueden intervenir en una función (técnica) puede resultar tan amplio como queramos hasta hacer inviable y poco significativa su representación matemática. Al elegir explícitamente como más interesantes un conjunto de estas variables, el resto, como vemos, no queda automáticamente excluido, pues aparece implícitamente en las constantes y en los parámetros, o coeficientes de las variables independientes. En verdad son, precisamente las constantes y parámetros, las verdaderas incógnitas del proceso de investigación implicado en la modelización de un sistema, siendo el ajuste entre las observaciones experimentales y las formulaciones teóricas las que permite cuantificar estos factores paramétricos.

Los parámetros permanecen constantes mientras así lo hagan las técnicas utilizadas (más adelante concretaremos el concepto de técnica), pero basta que varíe algún factor no considerado como variable independiente, y por tanto no controlado directamente, para que sea esperable un cambio en el valor de estos parámetros. Por este motivo se dice que los parámetros aparecen ligados en calidad y cantidad, siendo necesario especificar estas circunstancias al definir las condiciones de los factores paramétricos [Ballestero'71,82...].

Diremos que se realiza un cambio de técnica cuando se suprime, adiciona, o sustituye uno o varios de los factores técnicos u operaciones que intervienen en los procedimientos y procesos, o cuando se cambia la calidad de los medios instrumentales (C_k), la organización del proceso (K), o la cantidad de algún factor paramétrico (Q_j). No existe cambio de técnica cuando varían las cantidades que representan las variables independientes (V_i) que estamos estudiando.

Una vez obtenidas las expresiones matemáticas de estas funciones técnicas, sería posible estudiar su forma, sus puntos máximos y mínimos e, incluso, definir sus óptimos en función de otras consideraciones. Como ejemplo valga decir que, dentro del comportamiento mecánico, la máxima resistencia puede ser incompatible con la máxima deformabilidad requerida por el sistema estructural o por la base de aplicación de un revestimiento de yeso.

Siguiendo una clasificación de variables muy común en modelos económicos de producción [Ballestero'71,115], las variables de cualquier modelo pueden estudiarse como de diferentes tipos y, según el modo de clasificación podemos definir las siguientes clases:

Factores medidos. Son aquellos que adquieren valores aleatorios y caen fuera del dominio del experimentador, por los que también se las conoce como factores incontrolados. Se les puede medir, o valorar, en un momento determinado, pero no se puede fijar, en los límites del experimento, su valor, aunque pueden hacerse controlables mediante el oportuno cambio de técnica. Por ejemplo, la humedad y la temperatura del medio ambiente. La descripción más correcta de este tipo de factores se suele hacer mediante términos estadísticos y técnicas de muestreo, lo que permite la eliminación del efecto de las desviaciones métricas debidas al azar. Su incorporación en términos estadísticos a un modelo da lugar a modelos de tipo probabilista o estocástico, especialmente los modelos de análisis de regresión y los modelos de componentes de la varianza. Las variables de respuesta, o de comportamiento, pertenecen siempre a este grupo de factores medidos.

Factores controlados. Al contrario que los anteriores, adquieren valores fijos preseleccionados por el investigador y se mantienen, mediante las correspondientes técnicas experimentales, en un margen de variación lo más estrecho posible. Por ejemplo, la cantidad de agua de amasado. Se suelen utilizar dos tipos de variables controladas:

Factores fijos. Permanecen constantes a lo largo de todo el proceso aunque es posible su alteración. Aparecen siempre implícitos en los parámetros del modelo a pesar de que los parámetros reflejen también otro tipo de factores. Por ejemplo el tipo de yeso en un plan experimental donde no cambie a lo largo de todo su desarrollo.

Factores variables. Son las variables independientes del modelo y representan a los factores que se modifican en cada serie o fase del experimento o realidad. Estos factores pueden aparecer, a su vez como:

- **Ligados.** En el caso de existir una fuerte correlación entre dos o más de ellos, por lo que es posible expresarlos en función del más significativo y, entonces, se les conoce como **factores satélite**. Por ejemplo el tiempo de calcinación y la temperatura alcanzada en un horno.

- **Limitados.** Condicionados los valores máximos, o mínimos, y los óptimos de las funciones técnicas, así como restringen el rango de posibles valores que puede alcanzar la variable dependiente. Por ejemplo la cantidad de agua de amasado que queda limitada por las condiciones de trabajabilidad de la pasta de yeso.

- **Sustituibles.** Son variables de posible efecto compensado, es decir que la disminución cuantitativa de una de ellas se puede contrapesar con la alteración de la cantidad de otra variable. Por ejemplo la finura de molido y la calidad del yeso de cara a la obtención de resistencias.

- **Sustituibles- limitativos.** Combinación de los dos anteriores, son factores sustituibles solo hasta cierto punto. Es el caso del ejemplo anterior.

El grupo de variables formado por los tres últimos apartados son, en la práctica, los más interesantes de estudiar. En particular los últimos dan lugar a la formación de curvas isocuantas que, en forma de ábacos gráficos, permiten controlar fácilmente las variaciones cotidianas de ciertos factores. Las variables sustituibles son, precisamente, las que presentan mayor grado de interacción, que buscaremos mediante el plan experimental que se desarrolla a partir del capítulo 8.

Se llama **potencia** de una variable cuantitativa independiente al cociente entre la variación obtenida en la variable dependiente y la variación de esta variable independiente, y representa la sensibilidad de la variable dependiente con respecto a la independiente. En funciones continuas la anterior definición implica el cálculo mediante derivadas parciales, obteniéndose la función de potencia de cada variable independiente derivando parcialmente la función técnica correspondiente respecto a dicha variable. La importancia de este concepto radica, naturalmente, en que cuanto más potente sea una variable, mayor será la importancia de su control. En modelos lineales, dentro del ámbito estudiado, la potencia de las variables es constante.

Desde otro punto de vista los factores (variables) que intervienen en un modelo matemático pueden ser de dos tipos:

Variables cuantitativas. Las que pueden ser valoradas mediante una cantidad numérica proporcional a su valor. Por ejemplo la duración del tiempo de amasado. A su vez pueden ser:

Variables discretas. Cuando no pueden adquirir infinitos valores entre unos límites fijados, o la precisión de medida es comparable en su orden de magnitud con el alcanzado por la variable. Por ejemplo la edad de las probetas en número de días.

Variables continuas. Si pueden adoptar cualquier valor dentro un intervalo determinado. Aunque en última instancia todas las variables son discretas, pues dependen de la precisión del instrumental usado en la medición, cuando ésta precisión es de un valor muy por debajo del que puede alcanzar la variable, y a efectos prácticos, esta se considera continua. Por ejemplo la resistencia a compresión.

Variables cualitativas. Aquellas que se caracterizan por un nivel de alguna cualidad inherente a la unidad experimental. Por ejemplo el tipo de yeso según la denominación del RY'85.

En resumen, la elaboración de un modelo matemático cubre una serie de etapas usuales [Bueno Campos, 268] que son las siguientes:

1. Definición de las variables del modelo, deducidas a partir de los elementos definidos en un Sistema preconcebido, clasificándolas en dependientes e independientes. A la luz de los planteamientos teóricos expuestos en este capítulo, nos dedicaremos a este menester en los dos siguientes.

2. Indicación del grado de abstracción sobre el que discurrirá la exposición mediante la formalización de un conjunto de hipótesis, lo que hacemos, en un nivel general, en este capítulo y, en un nivel más particularizado, en los capítulos 5 y 6.

3. Descripción de las relaciones que se dan entre las variables a través de unas ecuaciones. Sobre la base de la teoría esta etapa se desarrolla en los capítulos 5 y 6, y sobre la base experimental a partir del capítulo 7.

4. Interpretación del significado de los resultados, restableciendo el vínculo entre las hipótesis iniciales y las deducciones desprendidas de la interpretación, lo que veremos en los capítulos 10 y 11.

La descripción de un procedimiento, que lo consideraremos subdividible en diferentes etapas, fases y operaciones, puede hacerse en forma "externa", considerando el proceso como una caja negra, o "interna", entrando en las distintas operaciones del proceso. En el esquema inferior observamos como un proceso tiene dos tipos de "inputs", la materia prima y los factores de actuación (acciones) mediante las cuales operamos sobre el sistema (acciones), mientras que se producen, por dos salidas, el producto y el comportamiento o conjunto de respuestas del sistema material.

Fig.2-9: En todo proceso actúan como "inputs" la materia prima y las acciones, observándose como "outputs" la materia prima transformada (producto) y el comportamiento del proceso (conjunto de respuestas).

El modelo de caja negra implica poner cualquiera de las salidas en función de cualquiera de las entradas, mientras que un modelo de caja transparente nos lleva a poner cada salida en función de ambas entradas y del contenido de la caja "proceso". Así, un modelo de observación "interna" es del tipo:

$$\text{Respuesta} = \text{Función} (\text{material} + \text{acciones})$$

en el cual está implícito el mecanismo del proceso al que se refiere.

Debemos darnos cuenta de que, visto desde el exterior, las únicas salidas son el producto, como nuevo material resultante, definido por su estado, y las reacciones de respuesta que nos definen su comportamiento. La apertura de la caja del proceso nos permite observar la transformación de la materia prima durante este proceso. Ahora bien, el material, definido por su estado, también es el resultado de un anterior proceso, es decir:

$$\text{Material.2} = \text{Función de estado} (\text{Material.1} + \text{Actuación.1})$$

A la vista del esquema del proceso general del YMC, el papel que juegan los distintos elementos es el siguiente:

El.primarios =	Mat.0	Generación =	Proc.0	Cristalización =	Comp.0
Aljez =	Mat.1	Calcinación =	Proc.1	Deshidratación =	Comp.1
Yeso =	Mat.2	Aplicación =	Proc.2	Hidratación =	Comp.2
Rehidrato =	Mat.3	Utilización =	Proc.3	Deformación =	Comp.3

Como ejemplo, un modelo externo de una función de estado, es del tipo:

$$\text{Yeso} = \text{Fe} (\text{Aljez} + \text{Calcinación})$$

Sin embargo, un modelo interno de comportamiento sería del tipo:

$$\text{Deshidratación} = \text{Fc} (\text{Aljez} + \text{Calcinación})$$

Por otro lado, como Comportamiento. n y Estado. $(n+1)$ son las dos salidas del Proceso. n aplicado sobre el Estado. n , se podrá establecer un puente de unión, o relación entre Comp. n y Est. $(n+1)$. Ambos elementos estarán, pues, relacionados lo que podemos expresar, como ejemplo, así:

$$\text{Yeso} = R \text{ (Deshidratación)}$$

Si ahora consideramos que, por ejemplo dentro del grupo de características que nos definen un comportamiento, todas ellas dependen del mismo grupo de variables, entre sí también habrá algún tipo de relación que las ligue. La llamaremos correlación y, en el caso del comportamiento mecánico, podremos poner, como ejemplo:

$$\text{Resistencia a flexión} = C \text{ (dureza)}$$

Dentro de uno de los tres subsistemas ya definidos, y una vez hecho el oportuno análisis de correlación, eliminaremos aquellas variables que presenten una fuerte correlación con otros (factores satélite), estudiando al final únicamente los grupos de variables que presenten una variación independiente o imprevisible respecto a las otras de su mismo tipo o nivel.

En consecuencia un Modelo Teórico de Comportamiento Mecánico lo entenderemos como un modelo del comportamiento que ofrece el "Yeso-Material de Construcción" como respuesta a las acciones de tipo mecánico. Ahora bien, aún con la anterior definición es posible concebir diferentes tipos de modelos de comportamiento mecánico, según enfoquemos, o adoptemos uno u otro punto de vista, en la observación del comportamiento del yeso.

Aunque la única respuesta observable frente a estímulos mecánicos es la deformación del material [Paricio'85], complementariamente otras teorías-marco, como las de la Elasticidad y Probabilidad, nos van a permitir deducir, a partir de la deformación observada y/o de medios instrumentales desarrollados a partir de estas teorías-marco, otras variables significativas para la definición del comportamiento mecánico, como son los diferentes tipos de resistencias y durezas que estudiaremos en su momento y que, en realidad, se derivan de conceptos teóricos obtenidos a partir del fenómeno observable que es la deformación en sus distintas manifestaciones.

2.4 VISION ESTRUCTURAL INTEGRADA DEL YMC.

PROCESOS, ESTADOS Y COMPORTAMIENTOS.

Hasta este momento hemos hablado de Sistemas y Modelos en sentido general, aunque refiriéndonos siempre a una visión un tanto restringida del concepto de sistema, el cual responde, básicamente, al esquema:

$$\text{Acción(es)} \rightarrow \text{Sistema} \rightarrow \text{Reacción(es)}$$

El conjunto de acciones nos queda determinado por las "operaciones", o procesos, a los que sometamos al Sistema, mientras que éste se puede conocer por su "estado", y el conjunto de reacciones nos define su

"comportamiento". Con una óptica diferente, entendiendo que, debido al conjunto de acciones externas el sistema cambia de estado, lo que implica su transformación, el esquema anterior puede concebirse como:

Producción -> Materia Prima -> Producto

donde hemos entendido la Producción como una "Técnica de Actuación" específicamente adaptada a la modificación voluntaria del material con vistas a su transformación en un nuevo producto.

La combinación de los dos esquemas anteriores, sustituyendo "Materia Prima" por "Material 1º" y "Producto" por "Material 2º", entendiendo que "materia prima" y "producto" son dos materiales diferentes correspondientes a fases sucesivas en su cambio de estado debido al proceso de transformación, tenemos el siguiente esquema:

```

    Producción (acción)
      |
      V
Material 1º -> Material 2º
      |
      V
Comportamiento (reacción)
  
```

Ahora bien, el producto resultante de este proceso puede ser utilizado para una nueva transformación si le sometemos a nuevas operaciones, por lo que finalmente podríamos tener una cadena del tipo:

```

    Producción-1      Producción-2      Producción-n
      |                |                |
      V                V                V
Material-1  -->  Material-2  --...-->  Material-n
      |                |                |
      V                V                V
Comportamiento-1    Comportamiento-2    Comportamiento-n
  
```

Esta cadena refleja la evolución, en el tiempo, de un material. Si ahora vemos este conjunto como un solo Sistema, en un sentido más general que el anteriormente utilizado, podemos englobar el conjunto de producciones en un Sistema de Producción, mientras que el conjunto de posibles estados del material será el Sistema de Estado, a la vez que el conjunto de comportamientos es el Sistema de Comportamiento. Insistimos en que el sistema de producción es un caso particular del Sistema de Actuación. En resumen, pues tenemos un único Sistema, compuesto por tres sistemas o subsistemas, que podemos representar así:

```

    Subsistema de Actuación
      |
      V
    Subsistema de Estado
      |
      V
    Subsistema de Comportamiento
  
```

El núcleo conceptual, elemento central del sistema es, obviamente, el propio material, el YESO, en su verdadera Forma, Naturaleza y Estructura, lo que se configura en un momento temporal según un determinado estado del material, observado en sus aspectos físico-químicos. Queda claro que entendemos por ESTADO la forma propia del ser y estar de nuestro material, respondiendo de un modo particular a la pregunta: ¿qué es y cómo es el material?. Sobre este núcleo central actúa un conjunto de operaciones, o actuación que provocan la reacción del material, observable mediante su comportamiento.

Así pues, se entiende por **Comportamiento del Sistema** el conjunto de acciones de respuesta (reacciones), observadas externamente, ofrecidas por el sistema en estudio frente a los estímulos (acciones) introducidos por el observador o por el ambiente. Por el contrario entenderemos por **Sistema de Comportamiento** el conjunto de elementos del sistema implicados en su comportamiento, observados internamente. El sistema de comportamiento es uno de los subsistemas del Sistema General (el YMC en nuestro caso).

Como el yeso es un material de construcción sometido a diferentes procesos (que veremos más adelante), a las pautas determinadas que se siguen en un determinado proceso, con un determinado material, las llamaremos **Técnicas** y hablaremos de Técnicas de Calcinación, Técnicas de aplicación, etc. En definitiva, una técnica es el conjunto de operaciones y medios materiales que permanecen invariables durante el estudio de la función correspondiente.

En cada proceso se pueden distinguir diferentes procedimientos que, a su vez los descompondremos en distintas etapas, fases y operaciones, en cada una de las cuales intervendrán uno o más factores o variables que, por pertenecer al sistema de Actuación, serán las "variables operativas" o, simplemente, operadores, y tendrán el carácter de variables independientes en la modelización matemática del comportamiento mecánico del yeso. Este grupo de variables representa, pues, aquellas que, dentro de sus límites, se pueden alterar por el investigador con objeto de obtención de los resultados finales apetecidos. El conjunto de técnicas de intervención se utiliza de forma consciente y voluntarista con la finalidad de colocar al material en un estado deseado capaz de responder con un comportamiento adecuado a la función para la que se requiere al material.

Una técnica de actuación se puede definir por la suma de las técnicas específicas de cada uno de los procesos que intervienen, es decir calcinación, aplicación y utilización, en el caso de yesos naturales en los que no ha sido posible intervenir en su generación. La especificación completa de los procedimientos, operaciones y factores nos define, pues, una determinada técnica de producción. Cada técnica puede ser representada por un esquema de organización, u organigrama, formado por cajas que representan etapas, u operaciones, y por líneas o relaciones de conexión, que representan transportes, o manipulaciones que no implican transformaciones en el material. Cuando el organigrama es de tipo lineal, la técnica es simple y todas las etapas intermedias, como eslabones de una cadena, pueden sustituirse por un único proceso que los englobe puesto que en los extremos de la cadena "input" y "output" permanecen inalterables, siguiendo las consecuencias de la existencia de Histéresis en el sistema.

Por el contrario, una técnica compleja aparece con un organigrama ramificado, con líneas paralelas, convergentes y/o divergentes e, incluso, bucles de retroalimentación. Su simplificación es más problemática pues corre el peligro de confundir etapas y procesos muy diferentes. En última

instancia la apertura de las "cajas negras" de los procesos simples tiene como finalidad el diferenciar este tipo de procesos complejos en donde antes sólo veíamos uno simple. En especial los bucles de retroalimentación, desde el punto de vista de la dinámica de sistemas, son muy importantes de detectar pues en ellos recae gran parte de la estabilidad de los sistemas y su posibilidad de control.

Fig.2-10: Técnicas simples y complejas.

El tipo de estado del material se puede definir por la configuración formal concreta de su estructura físico-química definida mediante sus propiedades y, análogamente, un determinado modo de comportamiento se define como una serie de características que se concretan en las variables de comportamiento.

Podemos comprender ahora, tal vez mejor, que un Comportamiento (efecto) es el reflejo, en un Estado (objeto), de una Actuación (intervención). Démonos cuenta de que en dinámica de sistemas, un comportamiento se vería como constatación de las diferencias entre sucesivos estados de un mismo objeto que, conceptualmente, permanece.

Fig.2-11: El comportamiento de un sistema (material) es el conjunto reacciones que refleja cuando sobre él incide un conjunto de acciones (producción) que le obliga a transformarse (producto).

Si las acciones son mecánicas, el comportamiento será mecánico. Si son térmicas, este será un comportamiento térmico y podremos hablar, entonces, de tantos modos de comportamiento como tipos de acciones.

EL SISTEMA DE ACTUACION. OPERACIONES.

El proceso de actuación (producción) se nos manifiesta según una configuración tecnológica y se concreta en una técnica particular, mediante

En el esquema anterior aparecen con minúsculas los productos, o materiales del proceso, mientras que en mayúsculas aparecen los procedimientos del mismo. En segunda línea, y entre paréntesis, aparecen las denominaciones del comportamiento reflejo correspondiente a cada fase.

EL SISTEMA DE ESTADO. TRANSICIONES.

La estructura, o estado, del material, en un momento determinado, se nos manifiesta a través de sus propiedades, conjunto de circunstancias que son propias del material, y que pueden agruparse según una configuración formal, o morfológica, que nos defina la forma o apariencia de la materia. Estas propiedades son cognoscibles mediante la observación del objeto material y las oportunas técnicas de análisis. Estudiaremos el estado físico y químico de nuestro material y su definición se concretará, cuantitativamente, en el conjunto de variables que llamaremos variables de estado. Son de tipo ontológico y sustantivo, constituyendo la expresión del "ser" y "estar" del material. Su realidad, en principio, es independiente de la actuación de acciones exógenas al sistema, es decir que existen aún antes de que entren en juego acciones externas. Llamamos transición al paso de un estado a otro y pueden apreciarse en la figura anterior.

EL SISTEMA DE COMPORTAMIENTO. REACCIONES.

El comportamiento del material se detalla siguiendo una configuración funcional, o modal. Se pretende evaluar mediante diferentes métodos de ensayo y/o pruebas. La estructura funcional del sistema de comportamiento del material nos viene indicada por la finalidad de nuestro estudio y la función para la que se requiera al material. Podremos hablar de comportamiento estructural, económico, reológico, higrótérmico y, en nuestro caso, mecánico. El comportamiento del material se define mediante una serie de características, reflejo del carácter del material, y su concreción se hará mediante una serie de variables de comportamiento, que siempre se concebirán como respuestas facultativas del material frente a las acciones externas que sobre él actúan.

En los tres subsistemas así definidos hemos diferenciado sus partes:

- Los grupos principales de elementos del sistema, que son las técnicas y etapas de actuación, los tipos de estado o estructura físico-química del material, y los modos de comportamiento o funciones que desarrolla el material.

- Los grupos de atributos de cada subsistema, mediante los que se reconoce a sus elementos, a los que hemos llamado operaciones, propiedades y características respectivamente para los subsistemas de actuación, estado y comportamiento, que habrán de concretarse en diferentes grupos de variables, que son los que intervendrán en un modelo matemático.

- Los acoplamientos que existen en y entre los subsistemas, a los que hemos denominado correlaciones, si son de tipo interno, y relaciones estructurales si son externas y ligan el sistema de estado y el de actuación, y funciones técnicas si hacen lo mismo con los sistemas de estado y comportamiento.

Al sistema formado por los tres anteriores, particularizado para el caso del Yeso como Material de Construcción, lo hemos denominado

Sistema YMC y recopila toda la problemática relevante, desde nuestro punto de vista, para la comprensión y estudio de este material. Este Sistema se resume en el organigrama siguiente:

Fig.2-12: El "Sistema YMC" proporciona una visión global de la problemática asociada al Yesso como Material de Construcción.

Finalmente, y utilizando la terminología de Sistemas, diremos que el YMC es un sistema:

- Físico, pues las variables que intervienen son medibles.
- Real, pues sus elementos son observables en el universo físico.
- Finito, pues consideramos un número limitado de elementos.
- Abierto, pues está en interacción con el medio ambiente, del que recibe las acciones exteriores, y sin retroalimentación.
- Centralizado, pues el Subsistema de Estado juega un papel dominante que centraliza, o recoge, las acciones externas a través del subsistema de actuación, y las manifiesta mediante el subsistema de comportamiento.
- Controlable, puesto que es posible actuar desde el exterior en el sistema para obtener resultados apatecidos.
- Secuencial, o de circuito abierto, pues no existe posibilidad de autorregulación dinámica. Esta concepción implica la presencia de

histéresis o memoria del sistema, y lo que sucede en cada etapa, o nivel secuencial, depende (recuerda) de lo sucedido en los niveles precedentes. Como veremos en el capítulo 39, la historia precedente del material se ve reflejada en su estado, lo que permite partir de él en cada etapa, superando, que no ignorando, a las anteriores.

2.5 RECAPITULACION.

Hemos visto el conjunto de conceptos teóricos y de presupuestos básicos que, a modo de herramientas intelectuales, nos van a permitir el posterior desarrollo de los fines que nos hemos propuesto para nuestra investigación. En particular se han dado las claves teóricas para la comprensión de todo proceso de investigación experimental científica, así como de la concepción sistémica globalizada de los problemas asociados a un material de construcción. También hemos desarrollado las ideas generales que nos van a guiar en el desarrollo de los modelos matemáticos, a la vez que nos permiten la comprensión de la solución que se dará a las cuestiones que se presenten. Finalmente, estamos ya en condiciones de empezar a estudiar al material de construcción "yeso" estructurando sus diferentes partes de acuerdo con la visión proporcionada por el Sistema YMC.

CAPITULO 3.

EL YESO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCION.

El objetivo a largo plazo de la teorización científica no es resumir la experiencia científica sino "interpretar la realidad" y, en particular, explicar aquella parte de la realidad ajustada al conocedor - esto es, el campo de los fenómenos (en el sentido del filósofo).

(M. Bunge: "Teoría y Realidad". 1.972).

3.0 INTRODUCCION.

Al finalizar el capítulo anterior, concretamos una visión genérica de como se puede entender la problemática de un material de construcción con la finalidad de deducir un modelo de comportamiento. Allí, sobre la base del principio de "acción $\leftrightarrow$ reacción" configuramos un esquema básico representado como:

A partir de la principal bibliografía que describe el proceso de fabricación del yeso [Arredondo'59] [Daligand'85] [Nolhier'85] [Papadakis, Venuat'70] [SNIP'82] [Wirsching'85-a] y otros, así como de la observación de los procedimientos actualmente utilizados, podemos desarrollar el anterior esquema, refiriéndonos exclusivamente al Yeso como Material de Construcción:

La primera fila del esquema anterior está formada por los diferentes procesos que actúan sobre el material en sus diferentes estados, que son los que aparecen en la segunda fila, mientras que en la tercera figuran los comportamientos asociados a cada fase por la que atraviesa el material. Dedicaremos este capítulo al estudio de cada uno de los elementos reflejados en este esquema, fijándonos en las variables más significativas que puedan influir en el comportamiento mecánico del yeso.

3.1 EL PROCESO DE FORMACION GEOLOGICA DEL ALJEZ.

Vamos a ver en forma conjunta un conglomerado de sucesos que acontecen a largo de milenios, antes que la piedra de yeso sea extraída de una cantera para el inicio de su proceso industrial, puesto que la historia del material, en realidad, empieza con la del mundo. La parte correspondiente del esquema anterior se puede detallar un poco más en la forma siguiente:

Adoptamos la denominación de "yesolito" (del griego "gypsos"= yeso y "litos"= piedra) para designar al mineral primario del yeso, antes de sufrir toda la serie de procesos tectónicos posteriores a su formación geológica.

Siendo el aljez una roca de origen sedimentario, sus componentes elementales son los diferentes iones que se encuentran disueltos en el agua del mar. Es sabido [SNIP'82,8] que un agua de mar dispone de, aproximadamente, un 3'5% de sales disueltas cuyos principales constituyentes son:

ION	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	Br ⁻
%	1'06	0'13	0'04	0'04	1'90	0'26	0'01	0'01

Si referimos estas cantidades a la cantidad total de materia soluble, en lugar de hacerlo a la cantidad total de agua marina, los porcentajes anteriores quedarían en:

ION	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	Br ⁻
%	30'6	3'7	1'2	1'1	55'0	7'7	0'4	0'2

Los iones anteriores podrían estar presentes distribuidos como:

Sales de Potasio y Magnesio.....	17'8 %
Cloruro Sódico.....	77'5 "
Sulfato cálcico.....	3'7 "
Sulfúrico cálcico.....	1'0 "

En resumidas cuentas, lo anterior supone una precipitación máxima de yeso de 0'55 mm/m. de columna de agua de mar. Esta cuestión es una de las que más dudas ha planteado en relación con el origen sedimentario del aljez. Por este motivo se han propuesto diferentes teorías sobre el proceso de génesis mineral. En resumen son las siguientes [SNIP'82,5...]:

Teoría lagunar: supone la precipitación de las sales del agua de mar por evaporación de ésta. Teoría formulada inicialmente por Ochsenius es la universalmente aceptada, a pesar de presentar algunos problemas. Supone que el agua de mar, en zonas costeras y formando lagunas relativamente aisladas del mar (vg. albuferas) permite la precipitación de sus sales al evaporarse. La posterior aportación de más agua, por mareas o por otros fenómenos geológicos, permite nueva precipitación de más sales. Este proceso justifica la denominación de "evaporitas" para el grupo de rocas sedimentarias más solubles que está formado, principalmente, por cloruros y sulfatos de Ca, K, Na y Mg.

Acción química sobre piedras calcáreas. Este es el caso de la acción del agua de lluvia, u otra de superficie ligeramente ácida, que descompone la pirita, formando ácido sulfúrico que, absorbido por el terreno, y en caso de ser éste de tipo calizo o arcilloso, reacciona con el carbonato cálcico y da lugar a sulfato cálcico. Este fenómeno se observa en muchos yacimientos de arcilla, en los que es frecuente encontrar nódulos de pirita y cristales de yeso muy perfectos (selenita) dispersos a lo largo del depósito. También es el caso de aguas termales de carácter sulfuroso sobre las calizas. Sin embargo, al contrario que el caso anterior, estos fenómenos no parece que puedan dar lugar a yacimientos importantes de yeso aprovechables industrialmente.

Acción bacteriana. Teoría propuesta por Vinot [1'65] para intentar explicar algunas incoherencias de la formación evaporítica del yeso. Supone que algunas bacterias anaerobias (especialmente la "Sprovbrio desulfuricans") convierte el azufre en sulfídrico que, por oxidación se transforma rápidamente en ácido sulfúrico, gracias a la acción de bacterias aerobias (como la "Thiobacillus thioparus" y la "T.thioxydans") a lo que seguiría un ataque del sulfúrico a depósitos calcáreos existentes, como en el caso anterior. Las bacterias coexistirían con una espesa vegetación productora de grandes cantidades de residuos orgánicos ricos en azufre. Este proceso, comprobado en laboratorio, no parece ser capaz de suministrar cantidades importantes de yeso como las de muchos yacimientos en explotación.

Desintegración y acumulación mecánica. Posteriormente a la formación original de los depósitos de yeso, la meteorización de éstos, y arrastre por el viento de sus restos, puede formar dunas, más o menos consolidadas y con otras arenas, arcillas y margas. Este es caso de muchos suelos yesíferos desérticos, como en Nuevo Méjico, EE.UU, Canadá y Túnez. La solubilización del yeso por el agua de lluvia y la penetración a capas inferiores del suelo, hasta 60-80 cm. de profundidad, así como la acción de la vegetación, que ayuda a evaporar el agua, completan la formación de un manto superficial en forma de costra.

A partir de algunos procesos observados en depósitos en formación, especialmente en la laguna de Khara Boghaz, en la costa este del mar Caspio

y la depresión de Danakil, entre Etiopía y Eritrea, podemos resumir las condiciones de formación de los depósitos de yeso [SNIP,13 Y Antolini'77]:

- a).Clima árido y caliente que asegure la evaporación que mantenga una concentración suficientemente elevada para que las sales precipiten.
- b).Un aprovisionamiento continuo o intermitente de agua salada, a través de algún canal estrecho.
- c).Un hundimiento del fondo de la cubeta que permita ir engrosando el espesor del depósito, o una elevación relativa del nivel del mar.
- d).La permanencia de una barrera entre la cubeta y el mar, originada por depósitos volcánicos, arrecifes de coral o debida a movimientos de la corteza terrestre.
- e).Una depresión final, desplazando la barrera y dando lugar a la posibilidad de otras sedimentaciones más dispersas como las que, ocasionalmente, se han encontrado en los depósitos actuales.

La precipitación del sulfato cálcico puede hacerse en su doble forma mineral, es decir yeso (doble hidrato) o anhidrita. Murray ['64 en SNIP'82,20] ha señalado que, en líneas generales, los depósitos de anhidrita están situados en profundidad, frente a la relativa superficialidad de los de yeso. Por otro lado Posnjak ['40] estudió la forma de precipitación en función de la concentración y de la temperatura (Fig.3-1). En esta gráfica, la línea de puntos representa el incremento de sulfato cálcico cuando tiene lugar la evaporación del agua de mar, y corta a la curva de solubilidad del yeso en el punto de salinidad que corresponde a 3'5 veces la concentración normal del agua marina. Así, a 30°C el yeso siempre se depositaría hasta que se alcanzara una cota de salinidad del 4'8, a partir del cual la precipitación sería en forma de anhidrita. De otro modo, la anhidrita se depositaría primero si la temperatura fuera de 42°C o más, en la cual la anhidrita es estable.

Fig.3-1: Curvas de solubilidad del yeso y de la anhidrita en soluciones salinas de agua de mar. [Posnjak'40].

Sin embargo, no es evidente que el yeso se formara en estas condiciones. La presencia de otros iones altera las solubilidades de las

sales, y los sulfatos sódico y potásico actúan como catalizadores de la anhidrita y, de hecho, en numerosos depósitos en formación se ha observado la precipitación inicial de anhidrita, que posteriormente se hidrata para formar yeso. En cualquier caso, lo que parece evidente es que tanto el yeso como la anhidrita pueden transformarse en la otra forma. En los yacimientos de un mineral es frecuente encontrar el otro, y que se haga o no el cambio depende del historial geológico de cada yacimiento.

En formaciones del Terciario medio es frecuente encontrar yacimientos con alternancia de yesos y anhidritas, observándose anhidritas que provienen de la deshidratación de yesos, cuyas características son algo diferentes a las de la anhidrita formada originalmente. Es probable que, cuando el yeso es deshidratado por un aumento de presión, el agua liberada actúe como lubricante entre los granos, plastificándose con relativa facilidad el depósito y, en estas condiciones, un débil esfuerzo es suficiente para producir plegamientos y corrientes de flujo. La liberación de este agua conduce a diversas formas texturales y puede, igualmente, implicar a gran parte de sales solubles que pueden recrystalizar.

Inversamente, si la anhidrita se transforma en yeso, la incorporación de agua (2 moléculas por cada molécula de anhidrita) implica, al menos teóricamente, un incremento de volumen del 60% lo que implica una presión situada entre 2 y 70 MN/m². Cuando este paso se realiza a poca profundidad, la transformación es progresiva y suele ir acompañada de la entrada en solución del yeso que puede recrystalizar posteriormente en sedimentos cercanos, especialmente en forma fibrosa, haciendo agrandar las fisuras. A mayor profundidad, la anhidrita puede estar sometida a importantes fuerzas de confinamiento que, llegado el caso de ser supradas pueden dar lugar a la liberación de una fuerza expansiva muy importante.

Como vemos, y al igual que sucede con el resto de la Naturaleza, la historia local del depósito, la composición química particular del agua de mar en sus diferentes épocas, la topografía del lecho, la alternancia de acciones meteorológicas, y el resto de las infinitas circunstancias telúricas particulares que acontecen a lo largo de los milenios que tarda en formarse un depósito, hacen que cada yacimiento posea un conjunto de características que lo identifican respecto a los demás, e incluso que aún entre zonas próximas de un mismo yesal varíe apreciablemente el mineral.

La misma apariencia física del yeso continúa cambiando en el transcurso de su historia. Se ha dicho que el yeso porfiroblástico corresponde a un primer estado de hidratación secundaria, mientras que la forma alabastro se forma más tarde en la etapa de su afloramiento. Cerca de la superficie, en presencia de agua abundante, los depósitos de yeso pueden dar lugar a su disolución, a la formación de cavidades y, eventualmente, a su lavado. En los cristales más grandes, la historia de su crecimiento o de sus cambios de forma puede ser observada por las líneas de impurezas incluidas diseñando los bordes precedentes del cristal, y la presencia de cristales más viejos puede igualmente ser observada por la existencia de pseudomorfías en las que un mineral envuelve los bordes de otro con una forma cristalina diferente.

En el interior de los yacimientos de yeso y anhidrita, pueden aparecer cantidades variables de sales de sodio y potasio, o de otras ya inicialmente presentes en el caldo marino original, que modifiquen el comportamiento de los productos del yeso aunque estén en cantidades ínfimas. Como ejemplo, la hidratación secundaria de la anhidrita en yeso tiene lugar en medio acuoso que contiene sales solubles (principalmente ClNa) y después de que haya entrado en contacto con suelos arcillosos, generalmente presentes como impurezas en los yacimientos de yeso, hay un

cambio de cationes en la superficie de las arcillas, por el que el ión Ca^{2+} pasa a solución y el ión Na^+ ocupa su lugar, más teniendo en cuenta que parte del agua ha dado sus moléculas para hidratar la anhidrita, con lo que está muy saturada de Sodio, y cuando la arcilla se satura de iones de sodio, comienza la formación de sulfato sódico o volver a precipitar cloruro sódico y cálcico. La distribución final de sales solubles en una capa de yeso está caracterizada a menudo por fuertes concentraciones de iones Na^+ en los minerales arcillosos y en la interfase yeso/anhidrita que puede ser considerada como un "frente de hidratación" y de concentración de sales. Cuando la erosión elimina los terrenos de cobertura, y las aguas superficiales se pueden filtrar hasta el yeso, las sales solubles pueden volver a ser lavadas. Por ello un yacimiento debe ser considerado como un sistema dinámico. Los minerales pueden cambiar de forma y posición, disolverse y volverse a forma en otro periodo geológico diferente.

DISTRIBUCION Y EDAD GEOLOGICA DE LOS YACIMIENTOS.

Es evidente que la formación de las evaporitas depende de un clima árido y caliente, lo que se da en zonas próximas al Ecuador, en general protegidas por las masas continentales. Sin embargo, en la actualidad, y por la deriva de los continentes, encontramos yacimientos de yeso en zonas no exactamente ecuatoriales.

El yeso se encuentra en todos los niveles de las eras geológicas aunque, en el hemisferio Norte, el Pérmico es el periodo con mayor cantidad de evaporitas. Los yacimientos más interesantes aparecen en el secundario (trias) y terciario (eoceno y oligoceno) [Foucault'72,21].

La mayor presencia de yacimientos de yeso se da en el Paleozoico y, en general, los yesos de formación más antigua tienen mayor grado de pureza que los más recientes [Antolini'77,24].

Tabla 3-I. Escala estratigráfica de los yacimiento de yeso

Era	Periodo	Edad (M)	Yacimientos
Cuaternario		2	Etiopía
Terciario	Plioceno	4	
	Mioceno	15	España
	Oligoceno	30	España, Italia, Francia e India.
	Eoceno	48	España
	Paleoceno	60	
Secund.	Cretácico	130	EE.UU.
	Jurásico	190	Canadá, Este de Africa, Gran Bretaña
	Triásico	230	Alemania, Francia, Gran Bretaña
Primario	Pérmico	275	URSS, Polonia, EE.UU,
	Carbonífero	340	Canadá
	Devónico	390	EE.UU
	Silúrico	435	Canadá
	Ordovícico	500	Canadá
	Cámbrico	570	Pakistán, URSS

En España, donde la superficie yesífera es cercana al 60% [Burgh Hohn'76,3] y los horizontes de yeso suponen el 12% de la misma, la mayor cantidad de yeso es de origen terciario, y la distribución de horizontes queda repartida en las siguientes épocas:

Triásico.....	4.580 km ² .
Eoceno + Oligoceno.	14.500 "
Mioceno.....	15.920 ".

En líneas generales, al Triásico corresponden los horizontes yesíferos de Murcia y Granada, al Eoceno la mayor parte de los catalanes y la cuenca de Oviedo, al Oligoceno los de Navarra y parte de los catalanes y aragoneses, así como algunos de Guadalajara y Valencia-Alicante y, finalmente, al Mioceno pertenecen los del Bajo Aragón, Castilla, y los La Sagra y La Mancha y la mayoría de los andaluces.

Fig.3-2: Situación de los horizontes yesíferos más importantes de España [Burgh Hohn'76(I),6].

En resumen, se puede afirmar que la composición química particular, con la presencia de unos u otros elementos (impurezas), y especialmente la textura cristalina y su relación con los anteriores, es el resultado del cúmulo de circunstancias geológicas morfogenéticas que, durante milenios, han actuado en cada yacimiento sobre el mineral de yeso.

3.2 LA PIEDRA DE YESO COMO MATERIA PRIMA: EL ALJEZ.

Hay que tener en cuenta que, salvo excepciones, las posibilidades que tenemos de alterar las características de la materia prima son muy reducidas. Podemos seleccionar el mineral y homogeneizarlo, y poco más, salvo secarlo si su humedad fuera muy elevada, o lavarlo de impurezas, como se realiza en algunas plantas industriales de Gran Bretaña (en España es innecesario por la pureza de los yesos nacionales). Así pues, las características del yeso como materia prima resultan, prácticamente en su totalidad, determinadas por su historial geológico.

PROPIEDADES QUIMICAS.

La composición química particular de un yeso queda fijada por su mineralogénesis, así como por posibles contaminaciones posteriores, diferenciándose unos de otros minerales en pureza, estructura y color. La mayor cantidad de impurezas son del tipo carbonato cálcico (caliza), dolomitas, margas y arcillas y, con menos frecuencia, sílice, carbón, glauberita, singenita y polihalita. Cuando estas impurezas están presente en el mineral desde su formación se denominan "impurezas primarias" para diferenciarlas de las "impurezas secundarias" que se introducen durante la exposición del mineral a los distintos procesos geológicos y durante su extracción o manipulación industrial. También se han denominado como impurezas "endógenas" y "exógenas".

En la tabla siguiente se reflejan las composiciones mineralógicas y químicas típicas de yesos de diferentes yacimientos y de diferente origen.

Tabla 3-II. Composición química de algunos yesos (%).

	Natural gypsums		Natural anhydrites		Fluc-gas gypsum		Phosphogypsums		Fluoro- anhydrite
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mineralogical analysis									
CaSO ₄ ·2H ₂ O	91.6	96.4	6.0	3.8	97.5	93.0	97.6	96.5	0.0
CaSO ₄ II	6.4	0.9	88.8	83.7	0.0	0.0	0.0	0.0	94.7
MgCO ₃	0.1	0.6	2.0	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CaCO ₃	1.9	1.3	3.1	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Chemical analysis									
Combined water	19.1	20.1	1.3	0.8	20.6	19.5	19.2	19.2	0.0
SO ₃	46.4	45.4	55.1	51.0	45.8	43.2	45.4	46.9	56.4
CaO	33.6	32.5	40.3	38.7	32.1	32.2	32.5	32.1	40.8
MgO	0.05	0.28	0.95	1.71	0.04	0.01	0.01	0.01	0.13
SrO	0.07	0.16	0.07	0.14	0.0	0.06	2.05	0.05	0.0
Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	0.01	0.08	0.01	0.39	0.27	0.27	0.70	0.93	0.27
HCl-insoluble residue	0.10	0.47	0.10	2.49	0.32	1.51	1.00	0.68	0.69
Na ₂ O	0.02	0.01	0.04	0.11	0.01	0.47	0.14	0.02	0.03
Total P ₂ O ₅	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.01	0.11	0.30	0.0
F	0.0	0.0	0.0	0.0	0.04	1.76	0.14	0.29	0.92
Others					0.20 SO ₂				0.11 ZnO
					0.01 Cl				0.69 K ₂ O
Organics	0.0	0.0	0.0	0.0	0.03	0.08	0.03	0.04	0.0
Ignition loss	0.54	0.71	2.08	4.45	0.4	1.38	0.34	0.43	0.14
Total	99.89	99.71	99.95	99.79	99.81	101.45	101.62	100.95	100.18
pH	6	6	6	6	6	3.1	9	4.2	10-12

1) Zechstein gypsum; 2) Keuper gypsum; 3) Zechstein anhydrite; 4) Keuper anhydrite; 5) Mitsubishi process; 6) From Moroccan raw phosphate, dihydrate process; 7) From Kola raw phosphate, dihydrate/hemihydrate process, after rehydration to dihydrate; 8) From Moroccan raw phosphate, hemihydrate/dihydrate process; 9) From hydrofluoric acid production. Zechstein is an Upper Permian deposit; Keuper, an Upper Triassic.

[Wirsching'85-a, 561]

El yeso puro es de color blanco, o transparente si su cristalización es homogénea en láminas paralelas (selenita), variando su color en función del predominio de las impurezas presentes. Así, los óxidos de hierro producen tonalidades que van del rojo al amarillo, según su cantidad, la arcilla y el carbón lo tornan desde el gris ceniza hasta el casi negro. Por el contrario, la anhidrita pura tiene un blanco azulado aunque usualmente aparece algo agrisada. Es muy frecuente encontrar menas de glauquerita (sulfato sódico-cálcico) en las bandas de separación de las zonas de yeso y anhidrita.

Respecto a las impurezas, debemos considerar que la estructura morfológica del yeso puede ser estudiada a varios niveles: molecular, cristalino, mineral y roca, siendo importante determinar a que nivel están situadas las impurezas, pues su papel será diferente, aunque el proceso de extracción- molturación- calcinación pueda mezclarlos mucho entre sí y difuminar sus fronteras.

A nivel molecular parece natural que no se considere la presencia de impurezas, pues el resultado sería otra molécula o compuesto químico, por lo que el nivel más bajo en el que observamos las impurezas es a nivel cristalino, en donde distinguimos las impurezas de inserción y las de sustitución [Gorchakov'81] y que por su implicación con los defectos cristalinos trataremos sus aspectos físicos conjuntamente un poco más adelante.

En el nivel del mineral, podemos encontrar al yeso asociado con otros minerales físicamente separables e identificables como son la halita, glauquerita, syngenita, etc..., mientras que, finalmente, en la roca de yeso se suelen encontrar vetas o menas de otras rocas sedimentarias que, en lo posible, intentan ser evitadas o separadas durante la extracción, y que podemos agrupar en tres familias:

- Arenas o silicatos.
- Calizas o carbonatos.
- Arcillas o silicatos de Mg, Fe y Al. [Lelong'77,372].

A nivel cristalino, las reglas básicas para la incorporación de impurezas como soluciones sólidas fueron establecidas por Goldschmidt'37 y Ringwood'55, basadas en las valencias relativas y en los radios iónicos de las impurezas y elementos mayoritarios, y son:

- 1ª. Si dos iones tienen la misma carga y el mismo radio iónico, pueden entrar en la fase cristalina en solución sólida en, aproximadamente, la misma proporción de sus concentraciones en solución líquida.

- 2ª. Si dos iones con la misma carga y similares, pero diferentes radios iónicos, compiten por entrar en solución sólida en el mismo lugar de una red, el ión más pequeño se incorporará más fácilmente que el mayor.

- 3ª. Si dos iones con similar radio iónico pero diferentes cargas compiten por un lugar en la solución sólida, el ión con carga más alta se incorporará preferentemente.

- 4ª. Si dos iones con la misma carga y similar radio iónico pero diferentes electronegatividades compiten, el ión con la electronegatividad más baja se incorporará preferentemente, puesto que forma un enlace iónico más fuerte.

Además, en condiciones de equilibrio, la incorporación de impurezas está gobernada por las leyes de distribución en equilibrio:

- a. Ley de distribución homogénea de Brethelot- Nernst: La concentración de impurezas incorporadas a la fase cristalina es proporcional a la concentración de elementos en solución.

- b. Ley de distribución logarítmica de Doerner- Huskins. La ley anterior (a) es seguida por la coprecipitación de soluciones fuertemente sobresaturadas bajo condiciones de equilibrio. La lenta evaporación de una solución saturada se aproxima por una distribución logarítmica, en forma tal que el equilibrio se mantiene y la sobresaturación es prevenida [Dean, Schreiber'78,87].

Por las leyes anteriores, y teniendo en cuenta los radios iónicos de las posibles impurezas en juego, es por lo que se comprende que las impurezas más frecuentes en los minerales de yeso sean las citadas anteriormente. aunque no siempre sea posible encontrar unas buenas condiciones de equilibrio y una precipitación suficientemente lenta.

A nivel rocoso, los índices de pureza de los yacimientos de yeso varían entre un 70-99%, siendo excepcionales los yacimientos de yeso no contaminado. Excepto cloruros, que normalmente aparecen bien separados de los sulfatos, las contaminaciones típicas de los yacimientos de yeso son la calcita, arcillas y margas, así como algunos óxidos de hierro. La calcita, aparte de las normales capas basales de caliza o dolomita, se encuentra presente en los lechos de yeso en finas inclusiones, casi siempre laminares, debido a la naturaleza sedimentaria del proceso de formación de estas evaporitas, alternandose las láminas sulfáticas con las calcícas según los ciclos de precipitación seguidos durante su formación. Los materiales clásticos como granos de arena, arcilla y margas suelen aparecer, en mayor o menor espesor, en forma de láminas, lentejuelas o cordones y sus cantidades varían del 1-30%, siendo debidas sus inclusiones, probablemente, al arrastre por las corrientes del agua de mar de materiales en suspensión más allá de las desembocaduras de los ríos [Antolini'77,21].

PROPIEDADES FISICAS.

Además de la humedad de cantera o recogida por la piedra en su exposición externa a los agentes atmosféricos, las propiedades físicas más importantes son la densidad y la estructura cristalina.

Las características más interesantes, desde un punto de vista mecánico, pueden ser la dureza, la resistencia y el módulo de elasticidad. Los valores normales de la dureza están en el intervalo 1'5-2 de la escala de Mohs, 30-45 de la Knoop, y en torno a 60 de la Vickers (Tabla 3.VI). La resistencia a compresión es del orden de 50-70 kg/cm² [Foerster'28,33], mientras que el módulo de elasticidad se ha estimado en 10⁶ psi ("Pounds/square inch") equivalente a unos 70.300 kg/cm² [Schiller'64,63].

TEXTURA CRISTALINA. El aljez no tiene distintas posibilidades ni diferentes estructuras reticulares, lo que se ha puesto de manifiesto por RX [SNIP'82,103]. Sin embargo sus hábitos cristalinos son muy variados según los yacimientos. Podemos sorprendernos de que, en la Naturaleza, no haya dos seres idénticos a pesar de existir numerosas similitudes entre ellos, ocurriendo lo mismo en el mundo mineral donde no hay dos piedras iguales. Cada yeso es diferente según su yacimiento, presentando variaciones, además de en la composición química por efecto de sus impurezas asociadas, en el tamaño y forma de sus cristales. Los hábitos

Fig. 3-3: Diferentes tipos de mineral de yeso (aljez).

cristalinos resultan alterados por las condiciones ambientales de la génesis del mineral como vimos en el apartado anterior. En efecto, la presión, la temperatura, y la presencia de sales que modifican las concentraciones iónicas y favorecen el crecimiento cristalino en una u otra dirección, además de provocar defectos cristalinos, son las condiciones más características, pero tampoco podemos olvidar el resto de procesos geológicos que durante millones de años han estado actuando sobre los minerales y que no solamente son diferentes para cada yacimiento sino que incluso dentro de cada uno de ellos también actúan con menores variaciones. Así comprendemos la variedad de tipos de yeso, que van desde los cristales laminares casi perfectos y transparentes de la selenita, a las granudas compactas más o menos finas y fuertes, como el alabastro, pasando por una amplia gama de yesos fibrosos y fibrolaminares, y con colores que van del blanco al amarillo-rojo o gris, según las impurezas que contengan.

Murat y Arnaud^{'77} han estudiado las características morfológicas y texturales de diferentes yesos y anhidritas utilizando MEB y DRX concluyendo que los yesos fibrosos, donde el eje de elongación es el c, presentan dos variedades distinguibles ("fibrosa" y "pseudo-fibrosa") en función de la desorientación de los ejes a y b en torno al c, con claras diferencias respecto a la morfología de las fibras, orientación y tamaño de los cristales y el estado de cristalización. En el caso de yesos granulares, los alabastros y los yesos sacaroideos presentan digramas de Laue muy diferentes, con facies cristalina muy variable según el origen del mineral, confirmando que cada yeso posee una individualidad propia, que proviene de las condiciones de su génesis, y que lo diferencia del resto de los yesos.

HUMEDAD DE CANTERA. La piedra de yeso puede llevar hasta una importante cantidad de agua de cantera [Wirsching^{'85-a,563}] variando con las épocas del año y de la percolación de la propia cantera, no debiendo utilizarse con más del 4% [UNE 41.619], aunque es frecuente encontrar hasta un 12%, lo que obliga a un proceso de secado previo [Papadakis, Venuat^{'70,222}]. Algo de esta humedad se elimina en el proceso de almacenado y homogeneización previo a la calcinación, pero es una cantidad mínima. Esta humedad, de no ser eliminada o controlada, puede alterar las condiciones de calcinación en forma importante. Nos podemos dar cuenta de lo que representa si la comparamos con la cantidad de agua de cristalización del DH que es del 21% (Tabla 3.VI) de la que 2/3 tienen que desprenderse para producir SH, lo que representa un 14% de humedad. Frente a ésta, un 3% más de agua de cantera representa un incremento de agua ligeramente superior al 20%, con suficiente entidad como para alterar el proceso de calcinación. Por este motivo, en la actualidad es cada vez más frecuente aprovechar parte del calor desprendido por el proceso de calcinación, en el secado y precalentamiento de la materia prima antes de su introducción en el horno, bien mediante los vapores que salen por la chimenea, o bien mediante cámaras previas incorporadas a los hornos [Monterde^{'87}].

En este mismo sentido, para deshidratar un mol de DH hasta convertirlo en SH hacen falta unos 86.700 Julios [Wirsching^{'85-a,559,569}] para la piedra a 25°C, equivalente a 20.725 calorías (industrialmente puede ser casi el doble). Abadal [^{'74}] ha calculado que una humedad del 5% necesita un complemento de unas 45 kcal/kg lo que representa un incremento de energía cercano al 15%, es decir un 3% de incremento de energía por cada 1% de humedad de cantera.

PLANCHE V

Observation de gypses (fractures) au MeB. 1 - Albâtre (C.8) ;
2 - Saccharoïde Mazan (B.3) ; 3 - Gypse Cognac (B.15) ; 4 - Albâtre
(B.27) ; 5 - Gypse Calottes (B.1) ; 6 - Gypse Saint Pierre de
Martigues (B.20).

Fig.3-4: Texturas cristalinas de diferentes minerales de yeso observadas por M.E.B. [Murat, Arnaud'77].

YESOS QUIMICOS COMO MATERIAS PRIMAS.

En España, actualmente, no se utiliza ningún yeso de origen químico para la industria de la construcción, por lo que no entraremos en la descripción de estos materiales que, por el contrario, se utilizan en otros países de Europa y en Japón. Divergen en la estructura cristalina de los yesos naturales, con diferentes dimensiones de la malla monoclinica [Gardet et al.'70,827] y tienen una serie de impurezas muy específicas que originan una problemática particular que, como vemos, se sale fuera de la propia de las materias primas nacionales (Tabla 3-II).

3.3 EL SISTEMA DE FABRICACION-CALCINACION.

Las tres etapas básicas que sigue el proceso de producción del yeso, a partir del aljez como materia prima, responden al esquema:

aljez => EXTRACCION => CALCINACION => EXPEDICION => yeso
 <----- FABRICACION ----->

A partir de este desarrollo inicial, cada proceso concreto, o procedimiento, que varía para cada fabricante, ya no responde a unos mismos esquemas, tanto menos cuanto más descendamos al detalle. Sin embargo, existen algunas líneas generales que, siguiéndolas, nos ayudan a descomponer cada etapa en varias fases:

EXTRACCION:

=> Extracción -> Trituración -> Homogeneización =>

CALCINACION:

=> Precalentado -> Calcinación -> Refino =>

EXPEDICION:

=> Mezcla -> Almacenado -> Expedición =>

Estudiaremos a continuación cada una de estas fases y las operaciones de que constan normalmente, junto con sus variables operativas más significativas.

Fig.3-5: Las fases más importantes y habituales en la fabricación del yeso de construcción [Bardin'82].

Fig.3-6: Esquema de fabricación del yeso en una instalación francesa [Papadakis, Venuat'70].

EXTRACCION.

EXTRACCION DE LAS CANTERAS.

En esta fase, en la que se prepara el material crudo para su calcinación, se pueden distinguir, básicamente, tres operaciones:

-> Excavación -> Troceado -> Carga ->
 <----- Extracción ----->

Aunque en otros países es frecuente la explotación en mina, en España únicamente se utiliza la explotación a cielo abierto. El factor más importante, una vez decidido el frente de cantera e iniciada su explotación, es la meteorización reciente que pueda sufrir el mineral antes de su extracción definitiva, en función del ritmo de trabajo en la cantera, lo que puede esponjar, por hielo o por descompresión, a la piedra de yeso, lavarla de algunas impurezas o, por el contrario, contaminarla con sales arrastradas por el agua.

El proceso de excavación, en muchos casos con explosivos puede fisurar la piedra, o microfisurarla, pero el hecho de someterla posteriormente a sucesivos triturados, machacados y molidos, hace que este factor pierda importancia e interés.

El troceado rompe los grandes bloques de piedra que puedan haber resultado de su desprendimiento del frente de cantera para adaptarlos a tamaños fácilmente transportable cuyo tamaño máximo pueda estar entre 0'5-1 m. Se realiza con martillos neumáticos, o elevando los bloques y soltándolos contra el suelo, e incluso manualmente con cuñas, palancas, etc. La influencia de esta fase tampoco es muy significativa, salvo que se aproveche para hacer una selección del mineral eliminando menas y alteraciones de la piedra visibles a simple vista.

La carga y transporte a fábrica se realiza en grandes camiones volquetes y, como las anteriores, su significación en cuanto a posibles cambios en la materia prima resulta prácticamente nula.

En resumen, en la fase de extracción del mineral, lo más importante es la posible selección, a "grosso modo", que se pueda efectuar sobre el mineral, y la posible meteorización o contaminación del mismo que, salvo casos excepcionales, no tendrán gran influencia posterior.

TRITURACION.

Esta fase de primera trituración (o trituración "primaria" frente a la "secundaria" realizada, en ocasiones, posteriormente a la calcinación) tiene dos operaciones, aunque en algunos casos puede alterarse ligeramente, lo que se refleja en las operaciones señaladas entre paréntesis que, por no ser generales o por ser reordenaciones de otras operaciones, las comentaremos tan solo muy brevemente. El esquema de esta fase es:

-> (Secado) -> Trituración 1ª -> Criba -> (Purificado) ->
<----- Trituración ----->

Esta primera trituración, además de alterar la granulometría, lo que es su misión fundamental, también puede producir cambios en la forma cristalina del polvo de yeso, pues no podemos olvidar que en general, la molturación produce un cambio de energía en forma de presión y temperatura que, de hecho altera la forma cristalina de los granos de yeso, pues el yeso material blando (dureza Mohs = 1'5-2) con cristales paralelos fácilmente exfoliables. Igualmente procura una primera homogeneización del material eliminando la distinción entre minerales, puesto que cualquier mena que vaya mezclada con la piedra será difícil de eliminar una vez triturada conjuntamente con el yeso.

Las principales variables a considerar son el tipo de maquinaria utilizada en la trituración, cuantificándola principalmente mediante su potencia y velocidad, lo que nos va a determinar la granulometría de la piedra resultante, definida por el tamaño máximo, o mejor por la curva de distribución granulométrica. Las máquinas empleadas, básicamente, suelen ser de cuatro tipos:

- Machacadoras por percusión, o de mandíbulas. Granulometría de salida con ϕ_m de 2-3 cm.
- Trituradoras de cono rotativo y eje vertical.
- Quebrantadora de cilindros dentados segmentados y eje horizontal.
- Molinos de bolas.

Según el tipo de máquina, la forma y distribución granulométrica resultarán diferentes [SNIP'82,127]. Por ejemplo, se sabe que el mejor tipo de molino es el de martillos, que exfolia el aljez en planos o

laminillas que se deshidratan mejor [Fdez.Paris, Carrascosa'64,260], por otro lado las machacadoras son más aptas para material húmedo, por lo que son muy utilizadas en esta primera trituración, mientras que para la trituración secundaria se utilizan generalmente máquinas de percusión, de martillos fijos u oscilantes, o de palas, a la vez que suelen ir acoplados a cribas [Nolhier'85,49]. En todo caso, lo más habitual es seleccionar el tipo de triturador a utilizar en función de la granulometría deseada [Lelong'77].

La limpieza o eliminación de impurezas mediante un proceso de purificado previo a la calcinación no es habitual y menos en España. En Inglaterra, donde la piedra de yeso tiene unos índices de pureza bajos, se suele lavar para lixiviar la glauquerita [Gunn'68 y Eurogypsum'87] [SNIP'82,66]. Sin embargo, lo que sí es frecuente realizar es una homogeneización de la piedra antes de su calcinación, de forma que, en lo posible, la calidad del producto final sea lo más constante posible.

HOMOGENEIZACION.

En esta etapa, que raramente se elimina, se procura mezclar la piedra extraída de distintas zonas o estratos de una misma cantera, para lo que se dispone de secaderos o "parques de homogeneización" con un funcionamiento muy parecido a los que se utiliza en la industria cerámica. Su capacidad depende de la de la planta, pero que suele variar de 1 a 4 semanas de producción de manera que permita disminuir las diferencias posibles entre el mineral de las distintas zonas de la cantera, e incluso de diferentes canteras, y conseguir finalmente un producto uniforme de calidad constante.

Fig.3-7: Parque de homogeneización. Los depósitos, en capas paralelas se recuperan mediante una cinta continua con cangilones que extrae mineral de diferentes capas [SNIP'82].

Una buena homogeneización sólo es posible con un tamaño máximo de unos 20 mm, por lo que se puede desarrollar con operaciones de molido y/o de secado previo o posterior. Frecuentemente el mismo sistema de almacenaje previo a la calcinación facilita la homogeneización del material, como es el caso de los secaderos que hemos mencionado (Fig.3-7) en los que una cinta transportadora vierte el material longitudinalmente en capas sucesivas que después se recuperan con cangilones transversales.

Podemos descomponer esta etapa de la siguiente forma:

-> (Secado) -> (Trituración) -> Almacén-Homogeneizado -> (Secado) ->
 <----- Homogeneización ----->

Definido el tipo de instalación industrial utilizada, su tamaño y capacidad, las principales variables que controla el fabricante, aunque en algunos casos estén fuertemente condicionadas, son, para el caso de utilizar el sistema referido, el espesor de las sucesivas capas de mineral, el tiempo de renovación, función de las capacidades de la instalación y de la extracción, así como las condiciones ambientales de humedad y temperatura, en su caso.

CALCINACION.

PRECALENTADO.

Resulta fundamental, para conseguir una calcinación homogénea, evitar que el material entre húmedo en los hornos (salvo que la cocción sea por vía húmeda), lo que además facilita un ahorro de energía, como vimos anteriormente. Generalmente se realiza inmediatamente antes de la cocción aprovechando el calor desprendido por el horno y que de otro modo se desperdiciaría. Esta inmediatez reduce, además, el choque térmico que pudiera sufrir el aljéz.

Puede ir precedido de operaciones de molido y criba, que también pueden ser posteriores, por lo que las operaciones implicadas pueden ser:

-> (Molido) -> (Criba) -> Secado -> (Almacenado) ->
 <----- Precalentado ----->

En este caso las variables utilizadas son, además de las que corresponden a los aspectos del molido y criba que coinciden con los ya vistos (tipo de máquina, potencia, duración, velocidad, energía de impacto, luz de criba, etc.), el tiempo de secado y sus condiciones ambientales de humedad temperatura.

CALCINACION.

Todos los procesos vistos hasta ahora se ven reflejados en el estado particular del aljéz al entrar en la fase de calcinación. La composición química, decidida desde la génesis del mineral, y su granulometría y estado físico, variados y controlados por las operaciones anteriores, son las circunstancias más importantes en este momento para el aljéz.

El proceso seguido por la piedra de yeso, a partir de ahora, es tan variable como decisivo según el tipo de calcinación que es, consecuentemente, el factor variable de mayor significación. Una vez definido éste, las variables de producción más comunes que utiliza el fabricante son el tiempo-velocidad y la temperatura del proceso, siendo a veces posible controlar la presión (de vapor) aunque sea indirectamente a través de la humedad de la piedra a cocer y, en algunos casos de calcinación discontinua, directamente el gradiente térmico mediante su

Fig.3-8: Diferentes tipos de horno frecuentemente usados en España: Horno rotativo a contra-corriente para fabricación de yeso de construcción, marmita horizontal tipo "Beau" para escayola (SH-beta) y autoclave vertical para fabricación de SH-alpha.

programación, así como la circulación de aire en el interior del horno. A su vez, estas variables se seleccionan a niveles adecuados a la granulometría y resto de características del aljez, y al producto resultante que se quiera obtener.

Como sea que, en España, los sistemas más utilizados para yesos y escayolas de construcción son los hornos rotativos, bien de fuego directo o indirecto (tipo "Beau"), adaptaremos los pasos sucesivos a esta circunstancia. En general las operaciones en las que se puede dividir el proceso son:

-> Dosificación y alimentación -> Calcinación -> (Refrigeración) ->
 <----- Calcinación ----->

SISTEMAS DE CALCINACION. Además de las posibles impurezas o contaminaciones que, fundamentalmente debida al combustible en los procesos de calcinación directa, son defectos del sistema de fabricación corregibles con relativa facilidad, la influencia más importante del tipo de horno, o sistema de calcinación, va a traducirse en dos vertientes:

- Combinación de las diferentes fases del yeso. Por ejemplo, en la siguiente tabla se puede ver la diferencia entre los yesos fabricados en distintos procesos, atendiendo a su diferente composición de fases, que trataremos un poco más adelante:

Tabla 3-III: Ejemplo de composición de yesos según su tipo de calcinación.

	Horno rotatorio	Horno vagoneta	Multifase
DH	0-0'5	0-2	0-2
SH-β	75	6	26
An-III	19	18	14
An-II	5	74	58

=====
 [Wirsching'85-a, 565]

La composición en fases de un yeso se suele representar en un "Diagrama triangular" SH/An-III/An-II o bien DH/SH/An-II si se considera que la An-III por su rápida reconversión en el momento del amasado hacia el SH puede asimilarse, a efectos prácticos, a este [Wirsching, 568] y [Scheer'42; Mc Adie y Kuntze'61; Murat'80, 78].

- Estructura física del yeso producido. Fundamentalmente en cuanto se refiere a granulometría y estructura cristalina del SH y An, así como sus formas alotrópicas. Es interesante recordar que las fuerzas que unen las moléculas de H₂O con los iones Ca²⁺ y SO₄²⁻ son más débiles que las que unen a estos iones entre sí, lo que permite que parte del agua sea eliminada sin que varíe, inicialmente, la red estructural [Burgh Hohn'76, 125], lo que da lugar a diversidad de estructuras moleculares presentes en cada yeso según el proceso que haya seguido. Más adelante volveremos a insistir sobre el proceso de deshidratación.

Fig.3-9: Diagrama triangular para la composición de yesos, desarrollado para reflejar las tres fases SH (ó HH), An-III y An-II [Wireching'85-a].

TIEMPO Y TEMPERATURA. Estos dos factores controlan la "cantidad de calor" que recibe la piedra de yeso para su calcinación, por lo que aparecen íntimamente ligados, de tal forma que a menor temperatura se necesita más tiempo de calcinación, aunque en este caso el producto final resulta mejor y más uniforme [Khalil'72,705]. Incluso es posible, a temperaturas relativamente bajas, y con tiempo prolongado, conseguir la deshidratación del DH, por ejemplo a 90°C durante 4 días se puede obtener SH-β sin nada de crudo [Khalil et al.'71], [Khalil, Gad'72-b] y [Mould, William'74]. Ahora bien, industrialmente, la temperatura de cocción depende de la velocidad de calentamiento, de la presión externa, granulometría, densidad y agitación de la masa de crudo, y se selecciona en combinación con el resto de variables que intervienen en el proceso de fabricación.

DESHYDRATATION DE L'HEMIHYDRATE SOUS 13 mmHg DE VAPEUR D'EAU (d'après Mould et William, 1974)

Fig.3-10: Deshidratación del yeso en diferentes condiciones de temperatura y baja presión. La deshidratación se completa a 60°C en un tiempo aproximado de un mes [Nolhier'85].

La temperatura incide sobre múltiples aspectos del comportamiento posterior del yeso, como la velocidad de fraguado, especialmente en la anhidrita [Hugo, Guilhot'82] y en la resistencia del yeso [Mariotti'85,213], lo que resulta comprensible si notamos que la composición de fases del yeso final y su granulometría dependen del proceso de calcinación. El yeso es muy mal conductor del calor, y los trozos grandes cuecen muy lentamente por lo que es frecuente que el núcleo interior de estos granos quede incocido mientras la capa externa resulta sobrecocida. Esta circunstancia es la que en los yesos de construcción dá lugar a la presencia de un continuo de fases desde el DH a la An-II.

También es importante el gradiente de temperaturas que se alcanzan en el horno pues, por ejemplo, el choque térmico que se dá en una deshidratación producida muy rápidamente provoca una exfoliación del grano de yeso, aumentando su porosidad [Lelong'77].

El tiempo de calcinación y la agitación de la masa mineral dentro del horno, aparecen indirectamente reflejados en su temperatura interior puesto que, en condiciones normales, la cantidad de calor que se suministra al horno es constante, así como la capacidad calorífica de la piedra, por lo que ésta aumenta su temperatura gradualmente, por lo que controlando el tiempo o la temperatura se controla indirectamente la otra variable. Se prefiere actuar sobre la temperatura por adaptarse mejor tanto a las diferentes circunstancias derivadas de los cambios meteorológicos como a los cambios de fase en la calcinación.

COURBE CARACTERISTIQUE DE CUISSON D'UN GYPSE

Fig.3-11: Curva característica de la cocción de un yeso. A unos 120°C se produce el SH y a unos 180°C se produce An-III (soluble) [Nelhier'85].

PRESION DE VAPOR. Tiene gran influencia en las propiedades del producto calcinado, especialmente en el agua de cristalización y en la superficie específica final pues, en combinación con la temperatura, controla la cantidad de agua de cristalización que puede expulsar el dihidrato. Si la presión de vapor es baja, cataliza la deshidratación, y si es alta, retarda el paso a An mejor que el paso a SH por lo que, en combinación con la temperatura, se puede producir directamente el paso DH→An o impedir el paso SH→An [Mc.Adie'64]. Por ejemplo, la eliminación rápida del vapor de agua provoca el paso directo de SH a An-III [Lehmann et al.'70-e,320].

Tabla 3-IV: Propiedades de yesos según procesos.

Sistema de fabricación	Tipo de yeso	Residuo	Agua	Relación	Fraguado		Resistencia			Densidad	Uso y aplicaciones
		tamiz 0'2, %	combinada %	A/Y	inicio	final	flex.	comp.	dureza	en seco kg/m³	
YESO NATURAL:											
Horno rotatorio	SH-β ó multifásico	1'0	4'1	0'73	13	28	4'8	11'2	19'1	1069	Prefabricados y yesos especiales
Marmita	Escayola	3'3	5'6	0'64	9	22	5'2	14'0	26'8	1133	Prefabricados y yesos especiales
Horno transporte	Y.construcción (multifásico)	36'6	0'8	0'60	6	35	5'1	15'5	25'9	1225	Yeso de proyectar y yeso de construcción
Autoclave	Yeso-alpha (Y.moldes)	0	6'2	0'38	10	22	12'3	40'4	92'0	1602	Yeso de moldes, cerámica y dental
DESULFOYESO:											
Horno rotatorio	SH-β	3'1	3'4	0'74	9	21	4'7	11'0	21'5	1064	Prefabricados, adhesivos y yesos especiales
Marmita	SH-β	2'6	5'2	0'72	14	28	5'2	13'5	19'5	1070	Prefabricados, adhesivos y yesos especiales
Horno transporte	Multifásico	26'2	2'0	0'56	6	20	6'7	20'8	34'1	1353	Yeso de proyectar y yeso de construcción
Autoclave	Yeso-alpha	0	6'0	0'37	13	26	12'0	45'0	90'2	1580	Yeso de moldes, cerámica
YESO DE PROYECTAR				0'45-0'55	60-120	170-220				1000-1200	
YESO PARA ENLUCIR				0'60-0'70	50-90	80-200				850-1000	
YESO ALIGERADO				0'55-0'65	50-90	100-170				900-1100	

(Wirsching'65-a)

A presión atmosférica la calcinación provoca la liberación violenta del agua de cristalización en forma de vapor y los cristales se fracturan, resultando agregados porosos compuestos por grupos de cristales de SH coloidal [Khalil'72,705], lo que se impide en los métodos de calcinación en autoclave (SH-alpha).

REFINO.

Efectuado para ajustar finalmente la granulometría del yeso a las especificaciones apropiadas. Es más fácil de realizar y consume menos energía que con el material crudo, especialmente si está húmedo [Nolhier'85,48]. Las operaciones que suele comprender son:

-> Molturación -> Tamizado -> (Clasificación) ->
<----- Refino ----->

La calidad y el tiempo durante el cual se muele son las variables más significativas, pues es posible que un molido prolongado haga variar la estructura del SH derivando la forma alpha hacia la beta. [Lehmann,Holand'66] [Barriac, Murat'69,4774-8] [Lambert'70,113].

EXPEDICION.

MEZCLADO Y COMPOSICION.

En esta fase de fabricación, se le da al yeso su carácter final adecuándolo a su destino de aplicación, buscando la mezcla de fases más adecuada. Típicamente se mezclan semihidrato y anhidrita, pero también se puede incorporar cualquier adición, aditivo, e incluso crudo si se estima conveniente. Las operaciones que puede comprender son:

-> Composición -> (Aditivado/Adicionado) ->
<----- Mezcla ----->

La variable más importante es el tipo y la proporción de mezcla resultante, así como la temperatura a que esta se realiza pues puede afectar notablemente a los productos añadidos.

ENSILADO Y ENVEJECIMIENTO.

El ensilado se hace con la finalidad de procurar un stock homogéneo que permita la expedición continua de yeso [Foucault'76,4] además que se procura la terminación reposada del proceso de calcinación, facilitando la reconversión de An-II hacia la An-III y del DH crudo hacia el SH, al enfriarse lentamente el material recién salido del horno, lo que le ha valido la denominación de "silo de recocido". Esta fase puede concebirse como de operación única:

-> Almacenado ->

En este proceso de "añejamiento" del yeso, las variables que intervienen con más significación son su duración, la humedad y temperatura con las que se realiza. En general, se puede decir que cuanto mayor es la humedad relativa, menor es la superficie específica del producto final, probablemente debida a la "recristalización" del SH-beta hacia formas más compactas tipo SH-alfa [Longuet'70].

Fig.3-12: Influencia de la humedad relativa sobre el envejecimiento isoterma de un yeso [Longuet'70].

El envejecimiento, que empieza en los silos, una vez enfriado y estabilizado el yeso, es un proceso de meteorización en el que, fundamentalmente, se produce una absorción de vapor de agua ambiental por la An-III que se convierte en SH [Eipeltauer'58 y '75] y [Schicht'80]. El contacto con vapor facilita la reconversión de los hidratos amorfos, reduciendo tensiones en la red cristalina producidas por el "choque térmico" de la calcinación. La hidratación de la An-III también varía con el tiempo [Khalil, Gad'72-b], lo que puede ser debido a su contacto prolongado con el vapor de agua atmosférico. El Sh- β , si la atmósfera es muy húmeda, puede pasar a DH mediante una evolución topoquímica [Murat, K. Ch.'74], o a SH-alfa. En obra, por otro lado, siempre se recomienda un almacenaje alejado del suelo, lejos de paredes donde se pueda acumular humedad y ligeramente aireado [Holdridge, Walker'67,499].

EXPEDICION.

Puede ser a granel, aunque normalmente es un envasado en sacos, por lo que podemos fijar las operaciones:

-> (Granel) -> Envasado ->
 <--- Expedición --->

Dentro del tipo elegido, importa considerar su calidad, estanquidad, capacidad y uniformidad, interesando evitar al máximo las segregaciones que se pudieran producir.

En resumen, en el siguiente cuadro se ofrece una visión de las variables de fabricación más significativas:

Tabla 3.V: Variables de Fabricación

Etapa	Fase	Operación	V.Cualitativas	V.Cuantitativas
EXTRACCION				
	Extracción			
		Excavación	Tipo	!
		Trozeado	Selección menas	!No cuantificadas.
		Carga	Sin valcarar	!
	Trituración			
		(Secado)		Tiempo, Hum. y temp.
		Trituración	Tipo	Potencia y velocidad.
		Criba	Tipo	Tamaño.
		(Purificado)		
	Homogeneización			
		(Secado)		Tiempo, Hum. y temp.
		(Molturación)		Potencia y velocidad.
		Almacen-Homogeneizado		Espesor y tiempo ren.
		(Secado)		Tiempo, Hum. y temp.

CALCINACION				
	(Precalentado)			
		(Molturación)		Tiempo, Pot. y vel.
		(Criba)		Tamaño.
		Secado		Tiempo, Hum. y temp.
		(Almacenado)		Tiempo, capacidad.
	Calcinación			
		Dosificación		
		Calcinación	Sistema	T, H, t, PV,
		(Refrigeración)		T, H, t.
	Refino			
		Molido		CV, T, v.
		Tamizado		Ø
		Clasficación		No cuantif.

EXPEDICION				
	Mezcla			
		Composición		π (% mezcla)
		(Aditivado)		π (% mezcla)
	Almacenado	Tipo		V, T, H, t.
	Expedición	Tipo		
		Ensacado		V
		(Granel)		
=====				

3.4 DESHIDRATACION DEL MATERIAL.

La deshidratación es la respuesta de la piedra de yeso al proceso de calcinación. Es, pues, un modo de comportamiento en el que sus variables dependen tanto del estado de la materia prima (propiedades del aljez), como del resto de operaciones sufridas en el proceso de fabricación. El fenómeno, tal y como se comprende en la actualidad, lo resumimos a partir de las ideas suministradas por numerosos investigadores. Antes, nos conviene recordar que la piedra de yeso está compuesta, fundamentalmente, por sulfato cálcico doblemente hidratado, con una estructura tal que el agua estequiométrica aparece dispuesta entre sucesivas capas paralelas de sulfato cálcico. El proceso de calcinación procura un importante aporte de energía (calorífica) a la piedra de yeso. Esta energía, inicialmente se consume en aumentar la temperatura del mineral hasta que sobrepasa cierto umbral a partir del cual se inicia la reacción de deshidratación.

Fig.3-13: Estructura del DH, según WOODSTER y FLORKE, en donde los iones sulfato están representados por trapezoides y el calcio por círculos. Entre las capas de SO_4Ca aparecen las de agua, con trama de puntos [Murat'77].

Una vez suministrada la "energía de activación" que depende de la estructura físico-química del material a calcinar, las moléculas de agua empiezan a abandonar el DH iniciándose la reacción en "gérmenes" coincidentes con puntos débiles de la red cristalina del DH. Para la existencia, densidad y particularidad de estos defectos cristalinos es determinante el historial geológico de la piedra de yeso. Una vez desencadenada, la reacción se propaga linealmente mediante el desplazamiento de la interfase SH-DH (ó An-SH según los casos), a una velocidad que depende de configuración estructural del material, de las impurezas que contenga y de las condiciones ambientales, especialmente de la terna Humedad- Presión- Temperatura siendo (para los SH- β) tanto más rápida cuanto menor sea la presión y mayor la temperatura.

La deshidratación comienza predominantemente en las caras (010) y (011) del cristal [Satava, Setak'73,159], y el agua escapa a través de planos perpendiculares al eje -b- [Atoji'59], es decir paralelamente a los planos de sulfato cálcico. En esta situación dinámica, aparecen superpuestos dos fenómenos de los que depende el desarrollo de la deshidratación [Pierce'70,135] siendo, el primero, el de nucleación-recristalización, que aparece controlado por el mecanismo de movimiento de la interfase entre el DH original y el SH formado, que avanza como una onda a partir de su foco.

Fig.3-14: Morfología de los cristales de yeso, con la denominación de sus caras [Murat'77].

El segundo fenómeno es el de evacuación de las moléculas de agua liberadas por la deshidratación, lo que se regula por mecanismos de difusión, prevaleciendo uno u otro mecanismo en función de las diferentes condiciones en las que se desenvuelva la deshidratación. El proceso se desarrolla, lógicamente, a la velocidad del más lento de estos dos mecanismos.

La deshidratación topotáctica, o topoquímica es el primer proceso de la deshidratación, dominado por la reacción límite en la interfase solución-cristal. El resultado es un cristal de yeso poroso pseudomorfo de cristales fibrosos perfectamente orientados según el eje *c* original [Satava'77,190].

La salida del agua provoca un desequilibrio de fuerzas moleculares en el cristal de DH que se ve obligado a recrystalizar mediante una reorganización y giro de los ejes cristalinos -b- y -c-, produciéndose una retracción del cristal, que depende de la presión de vapor [Barriac, Murat'69,477] y [Mc.Adie'64], aunque la deshidratación parcial de la red cristalina no implica necesariamente su destrucción, por lo que en esta reestructuración es posible encontrar un estado de equilibrio intermedio, en el que se detienen el SH y la An-III, y en el que todavía no ha salido toda el agua estructural del yeso. No obstante, si seguimos calcinando, la estructura se colocará, finalmente, en un estado de equilibrio más estable, al que llamamos An-II, en el que, prácticamente, han desaparecido todas las moléculas iniciales de agua. Esta situación da lugar a las diferentes fases del yeso y a sus varios estados intermedios.

Cuantitativamente, las características observables más importantes que ofrece la piedra de yeso como respuesta al proceso de calcinación se traducen en la energía de activación y su velocidad de transformación, o de deshidratación, entendidas como variables dependientes tanto de la estructura y características de la piedra original, es decir de su estado, como de las condiciones de calcinación, es decir de sus "variables de fabricación". La temperatura y el tiempo de calcinación, permaneciendo constantes el resto de variables, determinan la cantidad de materia transformada, es decir, la composición de fases del yeso resultante.

Un efecto muy importante es el denominado "choque térmico", del que ya hemos hablado, o, en general, el gradiente de temperatura que, si es importante, produce notables distorsiones en la estructura del DH que se "retrae" (el SH producido en la calcinación tiene menos volumen que el DH original), quedando con tensiones residuales que permiten la admisión de más agua que la estequiométrica siendo, en este caso, muy importante el tratamiento que siga el yeso posteriormente a su salida del horno durante

la fase de "añejamiento" o envejecimiento, cuando estas tensiones pueden, o no, relajarse.

El efecto de una calcinación rápida, en la que no ha podido deshidratarse el yeso con comodidad, es dejar a la estructura de las diferentes fases del producto en un estado más inestable que cuando la cocción ha sido lenta, lo que provocará, más tarde, que el fraguado de los yesos sometidos a una calcinación brusca sea más rápido que en el caso contrario.

Las variables de calcinación más importantes son, como ya hemos visto, las que controlan el ambiente en el que ésta se desarrolla, es decir, además del tipo de calcinación, la temperatura, la presión de vapor, la duración de la cocción y el gradiente térmico, estando a su vez correlacionadas entre sí según los procesos industriales y los tipos de horno utilizados.

Veamos más detalladamente que influencia tienen, en la reacción de deshidratación, los factores más importantes:

PAPEL DEL SISTEMA DE FABRICACION- CALCINACION.

Desde el principio del proceso nos encontramos con factores influyentes, puesto que incluso el propio calor generado por el molido puede deshidratar parcialmente al DH [Pinault'72,342].

Fig.3-15: Temperaturas industriales (medias) a las que se producen los diferentes cambios de fase durante la calcinación [Nolhier'85].

La temperatura es una de las variables más importantes. Así, Ball y Norwood'69 han comprobado como para temperaturas menores de 110°C la deshidratación parece controlada por procesos químicos de nucleación y propagación de la interfase, mientras que para temperaturas mayores es el mecanismo de difusión el más importante. Sin embargo, hay que tener en cuenta que industrialmente se efectúa el paso DH→SH a unos 130-150°C, SH→An-III a 180-190°C, a 500°C de An-III→An-II con reacciones exotérmicas, aunque en procesos de calcinación continua, en realidad se

produce una mezcla de fases [Khalil, Hussein'72], debido a que en el interior del horno unos granos de piedra permanecen más tiempo que otros y, en función de su granulometría alcanzan diferentes temperaturas.

El papel de la temperatura en el paso An-III-→An-II ha sido estudiada por Gardet et al.'76 y el de la presión de vapor por Soustelle et al.'70-a y Gardet et al.'76-a, comprobando como a mayor presión corresponde una temperatura mayor de transformación. Otros autores [Ball, Norwood'69] y [Ball, Urie'70,529] han buscado el desarrollo de modelos cinéticos sobre la base de mecanismos de difusión unidimensional, o intentando encontrar las energías de activación correspondientes a diferentes condiciones [Murat, Comel'70-a] [Negro y Stafferi'72] [Fevre, M,C'76].

Fig.3-16: Diagrama de equilibrio de las diferentes fases del yeso, en función de la presión y de la temperatura [SNIP'82].

PAPEL DEL ESTADO DEL ALJEZ.

Desde hace mucho tiempo se sabe que la temperatura de inicio de la reacción de deshidratación depende notoriamente del ambiente, del origen del mineral, tamaño de partículas, etc. [Tcheichvili'68,57], y aunque todavía no se dispone de explicaciones completamente satisfactorias de los mecanismos de actuación de las impurezas, son éstas, junto con la estructura cristalina y forma física de los cristales de DH, los factores de mayor influencia.

LAS IMPUREZAS. Podemos resumir la actuación de las impurezas en dos vías diferentes y contrapuestas, dependiendo de la forma física de inserción en la estructura del DH. Si las impurezas intervienen en los defectos cristalinos, pueden acelerar la deshidratación actuando sobre el mecanismo de nucleación. Por el contrario, las impurezas situadas en un nivel estructural superior pueden obstaculizar la salida de las moléculas de agua al taponar las capas en las que ésta se coloca, interviniendo en el mecanismo de difusión [Murat'77,103]. Así pues, el efecto de las impurezas es, a priori, difícil de conocer si no se sabe como interactúan con la estructura del dihidrato, lo que se refleja en la bibliografía con numerosas contradicciones, si nos fijamos únicamente en el carácter químico de las impurezas analizadas. En todo caso, y aunque el papel de las impurezas no esté del todo estudiado [Schicht'80,149], si es claro que los yesos con un cierto contenido de elementos extraños presentan una

descomposición térmica regular y progresiva, lo que se manifiesta por la existencia de una gama de valores en la energía de activación, favoreciendo la producción de yesos con diferentes fases. Es el caso de los yesos de construcción que, a partir de materias primas con un índice de pureza no muy elevado, resultan en yesos polifásicos muy aptos para su uso.

Aunque en laboratorio el efecto de las impurezas es el de acelerar o retardar la deshidratación, en el proceso industrial, donde es frecuente recurrir a calcinaciones periodificadas, el resultado es la alteración de la composición de fases del yeso resultante. Si la deshidratación se retarda, el yeso final tendrá mayor cantidad de crudo; si se acelera, el yeso tendrá mayor cantidad de anhidrita.

Las arcillas con gran absorción de agua pueden acelerar la deshidratación [Elprince et al'82], o retardarla [Bardin'82,61]. Ciertas sales, facilitan la producción de SH [Foucault'76,3] y, en general, disminuyen la temperatura requerida para que se produzca la disociación $\text{SO}_4\text{Ca} \rightarrow \text{CaO} + \text{SO}_3$ [SNIP'82,91]. El acoplamiento yeso-impureza es susceptible de retardarla [Murat y Comel'70,1952 y '70-a,232] [Murat et al'71,34], y su influencia es notoria aunque estén presentes en poca cantidad [Papadakis y Venuat'70,222].

LA ESTRUCTURA CRISTALINA. Sabemos que la forma y orientación de los núcleos de la deshidratación se altera con la presencia de materiales absorbidos en la superficie del cristal [SNIP'82,103], es decir impurezas. Pero además la forma del cristal es muy importante. Así, Deicha y Deicha [55] comprobaron el diferente comportamiento de diversos cristales de selenita. También sabemos que el yeso de estructura acicular se deshidrata más rápidamente que un material de otra estructura [Schicht'80]. En fin, las dislocaciones o formación de cadenas de vacancias y su papel en la deshidratación del SH ha sido investigada, además, por numerosos autores como Atoji [59]; Sella [62]; Fowler et al. [68]; Boldyrev [69]; Murat y Comel [70-a] y Beretka [70], comprobando todos ellos la importancia que tiene la estructura del yeso en su reacción de deshidratación.

LA GRANULOMETRIA. Aunque en teoría el proceso de calcinación depende de la granulometría de la piedra cruda, en la práctica el proceso es el inverso, es decir que se adapta la granulometría de la piedra de yeso al proceso de calcinación al que va a ser sometida, mediante el triturado y molido previo. La norma UNE 41.619 define 5 tipos para el aljez 1: (0-20 mm) 2: (20-50) 3: (50-150) 4: (0-150) 5: (sin limitación). Por ejemplo, los tamaños normales de la piedra para distintas calcinaciones son: [Wirsching'85-a,563].

Horno rotatorio 0-25 mm.

Marmita 0-2 mm.

Marmita combinada con ud. de secado y molido 0-0'2 mm.

Horno de vagonetas 4-60 mm.

Yeso y anhidrita para cementeras 5-50 mm.

Sin embargo, generalmente es difícil alimentar un horno con granos mayores de 25 mm [SNIP'82,124]. Al calcinar DH con tamaño de 5 mm. se produce una cierta cantidad de crudo final, que no aparece al calcinar yeso fino, debido a que el centro del grano queda incocido [Enayetallah'77-a]. Es un fenómeno muy conocido que si los granos de piedra son gruesos, se produce una corteza superficial de anhidrita, una zona intermedia de semihidrato y un núcleo central de incocido, por lo que es recomendable no cocer con granos mayores de 1 mm. [Fdez.París y Carrascosa'64,260]. También interesa calcinar yesos monogranulares, con lo que se obtiene una buena homogeneidad [Pinault'72,349].

Cuando la granulometría es muy fina aparece An-III en mayor abundancia [Khalil y Bad'72-e] [Lehmann et al.'70-e,322] y si, además, la temperatura es baja se puede retardar la salida del agua, pues los gérmenes no progresan adecuadamente por las discontinuidades del material [Lachaud'70,94].

La energía de activación aumenta con la granulometría al desplazar la reacción hacia un régimen de difusión al aumentar el tamaño de los granos, por el fenómeno de impedancia. También el orden de la reacción parece disminuir con el tamaño del grano. [Pierce'70,137].

Además hay que tener en cuenta que durante el proceso de calcinación, la granulometría resulta alterada, siendo diferente de la de entrada, lógicamente con mayor proporción de granos finos, puesto que muchos granos se fracturan por el proceso de deshidratación, debido a la presión interior del agua que busca su camino de salida, y por choque térmico [Beretka, Crook y King'81 y Murat y Karmazsin'77,228]. La calcinación a presión atmosférica provoca la liberación violenta del agua de cristalización en forma de vapor, y los cristales de DH se fracturan, resultando agregados porosos compuestos por grupos de cristales de SH coloidal [Khalil'72,705], es decir SH del tipo "beta".

3.5 CARACTERISTICAS DEL YESO.

El estado del yeso, al terminar su proceso de fabricación, o en el momento de su empleo en obra, depende del tipo de materia prima utilizado y del conjunto de transformaciones seguidas (procesos).

Químicamente, y salvo la alteración que supone la deshidratación de la piedra, no encontraremos en el yeso otros minerales o compuestos que no estuvieran ya en la materia prima. Las impurezas que tuviera, permanecerán prácticamente inalteradas pues, en las condiciones habituales, las temperaturas de calcinación no suelen alterarlas y no se añaden nuevos elementos en este proceso. Por otro lado, no se ha observado que las impurezas reaccionen con el yeso dentro del horno para producir nuevos compuestos. Contrariamente, la estructura física del yeso es muy diferente a la del material de partida. Además de la trituration sufrida por la piedra, el proceso de calcinación provoca la ruptura de los granos, como hemos visto en el apartado anterior. El paso de DH a SH implica una reducción de volumen que únicamente los granos muy finos pueden soportar sin fracturarse. En términos generales, la granulometría a la salida del horno es mucho más fina que a la entrada [Ridge, Boell'62-a] [Ridge, Surkevicius'62] [Karmazsin, Murat'77].

COMPOSICION QUIMICA. EL SISTEMA DE FASES.

Estando fijada la composición química general por la materia prima, la fracción que corresponde al sistema sulfato cálcico- agua presenta múltiples variaciones en función de sus condiciones de fabricación, siendo las más importantes las derivadas del tipo de horno y de las temperaturas alcanzadas en su interior, lo que se refleja en la composición de fases del producto resultante [Khalil, Hussein'72,69].

Las diferentes fases se diferencian químicamente por su grado de hidratación y, además, por su estructura cristalina y reactividad (Tabla

3.VI). En un yeso comercial podemos identificar cada fase presente, caracterizando a un determinado yeso por la distribución porcentual de sus distintas fases minerales, lo que llamaremos "composición GHASI" con el significado siguiente [Murat'80,78]:

- "G"= % de DH (Gypse).
- . "H"= % de SH (Hemihidrate).
- . "A"= % de An-III ó soluble (Anhidrite-III).
- . "S"= % de An-II, insoluble o sobrecocido (Surcuit).
- . "I"= % de Impurezas.

Siendo: $G + H + A + S + I = 100$, lo que requiere haber descontado previamente la cantidad de humedad o agua libre lo cual, por otro lado, presenta algunos problemas, pues debido al carácter zeolítico del agua presente en las fases metaestables (SH y An-III) es difícil apreciar que parte es la estructural [Schicht'80] y se pueden producir algunos errores en la valoración del DH.

Otra posible representación de la composición de las fases de yeso se puede hacer apoyándonos en diagramas triangulares, como ya hemos visto, reflejando las fases activas con dos modalidades. La primera es asumir que la An-III se transforma casi instantáneamente en SH además de no diferenciarse rotundamente de éste, y sumar ambas fases, con lo que tenemos un diagrama triangular DH/ SH+An-III/ An-II que se adapta bien al grupo de "yesos de construcción", y la segunda, apropiada para "yesos de moldear" (escayolas) es suponer despreciable la fracción de An-II y hacer un diagrama DH/ SH/ An-III [Scheer'42] [Mc.Adie y Kuntze'61] [Murat'80,78], o bien despreciar la fase DH y hacer un diagrama SH/ An-III/ An-II.

Los diferentes modos de calcinación y molido conducen a productos que, si bien son químicamente iguales, poseen reactividades muy diferentes. Por ejemplo, en un horno tipo "Beau", donde no queda crudo resultante ni apenas An-III, se produce un yeso muy adecuado para uso en prefabricados, mientras que en horno rotatorio se acomoda mejor a yesos de construcción (pastas de agarre y enlucidos), mejor si es de fuego directo [SNIP'82,116].

La importancia de cada fase queda manifiesta si comprobamos el papel que cumple cada una de ellas:

DIHIDRATO (DH). Su papel fundamental reside en la provisión de los primeros núcleos de cristalización [King et al.'78], por lo que si su finura es la adecuada, provoca importantes incrementos en la velocidad de fraguado, tanto mayores cuanto más tiempo haya tenido de hidratarse y cristalizar perfectamente [Moisset'85]. A su vez, este efecto implica un incremento de la expansión de fraguado [Moisset'85] y de la fracción fina de porosidad [Ridge et al.'62,253].

SEMIHIDRATO (SH). Es el principal responsable de la estructura resistente del yeso, una vez fraguado, por su reconversión a DH trabado entre sí gracias a su crecimiento cristalino. La cantidad de agua por molécula de SO_4Ca varía hasta casi $2/3$ debido al carácter no estequiométrico de solución sólida, que depende directamente de las condiciones determinadas de temperatura y presión de vapor en las que se haya obtenido [Gardet et al.'70] [Soustelle et al.'70], con tanta más cantidad de agua cuanto más rápida haya sido la calcinación [Gips Union'85], diferenciándose también en su superficie específica y porosidad [Ball'77], es decir en su forma física. A mayor finura de molido se acelera la velocidad de fraguado [Galtier et al.'83] lo cual, a su vez varía según que el SH provenga del DH o de la An-III, en cuyo caso el

efecto acelerador es más patente [Lehmann et al.'71-e,323]. También el SH cataliza la hidratación de la anhidrita, tanto más cuanto menor haya sido la temperatura de obtención de la An [Landrieu'63].

ANHIDRITA-III (An-III). Soluble, en contacto con aire húmedo ya es capaz de revertir a SH [Anstett'38,175] y se considera que esta reversión es prácticamente instantánea en el caso de mezclarse con agua líquida [Murat'71,259]. En realidad es un semihidrato deshidratado que aún conserva su estructura cristalina [Gardet et al.'76], siendo una fase intermedia entre el SH y la An-II [Lachaud'70,93]. Como ya hemos visto, parece que cada fase, antes de cambiar a otra, siguiendo el incremento de temperatura, forma una pseudofase relativamente inestable que, con la composición química correspondiente a la fase siguiente, casi mantiene la estructura física de la fase anterior. Su cantidad depende de la granulometría de la piedra pues cuanto más fina es ésta más cantidad de An-III aparece al final de la calcinación [Khalil'72-c,218], siendo mayor su superficie específica si viene producida directamente del DH en lugar de haber pasado por SH [Lehmann et al.'71-e,323].

Su cantidad de agua varía entre 0'06 y 0'11 mol. de agua por mol. de SO_4Ca y participa de las características enunciadas para el SH de solución sólida [Soustelle et al.'70-a], estando las pocas moléculas de agua prácticamente libres, en forma monómera, pues están sometidas a fuerzas muy débiles [Soustelle et al.'72,954]. Su efecto se traduce en catalizar la hidratación del yeso [SNIP'82,90] debido a su rápida disolución [Foucault'76,8] y sumarse al SH, además de afectar a la reología de la pasta [Lelong'77].

ANHIDRITA-II (An-II). Casi insoluble, o insoluble, tiene la misma estructura ortorrómbica que la anhidrita natural, de la que puede haber parte en el polvo de yeso, aunque, a diferencia de esta, su estado superficial y porosidad es diferente debido a su calcinación [SNIP'82,90,113]. Aparece a partir de los 300°C lo que le ha valido el nombre de "sobrecocido" (An-II-s) y, desde los 500°C su capacidad de solubilizarse para fraguar se pierde (An-II-i) para volver a recuperarla a los 700°C donde "cocido a muerte" forma los yesos para pavimentos del tipo "yeso (o cemento) Estrich" (An-II-E) ya parcialmente disociada [Schicht'80] [Wirsching'85,558,581], aunque sus temperaturas de transformación también dependen de la presión [Ridge, Surkevicious,62] [Soustelle et al.'70-a] [Khalil'72-c,218] [Hugo, Gulhot'82] [Gardet et al.'76]. Su fraguado resulta catalizado por la presencia de DH y, especialmente, por las impurezas [Tcheichvili'69] considerándose, por convención, que fragua en los primeros 7 días, más allá de los cuales se considera como inerte o como hidratación retardada. Su papel en la estructura final del yeso es importante, considerándose como una buena cualidad su progresiva hidratación que entraña una cristalización complementaria que refuerza la red cristalina primeramente formada por el SH, compensando parte de la retracción de secado [Papadakis, Venuat'70,237] por lo que evita la posible formación de fisuras por esta causa, efecto que se suma al térmico, debido a la disminución del calor de fraguado que su presencia origina [Chassevent'49,270] [Landrieu'63] [Ludwig, Singh'79,48] [SNIP'82,113,116]. Facilita la trabajabilidad y hace disminuir el requerimiento de agua, mejorando así las características mecánicas [Gardet et al.'76], salvo que su presencia sea excesiva [Baouman'57,43].

FORMAS ALOTROPICAS.

Tanto el semihidrato como la anhidrita soluble presentan una serie continua de variedades alotrópicas cuyos extremos se conocen desde hace

tiempo [Kelley et al.'41] y se denominan "alfa" y "beta". Se obtienen según las condiciones de calcinación, especialmente, en función de la presión de vapor. En condiciones atmosféricas se obtiene la variedad beta, mientras que en medio húmedo se produce la variedad alfa. Ahora bien, como aún en condiciones atmosféricas, el propio vapor de agua desprendido en la calcinación puede crear atmósfera locales con una cierta presión de vapor, es posible encontrar algo de forma alfa donde predomina la otra y, más frecuentemente encontrar formas intermedias, denominadas "alfa de baja presión" (a-bp) [SNIP'82,85], lo cual, a su vez, depende de la granulometría de la piedra pues en los granos gruesos puede verse dificultada la salida del agua en la deshidratación, lo que puede hacer aumentar su presión interna y producirse, antes de la ruptura u "explosión" del grano, ligeras cantidades de SH-alfa. Esta variedad es la principal constituyente de los yesos utilizados para usos médicos y moldes cerámicos, mientras que la beta es producida en las escayolas y yesos de construcción.

Fig.3-17: Esquematzación, sobre un diagrama de presión temperatura, de las condiciones de tratamiento térmico que permiten obtener el SH-alfa (camino 1234) o el SH-bp (camino abcd), según BARRIAC el al.'67 [Murat,77]

SEMIHIDRATO ALPHA (SH-a). Es la forma perfectamente cristalizada y compacta del SH, producida con altas presiones [Colussi, Longo'74,190] [Bardin'82,56], derivándose de su estructura una muy baja relación A/Y, del orden de 0'4, lo que produce yesos fraguados poco porosos y muy resistentes. Es más difícil de moler [Lacheny'67,22] con la particularidad de que un molido prolongado del SH-alfa hace que éste derive hacia formas de tipo SH-β [Lehmann, Holland'66] [Barriac, Murat'69,4774-8].

SEMIHIDRATO ALFA, DE BAJA PRESION (SH-aBP). Estas variedades se pueden obtener empezando la deshidratación en atmósfera seca, pasando después a una etapa húmeda para terminar en vapor seco [Eyraud et al.'67].

Tabla 3-VI: Propiedades y características de las diferentes fases del sistema $\text{SO}_4\text{Ca-H}_2\text{O}$

Fórmula	Dihidrato $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Semihidrato $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$		Anhídrita III $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{2}{3}\text{H}_2\text{O}$		Anhídrita II CaSO_4		Anhídrita I	
Formas		Alpha (α)	Beta (β)	An-III-β	An-III'-β	An-III-a	AnII-s	AnII-i	AnII-E
Masa molecular	172,17	145'15-148'03	145'15		136,14 (+ ?)			136,14	136,14
Estabilidad termodinámica, °C	<40	Metaestable en aire saturado		Metaestable en aire saturado				40-1.180	>1.180
Designaciones	DH Yeso Aljez Yeso fraguado	SH- Yeso de autoclave Yeso alpha	SH-β Escayola Yeso de modelar	An-III Anhídrita soluble			(soluble lenta)	An-II (insoluble) Anhídrita natural	Yeso Estrich Yeso de pavimentos An. Alta temperatura
Condiciones: Temperatura °C	<40	>45	45-200	50 al vacío	100	50 al vacío	200-1.180	200-1.180	200-1.180
Atmósfera		Solución acuosa	Aire seco	100 en aire seco	Aire seco	100 en aire seco			
Temperatura de producción, °C	<40	80-180	120-180	290	290	110	300-500	500-700	700-900
Agua de cristalización, %	20,92	6'21-8'05	6'21		41			0'00	0'00
Volumen molar, cm ³	74'5	52'4	55'2		52'8			46'4-45'8	
Densidad, g/cm ³	2'31	2'76	2'62-2'64		2'580			2'93-2'97	No determinada
Dureza Mohs	1'5-2	---	---		---			3-4	---
" Kncop	32-45	---	---		---			---	---
" Viclers	60	---	---		---			---	---
Solubilidad a 20°C, %	0'21	0'67	0'88		Se hidrata a SH			(0'27)	---
Índices de refracción: n _a	1'521	1'5590 (media)			1'501			1'570	No determinados
n _b	1'523	1'5595 (media)			1'501			1'576	
n _c	1'530	1'584			1'546			1'614	
Carácter óptico	+ (biaxial)	+ (uniaxial)	+ (uniaxial)		+ (uniaxial)			+ (biaxial)	No determinado
Orientación óptica	n _a b	c n _c			c n _c			n _a c	Indeter.
Ángulo axial 2V	58-60°	14°	14°		40°			n _b c	No determinado
Sistema cristalino (Murat)	Monoclínico	Hexagonal	Hexagonal		Hexagonal			42-44°	No determinado
Simetría reticular	Monoclínica	Romboédrica			Hexagonal			Ortorómbico	
Grupo espacial	C _{2v} = C _{2h}	C _{3v2} = D _{3h}			C _{6v2} = D _{6h}			Rómbica	Cúbica
Dimensión reticular, nm: a	1'047 (0'568)	0'683 (0'676-0'696)	0'683		0'699 (0'6983)			C _{cm} = D _{3h2}	No determinada
b	1'515 (1'518)	0'683	0'683		0'699			0'696 (0'6991)	
c	0'628 (0'629)	1'270 (0'624-0'635)	1'270		0'664 (0'6318)			0'695 (0'6996)	
β	(113°50)							0'621 (0'6238)	
Exfoliación	(010) Perfecta (100) y (011)							(010) Perfecta (100) y (001)	
Macclas	(100), (101) y raramente (201)							(011)	
Susceptibilidad magnética	-743.10 ⁻⁷ (medida) -754.10 ⁻⁷ (calculada)	-557.10 ⁻⁷						-496.10 ⁻⁷	
Constante dieléctrica	5'04-6'83							6'09	
Coef. dilatación térmico: Vol.	72'5.10 ⁻⁶								
Idea. lineal	24.10 ⁻⁶								
Solubilidad en agua, g/l. 5°C	1'85	8'10	10'40		10'50				
de CaSO ₄	20 2'05 25° 2'08 35° 2'10 50° 2'08 100° 1'69	8'65 8'20 5'45 4'25 1'60	8'90 8'15 6'80 5'00 1'72-1'80		6'95 6'30 6'80 4'10-5'25 1'51-1'76			3'00 2'70 2'30 1'82 0'78	
Solubilidad en agua, g/l. 5°C	2'34	8'67	11'12						
de fase hidratada	20° 2'58 25° 2'62 35° 2'64 50° 2'62 100° 2'13	7'11 6'63 5'83 4'55 1'71	9'52 8'72 7'27 5'35 1'84-1'93						
Calor específico, Cp = f(T)	21'84 + 0'076.T 44'5	16'95 + 0'039.T 28'6	11'48 + 0'061.T 29'6	23'78 (a 22°C)	14'10 + 0'033.T 25'9 ± 0'3	23'55 (a 22°C)		17'78 + 0'0236.T 23'93	
Entropía, S _{298.15} , cal/mol/K	46'4 ± 0'4	31'2 ± 0'6	32'1 ± 0'6					25'5 ± 0'4	
Entalpía, H _{298.15} , Kcal/mol	-479'40	-372'80	-372'32	-336'61		-335'55		-338'73	
E. libre, G _{298.15} , Kcal/mol	-428'48	-339'30	-339'06	-309'81		-308'75		-311'86	
Calor de disolución (CIN 2N)	5.700	(1.600)	(1.100)	-450		-1.510		(1.670)	
Calor de hidratación, cal/mol		-4.100 ± 20	-4.600 ± 20	-6.150 ± 20		-7.210 ± 10		-4.030 ± 20	

(Murat y Murat '77)

Prácticamente todos los SH industriales preparados por calcinación del aljez tienen una proporción importante de SH- α [SNIP'82,87] [Bardin'82,56].

SEMIHIDRATO BETA (SH-b). Frente a la variedad anterior presenta una forma externa de apariencia más amorfa con un importante aumento de la microporosidad [Bardin'82,57], menor tamaño cristalino y mayor superficie específica lo que se traduce en un mayor requerimiento de agua, normalmente del orden del 0'8, y un fraguado más lento y mayor energía superficial interna [Enayetallah et al.'77-a], aunque también puede fraguar más rápido [Karmazsin, Murat'74,19].

ESTRUCTURA FISICA.

Así como la estructura química de la materia nos indica "que" es lo que tenemos, la estructura física nos indica "como" lo tenemos, siendo ambas cuestiones fundamentales para comprender el comportamiento de cada material concreto. En el yeso, los aspectos físicos de más interés son aquellos que hacen referencia a los aspectos formales de los granos, es decir densidad aparente, tamaño y forma de los granos, superficie específica, etc., que están principalmente definidos por el sistema de fabricación y molido [Karmazsin, Murat'77 y '79], comprobándose que a mayor temperatura de calcinación, mayor superficie específica BET y menor velocidad de hidratación de las anhidritas [Nolhier'85,131], y que las dislocaciones de los cristales aumentan con la temperatura de calcinación [Hugo y Guilhot'82], con importantes consecuencias en el comportamiento del yeso durante la hidratación.

Cuando el DH se calcina y se convierte en SH, el volumen disminuye, formándose amplios canales que corren paralelos a las cadenas de SO_4Ca . En estas bandas, donde las moléculas de agua del SH buscan un nuevo equilibrio, permanecen libres algunas moléculas de agua de cristalización que escapan con relativa facilidad, a la vez que, de igual forma, pueden penetrar. En el caso de la An-III, cuya configuración molecular no está aún definitivamente asentada, este fenómeno explica la fácil conversión hacia el SH. Por el contrario, la An-II presenta una configuración cerrada y más compacta de iones, lo que impide la penetración de moléculas de agua, siendo la forma más densa y dura de los sulfatos cálcicos (cfr.Tabla 3-VI). Sin embargo, a pesar de la carencia de canales vacíos, en algunas condiciones puede, muy lentamente, absorber agua y reconvertirse hacia el DH [Wirsching'85-a,559].

GRANULOMETRIA. El tamaño de los granos es una de las variables más importantes, por cuanto controla aspectos relativos a su forma. No todas las granulometría resultan aptas para los diferentes usos [ADAA'85-a,197], aunque el avance en esta línea se ve obstaculizado por las dificultades prácticas de su determinación precisa [Venuat'77,309], puesto que en comparación con un cemento, la curva granulométrica de un yeso es más extendida. Se obtiene por tamizado hasta 0'1 mm. y luego con la pipeta de Andreasen [Venuat'70,105] y, en función de su uso, las diferentes normas nacionales imponen ciertas limitaciones [RY'85] y [Nolhier'85,49].

Lelong [77] ha estudiado las diferencias de comportamiento en la reología del yeso de diferentes granulometrías observando, por ejemplo, que el aumento de finos produce un mínimo en la relación Y/A para las diferentes granulometrías, y como se altera la fluidez de las pastas con diferentes composiciones.

FLUIDITE à E/P:0.8

évaluée par la mesure du diamètre d'étalement de la galette
obtenue par l'anneau de Schmidt

COURBES d'EGALE FLUIDITE en FONCTION
de la COMPOSITION GRANULOMETRIQUE

= COURBES d'EGAL GACHAGE à SATURATION (P/E)
en FONCTION de la COMPOSITION GRANULOMETRIQUE

= EVOLUTION des CARACTERISTIQUES de FLUIDITE
en FONCTION des PROPORTIONS RELATIVES de
PARTICULES FINES et MOYENNES, à TENEUR
CONSTANTE en PARTICULES GROSSIERES -

= EVOLUTION des TAUX de GACHAGE à SATURATION
en FONCTION des PROPORTIONS RELATIVES des
PARTICULES FINES et MOYENNES, à TENEUR
CONSTANTE en PARTICULES GROSSIERES -

Fig.3-18: Influencia de diferentes composiciones granulométricas en la fluidez y en la relación A/Y de amasado a saturación [Lelong'77].

SUPERFICIE ESPECIFICA. Es uno de los factores con más influencia en la reactividad de los yesos [SNIP'82,149], puesto que los mecanismos implicados en el proceso de hidratación son, en definitiva, de carácter superficial. Geométricamente queda determinada por el tamaño y la forma de los granos y por su densidad aparente [Venuat'70,105] lo cual, a su vez, depende de la piedra original, proceso de fabricación y de su estado de "envejecimiento" pues cambia rápidamente en el tiempo que sigue al final de la calcinación [Ridge et al.'75], así como del resto de variables de fabricación.

La del SH-a es bastante menor que la del SH-b, debido a su estado de cristalización, por ejemplo del orden de $1'8 \text{ m}^2/\text{g}$ frente a $7'2 \text{ m}^2/\text{g}$. [Ludwig, Singh'78,293]. En el caso del SH, por ejemplo, la superficie específica es mayor en el caso de provenir de la An-III que si su origen lo tiene en el DH [Lehmann et al.'71-e,322]. Afecta al requerimiento de agua [Ridge'61] así como a las fuerzas de adhesión superficial que mantienen la pegajosidad de la pasta [Beretka et al.'81]. Cuando aumenta la superficie específica, aumenta la reactividad y velocidad de disolución [Galtier et al.'83] y la sobresaturación durante el fraguado, lo que llevará a una cristalización con mayor abundancia de cristales maclados y en forma de agregados, en lugar de aciculares [Murat'77,78] resultando finalmente un yeso con estructura porosa más fina.

3.6 EL SISTEMA DE AMASADO-EJECUCION.

En esta fase tiene lugar la mezcla del polvo de yeso con el agua necesaria para su recristalización más otra cantidad de agua suplementaria que se necesita para que la pasta formada adquiera la consistencia adecuada a la trabajabilidad necesaria. Después del vertido del polvo de yeso sobre el agua, se espera unos instantes para que el polvo pueda imbibirse en el agua, procediéndose a continuación al batido de la masa, homogeneizándola y provocando una ligazón más íntima entre agua y yeso, facilitando su disolución.

Fig.3-19: Organigrama de puesta en obra de un yeso utilizado en fabricación de moldes para la industria cerámica [Lacheny'67-a].

Aunque las variables que intervienen en esta etapa se adaptan al empleo o finalidad a los que se va a destinar el yeso, también se adaptan al material con el que se vá a trabajar, puesto que, por ejemplo, la granulometría particular de cada yeso, y la forma de los granos, inherente a la estructura de la piedra original, puede hacerlo impropio para su empleo en determinados usos, como es el caso del yeso fibroso y de la selenita, poco adecuados para yesos de construcción [SNIP'82,124].

TECNICAS DE APLICACION.

Aunque las técnicas concretas de aplicación de la pasta de yeso varían con su finalidad, suelen seguir las líneas generales de un proceso en el que podemos distinguir distintas etapas [Lacheny'67]:

- Dosificación, Vertido y Espolvoreado del polvo de yeso sobre el agua.
- Reposo de imbibición.
- Mezcla y Batido de la masa, con paleta en obra o amasadora mecánica en procesos industriales.
- Reposo breve antes de su utilización para que la masa adquiera la consistencia necesaria (varía según el uso).
- Puesta en obra. Estrechamente relacionada con la aplicación, durante el "tiempo abierto".
- Curado, en condiciones ambientales controladas, o no.

Cuyo esquema de organización puede ser:

-> Dosificación -> (Reposo) -> Batido -> (Reposo) -> Aplicación -> Curado ->
 <----- Amasado ----->

De este proceso, las variables más importante que facilitan su control son la temperatura del agua y del yeso en el momento de la mezcla, la cantidad de agua de amasado o relación A/Y, la duración del amasado o diagrama temporal de etapas, la forma de hacer el batido, la adición de reguladores del fraguado u otros productos, etc. [Foucault'76,8] y que, como intervienen en diferentes momentos, vamos a ir viendo en orden cronológico.

VERTIDO. La unión de yeso y agua de amasado se hace siempre vertiendo el yeso en el agua, espolvoreándolo, y nunca al contrario, para evitar la formación de grumos que formen una capa de pasta densa en torno a polvos de yeso que quedarían sin hidratar. El espacio de tiempo que dura la incorporación o vertido del yeso en el agua se llama "tiempo de incorporación" y es una variable que interesa controlar [Lacheny'67]. Su duración afecta a la viscosidad de la pasta, así como a la resistencia final del yeso, lo que ha sido estudiado por Deleuil'77,354. Según éste investigador, debe ser rápido y progresivo, evitando que todo el polvo caiga en un solo golpe sobre el agua. Sin embargo, cuando el yeso es muy heterogéneo en su composición granulométrica, es preferible hacerlo en forma más lenta para evitar la inclusión de burbujas de aire que quedaría ocluido.

RELACION A/Y. De los factores con influencia en los comportamientos reológico y mecánico es el más estudiado, pues además de ser de todos ellos el de más fácil variación, de antiguo se sabe que es, quizás, el de mayor influencia, especialmente en lo que afecta a la porosidad del producto final, puesto que el agua que el yeso puede incorporar a su red cristalina está limitada por la cantidad de yeso utilizado en el amasado, el exceso de agua lo único que hace es incrementar, en forma aproximadamente lineal, la porosidad [Foucault'76,8].

En este momento, el tipo o calidad del agua que se utilice no es indiferente. A diferencia del agua destilada, según sean los iones del agua común se puede alterar el proceso de fraguado acelerándose o

Fig.3-20: Curvas de solubilidad de las diferentes fases del yeso [SNIP'82].

retardándose [Tcheichvili'68,66], debido a la interacción de las sales del agua con el yeso y con sus impurezas, aunque en el caso de aguas potables relativamente blandas, como es el caso de la de Madrid, esta influencia no es excesiva.

Las aplicaciones tradicionales se han realizado siempre con la receta práctica de amasar "a saturación" con el agua que naturalmente requiere cada yeso. Así con relación a este amasado a saturación se ha considerado como amasado "claro" el que se hace con más agua y "espeso" el que con menos, exagerándose los defectos con el primero de estos [Anstett'38,160], a pesar de no corresponder a una consistencia inicial constante [Venuat'70,105]. El "amasado a saturación" (A/S) es del orden de 0'6 a 0'7 para yesos de construcción y de 0'7 a 0'8 para escayolas siendo el SH-a el que requiere un mínimo de agua (0'4) debido a la forma compacta de sus cristales perfectos [Novo'58,39], puesto que el requerimiento de agua de un yeso depende de la forma y tamaño de sus granos.

En general, cuanto más superficie específica del yeso mayor será la cantidad de agua que se necesite para bañar y mojar todos sus granos. En los yesos y escayolas de construcción, la relación A/Y se sitúa entre 0'6 y 1'0 que son los límites prácticos de trabajabilidad de la pasta [Nolhier'85,71]. A su vez, la edad del yeso influye en esta cantidad de agua, disminuyendo este efecto con el tiempo y con la finura de molido [Beretka, Crook, King'81,159]. Una relación A/S más baja de lo normal puede revelar un exceso de materias inertes o impurezas, una cocción insuficiente o, por el contrario, excesiva [Anstett'38,156] y, a igualdad de condiciones de fabricación, depende de la piedra original [Schicht'80].

TEMPERATURA DE AMASADO. Esta variable se compone, en realidad, de tres sumandos, pues hay que tener en cuenta la temperatura ambiente, la del yeso y la del agua, que pueden ser todas diferentes entre sí. En líneas generales, a mayor temperatura más se alarga el fraguado [Chassevent'49] y a 40°C, que es la temperatura de inestabilidad del DH, la pasta es inestable y prácticamente no puede fraguar.

Ahora bien, el efecto de la temperatura es contradictorio, puesto que aunque altera la solubilidad de cada fase [Baouman'57,44] también aumenta la velocidad de disolución [Foucault'70,96] que, entre 10 y 30°C se incrementa con la temperatura [Liu, Nancollas'71,2316]. Para Ridge ['58], no ejerce mucha influencia en la hidratación, ni en el requerimiento de agua [Ridge, Boell'62-a,441 y '62,241], por lo que la situación puede resumirse diciendo que la disminución de la temperatura tiende a reducir la velocidad de disolución del SH así como la difusión de iones calcio y sulfato. Por contra, para numerosos yesos, la densidad de puntos favorables a la cristalización aumenta cuando la temperatura disminuye de forma que la solubilidad del SH aumenta. Por esto, el efecto de la temperatura será variable según que uno u otro de estos factores predomine [SNIP'82,112] aunque hasta los 30°C el aumento de temperatura incrementa la velocidad de hidratación [Ludwig, Singh'79,49], descendiendo después [Wirsching'85-a,575].

Desde nuestro punto de vista, la cuestión más importante es que, como la temperatura afecta a la relación A/Y a saturación [Volkart'75], cuando, en obra, se utiliza éste procedimiento para controlar la cantidad de agua de amasado, ésta circunstancia se verá, finalmente, reflejada en la resistencia mecánica del yeso, con la idea general de que a más temperatura menor resistencia, pues una temperatura baja favorece la recristalización del yeso y produce cristales mejor formados [Murat'77,76].

CALADO. En este intervalo de tiempo, en reposo, el agua y el yeso se penetran por fuerzas de absorción capilar y adsorción superficial. Es fundamental para conseguir una unión íntima y completa y, al igual que ocurre con el vertido, de no realizarse correctamente se favorece la formación de grumos [Lacheny'67].

BATIDO. Es sabido que las suspensiones de yeso en agua tienen naturaleza floculada, disponiéndose las partículas en cadenas y celdas cerradas [Ridge, Boell'62-a] [Ridge'61,292], teniendo el grado de floculación gran influencia en las propiedades reológicas de la pasta. Este grado de floculación, íntimamente determinado por las mismas características que procuran la adhesión intergranular, depende de las condiciones de batido de la pasta [Ridge, Boell'62]. Para la cuantificación del batido se recurre frecuentemente a la "energía de agitación", producto de la velocidad de agitación por el tiempo, que varía con el tipo de agitador. Su incremento reduce el tiempo de trabajabilidad, acelerando el fraguado, y amplifica el efecto del reciclado [Foucault'76,8] y [Deleuil'77,351], lo que se traduce en la existencia de un óptimo.

En relación con el tipo de batido, dentro de los mecánicos, la hélice más efectiva es la del tipo turbina [Lacheny'67]. El efecto del batido sobre la granulometría es la rotura de las partículas más grandes, por lo que su tamaño depende del tiempo y de la energía de batido [Lane y Summerfield'75,292]. Con el batido de la pasta se produce la rotura de sus enlaces cohesivos, lo que se llama "desagregación tixotrópica", efecto que es mucho más marcado cuanto mayor es la velocidad de batido [Cauvin, Papo'83,319].

Por otro lado, la agitación de la pasta de yeso acelera el fraguado puesto que rompe los primeros cristales de DH recién formado, causando la formación de nuevos gérmenes de cristalización, mientras que al hacer el amasado más homogéneo se reduce el "diámetro crítico" de los gérmenes que así tienen mayor facilidad para cristalizar sin disolverse [Moisset, Brujas'85]. Este diámetro crítico es tal que permite que un germen de yeso no desaparezca cuando existen perturbaciones locales de saturación, de forma que, cuanto mayor es el volumen del cristal, menor es su solubilidad, puesto que las fuerzas de enlace internas son menores, y es función del volumen de la molécula, de la energía interfacial, de la temperatura, de la concentración real y de la concentración de saturación.

Las resistencias mecánicas aumentan con el correcto batido de la mezcla, puesto que aunque la porosidad total no varía, al estar prácticamente determinada por la relación A/Y, pues el batido multiplica los gérmenes de cristalización, y provoca una estructura final formada por cristales de menor tamaño y más uniformes [Bardin'82,107].

Como el mecanismo de control de la velocidad de disolución del yeso en el agua es por difusión superficial, el batido incrementará esta velocidad [Liu, Nancollas'71,2315] y [Murat'77,70]. Sin embargo, un exceso de agitación puede alterar tanto el fraguado del yeso que lo perjudique [Ludwig, Singh'78,295].

La ausencia de batido decrementa la velocidad de disolución y apenas afecta a la tasa de precipitación. Aumentando el batido se aumenta la precipitación, pero no la velocidad de disolución [Taplin'65,866].

Así pues, resumiendo, el batido homogeniza la pasta y facilita la formación de cristales más pequeños, y por lo tanto más numerosos, lo que, finalmente, se verá reflejado en una mejora de las resistencias mecánicas.

Como consecuencia del aumento de núcleos de cristalización también la duración del fraguado se verá acortada. Sin embargo, si la duración del batido es excesiva, se produce un "rebatido de la pasta" cuando ya el crecimiento cristalino tiene cierta entidad, cuyo efecto es romper los enlaces entre cristales, disminuyendo notablemente la resistencia mecánica y causando importantes retracciones. La duración del tiempo óptimo de batido depende de la velocidad y del tipo de agitación.

Fig. 3-21: Influencia de la velocidad de agitación y de la relación A/V en las características reológicas y mecánicas en tres diferentes yesos (A, B y C) [Lacheny'67-b].

PUESTA EN OBRA. El yeso se ha utilizado y aún se utiliza en multitud de aplicaciones [Conill'25,84], aunque con el avance de los tiempos y la salida al mercado de productos cada vez más específicos, a la vez que se va adaptando mejor el yeso a sus empleos más característicos, se va reduciendo el número de estos posibles empleos [Zantedeschi'67] [Colussi, Longo'73] [Wirsching'85-a,578]. La técnica de aplicación se decide en función del elemento constructivo. En general puede ser:

- Agregado, como pasta de agarre en fábricas de ladrillo y recibido de elementos constructivos (vg. cercos de carpintería).
- Vertido, en pavimentos y placas de cartón-yeso.
- Colado o Moldeado, en paneles y placas de prefabricados.
- Tendido, en guarnecidos, enlucidos y pegado de plaquetas.
- Proyectado, en revocos realizados con esta técnica, específicamente los mecanizados.

Fig.3-22: Evolución esquemática del fraguado del yeso y de las sucesivas fases de trabajo de un "yesaire" (los tiempos son aproximados y se refieren a un enlucido manual tradicional) [ENIP'82].

Al ser la técnica de puesta en obra un aspecto específico del destino del material, únicamente cabría, para cada caso concreto, la comparación de diferentes alternativas para estudiar sus posibles repercusiones, no siendo posible establecer unas líneas generales que sean comunes a las diferentes técnicas de puesta en obra. Únicamente, cuando en su momento describamos la técnicas seguidas en la parte experimental, las especificaremos detalladamente explicando el sentido de las operaciones seguidas.

COMPACTACION Y VIBRADO. Empleado, como es natural, en los yesos vertidos y colados, industrialmente se suele hacer, básicamente, por percusión, vibración o por compresión, con mejores resultados los primeros de ellos pues van acompañados de un fenómeno de licuefacción, especialmente el segundo, además de requerir menos energía. A cada dosificación (A/Y) corresponde un óptimo de compactación. Igual que sucede con el batido, este óptimo depende de las condiciones reológicas de la pasta. En el caso de compactación por compresión no parece que se produzca el óptimo, mientras que el aumento de resistencia es más ostensible cuanto mejor es la calidad del yeso y menor su relación A/Y [Accetta, Pettang, Jacquet'85,55].

El efecto fundamental es la eliminación del aire ocluido en la pasta, a la vez que facilita su extensión y el correcto relleno del molde. En el caso de pastas muy fluidas puede producir una decantación de la misma y alterar los tiempos de fraguado [Fischer'53,45-7], reduciéndose al aumentar el vibrado, pues también aumenta la gelación (formación del gel), a la vez que permite la utilización de relaciones A/Y más bajas y el desmoldeo

inmediato [Rousseau'85,42-5] [Saltier, Soustelle, Guilhot'83] y [Brouard'85].

Sin embargo, el efecto de la compactación depende del momento en el cual se efectúe, es decir de las condiciones reológicas de la pasta de yeso, resultando claro que no conviene hacerlo ni muy al principio ni muy al final del periodo plástico de la masa. Nos volvemos a encontrar, entonces, con un instante y duración óptimos para cada técnica de compactación, dependiendo de las condiciones de la pasta.

DECANTACION Y REBATIDO. La decantación puede producirse en amasados claros, debidos a la prevalencia de las fuerzas gravitatorias sobre los granos gruesos, por lo que, además de ser dependiente de la cantidad de agua usada en el amasado, depende de la granulometría. Para evitarla, a veces se comete la falta de proceder a un nuevo batido de la masa cuando ésta ya ha comenzado su fraguado ("rebatido"), que suele provocar visibles fisuraciones por retracción de la pasta [Nolhier'85,84], a la vez que disminuye la resistencia, pues se destruye la red cristalina y su cohesión, impidiéndose la recristalización y endurecimiento de la pasta [Lacheny'63,222] y [Landrieu'63,222].

CURADO Y SECADO. Refiriéndonos ahora al conjunto de condiciones en las que se mantiene al yeso durante su secado posterior al endurecimiento y fraguado, vemos que la temperatura a la que se realiza el curado influye en la estructura cristalina pues, afectando a los fenómenos de recristalización que se producen en esta etapa, puede cambiar el hábito cristalino de los granos formados una vez que el yeso ha terminado su fraguado [Ridge'58 y '59].

El secado artificial en estufa aumenta la expansión de fraguado, mientras que el secado al aire aumenta la retracción [Mariotti'85,214].

El efecto de la humedad, tal vez, sea el más importante, especialmente durante el primer mes que sigue al amasado del yeso. Debe ser lento y a $t < 40^{\circ}\text{C}$ [Lacheny'67 y '71,833]. Chassevent ya puso de manifiesto, hace tiempo, que el curado del yeso en inmersión incrementaba notablemente la expansión de fraguado, lo que no ocurre cuando la humedad está presente en forma de vapor [Kuhlmann, Ludwig'76 y '77,386]. En efecto, la presencia de una capa de agua en la superficie de la pasta en curso de hidratación, producida por el asentamiento de la masa fluida, incrementa su dilatación al impedir la entrada de aire succionado por la retracción que supone el cambio de volumen absoluto en el paso DH->SH [Chassevent'49,219]. En estufa también aumenta la expansión de fraguado, mientras que no hay retracción posterior. Por el contrario, un secado incompleto al aire aumenta la retracción, incremento que es mayor cuanto menor haya sido la coacción del yeso [Mariotti'85,214].

Conservadas las probetas en húmedo, van perdiendo resistencia durante un mes, estabilizándose después independientemente del tiempo, siempre que después se sequen [Lambert'76:Yeso(23)]

El curado puede ser natural, al ambiente exterior, o artificial, en condiciones controladas y, normalmente, aceleradoras del proceso de secado. En ambos casos, para condiciones atmosféricas demasiado secas ($< 20\%$ HR) o demasiado húmedas ($> 90\%$ HR) las repercusiones son perjudiciales. Por el contrario, en atmósferas entre el 50-70% HR la resistencia se dobla entre 2h-1d y se cuadruplica entre los 2-7 días [Bardin'82,107].

La duración del período de curado depende de la composición de fases del yeso, pues, por ejemplo, un SH se estabiliza en pocas horas, mientras que un yeso de construcción, que contiene anhidrita, se estabiliza, en función de la cantidad de esta última, entre 7 y 30 días [Bardin'82,107].

Como vemos, el resultado del curado depende de la temperatura, higrometría y ventilación con las que se realice, influyendo, mientras el yeso no está seco, en las variaciones dimensionales y en la textura cristalina del yeso. Mientras el agua residual es superior al 5% las resistencias mecánicas son muy débiles y prácticamente constantes. Durante el secado se produce una ligera retracción del yeso, posterior a la dilatación inicial, como ocurre en la práctica totalidad de los materiales de construcción que sufren una dilatación por entumecimiento.

3.7 HIDRATACION Y FRAGUADO DEL YESO.

El estudio del comportamiento del yeso durante la etapa en la que, mezclado con el agua, recupera su estructura original de doble hidrato, es importante al ser en estos momentos en los que el yeso rehace el entramado estructural, lo que le va a permitir resistir fuerzas de carácter mecánico y, en definitiva, prepararse para su misión final en la edificación. Si recordamos lo visto en el capítulo 2º, cuando hablamos de los modelos de caja negra frente a los de caja transparente, podemos observar el conjunto de fenómenos que ahora se producen desde dos ópticas ligeramente diferentes. Con una visión externa del comportamiento de la pasta de yeso nos ocuparemos de sus aspectos fenomenológicos, mientras que intentando comprender los cambios físico-químicos que se producen estudiaremos los mecanismos que aparecen implicados en la hidratación del yeso.

FENOMENOLOGIA DEL FRAGUADO.

Los mas importantes aspectos son aquéllos que se refieren a la reología de la pasta, la reactividad del yeso (puesta de manifiesto a través del calor de hidratación), la expansión de fraguado y la posterior retracción y, en líneas generales, el secado del yeso una vez rehidratado.

REOLOGIA DE LA PASTA. Las cuestiones más interesantes son aquellas que hacen referencia, directa o indirecta, a las condiciones de trabajabilidad de la masa plástica de yeso-agua, siendo ésta una de las facetas que más condicionan el uso de un determinado yeso en obra y, en definitiva, deciden frecuentemente la aptitud del yeso para el empleo previsto. En este sentido es importante subrayar la interacción que se produce entre material y operario, pues éste es quien, en virtud del comportamiento reológico del yeso que tiene entre manos, lo adapta a sus necesidades, especialmente a través de la cantidad de agua de amasado y de las condiciones de batido.

El yeso necesita una cantidad de agua para fraguar, la estequiométrica, que es bastante menor de la que en realidad se utiliza, siendo el agua en exceso necesaria para poder amasar y, en su caso, verter y colar la pasta, de donde se deduce que es precisamente la aplicación del yeso la que más condiciona los requerimientos de comportamiento reológico por parte del usuario.

Son muy numerosos los factores de los que depende la reología de las pastas y van desde las propiedades inherentes a la materia prima original

(aljez) hasta las condiciones ambientales, como el estado de envejecimiento del yeso y la humedad del ambiente [Kuntze'67], siendo habitual referir las condiciones reológicas a la consistencia que, aunque es una propiedad no muy bien definida, se puede concebir como oposición a la deformación de la pasta bajo su propio peso, y está relacionada con la fluidez, viscosidad y deformabilidad. Su medición se hace de forma convencional adaptada a métodos de ensayo específicos. El comportamiento reológico de una pasta se controla mediante su consistencia o su resistencia a esfuerzo cortante, estudiando la evolución de estos parámetros a lo largo de la duración de su estado plástico mediante "reogramas" [Caufin, Papo'83].

Fig.3-23: Comportamiento reológico típico de una pasta de yeso, mostrando la evolución de la resistencia a cortante [Caufin, Lapasin, Papo'85].

El sistema de fabricación influye decisivamente en este comportamiento, tanto en sus líneas generales como en los aspectos más específicos. Por ejemplo, el SH fabricado en autoclave, del tipo alpha, requiere menos cantidad de agua [Coombe, Smith'71,284] para igual consistencia, lo que se traducirá posteriormente en mayores resistencias mecánicas, y más específicamente se ha comprobado que la agitación de la masa de yeso durante la calcinación acelera el fraguado [Ridge y Surkevicius'61,427] pues, indudablemente, este proceso altera la forma física de los granos y la composición final del yeso.

Por ello, los aspectos granulométricos tal vez sean los que más afectan, en especial, a los requerimientos de agua de un yeso para una determinada consistencia. Desde hace siglos se dice que el molido no debe ser demasiado perfecto, porque cuando esto ocurre, el yeso pierde sus propiedades plásticas [Granda'04,313]. Más recientemente se ha estudiado la influencia del proceso de triturado [Lelong'77] [Deleuil'77,366]. Uno de los efectos del molido posterior a la calcinación es la liberación del DH residual que ha permanecido crudo en el interior de los granos gruesos, afectando al fraguado [López Blázquez'76,135], sin embargo los aspectos ligados a la forma de los granos son los de mayor importancia, pues es necesario que su superficie quede bien mojada en agua para garantizar su lubricación y fácil deslizamiento de unos granos sobre otros, de tal forma que se consiga el comportamiento reológico deseado. Igualmente, la influencia de la granulometría en la velocidad de disolución es primordial [Galtier, S.G'83].

Sin embargo, el sentido de la acción de la granulometría a veces permanece discutido. La molturación reduce el requerimiento de agua en yesos calcinados estáticamente, que son más propicios a la adhesión intergranular, pero tiene un papel ambiguo, pues puede hacer disminuir o aumentar la consistencia dependiendo del tamaño y forma de los granos. En

cualquier caso parece que hay unos tamaños óptimos por lo que al final siempre se recomienda no moler demasiado [Ridge'61] y [Ridge y Boell'62,440...].

Por otro lado, la reología de las pastas resulta muy influenciada por el proceso de envejecimiento, a su vez dependiente de la granulometría, pues a yesos más finos se necesita más agua, y la curva granulométrica depende del origen del aljez, la composición del yeso y el empobrecimiento o enriquecimiento de finos derivado del proceso industrial [Lelong'77] alterando su consistencia y los tiempos de fraguado [Kuntze'67]. Especialmente sensibles a este problema son los yesos calcinados en marmitas, por lo que se procura que el proceso de almacenado sea inferior a 6 meses. Al pasar parte del SH a DH, se acelera el fraguado, aunque si el envejecimiento es excesivo, al haber mucho DH, el fraguado se retarda e incluso puede no tener lugar. Uno de los efectos más claros del envejecimiento es la variación de la relación A/Y a saturación [Papadakis, Venuat'70,240].

REACTIVIDAD. CALOR DE HIDRATACION. Siendo la reacción de hidratación de carácter exotérmico, la reactividad de un yeso se puede medir mediante el calor desprendido durante su fraguado y, gracias a técnicas calorimétricas, estudiar su evolución en función del tiempo. La reactividad está directamente correlacionada con la velocidad de hidratación, tanto en términos absolutos como relativos, pues es su manifestación externa. Así, todos los parámetros que tengan su papel en la reacción de hidratación se manifestarán en la reactividad de los yesos. Entre éstos los más importantes son la superficie específica (la hidratación implica mecanismos de carácter superficial) que depende de los procesos de fabricación, y los que implican a la concentración de SH en el agua (A/Y, composición, batido, etc...). La reactividad es diferente para cada fase del yeso y, por tanto, para sus distintas mezclas. En resumen, la reactividad depende directamente de la cantidad de superficie de SH dispuesto a hidratarse en cada momento, por lo que cualquier factor que influya sobre la cantidad de SH y sobre su superficie específica tendrá su manifestación, vía exotérmica, en la reactividad.

Fig.3-24: Curva típica de elevación de temperatura durante el fraguado de un yeso (SNIP'82).

EXPANSION DE FRAGUADO. Aunque en el caso de yesos muy reactivos no se puede olvidar la dilatación térmica que produce el calor de hidratación, su componente principal es el crecimiento de los cristales de DH por una doble vía. Por un lado, el SH aumenta de volumen al hidratarse pues tiene que

incorporar el agua a su estructura y, por otro, los cristales de DH en formación van creciendo mediante la incorporación acoplada de nuevas moléculas, desplazando a los cristales presentes en sus proximidades. Puede medirse en términos absolutos, al final del fraguado, o mejor en función del tiempo. Depende, pues, tanto de los factores que controlan el crecimiento cristalino como de los que controlan la reactividad del yeso. Así, aunque reactividad y expansión de fraguado corren parejos, esta última queda también condicionada por los hábitos cristalinos [Lea, Nurse'49,350] siendo mayor cuanto más aciculares crezcan los cristales.

La composición de fases es fundamental pues, por ejemplo, el DH, además de actuar como acelerador, aumenta la expansión de fraguado [Bacuman'57,50]. A mayor temperatura de calcinación, y mayor contenido de An-II, y mayor expansión de fraguado [Chassevent'49,271]. Las impurezas, de cara a la expansión por fraguado, actúan como material inerte, y puede disminuirla [Ludwig y Singh'79] tanto porque proporcionan una especie de "colchón" para el crecimiento cristalino como por el efecto de disminuir la densidad (número de cristales por cc. de pasta) de cristales en crecimiento. Los yesos gruesos presentan una mayor dilatación que los finos [Mariotti'85,216] y [Lelong'77].

Fig. 3-25: Cambios de volumen durante el fraguado de diferentes yesos con diferentes mezclas de SH y An-II [Kuhlmann, Ludwig'77].

Las condiciones ambientales de humedad y temperatura influyen mucho en la expansión. El curado en húmedo la disminuye [Kuhlmann, Ludwig'76] mientras que la conservación bajo una capa de agua saturada, debida al asentamiento de la más plástica (exhudación de agua), la incrementa, pues se impide la entrada de aire succionada por la expansión que supone el paso de SH a DH [Chassevent'49,219]. El secado en estufa aumenta la expansión, mientras que un secado incompleto al aire aumenta la retracción, más cuanto menor sea la cocción [Mariotti'85,214] [Kuhlmann y Ludwig'77,386].

RETRACCION. Puesto que el volumen molecular del DH es menor que la suma de los volúmenes del SH más el agua que incorpora, al inicio del fraguado se produce una ligera retracción, a la que hay que sumar el efecto de penetración intersticial del agua en los granos de SH, pero que es en seguida anulada por la expansión de fraguado. La retracción que más interesa considerar es la que se produce al final del fraguado, cuando el yeso ya se ha rehidratado y que es debida a tres componentes:

- Abandono del agua excedente que produce un efecto contrario al de la tumefacción por tensión capilar. La retracción por esta causa es tanto más

importante cuanto más rápido sea el secado [Bardin'82,108] y depende de la estructura capilar recién formada, puesto que cuanto menor sea el tamaño de los capilares, mayores serán las fuerzas de retracción [Ossa et al.'84] [Gorchakov'81,34]. Por otro lado, si el yeso se ha "rebatido" durante su fraguado, el secado de la masa no coherente que se ha desagregado por esta operación produce una retracción muy importante que fisura al material como si fuera inerte [Chassevent'49,190].

- Disminución de su temperatura equilibrándose con la ambiental, es decir una retracción de origen térmico debido al calor de hidratación.

- Reacción endotérmica que se produce al final del fraguado, y que se suma a la anterior.

En condiciones normales, la suma de estos tres efectos no suele llegar a la décima parte de la expansión de fraguado [SNIP'82,112].

SECADO. Depende de la temperatura, higrometría y ventilación, influyendo en las resistencias mecánicas (mientras el yeso no haya quedado totalmente seco), en las variaciones dimensionales y en la textura del material [Lambert'76].

El secado de los elementos de yeso se hace mediante la cesión del agua libre al medio ambiente, desde el exterior hacia el interior de forma que el aire seco va penetrando en el cuerpo húmedo a la vez que las moléculas de agua van dejando sitio al pasar al aire ambiente en forma de vapor. El aire, pues, entra al cuerpo húmedo por la misma cara por la que sale el agua, secando las zonas exteriores del cuerpo antes que las interiores. La cara exterior, sometida a un constante flujo de agua en forma de vapor y aire que entra en su sustitución mantiene, durante todo el proceso de secado, una humedad de equilibrio constante, aunque es posible que el flujo de humedad produzca fenómenos de recristalización que, a largo plazo, produzcan algún efecto sobre el yeso. Los primeros poros en evacuarse son los poros gruesos, avanzando el proceso de secado desde los poros gruesos hasta hacia los más finos, siendo la velocidad de secado función de la tensión interfacial solución-aire [Chatterji, Jeffery'64, 1947]. La velocidad de secado en pérdida de peso por minuto es inversamente proporcional a la humedad relativa y, dentro de ciertos límites, no parece tener influencia sobre las resistencias mecánicas de los elementos secos [Lambert'76]. En los capilares, al evaporarse el agua que estaba saturada de yeso, se produce una recristalización que en sucesivas etapas va haciendo más finos los canales porosos, compactándose la superficie, disminuyendo el número de poros y aumentando de superficie [Szymanski'79].

MECANISMO DE LA HIDRATACION.

La hidratación configura la etapa más química del fraguado [Schicht'80] y se pueden distinguir algunas fases diferentes en la misma, si bien ésta es una de las cuestiones más debatidas por los investigadores, habiéndose propuesto dos teorías diferentes, basada la primera en mecanismos de cristalización y la segunda en modelos coloidales. Como sea que es la primera la de más amplia aceptación, a ella nos referiremos, distinguiendo 4 etapas que se denominan como disolución, período de inducción o nucleación, precipitación y crecimiento cristalino y, finalmente, endurecimiento y recristalización.

DISOLUCION. La disolución del SH en agua es condición necesaria para su hidratación pues aunque se ha observado que bajo ciertas condiciones se puede desarrollar topotácticamente [Triollier, Guilhot'76] no parece ser

esta la forma normal de hidratación del yeso de construcción. Las tasas de solubilidad de las diferentes fases del yeso (tabla 3.V) están influidas por la presencia de impurezas, adiciones y aditivos, así como por la granulometría [Foucault'76,8] [Galtier, Soustelle y Guilhot'93] y las condiciones del amasado, como temperatura, cantidad de agua, y batido. La velocidad de disolución, controlada por un mecanismo de difusión superficial [Liu, Nancollas'71,2315], obedece a una función lineal de la sobresaturación y de la energía de batido, pudiendo llegar a ser 50 veces mayor que la velocidad de cristalización [Murat'77,70], y cuanto más rápida sea menor serán los tiempos de fraguado.

En una solución, los iones del cuerpo disuelto están disociados. Como la molécula de agua es eléctricamente asimétrica, forma un dipolo que es atraído alrededor del ión del soluto, quedando éste rodeado por moléculas de agua orientadas radialmente según su carga eléctrica. Esto es lo que se llama "hidratación iónica" de una solución. Es un proceso en dos etapas, en el que la primera es la separación de iones, que implica una energía o entalpía reticular, y en la segunda las moléculas de agua giran rodeando a los iones, implicando una entalpía de hidratación negativa [Moore et al.'79,254]. En esta etapa, que dura pocos minutos, el agua empapa al SH y lo disuelve hasta la saturación. La ausencia de batido decrementa la velocidad de disolución y apenas afecta a la tasa de precipitación [Taplin'65,966]. En esta fase se configura un sistema iónico saturado con relación a la An y al SH y sobresaturado con relación al DH, y se forman unos "hidratos primarios" inestables pero adecuados a la disolución del SH.

El SH- α es más capaz de hidratarse sin disolución, mientras que el SH- β se disuelve y suele cristalizar con forma acicular muy fina. La primera variedad tiene una hidratación intersticial y el agua puede penetrar entre las capas de la red cristalina sin destruirla [Lacheny'67,29]. Esta reacción sólido-líquido y la penetración en la red cristalina de iones hidrógeno o hidroxílicos a sido estudiada por Hansen [1963,360], quien ha demostrado su viabilidad.

Al disolverse el SH se produce una solución sobresaturada con respecto al DH que, siendo metaestable, comienza a precipitar, bien formando núcleos de cristalización mediante "hidratos primarios" mal formados e inestables, o bien acoplándose a los cristales en crecimiento, siendo la velocidad de precipitación función del cuadrado de la sobresaturación [Murat'77,69] [Kagawa et al.'81], pudiéndose definir como cociente entre la concentración en la solución y la concentración de equilibrio [Sarig, Mullin'82,526].

PERIODO DE INDUCCION Y NUCLEACION. En este estado se estabilizan los hidratos primarios, apareciendo verdaderos hidratos (DH) que se constituyen en gérmenes de cristalización antes de que el fraguado, propiamente dicho, haya comenzado [SNIP'82,111]. La agitación de la pasta de yeso, acelera el fraguado, pues se parten los cristales frescos de DH, formándose gérmenes suplementarios y disminuyendo el diámetro crítico de los gérmenes que, así, tienen más facilidad de pasar a cristales sin disolverse por completo [Moisset. Brujas'95]. El hecho de que varíe el tiempo de fraguado con la agitación nos permite pensar que el mecanismo de fraguado se rige, en esta fase, por procesos superficiales. [Murat'77,70].

Una vez que la solución sobresaturada de SH empieza a precipitar en DH, se continúa la formación y el crecimiento de núcleos de cristalización de forma autocatalítica, lo que origina un gran aumento de los cristales de DH, siendo en este momento muy importante el papel de las dislocaciones de los cristales de SH [Pinault'72,347] [Trioller y Guilhot'76,5].

Como el inicio del fraguado es originado por la preexistencia de cristales de DH que actúan como gérmenes de cristalización, tanto el periodo de inducción, como las etapas siguientes de crecimiento cristalino son función de la tasa de sobresaturación, o concentración del DH en agua, que aumenta al hacerlo la cantidad de DH o disminuir la de agua. Un amasado claro, o un SH muy puro, tendrán un principio de fraguado retardado debido a la escasa presencia inicial de cristales de DH.

PRECIPITACION Y CRECIMIENTO CRISTALINO. Este fenómeno se produce alrededor de los gérmenes o núcleos de cristalización anteriormente formados. Paulatinamente, van disminuyendo las cantidades de fases anhidras aprovechables y la velocidad de hidratación. Esta etapa es la que más influye en las características finales del producto [Nolhier'85,94] y en ella se van acoplando, sucesivamente, nuevas moléculas de DH a los núcleos primitivos, interpenetrándose y maclándose entre sí, lo que da lugar al inicio del mecanismo resistente del yeso.

En estos momentos es vital el reposo de la pasta pues cualquier acción que la mueva o reamase, deshace el incipiente entramado estructural que, posteriormente, no crece con igual intensidad. Asimismo todos los factores que afectan al crecimiento cristalino, y a su hábitos, en estos momentos, tendrán su repercusión en la resistencia mecánica del yeso rehidratado.

ENDURECIMIENTO Y RECRISTALIZACION. Finalmente, el rehidrato completa su estructura cristalina gracias a la posterior hidratación de las anhidritas y a fenómenos de recristalización que acontecen mientras el yeso permanece húmedo. Estos cristales, mucho más pequeños ya que los formados por el SH, terminan por apuntalar y acodalar a los primeros, consiguiendo su resistencia final.

HIDRATACION RETARDADA DE LA ANHIDRITA.

Si el curado facilita un secado excesivamente rápido del yeso recién amasado, es posible que no consiga su hidratación completa, especialmente si el yeso tiene un alto contenido en anhidrita, como puede ocurrir en los yesos de construcción (YG). Esta situación puede ser origen, posteriormente, de fenómenos de hidratación retardada que en lugar de ayudara a sujetar un entramado estructural en formación y crecimiento, causen su debilitamiento y ruina por expansiones internas.

Son varios los factores que afectan a éste fenómeno, especialmente la combinación de fases del yeso con las condiciones de curado, y la humedad ambiente [Wagner, Winkler'85], aunque la anhidrita parece que necesita pasar por la fase de solución para hidratarse [Tcheichvili'69].

MODELOS CINETICOS.

Los mecanismos implicados en la reacción de hidratación, al igual que los de la deshidratación, han sido objeto de numerosos estudios destinados a establecer los modelos cinéticos que gobiernan éstas reacciones. No es objeto de nuestro trabajo, pero en la bibliografía damos las referencias de los más importantes de éstos trabajos, entre los que destacan los de Beretka, Cournil, Guilhot, Karmazsin, King, Kronert, Murat, Ridge, Schiller, Trioller, etc.

3.8 EL YESO REHIDRATADO.

El estado de la materia, a la luz de los conocimientos actuales, queda determinado por sus características físicas y químicas. Desde nuestro punto de vista, las características químicas están directamente determinadas por la materia prima original, puesto que el papel de las adiciones y aditivos no son contemplados, y la única característica química que pueda variar de uno a otro yeso producido por una misma materia prima, una vez que el fraguado ha terminado, es la cantidad de DH formada, lo que se puede cuantificar en función de la "tasa de Hidratación" o relación entre el SH - An (hidratable) originales y el DH finalmente resultante. Un buen amasado que evite la formación de grumos, y un curado correcto que garantice la humedad necesaria, son suficientes para asegurar, prácticamente, la completa hidratación de un yeso, por lo que la composición química de los yesos derivados de un mismo origen depende más de la materia prima original que de las circunstancias particulares de cada yeso. Por el contrario, la estructura física, especialmente en lo que atañe a la porosidad y a la estructura cristalina, es el aspecto en el que los diferentes yesos rehidratados ofrecen mayor variación, dependiendo ésta de las condiciones particulares de fabricación de cada yeso.

Fig.3-26: Componentes estructurales del rehidrato. Las diferentes formas de los cristales de DH responden a las diferentes condiciones en las que se produzca el fraguado [Kuhlmann, Ludwig '77].

COMPOSICION QUIMICA.

Decidida, en líneas generales, por la composición química de la materia prima la de un yeso rehidratado, es interesante comprobar el papel que puedan jugar, especialmente, las impurezas o compuestos químicos diferentes al yeso pero que pudieran estar presentes.

IMPUREZAS. Gran parte de lo tratado anteriormente es de consideración en este momento. Recordando los posibles niveles en los que podemos encontrar las impurezas, vemos que, desde un punto de vista molecular, éstas pueden ser de "sustitución", si se colocan átomos ajenos o iones de impureza en los nudos de la red cristalina del DH reemplazando a la materia básica, o de "inserción", colocados en los intersticios de esta red [Gorchakov '81, 46] y [Hugo, Guilhot '82]. En definitiva, el papel de las

impurezas, fundamentalmente, es alterar la estructura cristalina del DH, causando tres tipos de fenómenos:

- Defectos cristalinos. Típicamente, se clasifican como:
  - Relativos a la extensión del cristal, caras y bordes de grano.
  - Relativos a la composición, Sustitución, Vacancia, inclusiones intersticiales.
  - Relativos a la integridad estructural, dislocaciones, mosaicos, poligonización.
  - Relativos a la dinámica atómica, vibraciones térmicas, fonón. [Amorós'75,287].

El papel de los defectos cristalinos únicamente está estudiado en líneas generales, pudiendo afirmarse que su presencia favorece la deformación del cristal, a costa de su pérdida de resistencia.

- Formación de sales combinadas. Es un fenómeno típico cuando las impurezas incorporan compuestos químicos isomórficos con el sulfato cálcico, como es el caso del $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, impureza típica del fosfoyeso. También el fosfato monosódico, NaH_2PO_4 , se puede incorporar a la red del yeso, así como otras que, en realidad, son más características de los yesos químicos que de los naturales que nosotros estamos considerando. En la naturaleza son relativamente frecuentes las sales dobles y triples, tales como las del tipo singenita ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), glauberita ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$) y polihalita ($2\text{CaSO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que también se presenta en depósitos de sal común, aunque su presencia en el rehidrato no se ha investigado sistemáticamente y se desconocen las posibilidades de su presencia específica. Finalmente, la ettringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) es una sal muy estudiada en la química del cemento, y puede formarse por contaminación del yeso durante su amasado, o en revestimientos húmedos sobre soportes con cemento, y suele ir acompañada de thaumasita y singenita. Estas sales aparecen, a veces, en los enlucidos de yeso cuando al otro lado del tabique se ha colocado un alicatado sujeto con mortero de cemento y, por la impermeabilidad del alicatado y la permeabilidad y absorción que proporciona la cara del tabique ya guarnecida, el secado se hace por esta cara, produciéndose una emigración del agua que arrastra sales del cemento hacia la cara revestida con yeso, lo que provoca la cristalización de estas sales que, en forma de eflorescencias, aparecen en el enlucido incluso una vez pintado.

- Sin embargo el efecto que, desde un punto de vista mecánico más nos interesa, es la alteración de la forma y de los hábitos cristalinos. Como sabemos, el DH cristaliza en el sistema monoclinico, lo que no implica, necesariamente, una forma externa fija para los cristales de yeso, como se comprueba en los yesos naturales. De igual modo, los cristales de DH que se forman en un proceso de fraguado pueden variar desde la forma compacta que forma un agregado hasta la acicular, pasando por formas tabulares. En realidad, los tres tipos de cristales suelen estar presentes, como muestra la observación microscópica (óptica y MEB) aunque siempre es una la que predomina. En el caso de yesos no aditivados, lo normal es encontrar cristales aciculares entremezclados en forma que puede recordar un enjambre de alfileres metidos al azar en una caja.

Además de los defectos de nivel cristalino debidos a las impurezas, no podemos dejar de considerar el efecto de otro tipo de impurezas, así consideradas desde un punto de vista químico, pero con independencia física de los cristales de DH y que no tienen un efecto importante en la estructura cristalina del yeso puesto que, en realidad, actúan como agregados, en forma similar a los áridos de un mortero, siendo su presencia ventajosa en algunos casos, pues influyen en los aspectos reológicos de la

pasta. Su papel fundamental, pues no interactúan químicamente con el yeso en forma notable, se centra en la caracterización de la trabajabilidad de la pasta de yeso y en la formación de gérmenes de cristalización en la fase inicial del fraguado. Desde este punto de vista podemos considerar la mayor parte de las impurezas naturales del yeso (arcilla, caliza, dolomita, sílice y marga) así como el DH crudo presente en el yeso antes de amasar.

Fig.3-27: Cristales de rehidrato producidos con diferentes grados de sobresaturación, con 7 g/l (1) y 4 g/l (2). Nótese la abundancia de macias en el primer caso [Murat'77].

La presencia de DH usado como acelerador, también altera la respuesta del rehidrato frente a la humedad, incrementando la absorción de agua del yeso fraguado, pues modifica su estructura cristalina [Holdridge'65,219].

EL AGUA DEL REHIDRATO. Es importante considerar la presencia del agua en el rehidrato que puede estar de diferentes maneras. Por un lado tenemos el agua estequiométrica, químicamente combinada con el sulfato cálcico y formando parte de su estructura cristalina, y por otra el agua libre,

aunque hay una parte importante de agua que, como en el caso de las zeolitas, está presente en una forma intermedia entre el agua de constitución y el agua libre. A su vez, el agua libre puede estar en forma líquida o en forma de vapor.

En el material colocado en obra, y puesto en uso, salvo problemas patológicos, lo habitual es que el yeso disponga de una cierta humedad en forma de vapor que siempre va buscando el equilibrio con el medio ambiente, siendo el intercambio de humedad constante y función de las condiciones relativas entre rehidrato y ambiente.

PAPEL DE LA HUMEDAD.

La humedad en el yeso es, como se dice desde hace tiempo, su auténtico cáncer, pues hace caer rápidamente las resistencias mecánicas y la dureza, incluso con contenidos de humedad relativamente bajos. Más allá de un contenido de humedad del 5%, la resistencia del material es la misma que cuando está completamente saturado, aunque la humedad en forma de vapor, que varía higroscópicamente, no llega al 5% [Nolhier'85,74,84] y [Engelke'79], sino que la contenida por el yeso en contacto y equilibrio con el medio ambiente es del orden del 1-2% en condiciones rigurosas [Daligand,Murat'77,416] aunque normalmente se sitúa entre el 0'6-0'8% [Danten et al.'84,303]. Esta humedad de equilibrio depende de la relación A/Y utilizada para amasar [Nolhier'85,77 de Russell'60] y, naturalmente, de las condiciones ambientales de humedad y temperatura [Wirsching'85-a,579].

ESTRUCTURA CRISTALINA.

El rehidrato se presenta en forma de cristales, generalmente bien definidos, en agujas más o menos alargadas y en maclas (Fig.3-26 y 27), caracterizándose por una porosidad importante debida a la evaporación del agua excedentaria utilizada necesariamente para el amasado [GNIP'82,85]. La estructura del sulfato cálcico consiste en cadenas en las que se alterna los iones de Ca^{2+} con tetraedros de SO_4^{2-} , permaneciendo la mayor parte de estas cadenas intactas durante los diferentes cambios de fase [Wirsching'85-a,559]. En el DH, el agua de cristalización es embebida entre las redes de sulfato cálcico, formando unas retículas laminares que permiten la exfoliación por planos cuando el yeso está perfectamente cristalizado en forma continua (selenita). Esta misma configuración facilita, como ya hemos visto, la deshidratación del yeso y la absorción de agua en forma zeolítica.

Es importante destacar que, partiendo de un mismo yeso, es posible obtener diferentes estructuras cristalinas según el método de hidratación y curado, con variación en el tamaño de partículas, forma, área de contacto y grado de intercrecimiento cristalino, de lo que dependen, en definitiva, las propiedades mecánicas del material [Soroka, Sereda'68,338]. y [Fdez. París y Carrascosa'64,260].

Un yeso acelerado con DH tiene cristales más pequeños [King et al.'78,360]. [Cunningham et al.'52,2406].

GRANULOMETRIA.

Recoge los temas relativos al tamaño de los granos del rehidrato que, verdaderamente, son cristales de DH. Sin embargo, el hecho de tratar al material como un cuerpo compacto, en lugar de un conjunto de granos

incoherentes, hace de los estudios granulométricos una parte de los porométricos que veremos a continuación.

El ser las propiedades que estamos comentando parte importante de los capítulos siguientes, posponemos su estudio detallado, viendo ahora, únicamente, sus líneas más generales.

POROMETRIA

La estructura de un material poroso se caracteriza por la porosidad total, abierta (accesible) y cerrada (accesible al deshacer el material triturándolo), por la distribución de los tamaños de poros a tenor de sus radios, y por la superficie interna específica de los poros [Gorchakov'81,26], circunstancias que pueden investigarse mediante porometría de mercurio [Wardlaw y Taylor'76] y técnicas de absorción de gases [Gragg, Sing'82].

Las variables que influyen en estos aspectos son muy numerosas pues, ya al final de nuestro recorrido por las diferentes transformaciones que sufre el yeso, se reflejan aquí prácticamente todos los factores anteriores. Algunos se han estudiado con más detalles, por ejemplo se sabe que la porosidad total no varía, aunque sí la distribución de tamaños de poros, con la agitación de la pasta [Bardín'82,107], siendo el agua de amasado la variable que más influye en la porosidad total.

Fig.3-28: Variación de la densidad aparente de un yeso de enlucir en función de la cantidad de agua utilizado en su amasado [ENIP'82].

CIRCUNSTANCIAS PONDERALES.

La propiedad más importante es la densidad aparente que, al igual que las anteriores, se verá con más detalles en los capítulos siguientes.

3.9 EL SISTEMA DE UTILIZACION. REQUERIMIENTOS MECANICOS.

El yeso no tiene aplicaciones estructurales en la actualidad, salvo en edificaciones experimentales de bajo coste [Brouard'85] [Mariotti'85] y [Nolhier'85,92 y 155], lo que no es óbice para que en sus aplicaciones típicas como pasta de agarre, revestimientos y prefabricados, esté sometido a multitud de acciones de tipo mecánico que son las que nos interesa estudiar.

En líneas generales, debemos tener en cuenta que las acciones mecánicas se traducen en "tensiones" en el interior del material que, salvo excepciones, son inobservables. No ocurre lo mismo con las deformaciones y con las "resistencias" (capacidad máximas de admisión de tensiones) que se pueden medir con las técnicas instrumentales adecuadas, y que las veremos como dos formas diferentes de la "respuesta" del rehidrato a las primeras. Aunque tensiones y resistencias se midan en las mismas unidades son, conceptualmente, diferentes. Así pues, en función de su origen y desde un punto de vista metodológico, podemos distinguir las siguientes acciones mecánicas que, normalmente, implicarán a diferentes mecanismos de respuesta del material:

DEFORMACIONES IMPUESTAS O RESTRINGIDAS. Suponen la puesta en acción de mecanismos de resistencia en la masa general del rehidrato, lo que autoriza a suponer repartos de tensiones suficientemente homogéneos. En este grupo tenemos:

- Deformaciones impuestas por los elementos estructurales de la edificación en su propia deformación. En este caso, el yeso adopta un carácter pasivo en el cual, generalmente, la resistencia del yeso es desconsiderable y el único factor de interés es la posibilidad de deformación acompasada del yeso sin fisuración. En esta situación se encuentran prácticamente todos los elementos de yeso acoplados o solidarizados a otros soportes y/o estructuras, es decir tabiques, revestimientos, falsos techos, etc. que no dispongan de "juntas de flotación" que eviten la transmisión de estas deformaciones estructurales.

Su estudio en laboratorio se desarrolla a partir de la simplificación de las acciones en forma estática unidimensional en los tipos de tracción, compresión, y cortante, y los bidimensional (implican el concepto de "momento") de flexión y torsión.

- Dilataciones de origen térmico parcialmente coartadas (Calefacción). Generalmente por diferencias en los coeficientes de dilatación de los materiales solidarizados con los elementos de yeso, y por diferencias de temperatura en estos materiales, bien provocadas por sus diferentes conductividades térmicas o bien por distintos gradientes de temperatura.

- Expansión de fraguado. Como vimos en los apartados anteriores, tanto por la propia expansión del yeso como por la posible hidratación retardada de la anhidrita, pueden originarse tensiones residuales en los

elementos de yeso que, asociados a su grado de humedad, sean de cierta importancia para el interés que nos ocupa.

- **Tumefacción** por aumento de humedad. En este caso la absorción de humedad puede hacerse en forma de vapor, del aire ambiente y hasta llegar a su "humedad de equilibrio", o en forma de agua líquida por absorción capilar y exposición al meteorito externo o por fugas en instalaciones, inundaciones, etc. Es muy importante, en esta situación, tener en cuenta las diferencias de comportamiento asociadas a sus grados de humedad.

ABRASION ó. EROSION. Acción típica que sufren los elementos de acabado, concretamente enlucidos y tabiques de paneles, poniendo en juego mecanismos locales de tipo superficial frente a acciones que discurren en la misma superficie. Podemos diferenciar dos tipos:

- **Fricción**, roce o desgaste superficial, causado por elementos relativamente más blandos que la superficie del yeso.

- **Penetración**, mediante rascado, rayado o punzado. Con carácter más localizado que el anterior tiene una influencia superficial, lineal o puntual según los casos y se causa, siempre, con elementos más duros que el elemento de yeso.

IMPACTO. A diferencia del caso anterior, en esta situación los aspectos dinámicos del choque o colisión son ciertamente influyentes, además de actuar normalmente a la superficie. También en este caso podemos diferenciar dos tipos de impacto:

- **Duro.** Causado por elementos que, frente al yeso, pueden considerarse como puntuales, al igual que su efecto. Por ejemplo el borde de una silla que al moverse golpea la pared.

- **Blando.** Aquí el impacto repercute sobre una zona relativamente amplia del elemento de yeso y parte de la energía de impacto es absorbida por el cuerpo que impacta.

DESUNION. Nombre con el designaremos diferentes tipos de separación que pueden tener un carácter interno o externo, por lo que diferenciaremos las fuerzas que se ponen en juego:

- **Cohesión.** Por acciones locales que se ejercen en el yeso contra el yeso y pone en juego mecanismos que, prácticamente son idénticos a los que se conocen como de "tracción pura", aunque en este caso la acción es de aplicación interna y suele tener carácter multidimensional.

- **Adhesión.** Al contrario que en el caso anterior, la separación afecta a dos materiales diferentes en su capa de unión o "interfase".

CONGELACION. Naturalmente ligada al efecto de la tumefacción que hemos visto anteriormente, tiene un interés marginal en el contexto de nuestra investigación, puesto que no es habitual hoy día el uso al exterior de elementos de yeso directamente expuestos a la acción combinada de la lluvia.

3.10 COMPORTAMIENTO MECANICO DEL YESO.

El comportamiento mecánico del yeso rehidratado se estudia, básicamente, a partir de sus diferentes tipos de resistencia y de su capacidad de deformación. Dentro de las resistencias, la dureza adquiere una entidad propia, especialmente importante por cuanto en gran parte de las aplicaciones del yeso es necesario garantizar ciertos mínimos para este tipo de respuesta. Es el caso de las aplicaciones en revestimientos y en prefabricados para tabiquería que, entre ambos, cubren la mayoría de la producción de yeso.

RESISTENCIA.

Son muy numerosos los factores que influyen en la resistencia mecánica del yeso y que van desde la materia prima, su composición y pureza, hasta las condiciones de amasado y curado, pasando por las diferentes condiciones de su proceso de fabricación, como el sistema de cocción [Coombe, Smith'71,284], tiempo y velocidad de calcinación [Mariotti'85,213], el de molido [Deleuil'77,366] y la granulometría [Lane, Summerfield'75], la agitación de la pasta [Bardin'82,107], las condiciones de curado [Papadakis y Venuat'70,243] y [Lacheny'71,833] y un largo etcétera que veremos con detalle más adelante, aunque por lo reflejado hasta ahora se ve con claridad que prácticamente todos los factores que intervienen, o actúan, sobre el material de construcción tienen, en mayor o menor medida, su reflejo en el comportamiento mecánico final del yeso.

DEFORMABILIDAD.

Es uno de los aspectos que requieren mayor interés, siendo poco conocido, pues aunque en líneas generales se sabe que la resistencia y la humedad están relacionados con la deformabilidad del yeso, no se conoce con precisión qué factores influyen en la capacidad de deformación del yeso, si es que los hay, con independencia de su resistencia, aunque parece que los aspectos puramente físicos, como la granulometría que incluye mucho en la fisurabilidad de los tabiques prefabricados con paneles [ADAUA'85-a,197], tienen un importante papel en esta cuestión.

3.11 RECAPITULACION.

El comportamiento mecánico del yeso es el conjunto de respuestas que el rehidrato ofrece a las acciones de tipo mecánico que sobre él actúan, según el esquema:

Las acciones mecánicas son, en principio, independientes del historial anterior del rehidrato, y externas a él, lo que no ocurre con las reacciones, que dependen tanto de las solicitaciones como del material en sí. El rehidrato, a su vez, es el resultado, o salida, de un proceso en el que han coincidido un determinado yeso y un determinado sistema de aplicación, dependiendo sus propiedades y características de ambos, así como de su interacción mutua.

Aunque podemos remontarnos en la historia del yeso para buscar la explicación de sus propiedades físicas, químicas y cristalográficas, el hecho cierto es que el yeso en polvo que nos llega a una obra es el fiel reflejo de toda su historia anterior, lo que nos permite, a partir de su estado, olvidarnos de su evolución anterior, de sus estados intermedios, y de los factores que le influyeron.

A partir de aquí, podemos trabajar únicamente con las variables de estado del yeso y con las variables operativas específicas de la aplicación que nos interese, justificando así el estado del rehidrato. A partir de este estado, junto con las acciones mecánicas, podremos estudiar el comportamiento mecánico del yeso como material de construcción.

CAPITULO 4.

EL ESTADO DE LA CUESTION.

"Decían los medievales, que tenían un respeto exagerado por la autoridad de sus autores clásicos, que los modernos, aún siendo "enanos" en comparación con aquellos, al apoyarse en ellos se convertían en "enanos a hombros de gigantes", con lo cual veían más allá que sus predecesores.(...) Hay que partir del principio de que, si se es un enano inteligente, lo mejor es saltar a hombros de un gigante cualquiera, aunque sea de estatura modesta; o de otro enano."

(U.Eco: Cómo se hace una Tesis. 1.977).

4.0 INTRODUCCION.

Vamos a tratar de ver en este capítulo un resumen de las investigaciones más interesantes que, sobre el comportamiento mecánico del yeso, se han realizado hasta la fecha, intentando resumir los conocimientos actuales sobre este tema, lo que terminará de completar la visión ofrecida en el capítulo anterior. Una vez que hayamos visto el panorama de las investigaciones que se han realizado en los últimos años nos entretendremos en las técnicas instrumentales y métodos de ensayo aplicados en la actualidad. Obviamente existen multitud de técnicas y posibles ensayos, pero nos dedicaremos únicamente a los más utilizados y a los que utilizaremos en nuestro propio plan experimental, de los que veremos, básicamente, sus fundamentos. Por último plantearemos los principios teóricos en los que se apoya el tratamiento matemático de los resultados experimentales, desarrollando una visión panorámica sobre distintas técnicas estadísticas que nos permitan comprender la forma de actuación posterior.

4.1 COMPORTAMIENTO MECANICO DEL YESO.

En la actualidad, y salvo algunas aplicaciones experimentales en la construcción de viviendas en países en vías de desarrollo [CSTB'85], el yeso no es un material utilizado estructuralmente. Sin embargo, hasta el siglo pasado, en aquellas zonas donde abundaba el yeso, y/o escaseaba la cal, su utilización era frecuente como material de unión entre bloques o piezas de piedra o cerámicas, excepto en cimentaciones. La creciente especialización de los materiales de construcción ha causado, en gran parte, la marginación de los estudios mecánicos aplicados a nuestro material, especialmente si los comparamos con los esfuerzos investigadores desarrollados sobre otros campos y problemas ligados al yeso. Sin embargo

existen, al menos, algunos precedentes interesantes en el estudio de los factores que más afectan al comportamiento mecánico del yeso.

Desde los tiempos más remotos, sobre la base proporcionada por la acumulación de conocimientos "prácticos", se ha considerado que los tres factores más importantes en la "resistencia" del yeso eran el tipo de piedra utilizado, la temperatura o tiempo de calcinación de ésta, y la cantidad de agua de amasado. Los dos primeros factores se resumen en el tipo de yeso y el tercero queda en manos del albañil para su acoplamiento a las particularidades constructivas.

Desde una perspectiva más científica la resistencia mecánica del yeso fraguado se entiende asociada a su "cohesión" interna debida a la imbricación de los cristales de DH nacidos durante el fraguado de la pasta [Pinault'72], y en la búsqueda de factores de los que pueda depender esta resistencia se señalan frecuentemente como más importantes la naturaleza y composición del yeso, su finura de molido, la cantidad de agua de amasado y la humedad en el momento de rotura.

Ultimamente, se intenta explicar el comportamiento mecánico del yeso considerando que el material rehidratado está formado por un conglomerado de cristales de DH interconectados. A partir de esta visión, además de la resistencia intrínseca de cada cristal individual, se considera que el comportamiento del conjunto queda determinado por la ligazón intercrystalina, de tal forma que la resistencia mecánica queda limitada, en realidad, por la unión entre los cristales, más débil que la resistencia intrínseca de cada cristal [Khan et al.'77,329]. En resumen, además de la resistencia de unión entre los elementos estructurales del cristal, el número y tipo de uniones intercrystalinas determina la resistencia del entramado estructural del yeso fraguado.

En esta misma línea, el estudio de la textura cristalina de los productos resultantes de la hidratación del yeso, revela que la forma de los cristales y sus maclas se traduce en el comportamiento mecánico final del cuerpo endurecido [Murat'77,80]. En particular, los cristales formados en el proceso de "disolución-recristalización" que supone el amasado y fraguado, son generalmente aciculares y es su entrecruzado el responsable de su resistencia mecánica. La presencia de elementos ajenos, como sales e impurezas altera los hábitos y las formas de desarrollo de las facies cristalinas, las superficie de contacto entre cristales y, consecuentemente, el comportamiento mecánico del rehidrato [Karmazsin et al.'78].

La multitud de circunstancias ligadas a la constitución y estado del yeso de partida pueden resumirse y asociarse al tipo de yeso utilizado. Pasemos revista a algunas de las aportaciones más importantes que se han dado, en esta línea, en los últimos años .

EL TIPO DE YESO.

Junto con diversas variables más, Lacheny ['67] estudió la influencia de diferentes condiciones de puesta en obra sobre las características del yeso endurecido, partiendo de 4 yesos comerciales. Aparte de otras cuestiones que veremos más adelante, concluyó que la naturaleza del yeso de partida, en particular su composición de fases, es muy importante y caracteriza de una forma prácticamente definitiva el comportamiento final de tal forma que, cuanto mayor es la proporción de SH-a (alpha) respecto al SH-b (beta) mayor es la resistencia.

Implicítamente la consideración de la importancia del tipo de yeso en su resistencia final queda recogida en casi todas las normas que especifican las condiciones que deben reunir los yesos comerciales, bastando recordar que la resistencia es uno de los parámetros más importantes para caracterizar a un yeso, y que el actual Pliego [RY'85] recoge las siguientes especificaciones para los diferentes tipos de yeso:

Tabla 4-I: Características de los tipos de yeso.

Característica:	Tipos y Clases			
	YG-YG/L	YF-YF/L	YP-E.30-E.30/L	E.35-E.35/L
Resistencia mecánica a flexotracción (kp/cm ²)	20	25	30	35

[RY'85]

La influencia, global, del proceso de calcinación puede comprobarse, por ejemplo, en alguna de las tablas del capítulo anterior, y con los datos suministrados por Enayetallah et al. [77-a,99] obtenidos a partir de una misma materia prima sometida a cuatro procesos de calcinación diferentes con los siguientes resultados:

Tabla 4-II: Resistencia mecánica de diferentes calcinaciones.

Resistencia (kp/cm ²)	Autoclave		Vía seca	
	5 atm.150°C.	10 atm.180°C.	150°C	180°C
Tracción	30	22	23	28
Flexión	70	55	58	66

[Enayetallah et al.'77-a]

Vemos cómo la calcinación en autoclave, que produce mayor cantidad de SH-a, mejora, a 5 atm., el comportamiento mecánico. Respecto a la temperatura y la presión de vapor, tienen efectos contrarios según la calcinación sea por vía seca o húmeda. En el primer caso se forma más SH a 180°C, mientras que en el segundo, a esta temperatura y a 10 atm. ya se ha formado suficiente cantidad de An-II no hidratable como para hacer bajar las resistencias.

La duración del proceso de calcinación tiene su importancia por cuanto a menor duración, naturalmente dentro de sus límites, se produce un yeso más crudo y, por tanto, con menor resistencia [Mariotti'85,213].

Fig.4-1: Influencia del tiempo de calcinación [Mariotti'85].

Obviamente la composición, o distribución de fases del yeso, es junto con la granulometría el factor más influenciado por el proceso de calcinación. El papel de las anhidritas hidratables es muy importante si nos fijamos, a partir de la duración del fraguado, en que los cristales que crecen despacio aparecen de mayor tamaño y mejor formados que aquéllos que han dispuesto una velocidad de hidratación mayor [Nolhier'85,131].

El efecto de la granulometría, entre otros, fué estudiado por Lane y Summerfield ['75] quienes, aplicando su estudio a yesos espumados, comprobaron que son las granulometrías medias, en el intervalo 6-16 μm , son las que mejores resultados dan, bajando la resistencia notablemente cuando el porcentaje de granos mayores de 32 μm es significativo. Lógicamente, la granulometría del yeso, cuando la molienda es previa a la calcinación, va asociada a la composición de fases, por cuanto los granos gruesos pueden tener un núcleo falto de calcinar y los finos estarlo en exceso. Además, el tamaño y forma de los granos afecta notablemente a la hidratación de la pasta por su comportamiento reológico [Lelong'77,42].

Otro factor importante es la estabilización y añejamiento del yeso posterior a su calcinación y antes de su amasado. Lelong ['77,43] constata que las resistencias mecánicas de los productos envejecidos mediante tratamiento con vapor de agua, que se corresponden con tasas de amasado a saturación obtenidas después del envejecimiento, son más bajas que las correspondientes, normalmente, a esta tasa. Este tratamiento hace bajar la relación A/Y correspondiente a saturación o a consistencia normal, observándose en ambos casos una resistencia mecánica inferior que la correspondería a igual relación A/Y en productos no envejecidos.

LA RELACION AGUA/YESO.

Es, como vimos, el factor más tradicionalmente utilizado para controlar los aspectos relativos al comportamiento mecánico de un yeso determinado. La resistencia a tracción, sobre probetas octoformes, varía, por ejemplo, con estos resultados:

Tabla 4-III: Variación de la resistencia a tracción con el A/Y:

Relación A/Y:	0'4	0'5	0'6	0'7
Rt (kp/cm ²):	14'8	10'5	7'8	5'3

[Navo de Miguel'88]

En términos generales, se confirma con claridad que la resistencia mecánica varía en relación inversa con el contenido de agua usado en la pasta que, a su vez, y puesto que en obra lo habitual es buscar unas condiciones constantes de trabajabilidad de la pasta, se elige condicionada por los aspectos formales de los granos de yeso, es decir su superficie específica, tamaño y forma de partículas. No olvidemos que, para cada yeso, su requerimiento de agua es, prácticamente, la cantidad de este líquido necesaria para llenar los vacíos del polvo compactado [Ridge'61].

Volviendo al trabajo de Lacheny ['67] nos encontramos con los resultados de la tabla siguiente, para ensayos de tracción y compresión, referidos a un SH-b:

Tabla 4-IV: Variación de resistencias con el A/Y:

Relación A/Y:	0'63	0'71	0'83	1'25
Rc (kp/cm ²):	161'7	120'0	93'8	31'2
Rt (kp/cm ²):	60'0	46'8	36'9	16'2

[Lacheny'67]

Para este investigador, la relación A/Y es extremadamente importante por cuanto, además de implicar una importante baja de resistencia cuando aumenta, conlleva una pérdida en el coeficiente de absorción y un aumento de porosidad y de los tiempos de fraguado. En resumen afecta a la trabajabilidad y durabilidad de los yesos en forma muy notoria.

Como se vé en la figura 4-2, las resistencias parecen caer, en función del A/Y, según una gráfica de tipo parabólico, tanto las resistencias de tracción como las de compresión, pasando a la mitad cuando la relación A/Y cambia de 0'55 a 0'80, mientras que la densidad sigue un comportamiento más lineal.

Fig.4-2: Influencia de la cantidad de agua sobre las resistencias según Kaufmann'50 [Papadakis y Venuat'70].

En éste mismo sentido, Albrecht [1'64] propuso una fórmula del tipo:

$$f_{gw} = \frac{f_{g1}}{w^2}$$

donde f_{gw} es la resistencia a compresión de un yeso amasado con una relación $A/Y = w$, y f_{g1} es la resistencia del mismo yeso cuando la dosificación de amasado es igual a la unidad.

Esta tendencia parabólica de la curva resistencia vs. agua/yeso se vé confirmada para otras resistencias mecánicas, como es el caso de la resistencia a compresión. Por el contrario, la dureza Shore-C parece que se comporta de forma aproximadamente lineal [Barriac'73].

Fig.4-3: El comportamiento de la dureza Shore-C es lineal, frente al de las resistencias a flexión y compresión, de tipo parabólico [Barriac'73].

También el Módulo de Elasticidad varía con la cantidad de agua de amasado. Para $A/Y=1'25$ el módulo de elasticidad dinámico, según la DTU.25.1 [Monjo'76,165] tiene un valor de unos 100.000 kp/cm², mientras que para $A/Y=1'43$ está entre 50.000 y 65.000 kp/cm² en un yeso fino de construcción [Foucault'70,96].

Fig.4-4: Evolución del Módulo de Elasticidad (dinámico) con el A/Y según Blakey'59 [Nohier'85].

También Mattone [77] ha estudiado la variación de resistencias mecánicas, incluso dureza, en relación con la cantidad de agua, corroborando lo que ya hemos visto, es decir la variación ligeramente parabólica de las resistencias según leyes geométricas equiparables tanto para las resistencia a compresión como tracción, flexión y dureza (Brinell).

Fig.4-5: Variación de resistencias mecánicas, medidas a los 10 días después del amasado, en función de la relación agua/yaso [Mattone'77].

CONDICIONES DE AMASADO.

Las operaciones que acompañan al amasado, como vimos, varían según los yesos utilizados y la aplicación final de éstos, y en mayor o menor medida todas tienen su influencia en el resultado final. En la práctica, el albañil ha aprendido, por la experiencia acumulada, unas técnicas de trabajo situadas muy cerca del óptimo y, en este caso, ligeras variaciones en las pautas de trabajo no tienen una repercusión final tan notable como los factores anteriormente estudiados. Sin embargo, en las aplicaciones industriales del yeso, donde la cantidad de operaciones y aparatos a utilizar es notablemente mayor, la sensibilidad del resultado a diferentes técnicas de amasado es más sensible. En concreto, las variables más importantes, y más estudiadas, son el modo de incorporación del yeso al agua, el tipo de batido de la pasta, su duración, velocidad y/o energía utilizada, la temperatura del yeso y del agua en el momento de la mezcla, la forma de compactación y algún otro más ligado a la problemática asociada a las técnicas industriales particulares, como la presencia de adiciones y aditivos, reciclaje de restos rehidratados, etc. [Deleuil'77].

La incorporación del yeso al agua debe ser lo más rápida posible, siempre que se garantice su progresiva incorporación, pues en caso de vertido excesivamente brusco es prácticamente segura la formación de grumos y la permanencia de bolas de yeso rodeadas de pasta que, posteriormente, van a requerir un batido más enérgico. Deleuil ['77,354] ha comprobado, sobre 4 fosfoyesos diferentes, cómo al pasar de un tiempo de incorporación de 10" a 40" la resistencia a compresión caía hasta un 15%.

Con relación a la temperatura de los productos de la mezcla, sus variaciones dentro del rango normal no ejercen una apreciable diferencia en la velocidad y tasa de hidratación del yeso. No ocurre lo mismo con la estructura cristalina, donde la temperatura tiene gran influencia una vez que el fraguado ha tenido lugar [Ridge'58,1225]. Así, a 46°C predominan los hábitos cristalinos con formación de haces o gavillas de cristales, mientras que a 20°C son más frecuentes las maclas en forma de colas de golondrina y los cristales aciculares. A 0°C aparece una estructura cristalina muy fina. En resumen, con temperaturas relativamente bajas se obtienen mejores resistencias en cuantía que varían hasta un 10-12%. Tal vez, la menor temperatura facilite un crecimiento más lento de los cristales y, consecuentemente, una estructura final mejor formada [Murat'77,76]. Los resultados de Deleuil son los siguientes:

Tabla 4-V: Influencia de la temperatura del agua de amasado:

Yeso:	T (°C)	Rf (kp/cm ²)	Rc (kp/cm ²)
A	10	39'3	67'4
	30	35'2	61'0
B	5	21'0	49'3
	25	21'0	47'2

[Deleuil'77,362]

El tipo de batido, importante desde el punto de vista industrial cuando se utiliza un amasado mecánico, no puede tampoco ignorarse cuando el amasado se hace manualmente, aunque en este caso sus posibilidades de control y uniformidad son bastante más remotas. Para yesos industriales, Lacheny ['67] se inclina por aquéllos que disponen de un órgano de agitación de tipo hélice frente a la turbina. Sus resultados, para un SH-b amasado a 0'83 con una velocidad constante de 600 r.p.m. durante 2 minutos, son los siguientes:

Tabla 4-VI: Influencia del órgano de agitación.

Aparato:	Rc (kp/cm ²)	Rf (kp/cm ²)
Hélice	93'8	38'3
Turbina	78'2	33'2

[Lacheny'67,806]

Unos resultados muy parecidos son publicados por Deleuil ['77,356] quien, al igual que el anterior también estudia la influencia de la velocidad llegando a la conclusión de que las velocidades mejores dependen de las características del yeso, aunque las rápidas durante corto tiempo dan buenos resultados. Lacheny, por su parte, para el mismo yeso anterior

amasado a 0'63 y a 0'83 durante 2 minutos, obtiene:

Tabla 4-VII: Influencia de la duración del batido:

Velocidad (rpm):	Rc (kp/cm ²)		Rf (kp/cm ²)	
	0'83	0'63	0'83	0'63
600	93'8	181'6	38'3	61'2
900	89'8	163'7	41'3	65'6
1.800	114'9	207'6	46'7	67'3

[Lacheny '67, 807]

Respecto a la duración, también ésta variable aparece ligada al tipo de yeso y, especialmente, a la relación A/Y, puesto que un amasado claro, con tiempos de fraguado más dilatados, permite amasar durante más tiempo. El tiempo de amasado, al contrario que la velocidad, es más fácil de variar a voluntad según las necesidades, existiendo, para cada yeso, unos tiempos mínimo y máximo de batido y, por lo tanto un óptimo. Los yesos utilizados por Lacheny pasaron, para una relación A/Y de 0'83 y unos tiempos de amasado de 2, 5 y 8 minutos, de 78,2 kp/cm² en compresión a 84'8 y 92'8 Kp/cm². El yeso amasado a 0'63 durante 2, 4 y 6 minutos, dió resultados de 116'7, 120'7 y 122'5 kp/cm². En resumen, cuando la velocidad o el tiempo de batido aumentan, también lo hace la resistencia mecánica.

La compactación, aunque únicamente se utiliza en algunos elementos prefabricados, y en la ejecución de las probetas normalizadas, también tiene su importancia, como se aprecia en los trabajos de Soroka y Sereda ['68] y de Accetta, Pettang y Jacquet ['85].

Fig. 4-6: Evolución de la resistencia a compresión en función de la energía de compactación para diferentes dosificaciones de un mortero de yeso [Accetta, Pettang, Jacquet '85].

Fig.4-7: Variación de las resistencias a compresión, flexión, tracción y dureza para diferentes relaciones A/G en función del tiempo transcurrido desde su amasado [Mattoni'77].

EL PROCESO DE CURADO.

El tiempo, y las condiciones ambientales en las que se desenvuelve el yeso posteriormente a su fraguado, no tienen una influencia muy clara en el comportamiento mecánico del yeso. Lacheny [1967] que también estudió esta variable no llega a resultados concluyentes aunque, según sus resultados, parece que los curados a alta temperatura, o a baja temperatura pero humedad alta, dan peores resultados que los correspondientes a temperaturas y humedades intermedias. Este resultado parece confirmarse por Coutts [1986, 2960]. La humedad, la temperatura, la renovación de aire y la duración son las variables más importantes en este proceso [Lelong 1970, 129].

Sin embargo, la variable más significativa es la humedad del yeso. Todo parece indicar que, una vez el yeso está seco, la resistencia alcanzada varía muy poco en función del camino seguido hasta ese instante. Es un fenómeno muy claro la progresiva ganancia de resistencia durante el fraguado y posterior curado del yeso, de tal manera que una vez alcanzada cierta humedad mínima, del 1-2%, la resistencia permanece constante si lo hace su humedad de equilibrio.

La ganancia de resistencia durante el proceso de curado ha sido reseñada por numerosos investigadores como Landrieu [1963, 221], Foucault [1970] y Mattone [1977], con resultados análogos en cuanto a la obtención de curvas parabólicas asintóticas con una línea horizontal que corresponde a la resistencia máxima.

En fin, Papadakis y Venuat [1970, 242], Khalil [1972, 708] y Enayetallah et al. [1977, 100] nos confirman, entre otros autores, el tipo de gráfica reflejada en la figura 4-7. Es interesante ver que hay yesos que tienen una momentánea caída de resistencia para recuperarla después [Novo 1958] y [Landrieu, 63], pareciendo que este fenómeno va ligado a la composición de fases y, en especial, a la posible recristalización de los yesos a base de SH. Esta reestructuración del esqueleto cristalino se produciría después del primer día y duraría hasta el séptimo, en función de las condiciones de curado [Wandser 1962].

Fig.4-8: Crecimiento, en el tiempo, de la resistencia a flexión [Landrieu 1963].

LA HUMEDAD EN EL YESO.

Este es otro de los factores con notable influencia en el yeso, una vez rehidratado, de tal forma que el Coeficiente de Reblandecimiento [Gorchakov'81,32], definido como cociente entre resistencias secas y húmedas, es superior a 0'5, lo que ya justifica, por sí solo, el hecho de la inutilidad del yeso en empleos estructurales. Veamos datos concretos de cómo afecta el agua al yeso fraguado, diferenciando el agua en estado líquido y en forma gaseosa o de vapor.

El yeso rehidratado tiene una estructura muy higroscópica con enorme facilidad de absorción y cesión de agua gaseosa del medio ambiente, facultad que le hace idóneo como regulador del ambiente interior de las viviendas. En condiciones normales la humedad de equilibrio del yeso es del orden del 1-2% y, con esta cantidad de agua, el yeso se comporta sin grandes problemas aunque volviéndose más blando (deformable) y menos resistente cuando su humedad aumenta. Es interesante la facultad del yeso de rechazar el agua a una rapidez mucho mayor que la de su admisión, del orden del doble, habiéndose medido valores de velocidad de secado de unos 30 g/h.m² que varía, naturalmente según la estructura capilar del yeso y las condiciones ambientales.

El yeso tarda mucho tiempo en absorber agua, pero muy poco en cederla. En estas condiciones, se necesitan condiciones climatológicas muy adversas (muchos días con mucha humedad relativa) para saturar al yeso. Después de un mes en cámara húmeda (20 ± 5°C y 95% HR) el yeso experimenta una caída de resistencia, que ya permanece constante aunque se prolongue la estancia en cámara húmeda, próxima al 50% [Lelong'70,133].

Fig.4-9: Caída de resistencia de un yeso saturado con vapor de agua a diferentes relaciones A/Y, según Blakey'59 [Nolhier'85].

Para una determinada relación A/Y constante, la caída de resistencia con la absorción de vapor parece ser, hasta el 1% bastante lineal.

Fig.4-10: Resistencia a compresión en relación con el contenido de humedad en forma de vapor [Kuhlmann, Ludwig '77].

Respecto al agua líquida, en líneas generales, la situación es la inversa de la del proceso de curado-secado, aunque permanece el comportamiento del yeso en cuanto que tarda mucho más tiempo en captar cierta cantidad de agua que en cederla por secado (cuando las condiciones ambientales se lo permiten y, desde luego, en ambiente de interior alrededor de 20°C y 50% HR). Como en el caso anterior, una vez vuelto a secar el material, se recuperan las características mecánicas [Engelke '79] e incluso, en algunos casos, las mejoran, probablemente debido a una más completa hidratación del yeso y a fenómenos de recristalización. Los ensayos de Merlet ['85,163] se reflejan en las gráficas siguientes:

Fig.4-11: Evolución de la resistencia con la absorción de agua en dos yesos con densidades 1'07 y 0'53 [Merlet '85].

Muy en relación con el comportamiento del yeso frente al agua está su reacción frente al hielo, problema que ha sido menos investigado por la falta actual de aplicaciones exteriores del yeso. No obstante sabemos, en este caso, que el parámetro más importante parece ser el tamaño de la estructura capilar del rehidrato. Según el trabajo de Engelke ['79], la helada, posterior a la saturación completa del yeso, no tiene gran influencia en el comportamiento mecánico del yeso ni en su posterior recuperación al secarse, mientras que para Marusin ['81] el factor más definitivo no es la porosidad total del yeso, sino el tamaño de sus poros observando que, además, durante los primeros ciclos se observa una

alteración en la distribución de tamaños de poros de tal modo que las muestras estudiadas evolucionan hacia su distribución intermedia. Es decir, un yeso con tamaño medio de poros $\phi_A = 10^{-6}$ m, evoluciona aumentando este tamaño medio y, además, es heladizo. Por el contrario otro yeso, con tamaño medio de $\phi_B = 7 \times 10^{-6}$ m, evoluciona disminuyendo este tamaño y, además, no es heladizo.

Hasta ahora hemos visto cómo afectan al comportamiento mecánico las variables más importantes desde el punto de vista de su posible control externo, sin embargo intuimos, como en el caso de la heladicidad, que la estructura porosa del yeso puede ser una buena causa de tipo "interno" para indagar justificaciones del comportamiento mecánico. En esta línea de trabajo y de "apertura de la caja negra" según vimos en el capítulo anterior, se han hecho algunos estudios, aunque hasta ahora incompletos y sin resultados completamente satisfactorios.

DENSIDAD Y POROSIDAD.

Desde hace bastante tiempo se sabe que la densidad aparente del yeso, una vez fraguado, disminuye cuando aumenta el agua de amasado y ello por la sencilla razón de que el yeso sólo puede fijar, químicamente, una máxima cantidad de agua que corresponde a su cantidad estequiométrica, es decir dos moléculas de agua por cada una de sulfato cálcico, y el agua añadida de más se tiene que evaporar durante el proceso de secado, dejando en su lugar aire. Cuanto más agua, más aire. Así pues cuanto menos densidad menos resistencia.

Fig. 4-12: Variación de resistencia, densidad y coeficiente de absorción en función de la relación A/Y [Arredondo '59].

Según el C.S.T.B. [Monjo'76,166] se puede tomar, aproximadamente, las siguientes densidades en función de la dosificación de amasado:

Tabla 4-VIII: Densidad del rehidrato.

Relación A/Y:	0'6	0'7	0'8	0'9	1'0	1'1	1'2
Densidad (g/cc)	1'15	1'08	1'00	0'95	0'88	0'83	0'75

[Monjo'76]

Según Schiller [60] la resistencia del yeso está esencialmente determinada por su porosidad y por la resistencia intrínseca de los cristales que forman su esqueleto estructural, con la circunstancia de que la porosidad está, prácticamente, decidida en su totalidad por el agua de amasado, mientras que los poros tiene una forma excesivamente compleja que está muy lejos de una simple descripción matemática y, aunque la estructura porosa del yeso (rehidrato) está formada, a nivel medio, por cavidades más o menos esféricas conectadas por una red de canales [Murat'80], a un nivel microscópico es difícil separar cavidades de canales y de espacios intercristalinos por la complejidad de su geometría. En resumen, Schiller propone una fórmula del tipo:

$$\text{Resistencia: } S = q \log \frac{P_{cr}}{P} = q \log \frac{w + 0'36}{w - 0'15} + q \log P_{cr} \quad (4.1)$$

Donde "q" es un parámetro característico de la calidad o tipo de yeso y del tipo de ensayo, "Pcr" es la porosidad crítica específica de cada yeso, "P" es la porosidad considerada en cada caso, y "w" es la relación A/Y. La fórmula anterior puede ser representada gráficamente, por ejemplo:

Fig.4-13: Variación de resistencias a flexión, compresión y módulo de rotura con la porosidad y el A/Y [Schiller'60].

Por otra parte, Hasselmann [63] propone ecuaciones más sencillas, de tipo lineal, y de la forma:

$$\text{Resistencia: } S = S_0 (1 - A_0 P) \quad (4.2)$$

Donde " S_0 " es la resistencia intrínseca del cuerpo no poroso, " P " es la porosidad y " A_0 " es una constante. Este tipo de fórmula es válido también para la obtención del módulo de elasticidad sin más que sustituir " S " por " E ". La idea implícita en la anterior ecuación es la de que la porosidad no afecta a las propiedades intrínsecas del material en sí mismo por lo que, en un sentido macroscópico, se puede interpretar que sólo una cantidad de material $(1 - A_0P)$ es capaz de soportar o trasladar la carga, y el valor de A_0P representa la parte de material libre de carga. Esta cantidad de material libre de carga depende de la geometría (forma y distribución) de los poros y de su dimensión puede verse en la figura siguiente.

Fig.4-14: Modelo mecánico propuesto para justificar el efecto de la porosidad en la resistencia, mediante áreas libres de carga en la proximidad de los poros [Hasselman'63].

Para algunos investigadores [Satava'67], la resistencia parece ser directamente proporcional a su densidad y, consecuentemente, a su porosidad, y a su vez, menos directamente, de la relación A/Y y del tamaño y estructura de su red porosa [Wirsching'85-a,575], mientras que otros, por la vía del ajuste de curvas a los datos experimentales proponen fórmulas exponenciales [Soroka, Sereda'68] del tipo:

$$S = S_0 e^{-bP} \quad (4.3)$$

Igual fórmula se utilizaría para el módulo de elasticidad, donde " b " es una constante empírica relacionada con el tipo de yeso y su geometría porosa, y el resto de variables tienen el significado ya conocido. Ahora bien, como indican estos dos últimos autores, el problema radica en que, desde un punto de vista experimental siempre se puede ajustar una curva a un conjunto de datos, sin que por ello esta curva sea justificativa, desde un punto de vista teórico, del mecanismo subyacente que "explique" los resultados experimentales. En este sentido observan que, aunque la resistencia está relacionada con la porosidad, ambas variables están gobernadas por factores adicionales, básicamente de tipo estructurales, como tamaño y forma de las partículas cristalinas, área efectiva de contacto, grado de crecimiento intercristalino, etc. En el caso del yeso, la recristalización en los ángulos (agudos) de contacto cristalino, produce un importante incremento de su área de contacto, contribuyendo a su mejora de resistencia.

Mikhail y Malek [71] estudiaron, además, como parámetro determinante la superficie específica. Observaron distribuciones de tamaños de poros con carácter dual, agrupándolos en poros "pequeños" de 10 a 20 Å, y "grandes", entre 70 y 80 Å. Al aumentar la cantidad de agua de amasado el grupo de poros pequeños evoluciona hacia mayores diámetros, mientras que el grupo de poros grandes desaparece completamente.

Pore size distribution curves for hardened gypsum pastes containing no additive

Curve (1) W/P = 0.35; (2) 0.40; (3) 0.50; (4) 0.60

Fig.4-15: Curvas de distribución de tamaños de poros en yesos fraguados [Mikhail, Malek'71].

Cuanto menor es la cantidad de agua de amasado, más se facilitan los contactos intercristalinos, por lo que aumenta la resistencia, sin embargo, los cristales, individualmente, son más pequeños y algo menos resistentes que los grandes que, además, crecen a expensas de los pequeños, lo que les hace perder puntos de contacto, disminuyendo su resistencia y su superficie específica, a la vez que aumenta el tamaño de grano.

Más recientemente, las investigaciones parecen revelar, en esta misma línea y al igual que con otros materiales porosos, que más que la porosidad (absoluta) es la distribución de tamaños de poros la verdaderamente relacionada con la resistencia mecánica y, en concreto se han buscado relaciones con un grupo de tamaños de poros en lugar de con todo el conjunto [Mai, Cotterell'85]. Este tamaño en unos casos es, simplemente, el tamaño máximo de poro y en otros, como han propuesto recientemente Bachiorrini y Murat [87], una "macroporosidad crítica" correspondiente a valores de tamaño de poro dependiendo del material estudiado. Así, parece que el efecto de los poros es diferente según lo sea su tamaño, comprobándose la poca influencia de los poros pequeños ($\phi < 10$ nm) [Odler, Roßler'85], mientras que el efecto de los poros de tamaño intermedio es muy similar de unos a otros tamaños. Si recordamos la proposición de Hasselmann, podemos entender que la zona de material incapaz de transmitir carga varíe más que linealmente con la porosidad y la diferencia de importancia de los diferentes tamaños de poro.

La porosidad del yeso fraguado varía, básicamente, en función de la cantidad de agua utilizada en el amasado. Por ejemplo, para una relación A/Y de 0.5 Mengarelli [80,8] obtiene valores de 0.23, mientras que para A/Y=1 obtiene 0.72. En general, los valores más frecuentes, para derivados del SH-b, están entre el 40 y 60 % con prácticamente la totalidad de los poros mayores de 50 nm [Wirsching'85-a,579].

4. 2 METODOS DE ENSAYO.

Acabamos de ver el estado de la cuestión desde el punto de vista de los conocimientos científicos aplicados al problema que nos hemos planteado, pero nos falta conocer algunas de las técnicas instrumentales específicas que podemos utilizar en nuestras observaciones experimentales.

ENSAYOS MECANICOS.

En el campo del yeso existen pocos tipos de ensayo exclusivos de este material, habiéndose derivado casi todos ellos de los métodos de ensayo de pastas y morteros de cemento que, posteriormente, se han adaptado al caso del yeso. El ensayo más habitual y común en todos los países es el de **rotura a flexión**, utilizando probetas de pasta normalizadas con dimensiones de 4x4x16 cm. Este ensayo, en España está recogido por la normativa oficial y a ella nos remitimos [RY'85 y UNE.102.031]. Existe bastante experiencia sobre este ensayo y prácticamente todos los trabajos de investigación, directa o indirectamente relacionados con aspectos relativos al comportamiento mecánico del yeso, lo utilizan.

Otro tipo de ensayo muy habitual, aunque menos que el anterior, es el ensayo de **rotura a compresión**, para lo que es frecuente utilizar cualquiera, o ambas, de las semiprobetas en las que queda partida la utilizada para romper a flexión. En España este ensayo no es obligatorio para el control del yeso, aunque está recogido en la norma UNE-102.031. Este ensayo se utilizó en nuestro país durante bastante tiempo y existen, también, bastantes trabajos de investigación que han utilizado este tipo de ensayo.

El ensayo de **rotura a tracción** utilizando probetas "octoformes" hace ya tiempo que ha caído en desuso y solo excepcionalmente se encuentra este tipo de ensayo en la bibliografía. Su ejecución no es difícil y se utiliza la máquina de Michaelis. Para las probetas se utilizan moldes que suelen seguir la norma americana ASTM: C-190 (tipo octoforme) con unas pautas operativas análogas a las de los ensayos anteriores.

Fig.4-16: Máquina y probeta para ensayos de tracción.

En cuanto a ensayos de **rotura a esfuerzo cortante** no se encuentra en la bibliografía ni una sola referencia a su utilización. Sin llegar a la ausencia absoluta, es muy notable la escasa ejecución de ensayos para la

obtención del módulo de elasticidad y coeficientes de Poisson.

Disponemos de dos procedimientos, ninguno de ellos normalizado, para obtener módulos de elasticidad. El primero, menos utilizado, se apoya en consideraciones estáticas basadas en la Teoría de la Elasticidad, calculando el módulo de Young a partir de la deformación, o flecha, producida en las mismas probetas de los ensayos de flexión en un ensayo que puede ser el mismo [S.N.I.P.'83,12].

En este ensayo sabemos que la flecha producida en el centro del vano de una pieza simplemente apoyada cargada puntualmente en el centro de la luz vale:

$$f = \frac{Q.L^3}{48 E.I} \quad (4.4)$$

Donde "Q" es la fuerza o carga aplicada sobre la probeta, "L" es la separación entre apoyos, "E" es el módulo de Elasticidad del material e "I" es el momento de inercia de la sección transversal de la probeta. El ensayo nos permite observar, directamente los valores de F y de f. Como sabemos que el valor del momento de inercia es:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (4.5)$$

sustituyendo 4.5 en 4.4 y despejando obtenemos:

$$E = \frac{P.L^3}{4 b.h^3.f} \quad (4.6)$$

Los valores de L, b, y h son fijos y conocidos si utilizamos las mismas probetas y condiciones de apoyo que para el ensayo de flexión, es decir las especificadas por la norma UNE-102.031, por lo que la fórmula anterior se queda en:

$$E = \frac{Q.L^3}{1024 f} \quad (4.7)$$

El segundo método de cálculo es de tipo dinámico pues utiliza la frecuencia fundamental de resonancia. Este método es más utilizado que el anterior y da valores diferentes y más altos que el anterior. La probeta se mantiene entre dos sondas, una emisora y otra receptora, y es atravesada por una onda ultrasónica que la hace vibrar longitudinalmente [S.N.I.P.'83,12 y Del Olmo'86]. Se hace variar la frecuencia de la onda hasta que aparece un fenómeno de resonancia, obteniendo un máximo de amplitud sobre la sonda receptora. En esta situación, la frecuencia -f- es el cociente entre la velocidad del ultrasonido -v- y la longitud de su onda -l-:

$$f = \frac{v}{l} \quad (4.8)$$

El módulo de elasticidad dinámico del material está relacionado con la velocidad de transmisión del sonido en su interior ("c"), por la fórmula:

$$E = d.c^2 \quad (4.9)$$

Donde "d" es la masa volumétrica, o densidad, del material estudiado. Por otro lado, en el instante de la resonancia, la longitud de onda ("l") es el doble de la separación entre sondas ("L"), es decir de la longitud de la probeta ($l = 2L$) y, teniendo en cuenta que para pasar de unidades de masa a unidades de fuerza debemos dividir por el valor de "g", constante universal de gravitación, obtenemos al incorporar 4.6 a 4.7:

$$E = \frac{1}{g} (4 L^2 . f^2 . d) \quad (4.10)$$

Mediante este ensayo se han obtenido valores, para diferentes yesos, entre 50.000 y 60.000 kp/cm² [Foucault'70,96], entre 120.000 y 180.000 kp/cm² para un yeso amasado con relación A/Y entre 0'6 y 0'3 [Ali, Singh'75,1922], y otros ya vistos (fig.4-4), aunque hay que tener en cuenta que los valores obtenidos por ensayo dinámico son más altos que los correspondientes a un ensayo estático.

El coeficiente de Poisson solo lo hemos encontrado obtenido una vez, en ensayos de paneles para tabiques [YEPSA'86,15] con un valor de 0'18 que corresponde a un yeso cuyo módulo de elasticidad dinámica era de 40.600 kp/cm².

Otro grupo de ensayos muy utilizados en el caso del yeso son los de dureza. En años anteriores se han utilizado diversos métodos para medir la dureza superficial de los yesos [Foucault'70,98] aunque en la actualidad son únicamente dos los métodos usados preferentemente [Barriac'70 y Gremion'75]. En concreto la determinación de la dureza Shore-C es, quizás, el más utilizado por su facilidad de ejecución y no dejar apenas huella. Este método se ha normalizado recientemente en España [UNE-102.039] y necesita utilizar un aparato especial (Zwick n^o3 102) que mide en una escala graduada el rechazo a la penetración de un punzón.

Los valores del índice Shore-C (0-100) varían según la calidad del yeso desde 25 uds., para yesos celulares, hasta 80-90 uds. para yesos proyectados o de alta dureza [Merlet'85,162]. En Francia, el D.T.U.n^o 25 ['75] exige un valor mínimo de 45 para enlucidos tradicionales, de 65 para yeso proyectado y 80 para un enlucido de alta dureza, mientras que los paneles para tabiques, según la N.F.72.301/75, deben dar un índice mínimo de 55 [S.N.I.P.'82,214].

Otro método, también muy utilizado, es la determinación de dureza Brinell, mediante la huella que produce una bola de acero especial de 10 mm de diámetro con una carga de 20 kp o de 200 N. También éste ensayo ha sido recientemente normalizado [UNE-102.039] siguiendo, como en el caso anterior, las recomendaciones de la RILEM-GP-2.

La dureza Brinell se calcula dividiendo la carga utilizada por la superficie de la marca dejada por la bola, que es de geometría esférica conocida si se conoce la profundidad -h- o el diámetro de huella -Ø= 2r-.

Fig.4-17: Durómetro Shore-C.

La superficie de un casquete esférico de una bola de radio R vale:

$$S = 2 \pi R h \quad (4.11)$$

Además, el valor de la profundidad de la huella (altura del casquete esférico) está relacionado con el diámetro de la huella por la ecuación:

$$h = R - \frac{(4R^2 - \phi^2)^{1/2}}{2} \quad (4.12)$$

En definitiva, la dureza Brinell (BRN) está dada por el valor de:

$$BRN = \frac{Q}{S} \quad (4.13)$$

Donde "Q" es la fuerza aplicada (20 kp), y "S" es la superficie de la huella, dada por la expresión 4.9 en la que $R = 0.5$ cm. Con estos valores, la expresión 4.11 se convierte en:

$$BRN = \frac{20}{\pi h} = \frac{6.366}{h \text{ (cm)}} \text{ kp/cm}^2 \quad (4.14)$$

Si en lugar de medir "h" medimos "Ø" (en centímetros), la fórmula anterior se convierte en:

$$\text{BRN} = \frac{12.732}{1 - (1 - \delta^2)} \text{ kp/cm}^2 \quad (4.15)$$

Los ensayos de dureza, fáciles, rápidos y no destructivos, se han utilizado especialmente en el control de enlucidos, aunque nada impide utilizarlos más a menudo de lo que, en la actualidad, se hace. Barriac [70] y Gremion [73] han informado sobre amplias series de ensayos, obteniendo valores variables según los tipos de yeso, cantidades de agua de amasado y humedad de las probetas, variando entre 30 y 500 kp/cm² con el método Brinell y ente 20 y 90 unidades del índice Shore-C.

Otros métodos esporádicamente utilizados en ensayos de dureza han sido los de impacto dinámico mediante la caída de una bola de acero [Fdez. París, Carrascosa'62,188], Vickers [Soroka, Seredea'68,338], y desgastabilidad por roce [Szymanski'79].

Por otro lado, aunque aplicados a compuestos de matriz yeso también se han realizado esporádicamente ensayos de resistencia dinámica, resiliencia, etc. [Coutts'86], y para ensayos de adherencia se ha utilizado un aparato especial de marca Sattec.

ENSAYOS FISICOS.

Este grupo de ensayos se realiza, en líneas generales, en forma completamente análoga a los correspondientes a cualquier material de construcción asimilable, como es el caso de morteros y piezas cerámicas. Aunque nos interesa, en especial, el yeso fraguado, pasaremos revista a algunos de los más corriente ensayos de identificación y caracterización que se realizan sobre el yeso (en polvo) y sobre las pastas de yeso.

A. YESO.

El ensayo físico más frecuente es el de finura de molido que, indirectamente, controla la granulometría del yeso por un solo tamaño. El método especificado en España está reflejado en la norma UNE-102.031 y, en esencia, consiste en un tamizado manual que, previa contrastación, puede sustituirse por uno mecánico. En el caso de tamizados mecánicos es frecuente, en otros países, el uso de un aparato tipo "Alpine" [S.N.I.P.'83,3].

Para determinaciones de granulometrías finas los métodos mejor estudiados se agrupan son de dos tipos. Primero, los basados en la conocida ley de Stokes que da la velocidad límite de caída de una partícula de diámetro esférico sometida a una fuerza de atracción (normalmente gravitatoria o centrífuga) en un fluido, en función de su densidad, de la viscosidad del fluido y de las características de la partícula. En este grupo pueden utilizarse métodos y aparatos de sedimentación, como la Pipeta de Andreasen (de 2 a 50 µm) y el Sedigraph (de 0.1 a 100 µm), o elutriadores como el Fluorómetro (de 15 a 50 µm) y el Elutriador-Centrifugador (BAHCO) (de 2 a 30 µm).

En segundo lugar, puestos a punto últimamente [Wirsching'86] se pueden utilizar "granulómetros láser" (hasta $1'5 \mu\text{m}$) y contadores "Coulter" (de $0'6$ a $200 \mu\text{m}$) [S.N.I.P.'83,4].

Para medidas de superficie específica se han utilizado, con resultados diversos faltos de uniformidad, los métodos del permeabilímetro y de Brunauer, Emmett y Teller (BET) por la absorción de nitrógeno.

B. PASTAS.

Existen multitud de aparatos y técnicas para estudiar aspectos ligados a la reología de las pastas de yeso y no es este lugar para detenernos en ellos. El pliego RY'85 especifica la realización de ensayos de **trabajabilidad** que, en concreto, nos llevan a determinar la cantidad de agua que corresponde al amasado a saturación y a medir los tiempos de inicio y fin del fraguado.

El amasado a saturación permite conocer la cantidad de yeso necesaria para saturar en forma "natural" 100 g de agua. Es la inversa de lo que en países anglosajones se conoce como **requerimiento de agua**. Este ensayo responde, además, a la práctica habitual en obra, utilizada en el amasado de pastas de agarre, de espolvorear el yeso sobre la gaveta, una vez vertida el agua, hasta que el polvo de yeso aflora a la superficie del agua y ésta no empapa más yeso. El ensayo normalizado está recogido en la norma UNE-102.031.

La **duración del estado plástico** es la diferencia, o tiempo transcurrido, entre el final del fraguado y su principio o "tiempo transcurrido en pasar del estado líquido al plástico". El "principio del fraguado" se define como el instante en que la pasta de yeso presenta una cierta resistencia al esfuerzo cortante, lo que se conoce cuando los bordes de una galleta de pasta, amasada a saturación y cortada con un cuchillo o una espátula, permanecen sin juntarse. El **final del fraguado** se define como el instante en que la pasta de yeso no se deforma apreciablemente bajo una presión de 5 kp/cm^2 , lo que se conoce haciendo periódicamente presión con la yema del dedo índice hasta que no se deja huella visible.

En otros países las anteriores definiciones y determinaciones se hacen de diferentes formas. En concreto es frecuente determinar la consistencia normal de la pasta como aquella que produce un escurrimiento determinado bien por su propio peso (anillo Smith) o en la mesa de sacudidas, o mediante Aguja de Vicat. En fin, también son frecuentes las técnicas calorimétricas para observar la evolución del fraguado y la reactividad de las pastas de yeso y otros más ensayos [S.N.I.P.'82].

C. REHIDRATO.

El **peso específico** se determina con la ayuda de benceno y un picnómetro, siguiendo la pauta especificada, en España, por la norma UNE [UNE-102.031]. Para el yeso completamente hidratado tiene un valor de, aproximadamente, $2'3 \text{ g/cm}^3$.

La **densidad (aparente)** se obtiene mediante métodos ponderales reemplazando el volumen de aire de los poros por agua saturada de yeso [S.N.I.P.'83,13] y realizando tres pesadas. La primera, con la probeta desecada en estufa, nos permite conocer el peso seco $-P_0-$, la segunda pesada, con el material saturado de agua, nos da el peso embebido $-P_e-$, mientras que la tercera pesada con la probeta sumergida en el agua de una

balanza hidrostática, nos dá el valor del peso sumergido $-P_e-$ que nos permite calcular la densidad según la fórmula:

$$DA = \frac{P_o}{P_o - P_e} \quad (4.16)$$

Otro método posible es mediante la inmersión en mercurio [S.N.I.P.'73,131]. Desde un punto de vista puramente experimental, en las figuras 4-2, 4-12 y 4-18 se puede observar la variación de la densidad aparente en función de la relación A/Y.

Fig.4-18: Evolución de la densidad aparente y del porcentaje de volumen vacío en un yeso industrial francés, según Barriac'85 [Nolhier'85].

Disponemos de algunos ensayos más destinados a observar, por medios físicos, la estructura capilar del material, o mejor el comportamiento del material frente al agua en función de su estructura capilar. Así podemos hacer ensayos de absorción de agua [S.N.I.P.'83,14], para lo que podemos utilizar los valores obtenidos antes y calcular un índice de absorción como:

$$IA = \frac{P_e - P_o}{P_o} \quad (4.17)$$

Fig.4-19: Permeabilímetro de pared y curvas de absorción de agua en función de la densidad del yeso de un enlucido: Curva 1 = 150 cc/dm², Curva 2 = 60 cc/dm² [Foucault'70].

En fin, la ausencia de métodos normalizados hace muy extensa la cantidad de ensayos y procedimientos que se pueden utilizar para sacar conclusiones sobre la estructura porosa del yeso por la vía intermedia de su comportamiento frente al agua cuando no se dispone de técnicas porométricas como la de mercurio. Foucalt [70,98] ha usado un permeabilímetro de pared, mientras que Dupont [70,100] realizó ensayos de higroscopicidad colocando sus probetas en cámara húmeda y pesando periódicamente (Fig.4-15).

Fig.4-20: Absorción higroscópica de vapor de agua en función del tiempo en placas para tabiques fabricadas con dos yesos diferentes "C" y "S" [Dupont'70].

El coeficiente de capilaridad, o de absorción [Lacheny'67,804] definido por la norma francesa NFB-10.502 (MY'80) [Cigni, Codacci-Pisanelli'87,9] refleja la cantidad de agua que capta una probeta -M (g)- en relación con el tiempo en contacto con el agua -T (min)- y la sección que tiene que atravesar el agua -S (cm²)-, según la fórmula:

$$CC = 100 \frac{M}{S \cdot T^{\frac{1}{2}}} \quad (4.18)$$

Los valores de este coeficiente de capilaridad son del orden de 50 [Cigni, Codacci-Pisanelli'87,9]. Lacheny [67,804] utiliza este ensayo y esta fórmula, aunque el coeficiente obtenido lo llama de "absorción" y los valores obtenidos, entre 2 y 4, no se ajustan a los anteriores ni a los que resultan de los ensayos que veremos más adelante, en la parte experimental.

En relación con este mismo ensayo de succión capilar, es interesante recordar que, al menos teóricamente, la altura que alcanza el agua es función inversa del tamaño de los poros. Es sabido que en el interior de un material existen poros de muchos tamaños y de geometría muy difícil de conocer con exactitud, por lo que es habitual pensar que los poros son de

sección cilíndrica y aplicar unas ecuaciones matemáticas relativamente sencillas. En el interior del capilar se plantea un equilibrio de fuerzas que depende de la tensión superficial del líquido, del ángulo de contacto con las paredes del capilar, y de la altura o cantidad de líquido en el mismo, de tal manera que la altura ("x") que alcanza el líquido cumple la condición:

$$Dl.g.\pi.p^2.x = 2 \pi.p.TS.\cos.\beta \quad (4.19)$$

donde "Dl" es la densidad del líquido, "g" es la aceleración de la gravedad (981 cm.s^{-2}), "p" es el radio del poro capilar, "TS" es la tensión superficial y " β " es el ángulo de contacto entre la superficie del líquido y la pared capilar. El primer miembro representa el peso de la columna de líquido, mientras que el segundo representa las fuerzas de succión capilar que se desarrollan en las paredes del poro. Es importante ver que, en definitiva, la altura del líquido únicamente depende de la relación entre perímetro y sección del capilar, pues el resto de los parámetros son constantes. Del perímetro dependen las fuerzas capilares, y de la sección depende el peso de la columna de líquido.

Fig.4-21: Equilibrio de fuerzas en el interior de un capilar.

En los materiales de construcción habituales, una fórmula práctica para ver el máximo valor que puede alcanzar el agua en un material poroso es [Cigni, Codacci- Pisanelli'87,8]:

$$x = \frac{30 \times 10^{-6}}{p} \quad (4.20)$$

y, en cualquier caso:

$$p = \frac{k}{x} \quad (4.21)$$

donde "k" es una constante que depende de la geometría de los capilares, del material y del líquido en contacto. En resumen, la altura de ascensión

capilar puede ser una medida, aunque indirecta, del tamaño de los capilares de un material poroso, aunque no conocemos ningún trabajo en el que se haya utilizado esta técnica indirecta de análisis porométrico del yeso en particular.

Ensayos para obtener el coeficiente de dilatación térmica también se han realizado, aunque el método no aparece reseñado en la bibliografía. Sin embargo la existencia de un método muy claro para probetas de mortero de cemento [ASTM: C-490] nos permite suponer que la utilización de comparaciones longitudinales con precisión de 0.01 mm es suficiente, y además es la habitual en este tipo de materiales para circunstancias ambientales normales. [ISO 3.051-74 (Anexo 4)].

Los valores publicados del coeficiente de dilatación son siempre los mismos y coinciden con situarlo entre $1.5-2.10^{-2}$ mm/m°C [Blachere'67,143], pareciendo que es poco dependiente de las condiciones de amasado y del tipo de yeso [Nolhier'85,85].

Engelke [79] ha medido dilataciones por humedad, pero no da valores de un coeficiente de dilatación higroscópica aunque, según sus datos, parece situarse sobre un máximo de 5 mm/m en saturación:

Fig. 4-22: Dilatación por humedad en diferentes tipos de yeso saturados de agua líquida [Engelke'79].

Fig. 4-23: Absorción de humedad (vapor de agua) y dilatación de un yeso [Kuhlmann, Ludwig'77].

ANÁLISIS QUÍMICOS.

Con la finalidad de conocer la composición química de los yesos de construcción el actual Pliego [RY'85] prescribe la determinación del agua combinada, del índice de pureza, contenido en SH y la determinación del pH, para lo cual remite a las normas UNE-102.032 y UNE-102.037.

La determinación de agua combinada, en resumen, se hace ponderalmente observando la pérdida de peso que sufre el yeso al calcinarlo de forma que se deshidrate completamente $-P_1-$, lo que según la norma UNE se consigue durante una hora a 400°C ó a 250°C hasta peso constante, y refiriendo esta pérdida al peso seco del yeso $-P_0-$. El agua combinada se obtiene de la expresión:

$$\text{Agua Combinada (\%)} = 100 \frac{P_0 - P_1}{P_0} \quad (4.22)$$

La determinación del índice de pureza requiere conocer, además, el contenido en iones SO_4^{2-} lo que, a su vez, requiere conocer el contenido en trióxido de azufre (SO_3) que, siguiendo el método de la norma UNE se hace con técnicas gravimétricas atacando la muestra con ácido clorhídrico y precipitando, posteriormente, con cloruro bórico. El índice de pureza se calcula entonces con la fórmula:

$$\text{IP} = 1.7 a + b \quad (4.23)$$

Donde "IP" es el índice de pureza, en tanto por ciento, 1.7 es la relación entre los pesos moleculares del sulfato cálcico ($\text{SO}_4\text{Ca} = 32 + 64 + 40 = 136$) y trióxido de azufre ($\text{SO}_3 = 32 + 48 = 80$), "a" es el contenido (%) en SO_3 y "b" es el contenido en agua combinada (%) determinada como acabamos de ver.

Para determinar el contenido en SH, o sulfato cálcico semihidrato ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) se sigue la pauta especificada por la norma UNE-102.037 que, en resumen, utiliza la fórmula:

$$\text{SH (\%)} = 1.42 n - 21.46 h - 5.37 w \quad (4.24)$$

donde "n", "h" y "w" son el sulfato cálcico total ($\text{DH} + \text{SH} + \text{An-III}$), el aumento de peso debido a la hidratación y la pérdida de peso de la muestra al calentar a 450°C respectivamente.

Finalmente, el valor del pH se obtiene con un pH-metro comercial y preparando una disolución del yeso a analizar dosificada con relación agua/yeso = 2.

Pues bien, hasta ahora hemos revisado tanto el estado actual del conocimiento científico respecto al comportamiento mecánico del yeso como el panorama general de las técnicas instrumentales que nos pueden facilitar el conocimiento de diversas variables de comportamiento y de estado del yeso. Nos falta ahora penetrar en el conjunto de técnicas matemáticas que nos va a permitir "modelizar" el problema que planteamos. En lugar de entretenernos en exposiciones matemáticas apoyadas en fórmulas y expresiones que, en este caso, son engorrosas y de difícil seguimiento, veremos las ideas y fundamentos en las que éstas se apoyan, lo que creemos más útil pues, en definitiva, el desarrollo matemático concreto y riguroso ya está en la bibliografía y nuestro objetivo, ahora, es la comprensión de las técnicas matemáticas que utilizaremos más adelante para sacar conclusiones válidas de los resultados experimentales.

4.3 EL ANALISIS MATEMATICO.

En la observación y toma de datos de fenómenos más o menos controlados mediante técnicas experimentales es un hecho bien conocido la dispersión de los resultados. Esta variabilidad es debida por un lado a la variación, controlada, de los factores que se están estudiando, y por otro lado a la actuación de numerosas causas incontroladas e incontrolables que se reúnen bajo la denominación común de "azar" y que provocan cierta incertidumbre en la repetibilidad de las observaciones. El recurso a técnicas matemáticas estadísticas permite desentrañar el complejo de variables que intervienen en los fenómenos estudiados separando las que interesa estudiar de aquellas que ocultan y distorsionan la acción de las anteriores. Las técnicas estadísticas nos permiten, además, plantear hipótesis probabilistas y estimar parámetros matemáticos de formulas teóricas o empíricas diseñadas mediante el planteamiento de modelos teóricos previos.

DESCRIPCION DE LOS RESULTADOS.

En primer lugar debemos diferenciar claramente los resultados "en bruto" de una observación experimental de aquéllos otros, más o menos elaborados a partir de los anteriores, que ya implican una cierta "manipulación" a la que no es ajena la persona que hace la observación. Por ejemplo, en un ensayo de rotura a compresión el resultado bruto es la carga de rotura, y el elaborado es la tensión de rotura que se obtiene a partir de una "presunción", en este caso sobre el reparto uniforme de tensiones en toda la sección de la probeta. Es frecuente, cuando los resultados experimentales no se atienen a lo previsto, tener que revisar, a veces en profundidad, la gran cantidad de "presunciones" que van implícitas en todas las pautas que siguen las observaciones experimentales.

Independientemente de las anteriores consideraciones, y desde un punto de vista matemático más neutral, cuando se dispone de cierta cantidad de datos se recurre a una serie de parámetros estadísticos que los resumen. Además de la media aritmética que es el más utilizado y representa la "esperanza matemática" que tenemos de obtener un resultado, utilizaremos la varianza y, también, la desviación típica, que es la raíz cuadrada de la anterior, como medidas de la dispersión de los resultados alrededor de la media. Utilizaremos también al recorrido, distancia o número de unidades que hay entre los valores máximo y mínimo observados, y el coeficiente de variación, que es una medida adimensional y relativa de la variación obtenida, y es número de veces que la desviación típica está contenida en la media. Se calcula, por tanto, como cociente entre la desviación típica y la media.

Supondremos también, como es habitual, que los resultados experimentales, salvo claros indicios en contra, siguen un tipo conocido por el nombre de distribución normal, también llamada como "campana de Gauss" en honor del matemático que la formuló, junto con Laplace, y por vez primera a principios del S.XIX, hipótesis que deberá ser comprobada mediante el "análisis de residuos". Esta hipótesis, además de ajustarse al resultado obtenido en multitud de experimentos realizados con anterioridad, se apoya en el conocido teorema del "límite central". Según este teorema, cuando una variable (experimental) está formada por una combinación (lineal) de gran cantidad de otras variables, éstas con cualquier forma de distribución, entonces, independientemente del tipo de distribución que

sigan éstas segundas variables, la primera sigue una distribución normal cuya media es la misma combinación lineal de las medias de la multitud de variables y de varianza la combinación lineal de sus varianzas.

El enunciado anterior puede traducirse en términos más comprensibles. Supongamos que una variable experimental, por ejemplo la resistencia a flexión, depende (es una función lineal) de multitud de variables "internas" como ya hemos visto, es decir de todas y cada una de las condiciones de formación geológica del aljez, de las de fabricación, amasado etc. Pues bien, independientemente de las distribuciones de las probabilidades de ocurrencia de valores determinados para cada una de estas variables, la resistencia a compresión, por ser una combinación lineal de todas ellas, sigue una distribución normal. Aunque no haya evidencia de que el tipo de función tenga que ser lineal, la experiencia ha demostrado suficientemente que los resultados experimentales del tipo que nos ocupa, se aproximan sin dificultad a la distribución normal y, de hecho, se utiliza universalmente, comprobándose "a posteriori" que esta hipótesis es, al menos, asumible.

INFERENCIA ESTADISTICA.

A partir de la hipótesis de que los resultados siguen una distribución estadística conocida, es posible conocer la probabilidad de ocurrencia de ciertos fenómenos y, lo que es importante, fijar los límites fiduciaros, o de confianza, asociados a esta probabilidad. En un lenguaje más común esto significa poder hacer una estimación del tipo: "la dureza Shore-C de este yeso varía entre 50 y 55 con una probabilidad (confianza) del 95%". Es decir que en el 95% de los casos en que midiéramos la dureza Shore-C obtendríamos valores entre 50 y 55.

Cuanto mayor confianza queramos dar a nuestras inferencias, mayor ha de ser el intervalo entre los límites de confianza. Está claro que en el 100% de las veces obtendremos valores entre cero e infinito. Por esta razón, la seguridad absoluta nunca se puede obtener, ni tampoco se persigue, pues anula toda posible información. En su lugar se recurre, como valores más habituales, a límites de confianza correspondientes a probabilidades de 0.99, 0.95 ó 0.90. A veces usaremos también la denominación de niveles de significación para designar los valores recíprocos de los anteriores, es decir 1-0.99, 1-0.95 ó 1-0.90 o, lo que es igual, 1%, 5% ó 10%. Es importante recalcar la arbitrariedad de elegir unos u otros niveles, por lo que siempre es aconsejable señalar el nivel crítico al que un determinado test estadístico resulta significativo.

EL ANALISIS DE LA VARIANZA.

Si disponemos de un conjunto de resultados experimentales que, cuando menos, podemos agrupar en función de los valores de una variable controlada (independiente), podemos analizar la variabilidad de los datos usando dos estimaciones diferentes. Por un lado la de todos los grupos, y por otro lado, la variación interna de los datos dentro de cada grupo. Para el primer caso utilizamos la varianza de las medias de los resultados de cada grupo. Para el segundo caso utilizamos la media de las varianzas internas de cada grupo. Comparando estas dos estimaciones de la varianza, si suponemos que no hay diferencia entre los grupos, y que todos los datos, en realidad, fueran resultados particulares de un solo grupo, y si los resultados corresponden, en verdad, a las hipótesis de normalidad, el cociente de estas dos estimaciones sigue una distribución estadística conocida. En caso contrario, el cociente anterior resulta de un valor

mayor que el esperado, lo que nos permite afirmar, con un grado de probabilidad previamente determinado, que al menos uno de los grupos de datos no pertenece al mismo que los restantes.

En puridad matemático-estadística, a las hipótesis anteriores hay que añadir la de que los datos provienen de poblaciones que, aunque tengan diferente media, tienen la misma varianza. Además la expresión matemática rigurosa de lo anterior necesita recurrir a expresiones que hemos suprimido para mejor comprensión del fundamento teórico de esta técnica.

Todo lo anterior significa, en concreto, la posibilidad de disponer de una técnica estadística que nos permita conocer, en función de la variabilidad de una serie de datos, la significación de las diferencias observadas entre una serie de resultados experimentales. Si, por ejemplo, planteamos una serie de ensayos para comprobar la mejora de resistencia mecánica que una determinada técnica de amasado produce en el yeso, y comparamos las resistencias obtenidas con las de una "serie-patrón" con amasado estándar, puede darse el caso de que, por la propia dispersión de resultados, no se pueda considerar significativa la diferencia entre las resistencias de una y otra serie. La técnica de análisis de la varianza nos permite conocer, en función de la seguridad que queramos dar a nuestras afirmaciones (nivel de significación), el límite de las diferencias entre los resultados a partir del cual se puede afirmar que estas diferencias existen realmente (son "estadísticamente significativas").

El análisis de la varianza apoyado en las anteriores ideas se ha desarrollado notablemente para diferentes casos particulares, alguno de los cuales utilizaremos más adelante, y, al final, los resultados de este análisis se acostumbra a resumir en un cuadro o tabla, llamada ANOVA (ANalysis Of VAriance) o ADEVA (Análisis DE VArianza). Por ejemplo, si estamos estudiando la posible influencia de "n" variables experimentales, cada una de las cuales tiene "m" posibles valores (por simplificar consideramos, en principio, que "m" es igual para todas las variables aunque nada obligue a que así sea), y hemos repetido "r" veces los ensayos, dispondremos al final de r.n.m resultados. Para cada variable, el número de grados de libertad es, en este caso, el número de sus posibles valores, menos uno. El esquema de presentación de la tabla ADEVA es el siguiente:

Tabla ADEVA:

(1)	(2)	(3)	(4)=2+3	(5)=4+VE	(6)
Variables estudiadas	Suma de	Grados de	Varianza	F	FL
fuentes de variación	cuadrados	libertad	E.M.C.		
Variable 1a	SC1	m - 1	SC1/m-1	F1	FL1
Variable 2a	SC2	m - 1	SC2/m-1	F2	FL2
.....					
Variable na	SCn	m - 1	SCn/m-1	Fn	FLn
Repeticiones	SCr	r - 1	SCr/r-1	Fr	FLr
Error experimental	SCE	resto	VE		
Total	SCT	rmn - 1			

En la columna 1 se reflejan las variables o "fuentes de variación estudiadas", que difieren según los casos y los modelos aplicados, aunque siempre aparecen las filas del error experimental y la total, mientras que las columnas 2 y 3 son auxiliares para el cálculo de la columna 4 que

refleja la varianza (explicada) que corresponde a la fuente de variación de su fila.

Los grados de libertad del error experimental se obtienen como diferencia, o resto, entre los totales y los "consumidos" por las fuentes de variación. En la columna 5 se coloca el valor del cociente de las dos varianzas del que hablamos más arriba y que debe seguir una distribución estadística que se conoce con el nombre de "Distribución F" (de Fischer). Finalmente, aunque no siempre, se coloca una sexta columna con el valor teórico (límite) que corresponde al cociente anterior para los grados de libertad de numerador y denominador, valor que se encuentra en las tablas estadísticas de la distribución F, lo que nos sirve para, comparándolo con el de la columna anterior, aceptar o rechazar la significación de la fuente de variación correspondiente a esa fila. Aunque no es habitual, conviene colocar en cada fila el valor de probabilidad, o nivel de significación, asociado al valor de "F" obtenido, lo que permite hacerse mejor idea de la significación estadística de la variación producida por la fuente correspondiente.

Los cálculos que implica el desarrollo de esta técnica, sin ser especialmente complicados, son largos y tediosos, existiendo diferentes algoritmos que ayudan a su elaboración. Sin embargo, estos algoritmos, que se encuentran en todos los manuales de estadística que hablan de esta técnica, están desarrollados para la ejecución manual del cálculo. Más adelante veremos como el recurso a la herramienta informática que proporcionan las "hojas de cálculo" facilita enormemente la realización de las tablas ADEVA. Para ello, el autor de esta Tesis ha desarrollado el "software" necesario para la implementación del conjunto de aplicaciones de una hoja de cálculo comercial. Estas aplicaciones permiten hacer automáticamente todos los cálculos necesarios para la realización de los test estadísticos utilizados.

DISEÑO DE EXPERIMENTOS.

Las técnicas de análisis de la varianza tienen su destino final en la rama de la estadística aplicada que se conoce con el nombre de "diseño de experimentos", y que se ocupa de las técnicas generales de planificación y diseño experimental, así como de los contrastes estadísticos necesarios para la elaboración de conclusiones. Básicamente, se puede decir que hay tres formas diferentes, pero complementarias, de utilizar las técnicas de diseño de experimentos, y las tres las utilizaremos en su momento:

- Como metodología de diseño de los "arreglos" o planes experimentales.
- Como método de estudio de la significación de los resultados de un plan experimental.
- Como modelo matemático que resume, en una fórmula precisa, los resultados en función de los factores estudiados.

Vimos en el capítulo anterior que las variables de un modelo matemático podían ser cualitativas o cuantitativas. Pues bien, cuando las variables independientes y controladas del modelo son de tipo cualitativo, el Diseño de Experimentos es la técnica estadística más apropiada. La utilización de variables cualitativas es bastante más frecuente de lo que a primera vista pudiera parecer. Por ejemplo, un plan experimental que intente averiguar la influencia del tipo de calcinación en la resistencia mecánica del yeso, está considerando como variable independiente el proceso de cocción, y lo hace cualitativamente, salvo que se fije el tipo y lo que

se considere sea la temperatura (que ya es una cantidad), o la presión de vapor, etc., pero si definimos la variable independiente como "calcinaciones tipo A, B, C, etc.", lo estamos haciendo cualitativamente, aun cuando la variable dependiente, o respuesta, sea cuantitativa (resistencia mecánica). La unión matemática de variables independientes cualitativas con variables dependientes cuantitativas es el Diseño de Experimentos a través del Análisis de Varianza.

La metodología de diseño de experimentos en definitiva, estudia cómo realizar comparaciones lo más homogéneas posibles, para aumentar, en consecuencia, la probabilidad de detectar cambios o identificar variables influyentes [Peña'87(2),73] y, como el resto de las técnicas estadísticas, requiere una premisa fundamental, sin la cual todo el fundamento estadístico resulta huero, cual es el principio de aleatorización por el que se asignan, o distribuyen, al azar todos los factores experimentales no controlados por el experimentador. En todo experimento se controlan las variables, o factores, que más interesan al investigador en cada caso, lo que no impide que existan otros factores, conocidos o ignorados, que influyan en el resultado observado. La asignación al azar de operaciones como el orden en que se realizan los ensayos, selección de unidades experimentales, etc. garantiza que todos los factores no controlados quedan repartidos uniformemente, por lo que se pueden considerar como parte del "error experimental" y como tal ser separados del resto de variables estudiadas, como vimos en tabla ADEVA.

En concreto, este principio metodológico debido a Fischer nos procura las siguientes ventajas [Peña'87(2),75]:

- Evita la presencia de sesgos, o errores sistemáticos.
- Evita la dependencia de las observaciones, debida a su orden de ejecución.
- Confirma la validez de los procedimientos estadísticos.

Así pues, la aleatorización es como un seguro frente a las posibles interferencias que en un experimento pudieran ocurrir, por lo que es aconsejable tomarse el trabajo de aleatorizar aun cuando no se espere que haya un sesgo importante al dejar de hacerlo [Cochran, Cox'57,25].

El diseño experimental tiene una terminología específica que, para complicarlo mas, no siempre es fácil trasladar de un campo a otro. En nuestro caso, consideraremos las siguientes definiciones, o equivalencias, de los términos usuales en diseño de experimentos, "traduciéndolos" a un lenguaje más cercano al ensayo de materiales de construcción:

Alias: Interacción o efecto confundido con otro.

Arreglo: Configuración estructural del tipo de diseño experimental planteado. Vg.: Diseño completamente al azar, Bloques al azar, Cuadrado latino, Factorial, etc.

Bloque: Conjunto de unidades experimentales suficientemente homogéneo sobre las que se realiza un mismo tratamiento. También se designa con este nombre al conjunto de series experimentales que coinciden, parcialmente, en sus tratamientos. También lo llamaremos "lote".

Confusión: Situación causada por el tipo concreto de diseño experimental elegido en la que es imposible la diferenciación matemática de los efectos de unas variables, o interacciones, con otras que, en consecuencia, aparecen "confundidas" con las primeras.

Diseño experimental: Plan completo que comprende un arreglo más un análisis de resultados mediante una tabla ADEVA ajustada específicamente al arreglo utilizado. Comprende la definición de:

- Conjunto de variables y niveles que van a ser contrastados y sometidos a ensayo, en función del fin perseguido.
- Conjunto de probetas, lotes, etc. del material que se va a ensayar.
- Reglas de asignación de los diferentes tratamientos a las distintas unidades experimentales.

Efecto: Referido a un nivel de una variable (tratamiento), es la diferencia entre el resultado medio del conjunto de las unidades experimentales y las de aquellas que disponen de ese tratamiento.

Factor: Variable independiente que pueda adquirir diferentes valores concretos, o niveles.

Interacción: Efecto combinado de diferentes niveles de varias variables. El número de variables que interactúan define el orden de la interacción.

Nivel: Cada uno de los posibles valores que puede adoptar una variable.

Parcela: Lo mismo que unidad experimental.

Repetición, o replicación: Número de veces que aparece un tratamiento en el ensayo o experimento. No se debe confundir con el número de veces que se toman medidas sobre una misma unidad experimental.

Tratamiento: Lo emplearemos con dos sentidos. Como conjunto de posibles valores que puede alcanzar una de las variables independientes (vg.: el tratamiento "cantidad de agua de amasado") y en este sentido es sinónimo de "factor" o "variable", y como conjunto, total o parcial, de los valores particulares que, en cada unidad experimental, adoptan las variables independientes (vg.: una probeta tiene el tratamiento de tipo de yeso= escayola, amasado= manual, relación A/Y= 0'8, curado= cámara húmeda, humedad de rotura= seca). En este último sentido también se le dá la consideración de un "vector".

Unidad Experimental: Pieza material sobre la que se realiza un ensayo. La variación de medidas que se efectúen dentro de esta unidad no se considera afectado, por principio, por otro tipo de causas que las asignadas al azar. Más frecuentemente las llamaremos "probetas".

En las anteriores definiciones han aparecido diferentes tipos de arreglos. No es nuestro objetivo entrar en ellos, lo que nos entretendría bastante, y sólo más adelante, cuando justifiquemos el plan experimental a desarrollar, explicaremos el elegido para el caso.

ANALISIS DE CORRELACION.

Ya en el capítulo anterior explicamos lo que entendemos por "correlación" entre las variables de un modelo matemático, concepto que no coincide exactamente con lo que se entiende en la terminología estadística por correlación, aunque tampoco se aparta demasiado. Para nosotros la correlación es un tipo de función matemática que liga diferentes variables de una misma familia, es decir a diferentes maneras de definir cuantitativamente un atributo cualitativo de la realidad investigada. Así pues, en nuestro análisis de correlación buscamos la relación entre variables que siempre son cuantitativas y que, por una "presunción teórica", se considera que dependen del mismo conjunto de factores y que, en consecuencia, deben evolucionar en forma acompasada.

Cuando intentamos conocer la posible variación conjunta de un grupo de variables cuantitativas, y elegimos una de ellas para expresarla en función de las restantes, podemos utilizar las técnicas estadísticas del análisis de regresión que, apoyado en el "método de mínimos cuadrados" nos permite calcular los coeficientes, o parámetros, de formulas tipo matemáticas previamente planteadas, sin que esto signifique algún tipo de relación causal entre unas y otras variables, que debe resolverse a la luz de planteamientos teóricos, sino su mera descripción en términos matemáticos. Al igual que para el diseño de experimentos, la facilidad que supone el uso de programas de cálculo con ordenador, especialmente desarrollados para esta Tesis, será definitiva para nuestro trabajo.

4. 4 RECAPITULACION.

Una vez pasada revisión del estado actual de conocimiento científico en los tres aspectos pertinentes a nuestro trabajo de investigación, estamos en disposición de formular y plantear cuantas hipótesis sean oportunas para avanzar a partir de este estado actual de la cuestión. En concreto hemos visto cuales son las variables más importantes que influyen en el comportamiento mecánico del yeso y cual es la "tendencia" de su influencia. Hemos visto algunos intentos de explicación basados en modelos de "caja negra" e intentos de apertura de esta caja aunque, como en el caso del burgués "gentilhombre" de Molière que se asombraba de hablar en prosa, nunca sus autores se han referido en estos términos a sus investigaciones.

Las explicaciones en términos de caja transparente, apelando a variables de tipo "interno", parten de la consideración del yeso como cuerpo poroso e intentan, a partir de su estructura cristalina, justificar la resistencia mecánica del yeso. Sin embargo las explicaciones en términos de caja negra, combinan las variables directamente controlables por el experimentador, vistas al principio de este capítulo, con las respuestas observables. También hemos visto la variación conjunta, en una misma dirección, de los diferentes tipos de variables (resistencias, durezas, etc.) que pueden definir el comportamiento mecánico del yeso.

Hemos visto, también, que existe un conjunto de técnicas experimentales suficientemente desarrollado como para ser, en principio, inmediata su utilización si se dispone de ellas en laboratorio.

Finalmente, también existen las técnicas matemáticas que permiten analizar los resultados. Estas técnicas, sin embargo y como es natural, obligan a ser tenidas en cuenta desde el primer momento en que uno se

plantea realizar un trabajo complejo de observación. Si el punto de partida no está claro desde el principio tampoco lo puede estar el de llegada y la utilización de técnicas estadísticas, aunque se disfracen, difícilmente podrían ayudarnos a convalidar nuestros resultados. Es primordial comprender que las técnicas estadísticas no se aplican "después de" obtenidos los datos, sino que, desde el primer momento, intervienen en la planificación, diseño y toma de datos experimentales. La estadística poco puede hacer con los datos recogidos sin haberla tenido en cuenta.

En cualquiera de los dos últimos casos es necesario implementar las técnicas generales y adaptarlas y ponerlas a punto para cada caso particular, lo que veremos a su debido tiempo.

III

HIPOTESIS

CAPITULO 5.

GEOMETRIA DE LOS CUERPOS POROSOS.

"Cuando cambian los paradigmas, el mundo mismo cambia con ellos. Guiados por un nuevo paradigma, los científicos adoptan nuevos instrumentos y buscan en lugares nuevos. Lo que es todavía más importante, durante las revoluciones los científicos ven cosas nuevas y diferentes al mirar con instrumentos conocidos y en lugares en los que ya habían buscado antes."

(T.S.Kuhn.: La estructura de las revoluciones científicas. 1.962).

5.0 INTRODUCCION.

Veremos en este capítulo el tratamiento geométrico (teórico) de los cuerpos porosos y de sus variables características más importantes. Como toda geometría, la de los cuerpos porosos se desarrolla a partir de su consideración como cuerpos ideales, es decir teóricos. Aunque existen vías experimentales que nos permiten conocer la pretendida realidad de la materia, estas vías solo se pueden interpretar bajo la óptica de los conceptos teóricos, y no siempre coinciden los resultados, o mediciones experimentales, con las "pre-visiones" teóricas. Re-definiremos la base conceptual que nos permitirá modelizar (imaginar) la realidad física de nuestro material de construcción, considerando como fundamental su característica de cuerpo poroso. Quede claro que trataremos de conceptos teóricos y que su conocimiento experimental va acompañado de problemas específicos en los que solo entraremos ocasionalmente, y veremos como es posible conceptualizar algunas variables geométricas del material y sustituirlas por sus equivalentes desarrolladas a partir de modelos geométricos.

5.1 CARACTERISTICAS GENERALES. PARAMETROS DE ESTADO.

La característica más importante de los materiales de construcción porosos es la cantidad de aire que encierran en su volumen aparente. Esta situación va implícita en su geometría y, según los casos, impide su consideración como cuerpo continuo al estilo tradicionalmente estudiado en teorías como la de la elasticidad.

Las más importantes variables de estado, o propiedades, de los cuerpos porosos utilizados en construcción son aquellas que afectan a su masa, volumen y forma, es decir a sus atributos ponderales y formales.

ATRIBUTOS PONDERALES Y VOLUMETRICOS.

La Masa ("M"), que indica la cantidad de materia contenida en un cuerpo o pieza material, normalmente se refiere a la específica del material sin considerar la correspondiente al aire de los poros u ocluido. Tampoco se suele considerar al agua, líquida o en forma de vapor que pudiera encontrarse en su interior, salvo que se especifique lo contrario. Es un concepto puramente teórico que se deriva de la Teoría de la Gravitación Universal (Newton) y se conoce, normalmente, a través del peso del material ("P").

$$P = g.M \quad (5.1)$$

Donde "g" es la constante universal de gravitación, con valor normalizado de 0'980665 (si el peso se mide en kp) que, en muchos casos y a efectos prácticos, se toma como 1.

En el Volumen de un cuerpo, espacio que ocupa su materia, y en el caso de los cuerpos porosos, con gran cantidad de vacío (aire) en su interior, se distingue entre el volumen sólido ("VS"), o neto, y el volumen ocupado por los poros o volumen poroso ("VP") siendo su suma el volumen total ("VT"). Aunque a veces se designa el volumen sólido como volumen absoluto o volumen real como contraposición al volumen aparente, estas denominaciones no parecen correctas por cuanto el volumen es una característica formal de los cuerpos y, por tanto, aparente "per se". La diferenciación de la parte sólida es, llegando a su límite, convencional y relativa al método experimental usado en su determinación; por ejemplo según la norma UNE 7.050 todo el material que atravesase el tamiz de 0'1 mm se considera sin poros [Camuñas'69,41], mientras que ésta medida es de 0'25 mm en la U.R.S.S. [Gorchakov'81,25]. Análogamente, el volumen poroso no es, estrictamente hablando, volumen vacío, puesto que suele contener agua, en forma líquida o de vapor, cuya cantidad es la humedad del material y, además, el mismo aire es material compuesto por diferentes gases. En una aproximación más detallada también se distingue entre el volumen de poros accesibles desde el exterior, por estar abiertos los poros, y el volumen vacío con aire ocluido encerrado e inaccesible. En definitiva, sin esta última consideración, nosotros estimaremos que:

$$VT = VS + VP \quad (5.2)$$

Es habitual expresar los anteriores conceptos mediante cocientes. Por ejemplo, la densidad, o cantidad de masa por unidad de volumen ("masa específica"), por lo que también se la llama masa volumétrica. Según se refiera la cantidad de masa al volumen sólido o al volumen total del cuerpo, así calificamos a la densidad:

Densidad Neta ("DN"), o densidad "real":

$$DN = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen Sólido}} = \frac{M}{VS} \quad (5.3)$$

Densidad Aparente ("DA"), o densidad en masa:

$$DA = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen Total}} = \frac{M}{VT} \quad (5.4)$$

que, teniendo en cuenta 5.3, podemos escribir:

$$DA = \frac{DN \cdot VS}{VT} \quad (5.5)$$

Un concepto análogo a la densidad es el Peso específico ("PE"), o densidad relativa. El concepto, introducido por Arquímedes, representa la relación entre la densidad del material y la del agua siendo, por tanto, un número adimensional y una proporción. Si tomamos la densidad del agua como la unidad, entonces el número que indica el peso específico coincide con el de la densidad:

$$PE = \frac{\text{Densidad neta}}{\text{Densidad del agua}} = \frac{DN}{1 \text{ (g/cc)}} = DN \text{ (adimensional)} \quad (5.6)$$

Haciendo abstracción de las unidades, y puesto que el volumen de un cuerpo se mide con referencia al agua, el peso específico también puede verse como el peso por unidad de volumen y, al identificar peso con masa, identificar densidad neta con peso específico, es decir:

$$PE = DN = \frac{P}{VS} \quad (5.7)$$

La proporción de volumen de poros en el volumen total del material representa el grado de ocupación de éste por los poros, y se conoce como porosidad ("PR"):

$$PR = \frac{VP}{VT} \quad (5.8)$$

Teniendo en cuenta 5.2, 5.3 y 5.4 podemos escribir:

$$PR = \frac{VT - VS}{VT} = 1 - \frac{VS}{VT} = 1 - \frac{M/DN}{M/DA} = 1 - \frac{DA}{DN} \quad (5.9)$$

Al volumen sólido por unidad de volumen total, o compacidad ("CP"), normalmente se da en tanto por ciento, al igual que la porosidad, siendo dos conceptos complementarios. Teniendo en cuenta lo escrito en 5.6 resulta que:

$$CP = \frac{VS}{VT} = \frac{VT - VP}{VT} = 1 - \frac{VP}{VT} = 1 - PR = \frac{DA}{DN} \quad (5.10)$$

La compacidad también se llama, a veces, coeficiente de densidad. Hablando de estos dos términos, compacidad y porosidad, puede sernos útil entender que la compacidad representa un análogo adimensional de la "densidad de materia" (en el volumen total) del cuerpo, mientras que la porosidad es como una "densidad de poro" en este mismo volumen.