

UCLV



Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas



Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil

Trabajo de Diploma

Titulo: Bases Conceptuales para los estudios diagnósticos de edificaciones de piedra natural.

Autor: ✓ Adam ST.Ville

Tutor : ➤ Msc. Arq. José Armando Chávez Hernández

Asesor: ➤ Dr. Ing. Carlos A. Recarey Morfa

Curso 2007-2008

**The path of the righteous is like the first gleam of dawn,
shining ever brighter till the full light of day.**

Proverbs 4:18

**Mas la senda de los justos es como la luz de la aurora,
Que va en aumento hasta que el día es perfecto.**

Proverbio 4:18

Dedicatoria

A mis padres, hoy cumpla su sueño... es el mío también.

A mi familia en general

A mis amigos

A la memoria de mi papa, por ser inspirador y guía y por su amor en cada instante de mi vida.

A mis Padres, por la incondicionalidad.

Adam St.ville

No caben en una hoja de papel ni el sentimiento ni las palabras para retribuir....

Quero agradecer a Dios por el amor y la fuerza.

A mi tutor Msc. Arq. Jose Amando Chávez por su voluntad incansable y su ayuda profesional.

Al Dr. Ing. Carlos Recarey Morfa por el conocimiento brindado.

A todos los profesores de UCLV.

A Todos mis Amigos, Carlos, y a todos que he olvidado .

A mi Amigo especial Kent.

A mi Novia por todo el amor y apoyo.

Al Comandante Fidel Castro y la Revolucion Cubana .

INDICE

Contenido	Pág
Resumen	1
Summary	2
Introducción.	3
Capítulo I. Antecedentes del conocimiento, generalidades, términos y definiciones.	8
1. Objetivos del capítulo.	8
2. Antecedentes del conocimiento.	13
3. Piedra natural. Generalidades.	13
3.1. Definiciones y clasificación.	15
3.2. Características fundamentales.	
4. Empleo en la construcción de los materiales pétreos. Tipología de muros de cargas.	21 24
5. Factores y mecanismos de alteración de la fábrica pétreo.	25
5.1. Agua.	28
5.2. La contaminación atmosférica.	30
5.2.1. Compuestos de azufre.	31
5.2.2. Compuestos de nitrógeno.	32
5.2.3. Compuestos orgánicos volátiles.	33
5.2.4. Partículas sólidas.	34
5.2.5. Las sales solubles.	36
5.3. Organismos vivos.	37
5.4. Graffitis o pinturas.	38
5.5. Choques y presiones mecánicas.	38
5.6. Antropogénicas.	38
5.7. Variación de temperaturas.	38
5.8. Otros.	38
5.9. Agentes de alteración (intrínsecos).	39
5.9.1. Mineralogía.	39
5.9.2. Textura.	39
5.9.3. Tectónica.	39
6. Conclusiones del capítulo.	40
Capítulo II. – Procedimiento para el diagnóstico patológico de edificaciones construidas de piedra natural.	41
1. Objetivos del Capítulo.	41
2. Enfoque y utilidad de la investigación.	41
3. Procedimiento para el estudio patológico de edificios construidos de piedra natural.	43
3.1. Niveles de Estudio.	43

3.1.1. Nivel 1. Estudio Preliminar.	46
3.1.1.a. Generalidades.	46
3.1.1.b. Habilitación del Expediente de Diagnóstico.	47
3.1.1.c. Estudios propios de esta etapa.	48
3.1.1.d. Elaboración de una Ficha de Antecedentes de la estructura y del medio ambiente (en base a Información Documental y/o Examen Visual).	48
3.1.1.e. Examen Visual de la estructura.	48
3.1.1.f. Elaboración del Plan de Diagnóstico.	49
3.1.1.g. Levantamiento Geodésico y Levantamiento Arquitectónico.	50
3.1.1.h. Auscultación y levantamiento inicial de deterioros y daños.	52
3.1.1.i. Análisis y realización de ensayos rápidos o generales.	53
3.1.1.j. Caracterización preliminar de los materiales.	53
3.1.1.k. Modelación.	54
3.1.1.l. Prediagnóstico.	55
3.1.2. Nivel II. Estudio Detallado.	55
3.1.2.a. Generalidades.	55
3.1.2.b. Proceso de auscultación y levantamiento de deterioros detallado de la edificación.	55
3.1.2.c. Estudio de caracterización físico-mecánica y térmica detallada, de los materiales que conforman la edificación.	65
3.1.2.d. Modelación.	68
3.1.2.e. Prediagnóstico.	69
3.1.3. Nivel III. Estudio Avanzado.	69
3.1.3.a. Instrumentación.	69
3.1.3.b. Modelación.	70
4. Técnicas de experimentación para el estudio de edificaciones de piedra en proceso de restauración.	71
4.1. Resumen.	71
4.2. Introducción.	71
4.3. Las investigaciones preliminares.	72
4.4. El análisis de la estructura y las características mecánicas.	72
4.5. Las técnicas no destructivas.	73
4.6. Las pruebas ligeramente destructivas.	74
4.7. La resonancia magnética nuclear.	75
5. Conclusiones del capítulo.	76

Capítulo III – Modelación y comportamiento estructural de las Edificaciones de Piedra para su restauración.	77
1. Introducción.	77
2. El análisis Estructural moderno y la mampostería.	77
3. La visión general de estrategias para la modelación numérica de estructuras de mampostería.	78
4. Propiedades de la unidad y el mortero.	81
4.1. El modo I. El fallo a tensión.	81
4.2. El modo II. El fallo a cortante.	82
5. Propiedades del material compuesto.	83
5.1. Comportamiento uniaxial de la mampostería.	83
5.2. Comportamiento biaxial de la mampostería.	83
6. Modelos constitutivos para fractura.	86
6.1. Modelos basados en la elasticidad lineal y no lineal.	87
6.2. Modelos basados en la teoría de la plasticidad	87
6.3. Modelos basados en la teoría endocrónica.	88
6.4. Modelos de Daño y fractura.	88
7. Modelos basados en la mecánica clásica.	91
8. Conclusión del capítulo III	97
9. Conclusiones	98
10. Recomendaciones	100
11. Bibliografía	101
12. Anexos.	105
12.1. Anexo I. Características de los diferentes modelos y sugerencias de aplicación de los mismos.	
12.2. Estudio de Casos Internacionales.(Anexos)	
12.3. Estudio de Casos Nacionales (Palacio y Templo).(Anexos)	

Resumen

En el presente trabajo de diploma se hacen una recopilación de los estudios antecedentes del conocimiento acerca de las patologías y tratamiento de los materiales pétreos naturales presente en edificaciones. Se recopilan importantes conocimientos generales de la piedra, así como términos y definiciones. Se adecúa el procedimiento general realizado por los autores José A. y Carlos R. al caso específico de las edificaciones construidas con piedra natural. Se cuenta, en dicho procedimiento, con la descripción de cada uno de los puntos que lo conforman, así como la forma en que se desarrollarán y el nivel de información que deberá alcanzarse en cada uno de ellos. En los puntos de este procedimiento, relacionados con los ensayos, la instrumentación y modelación, se describe como se realizarán, pero además, se detallan los instrumentos y técnicas utilizados y se brindan una serie de recomendaciones para su correcta utilización las que garantizan la obtención de los resultados correctos y así la consecución de un diagnóstico mas acertado. Así mismo se podrá apreciar el desarrollo de modelos numéricos en el análisis estructural de edificios de mampostería y varias formas de representación de las muestras de materiales en los modelos.

Capítulo I. Antecedentes del conocimiento, generalidades, términos y definiciones.

1. Objetivo del Capítulo.

En el presente capítulo se analizan y estudian una gama de bibliografías, para la realización de los estudios antecedentes del conocimiento acerca de las patologías y tratamiento de los materiales pétreos naturales presente en edificaciones, también para acercarnos al estado actual del conocimiento que rodea este antiguo material. Se recopilan importantes conocimientos generales de la piedra, así como términos, definiciones para consolidar las bases de los posteriores capítulos.

2. Antecedentes del conocimiento.

La historia de los edificios construidos por el hombre con piedras natural, se ha visto amenazada desde siempre por problemas más o menos importantes debido a varias consecuencias, que además han ido acelerado los daños en dicho material, como por ejemplo la expansión de las ciudades, la revolución industrial, incorporando un marcado aumento de los niveles de impurezas del aire de gran agresividad. Las edificaciones, no escapan de esta acción de los denominados contaminantes, los que a su vez generan cambios climáticos y otros efectos que inciden en las condiciones que rodean a las construcciones.

El deterioro de los materiales pétreos utilizados en la construcción de edificios históricos no es una cuestión inherente a los tiempos actuales, antes y después de Cristo, algunos autores planteaban la necesidad de asegurar la durabilidad de los materiales. Vitruvio, a raíz de los deterioros existentes en las construcciones romanas, señalaba que: ..."la durabilidad de un material debe ser asegurada cuando... se seleccionen libremente los materiales... destinados a una construcción importante". Plinto, por su parte, indicaba qué materiales eran los más apropiados

para uso ornamental basándose en los niveles de alteración observados en las diferentes edificaciones. León Alberti (1450), orientaba la observación de edificios antiguos para seleccionar los materiales de construcción. "En Inglaterra, país hacia el cual siempre se vuelven los ojos en temas de Urbanismo y Medio Ambiente, hubo que plantearse, ya en 1600, la creación de ordenanzas que controlasen la calidad de los carbones usados en la combustión industrial".

Todas estas preocupaciones denotan la existencia de un latente interés de empíricos e investigadores a lo largo de la historia. En la actualidad y desde el siglo XIX, muchas ramas de la ciencia se aglutinan en torno a este problema. En Londres, en 1939, se propuso una Comisión encargada de estudiar la alteración de los materiales de las Casas del Parlamento". Sin embargo, estos trabajos no se llevaron a cabo de forma sistemática y precisa hasta comienzos del siglo XX, cuando Howe (1910), Watson (1911), Hirschwald (1912) y Scott Russell sentaron las bases del análisis de la alteración y durabilidad de los materiales pétreos naturales empleados en obras arquitectónicas, seguidas con algunas variaciones metodológicas en la actualidad.

Hirschwald (1912), dio inicio al estudio de las características intrínsecas de los materiales pétreos y la relación con su posible alterabilidad, a la vez que planteaba las probables causas que provocaban los daños observados en monumentos alemanes de forma genérica. El incremento de la tasa de deterioro se confirma en el trabajo realizado por Winkler, en la década del setenta, donde se observa que existe un acentuado aumento de los daños a partir de la Revolución Industrial, momento en que comienzan a manifestarse los procesos de deterioro con magnitudes relevantes. En la **figura 1.** se aprecia como a partir de 1870 la curva de comportamiento es exponencial ascendente, mientras que desde el siglo XVII hasta principios del XVIII el comportamiento fue lineal, lo cual corrobora lo planteado anteriormente.

Mejerding, Klein, opinan que este comportamiento es lógico, por la aparición de sustancias nocivas producto de la actividad del hombre, especialmente en centros urbanos e industriales por la combustión masiva de carbón y derivados del petróleo. Dichas emanaciones aceleraron el incremento de las tasas de alteración y degradación de tan importante legado. Existen, además, fenómenos naturales como: la disolución del material por la acción del agua: la fisuración. El agrietamiento y el desprendimiento por la acción del conocido hielo/deshielo; la cristalización de sales en la masa del material o en su superficie, etc. que se producen al extraer y colocar el material en un ambiente con características particulares, en ocasiones muy diferentes al medio natural en que se encontraba.

Las ciudades no se detuvieron en el tiempo. Se fueron transformando al igual que sus microclimas. Las áreas pavimentadas fueron en ascenso. Las antiguas calles por donde circulaban carruajes hoy son destinadas al tráfico de vehículos de diferentes magnitudes, dejando escapar altos contenidos de gases que contaminan los ambientes. Estas variaciones en cada factor medioambiental y su incidencia en el patrimonio de piedra aún queda en análisis aislados y generalizados, donde se nota una falta de integración que ayude a comprender el comportamiento real de los materiales pétreos empleados en las construcciones.

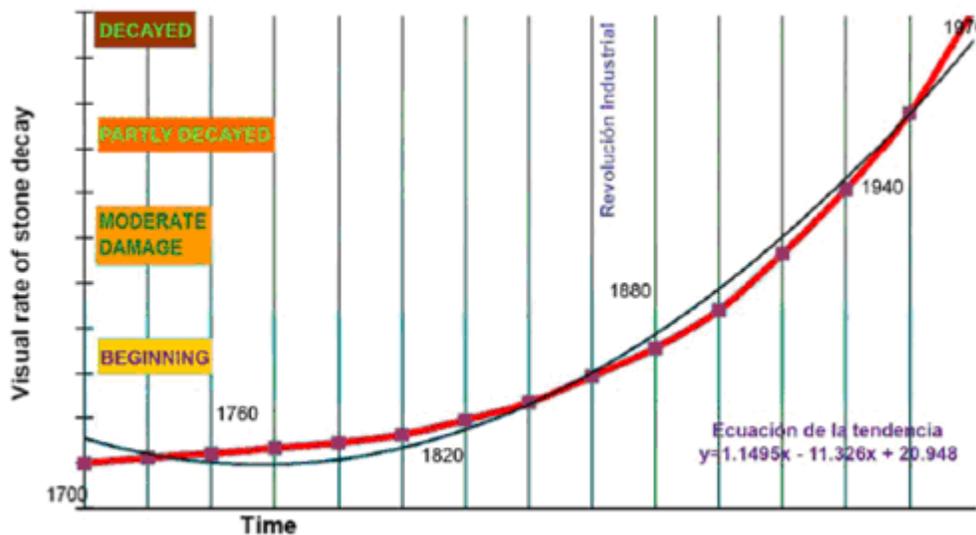


Figura 1
Variación de la tasa de la alteración de las rocas en los últimos tres siglos.

En Europa, las investigaciones se dirigen a conocer las causas y mecanismos que han dado lugar a las formas y niveles de alteración existentes en gran parte de la extensa y valiosa herencia arquitectónica de ese continente. Desde los trabajos de Hirschwald (1912) en Alemania y Schaffer (1932) en Inglaterra, se trató de estudiar y evaluar de forma exhaustiva como eran éstos y en qué medida afectaban a los numerosos tipos de rocas ornamentales utilizadas. Sin embargo, no se analiza la incidencia de los factores medioambientales como un sistema activo que interactúa con el edificio. Los estudios carecen de la participación de grupos multidisciplinarios; donde cada ciencia aporte sus conocimientos y se integren los resultados alcanzados por cada una, en aras de un propósito común: la salvaguarda del patrimonio.

Eventos de diferentes magnitudes se desarrollan en torno a esta problemática, donde especialistas como Cesáreo Sáiz Jiménez; exponen sus conocimientos acerca de la incidencia de los microorganismos en las rocas monumentales. Una fuerte actividad intelectual se desarrolla, la cual se refleja en la edición de libros y revistas, donde expertos como Eduardo Sebastián Pardo, ponen de manifiesto su larga experiencia en el campo de los deterioros de los materiales pétreos y en el uso de las técnicas resolutivas para el diagnóstico de la piedra.

Metodologías para el análisis de los deterioros son propuestas por María de Gracia, Mónica Añorbe y María Esbert et al.: en las que se plantea claramente los pasos que se deben seguir en el diagnóstico y análisis de los tratamientos. La acción del medio se resume a una recopilación de los datos climáticos y de la calidad del aire a escala del territorio, sin vínculos e interacción.

Rodríguez-Navarro et al., Hanumantha et al., Gauri et al., Suzukit et al., realizan estudios dirigidos a conocer no sólo como afectan algunos de los componentes del

medio y cómo influyen en las reacciones que se producen en las rocas, sino también los comportamientos de algunos tipos de rocas tratados en ambientes simulados y las formas para controlar las emanaciones de gases contaminantes como el dióxido de azufre. Estas investigaciones aportan conocimientos de gran interés para los que se dedican al estudio del comportamiento de los materiales pétreos empleados en los monumentos históricos.

En Cuba se han realizado trabajos de investigación relacionados con las patologías de los materiales pétreos naturales en diferentes edificaciones. El Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría realizó el diagnóstico de la Fortaleza de San Carlos de la Cabaña, dirigido por la autora Lucrecia donde se determinaron las causas de los deterioros presentes en la estructura mural del monumento. Esta investigación se extendió a las salas del Museo de los Grandes Viajes en el Castillo de los Tres Santos Reyes del Morro y al restaurante La Divina Pastora. Su carácter multidisciplinar, es uno de los aspectos que lo distingue, donde las diferentes disciplinas analizaron el problema y se integraron en su análisis. La metodología aplicada para el diagnóstico constituyó un logro científico y fue premiada en el XII Forum de Ciencia y Técnica a escala nacional. A pesar de relacionar aspectos como las características del medio que rodea la edificación y los estudios necesarios para determinar las causas de los daños, no se pudieron cumplir todas las etapas que fueron propuestas en la metodología, dentro de las que se encontraba el estudio de los tratamientos.

Por su parte, los trabajos de doctorado nacionales no han estado dirigidos al estudio de los procesos de alteración de las rocas como material de construcción y a la determinación de los factores que le dan origen. Un método ponderativo para la evaluación del deterioro causado por contaminación fue planteado en la tesis de Diana Aviles el cual permite la evaluación sistémica de la degradación en fachadas externas. A pesar de su rigor y de lo novedosa que resulta, esta tesis no tiene en cuenta la importante relación existente entre la morfología de los deterioros y la

naturaleza origen del material donde se presentan los mismos, por lo que el método da resultados limitados en Centros Históricos como el de La Habana, donde la heterogeneidad viene dada también, por los disímiles materiales que son empleados en las fachadas de los monumentos y por los microambientes que se crean, una tesis doctoral que tiene muy en cuenta al estudiar las afectaciones de la piedra natural el medio ambiente y la edificación con sus rasgos propio es la tesis doctoral de Lucrecia que diagnostica además entre otras La catedral de la Habana.

3 Piedra natural, generalidades.

3.1 Definición y clasificación.

El concepto de “piedra natural”, o abreviadamente “piedra”, en el ámbito de los materiales de la construcción, se aplica a las rocas presentes en la corteza terrestre, después de su extracción y elaboración por la mano del hombre; en consecuencia se encuentra incluido dentro del termino “material rocoso” o “roca”.

Las rocas desde el punto de vista geológico, se definen como agregados de mineral formados por procesos naturales, ampliamente representados en la corteza terrestre. Los distintos tipos de rocas son consecuencia de los diferentes procesos, endógenosexógenos, los cuales condicionan su composición, características y propiedades.

Bajo el término de piedra natural se agrupa un conjunto de rocas que tienen marcada diferencias geológicas entre si. Por su parte, el comercio ha consagrado un vocabulario, que está en muchos aspectos, alejado de las clasificaciones científicas, lo que da lugar frecuentemente a descripciones confusa de los productos (Tabla.1).

COMERCIAL		CIENTIFICA				
		COMPOSICIONAL	GENETICA			
			Rocas Igneas		Rocas Metamórficas	Rocas Sedimentarias
			Plutónicas	Volcánica		
Granito	Granito Granitoide	Rocas Silíceas.	Granito Adamellita Granodiorita Pegmetina		Gneis	
	Granito Negro		Grabo, Monzonita, Tonalita, Dolerita, Peridotita			
	Basalto		Andesita Basalto			
Pizarra					Esquistos, Filitas, Pizarras	
Mármol	Rocas Verdes Calizas	Rocas Carbonatadas			Serpentinitas Anfibolitas	
	Mármoles Grupo del Travertino				Mármol Dolomítico	Calizas, Dolomías, Calizas Marmóreas
	Arenisca			Ignimbritas		Arenisca
	Alabastro				Cuarcitas	

Tabla 1 Clasificación de rocas según terminos comerciales y científicos.

Bajo el nombre de piedra natural se incluyen diferentes productos:

Las rocas ornamentales, cuya extracción se realiza en bloques grandes, generalmente de varios metros cúbicos que, a continuación, se procesan industrialmente por exfoliado, serrado, pulido, abujardado y otros tratamientos superficiales. El resultado son productos normalizados, tales como plaquetas, tableros, escalones y zócalos.

Las piedras de cantería, que son aquellas rocas que se utilizan en construcción, generalmente rústicas o bien monumental, que no precisa ser extraída en bloques

de gran tamaño y cuyo procesamiento posterior suele ser manual o escasamente mecanizado.

Sillería, mampostería y piedra de talla, se caracterizan por ser tipos rocosos textualmente homogéneos y cuyo tamaño de grano, por lo general fino, permite una labra manual relativamente fácil. Los tipos litológicos más frecuentes son mármoles, calizas, areniscas y granito de grano fino.

Solados y recubrimientos, se trata de rocas anisótropas que se presentan planos de exfoliación, a partir de los cuales es posible obtener piezas tubulares por procedimiento de hienda manual. Pizarras, gneíses, areniscas y calizas finalmente laminadas son algunas de las tipologías más comunes.

3.2 Características fundamentales.

Petrografía.

Las características petrográficas de los materiales rocosos más directamente relacionados con sus comportamientos, especialmente en su empleo como piedras de edificación, se recogen de forma esquemáticas en la Tabla 2.

Tabla 3. Características petrográficas de los materiales rocosos	
Textura	<p>Relaciones especiales entre los componentes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fase aglomerante <ul style="list-style-type: none"> - Naturaleza (matriz, cemento) - Porcentaje - Anisotropías y heterogeneidades - Granos y cristales: forma, tamaño, orientación <p>Espacios vacíos (huecos)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Poros: <ul style="list-style-type: none"> - Cantidad (volumen) - Localización: tipos - Tamaño y forma - Conectividad - Fisuras: <ul style="list-style-type: none"> - "Densidad" (volumen) - Localización: tipos - Tamaño (longitud, espesor) - Conectividad
Mineralogía	<ul style="list-style-type: none"> - Naturaleza de las especies minerales - Porcentaje en volumen de cada especie mineral - Grado de alteración de los minerales
Composición química	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis químico cualitativo y cuantitativo

Tabla 2. Tabla de características petrográficas de materiales rocosos.

Textura: sistema poroso.

La disposición y relación tridimensional (textura) que presentan los componentes de las rocas (minerales y espacios vacíos), son una de sus características distintivas fundamentales. A pesar de su variedad textural, pueden establecerse dos grandes modelos texturales (**Tabla 3**).

- Texturas cristalinas. Constituidas por minerales bien cristalizados, de formas más o menos poliédricas en contacto directo, formando un mosaico. Son propias de las ígneas y metamórficas y se denominan "cristalinas".

- Texturas cementadas. Formadas por granos minerales unidos por una fase aglomerante. La fase aglomerante puede ser cemento (material cristalino precipitado) o matriz (material fino depositado). Pertenecen a este grupo la mayoría de las rocas sedimentarias y se denominan "cementadas".

Rocas cristalinas	Textura cristalina	Granos minerales en contacto unos con otros	Variedades masivas	Granito
	Medios fisurados		Variedades foliadas	Marmoles
Rocas cementadas	Textura detrítica	Matriz o cemento entre los granos minerales	Arenisca, calizas dolomías, conglomerados.	
	Medios porosos			

Tabla 3. Tabla de clasificación textural de las rocas

Un aspecto fundamental de la textura es la existencia de huecos o espacios vacíos, donde se sitúan fases fluidas (aire, agua). El conjunto de estos huecos o espacios vacíos constituye la porosidad, condicionando de forma mayoritaria sus propiedades físicas y su comportamiento químico, en consecuencia influye notablemente en su calidad y durabilidad.

Mineralogía.

La mayor parte de las rocas presentan un número reducido de especies minerales. De esos minerales, es aún menor el número de los que aparecen en porcentajes apreciables (superiores al 5%). Dichos minerales se denominan “minerales petrográficos”, es decir, formadores de rocas. Los más abundantes son los siguientes.

- Cuarzo, feldespato y mica. Son los minerales propios de las rocas de naturaleza silícea (granito, arenisca, pizarras).
- Calcita y dolomita. Son los minerales esenciales, y con frecuencia exclusivos, de las rocas carbonatadas (mármoles, calizas y dolomías).

La presencia de determinados minerales, a pesar de que su porcentaje sea muy pequeño (minerales arcillosos, óxido de hierro, yeso, sales solubles, etc.), pueden resultar muy significativo en cuanto al comportamiento mostrado por ciertas rocas.

Composición química.

Unos pocos elementos químicos constituyen, de forma mayoritaria, las rocas de la corteza terrestre, son los siguientes: O, Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na y K. de acuerdo con la abundancia de los citados elementos, puede establecerse dos grandes grupos de rocas:

- Rocas silíceas. Formadas mayoritariamente por Si con porcentajes menores, y en general variables, de Al, Fe, Ca, Mg, Na, K. están compuestas por sílice, junto a silicatos de muy diversos tipos. Dentro de este grupo las piedras más conocidas son los granitos, las areniscas y las pizarras.

- Rocas carbonatadas. Constituidas por C, Ca y a veces Mg, sin ningún otro elemento en proporción significativa. Están compuestas mayoritariamente por carbonatos. Los presentes más conocidos en este grupo son los mármoles, las calizas y las dolomías.

Cuando dichos materiales son sometidos a procesos de tratamiento, con el fin de mejorar su respuesta a un determinado uso, es conveniente conocer la compatibilidad y adecuación que existe entre la naturaleza química de la piedra y la del producto de tratamiento. Las piedras más utilizadas en la construcción son el granito, la caliza, las dolomías y las areniscas, sus características se comentan a continuación:

Granito: Roca eruptiva, es un agregado de cristales de cuarzo, feldespato y mica, gran resistencia a la compresión. 1500 kg/cm^2 en promedio. Tiene gran dureza, del 6 al 8 de la escala de Mohs, por lo que es de difícil labra, pero admite pulimento y

ofrece enorme resistencia al desgaste. El color, que depende del feldespato, puede ser gris, rosado o verdoso y la estructura cristalina es de grano fino o mediano; cuando son grandes los cristales de feldespato, la atmósfera lo descompone fácilmente (caolinización). El granito halla aplicación para darlos de apoyo muy cargados, para aceras de zócalo, columnas, peldaños de escalinatas y adoquines. El cascajo de granito se emplea mucho para el recebo de firmes, y constituye un árido excelente para hormigones.

Caliza: Roca sedimentaria, carbonato cálcico mezclado con diferentes sustancias. Estructura compacta o cristalina. En general, las calizas resisten menos a la atmósfera que el granito y la pizarra (no obstante, algunas duran mucho) y el fuego las calcina, formando cal viva con desprendimiento de anhídrido carbónico. Se disuelven con efervescencia tumultuosa en los ácidos y también son atacadas por aguas carbónicas. Según la composición, el peso específico oscila entre 1 5 y 3,0. La resistencia a la compresión varía entre 500 y 1500 Kg/cm². No puede servir en hogares ni bajo el agua, como que admite pulimento relativamente fácil, halla aplicación frecuente como revestimiento de paramentos. Pero la aplicación principal de la caliza es en la fabricación de morteros, una vez calcinada. Entre las variedades numerosas, citaremos:

Mármol: Agregado cristalino compacto susceptible de buen pulimento y que casi siempre va acompañado de elementos minerales y restos orgánicos. El blanco, sacaroideo y muy homogéneo, se llama estatuario, el integrado por fragmentos irregulares fuertemente trabados por una pasta uniforme, brecha, el que contiene multitud de fragmentos de conchas y otros fósiles, lumaquela, el que lleva pajuelas de mica, cipolino, el que encierra nódulos arcillosos, griotte, etc.

Toba caliza: Procedente de la precipitación de carbonato cálcico por aguas cargadas de ácido carbónico, en forma compacta (estalactitas) o esponjosa

(travertino). En este caso, por su ligereza, es adecuada para tabiques, bóvedas, cornisas y para acerar paramentos exteriores e interiores.

Creta: Caliza blanca, friable, formada por un agregado de partículas de protozoos y otros seres inferiores. Las más veces resiste a la atmósfera.

Dolomía: Roca sedimentaria, carbonato doble de cal y de magnesia. Resiste a los ácidos mejor que la caliza. Su color es variable y, si es de grano mediano, constituye una piedra de construcción muy duradera. Resistencia a la compresión = 500 a 1500 kg/cm². Aplicación principal para la fabricación de cemento Pórtland.

Arenisca: Rocas de origen sedimentario, se compone de granos de cuarzo de diferentes formas trabados por un cemento silíceo, calcáreo, margoso o arcilloso, pero aún es más variable la resistencia a la compresión, que depende principalmente de la naturaleza del aglomerante; oscila entre 300 y 1500 kg/cm², y en algunos casos puede llegar, como en las grauvacas hasta 3000 kg/cm² considerando que la carga actúa normalmente al lecho de cantera. La arenisca absorbe mucha agua, a veces admite un 25 %. Si el aglutinante es arcilloso, la arenisca es hostigada por la atmósfera pero con cemento cuarzoso o calizo constituye una piedra de construcción excelente que se suele admitir fácil labra sobre todo recién arrancada de la cantera.

El tipo de roca más utilizado en la cantería en Cuba es la piedra caliza, donde las variedades o tipos más conocidos son la piedra de Jaimanitas y la piedra de Capellanía. Ambas toman su nombre de antiguas canteras o yacimientos de extracción de La Habana, junto a las cuales existieron tradicionales y muy conocidos talleres de cantería.

Hoy en día, aunque no sean extraídas de los lugares que les dieron origen, se sigue distinguiendo entre ambas denominaciones, aludiendo más bien a su laborabilidad y

aspecto externo, ya que la piedra de Jaimanitas es más blanda y acepta terminaciones más lisas, con apariencia estética más fina y ornamental, mientras que la piedra de Capellanía es de mucho mayor dureza, con lo cual su terminación usualmente es más rústica, lo cual le confiere también su propia particularidad para trabajos de terminación y ornamento.

4. Empleo en la construcción de los materiales pétreos. Tipología de muros de cargas.

La piedra en la construcción de edificaciones se emplea de diferentes formas, siendo la más común el empleo de las rocas trituradas que componen los áridos para la composición de los hormigones. La piedra se utiliza como elemento componente de la edificación, es decir, como elementos estructurales o como elementos de terminación exterior e interior.

Por sus propias propiedades mecánicas y capacidades estructurales, la piedra se ha utilizado fundamentalmente con función estructural en los elementos portantes verticales (columnas y muros); en arcos dovelados, sobre todo aquellos cuyos esfuerzos básicos sean de compresión, en determinados tipos de bóvedas, siempre que trabajen con un régimen de esfuerzos a compresión y en cimientos. En las construcciones antiguas también se han empleado elementos pétreos naturales en cornisas, balcones y aleros, donde han ejercido también determinadas funciones estructurales. Con función de terminación, la piedra se emplea profusamente en revestimientos de pisos, muros interiores y exteriores (enchapes, zócalos) y en otros usos ornamentales y de complementación.

En los muros de piedra, ésta se ha empleado aplicando diferentes técnicas de construcción; como por ejemplo, la mampostería, la sillería y la cantería.

Mampostería: Cuando las piezas carecen totalmente de labra, o su estereotipo es irregular, se llaman mampuesto, y al muro resultante mampostería. Análogamente al caso anterior, la colocación puede ser a hueso, mampostería en seco, o recibido los mampuesto con mortero. Podemos considerar los siguientes tipos:

Mampostería ordinaria: Cuando los mampuestos se colocan tal como llegan del troceado de cantera sin preparación o principio de labra alguno. Dada la desigualdad de las piezas, tienden a bascular fácilmente, por lo que se hace necesario la colocación de pequeñas lajas o restos de piedra que se llaman ripios, con el fin de acuñarlas. A este acuñado se le denomina enripiado (**Figura. 2**).

Mampostería concertada: Los mampuestos siguen siendo irregulares pero ya disponen de un principio de labra, a fin de tanto las caras de paramento visto como las de juntas se aproximen a superficies planas (**Figura.3**).

Mampostería careada: Cuando en el caso anterior se rellenan las juntas con mortero mas fino para dar una apariencia de espesor constante. En este caso se admite el enripiado también pero siempre que no se manifiesten en los paramentos vistos (**Figura. 4**).

Mampostería a hilada: Los mampuestos tiene la forma aproximada de paralelepípedos trirretángulados. Podríamos decir que se trata de una fábrica intermedia entre la sillería y la mampostería (**Figura. 5**).

Mampostería ciclópea: De muy escasa aplicación, solo la encontramos en construcciones muy antiguas. Se caracteriza por la enorme dimensión de los mampuestos y porque en los vértices se suele enlazar mas de tres piezas sin junta a nivel de plomadas. Generalmente esta mampostería se coloca a hueso.

Mampostería de canto rodado: Dado el mal ajuste de los mampuestos en este caso, su uso en la actualidad queda casi reducido a parámetros de escasa altura (1 ó 2 plantas en viviendas unifamiliares) y resistencia, como motivo ornamental de aspecto rústico. Su mayor problema es que son susceptibles de grandes asentamientos de obra nueva dada la cantidad de mortero que entra a sus juntas (**Figura.6**).



Figura 2
Mampostería ordinaria

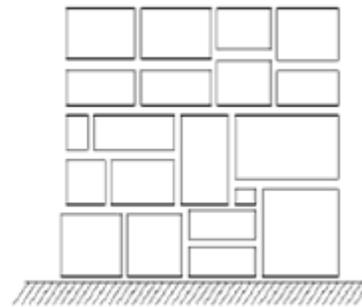


Figura 3
Mampostería concertada



Figura 4
Mampostería careada

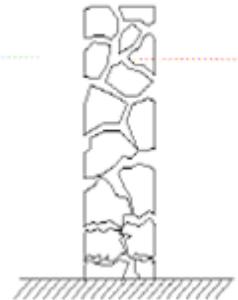


Figura 5
Mampostería a hilada



Figura 6
Mampostería ordinaria

Sillería: Cuando las piezas de piedra natural disponen de una estereotomía muy regular, se llaman sillares, y el muro es un muro de sillería. La colocación de los sillares puede ser a hueso o con mortero. Una variante de estos muros, son los denominados de **cantería**, donde las piezas de piedra son los “cantos”, elementos de secciones más esbeltas que los sillares. En función del acabado de la cara vista de los sillares podemos distinguir:

Capítulo I. Antecedentes del conocimiento, generalidades, términos y definiciones.

Sillería normal: Cuando se somete la cara vista toda ella a una labra fina mediante la bujarda (**Figura. 7 y 8**).

Sillería rústica: Cuando la labra fina sólo afecta a los bordes próximos a las llagas, quedando un rectángulo o zona central más rústica y resaltada.

Sillería almohadillada: De modo análogo al anterior pero con la zona central en forma de almohadilla labrada en fino.

En Cuba las dimensiones más frecuentes en que se puede encontrar este tipo de piedra son:

- 80 x 60 x 40cm.
- 60 x 60 x 40cm.

La unión entre los bloques se realizaba con mortero de arena y cal generalmente.



Figura 7. Sillería normal.

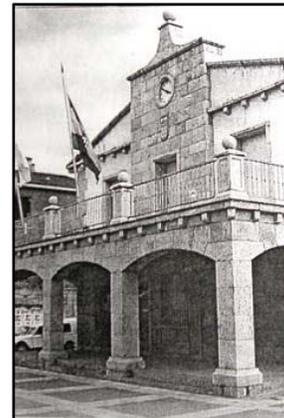


Figura 8. Sillería normal.

5. Factores y mecanismos de alteración de la fábrica pétre.

Los agentes que contribuyen en mayor medida a la alteración de las piedras de los monumentos, y a la aparición de las formas de deterioro, son: *el agua, contaminantes atmosféricos, las sales solubles y los organismos vivos.*

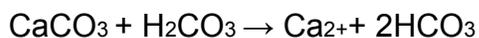
5.1 - Agua.

El *agua*, en sus distintos estados o fases (líquido, vapor y hielo), es el más importante agente de alteración. Es un agente polivalente dados los cambios de fase que puede experimentar. Actúa también como vehículo de transporte de otras sustancias tales como las sales solubles, los contaminantes atmosféricos y los organismos vivos, lo que eleva significativamente su papel en los procesos de degradación. Interviene en la mayoría de los procesos de alteración físicos, químicos y biológicos de la piedra.

La humedad de las piedras en los edificios procede principalmente de la atmósfera (condensación), de las aguas de lluvia (absorción) y del suelo (ascensión capilar). El contenido en humedad de una piedra está regulado por su capacidad de absorción y de evaporación (deseccación). En el seno de las piedras porosas el agua se distribuye en función de distintos niveles de imbibición, los cuales están estrechamente relacionados con la tortuosidad del sistema poroso.

Atendiendo a su comportamiento, pueden diferenciarse diversos tipos de agua en las piedras: agua de constitución o hidratación; agua ordenada o de adsorción; agua capilar, etc. Su acción se manifiesta a través de diversas reacciones químicas con el sustrato pétreo (disolución, hidrólisis, hidratación, oxidación reducción, etc.).

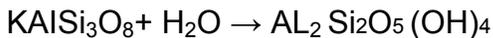
La disolución afecta mayoritariamente a piedras de naturaleza carbonatada (calizas, dolmitas, mármoles). Mediante dicha reacción (carbonatación) calcita es disuelta por el agua, en presencia de dióxido de carbono (ácido carbónico), dando lugar a iones bicarbonato y calcio, que pasan a la solución acuosa:



La dolomita (carbonato cálcico-magnésico) se disuelve más lentamente que la calcita. Si el equilibrio en la anterior reacción se desplaza de derecha a izquierda se obtiene la precipitación de calcita. La presencia de CO₂ en la solución acuosa es clave en el desplazamiento de la reacción en un sentido u otro. La capacidad de

disolución del agua aumenta con el incremento de la cantidad de dióxido de carbono disuelto en ella, ya que aumenta su acidez (disminuye el pH). Este hecho se ve también condicionado por la temperatura; al aumentar ésta disminuye la capacidad de disolución del CO₂ en agua. La humedad ambiental contribuye asimismo a la disolución de los carbonatos, ya que la acumulación de pequeñas gotitas de agua en la superficie de la piedra, por condensación del vapor de agua circundante, favorece las reacciones de descomposición mineral. En el caso de ambientes contaminados, el incremento relativo de determinados gases (p. ej. óxidos de azufre y de nitrógeno) tiende a disminuir el pH de las aguas pluviales (lluvia ácida) y, en consecuencia, a aumentar la agresividad de la misma.

Las reacciones de hidrólisis afectan fundamentalmente a componentes silicatados (p.ej. feldespatos), por lo que son de especial relevancia en las rocas graníticas. La hidrólisis conduce en última instancia a la formación de minerales arcillosos, más estables en las condiciones ambientales de la superficie terrestre. Así, por ejemplo, el feldespato potásico se convierte en caolinita:



La hidratación consiste en la incorporación de moléculas de agua por parte de un mineral. Este sería el caso de la anhidrita (sulfato cálcico) cuando se transforma en yeso (sulfato cálcico dihidratado). Las reacciones de oxidación y reducción afectan sobre todo a componentes férricos. El hierro es oxidado por el oxígeno libre del aire, dando lugar a óxido de hierro. El azufre (en los sulfuras) se oxida generalmente a sulfato. En ambos casos el agua acelera los procesos de oxidación. En la Tabla. 4 se resumen los principales procesos de alteración en los que interviene el agua, los minerales que afecta y daños que genera.

Agua natural: lleva habitualmente CO₂ en disolución				Aumento importancia daños generados
Acción química	Disolución Carbonatación Hidrólisis Hidratación Oxidación	afecta a afecta a afecta a afecta a	minerales varios carbonatados silicatos ciertos minerales compuesto de Fe	
Acción física	Agua + cambios de fase			
	Ciclos	<ul style="list-style-type: none"> — humedad/sequedad — hielo/deshielo 		
	Agua + sales solubles			
	Ciclos	<ul style="list-style-type: none"> — cristalización de sales — hidratación de sales 		

Tabla 4. Procesos de alteración relacionados con el agua.

Acción del hielo: El hielo es un agente de alteración física notable. La transformación total o parcial del hielo del agua contenida en el interior de poros y fisuras de la piedra supone un incremento de volumen de alrededor 9% lo que genera tensiones internas en las paredes de estos huecos. A esto habrá que añadir la presión hidráulica generada durante la congelación del agua. Estas tensiones provocan nuevas fisuras que finalmente conducen, en repetidos ciclos de hielo-deshielo, a la exfoliación, fisuración y eventual rotura del material (crioclastia).

Pese a la complejidad de los mecanismos implicados en la acción del hielo (gelivación), el conocimiento de la naturaleza heladiza o no de determinados materiales rocosos es de capital importancia a la hora de valorar su utilización en determinados climas extremados, o en según que partes del edificio.

La heladicidad o vulnerabilidad de un tipo dado de piedra a la acción del hielo depende, fundamentalmente, de su porosidad, de la distribución y tamaño de los

Capítulo I. Antecedentes del conocimiento, generalidades, términos y definiciones.

poros y del grado de conexión y continuidad de los mismos (tortuosidad). Las presiones de cristalización son inversamente proporcionales al tamaño de los poros y fisuras. Así, las rocas con grandes poros son generalmente menos sensibles a las heladas que las que contienen poros pequeños.

Según la mayoría de autores, el tamaño crítico de poro se sitúa en torno a las 5-7 micras. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que para que los efectos del hielo se dejen sentir de forma notoria, la piedra debe tener una porosidad notable (superior al 5%) así como un coeficiente de Hirschwald (grado de saturación de los poros en agua) superior al 85%.

La acción del agua en la piedra de edificación está controlada en cada caso, por una serie de características específicas que se resumen en la Tabla 5.

Propias del edificio	Subsuelo (nivel freático)
	Diseño y forma arquitectónica
Propias de la piedra	Características de los muros
	Orientación
	Lugar de emplazamiento
	Tipos de piedra
	Naturaleza químico mineralógico
	Textura- sistemas porosos
	Propiedades físicas
	Acabados superficiales
	Modo colocación en el edificio (a hoja, contrahoja)

Tabla 5. Características que controlan la acción del agua en las piedras de los edificios.

5.2 - La contaminación atmosférica.

En áreas urbanas y zonas industrializadas, los efectos de *la contaminación atmosférica* sobre el deterioro de la piedra son particularmente evidentes. Los contaminantes atmosféricos (sólidos, líquidos y gaseosos) reaccionan con los

Capítulo I. Antecedentes del conocimiento, generalidades, términos y definiciones.

componentes de la piedra, dando lugar a diversas formas de alteración (eflorescencias, pátinas, costras) y a la degradación del material.

La mayoría de contaminantes presentes en el aire provienen de fuentes de antropogénicas, concretamente de la combustión de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural), sin olvidar la parte correspondiente a causas naturales (emanaciones volcánicas incendios forestales, putrefacción de la materia orgánica, aerosoles marinos...), más importante en algunos casos.

Entre los principales tipos de contaminantes que influyen, directa o indirectamente, en el deterioro de los materiales pétreos se encuentran: compuestos de azufre y de nitrógeno; óxidos de carbono; cloruros y fluoruros; compuestos orgánicos volátiles y partículas sólidas. En la Tabla 6. se resumen las principales fuentes y tipos de contaminantes atmosféricos.

Fuentes	Actividad Humana	(combustión de combustibles sólidos y líquidos)
	Actividad natural	(volcanes, incendios forestales, descomposición de materia orgánica...)
Contaminación Atmosférica	líquidos sólidos, gases o mezclas:	<ul style="list-style-type: none">-Compuestos de azufre (SO_2, SO_3, SH_2)-Compuestos de nitrógeno (NO_x, NH_3)-Óxido de carbono (CO, CO_2)-Cloruros y fluoruros (HCl, HF)-Compuestos orgánicos volátiles (hidrocarburos)-Partículas sólidas

Tabla 6. Fuente y contaminación atmosféricos.

5.2.1- Compuestos de azufre

La presencia de cantidades relativamente elevadas de dióxido de azufre en el aire de núcleos urbanos e industriales (y también, aunque en menor medida, de SH₂), procedentes en su mayoría de la ignición de combustibles fósiles, es uno de los factores más negativos respecto a la alteración de las piedras de los monumentos. Una vez en el aire el SO₂ se oxida rápidamente a SO₃, y, en combinación con la humedad del ambiente, da lugar a la aparición de sulfatos dañinos para la piedra (p. ej. yeso). Si bien los productos iniciales y finales de dicha reacción son bien conocidos, los mecanismos de detalle son complejos. En el caso de una piedra de naturaleza calcárea la reacción a grandes rasgos sería:



La formación de yeso comporta un notable incremento de volumen, creando costras sulfatadas y favoreciendo las descamaciones, desplazaciones y otras formas de deterioro. En las rocas graníticas el ataque ácido favorece, además, la alteración de los silicatos.

La acción del SO₂ en la piedra se puede realizar a través de dos vías principales: seca y húmeda (**Figura. 9**). En el primer caso (deposición seca) el SO₂ alcanza la superficie de la piedra en forma gaseosa. En contacto con el carbonato cálcico reacciona dando lugar a sulfito cálcico, el cual, en presencia de agua y catalizadores, se convierte en sulfato.

En la deposición húmeda, la más habitual, la oxidación del SO₂ tiene lugar bien en la atmósfera (disolviéndose en las gotas de agua de nubes y nieblas): o bien en la misma superficie de la piedra (durante la condensación de vapor de agua). En ambos casos el ataque a la piedra se realiza a través del ácido sulfúrico diluido.

5.2.2- Compuestos de nitrógeno.

Los principales son los óxidos, procedentes en su mayoría de los fertilizantes nitrogenados, de los combustibles de los automóviles y de ciertos procesos bioquímicos. El mayor peligro para las piedras reside en la conversión fotoquímica de los NO_x en ácidos nítricos, sobre todos en los "smogs".

Las piedras carbonatadas son especialmente sensibles a la acción de los contaminantes nitrogenados. Un efecto adicional de los óxidos de nitrógeno es su papel como catalizador de la reacción: $\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3$. Otro contaminante nitrogenado, el amoníaco (NH_3) no ejerce directamente una gran acción destructiva sobre las piedras, pero si indirectamente, al favorecer la oxidación del SO_2 .

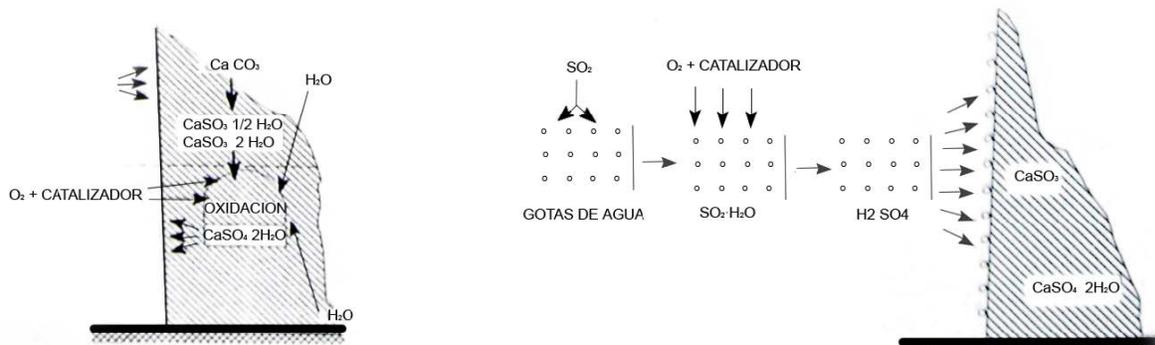


Figura. 9 - Esquema de deposición, seca y húmeda, del dióxido de azufre sobre la piedra.

Óxidos de carbono El dióxido de carbono es un componente natural de la atmósfera cuantitativamente variable. Su concentración media normal (alrededor de 340 ppm) ha crecido sensiblemente en los últimos decenios, sobre todo en las áreas urbanas (hasta un 0,3%), debido principalmente a la quema de combustibles fósiles. Sus efectos negativos se concentran en los materiales calcáreos, al disolver, en presencia de agua, los carbonatos constituyentes de dichas rocas.

La mayor parte (75%) del monóxido de carbono existente en el aire se debe a causas

naturales (emanaciones volcánicas, descomposición de la clorofila, acciones bacterianas...) y, en menor grado, a combustiones incompletas. El CO no supone, en principio, un grave problema para las piedras; pero se oxida normalmente a CO₂.

También puede actuar como catalizador en las reacciones de oxidación del SO₂. *Cloruros y fluoruros* Los productos clorurados de la atmósfera proceden, principalmente, de fuentes naturales (mares, volcanes, desiertos...), así como de la actividad humana (plantas de fabricación de HCl, elaboración de papel y plásticos con cloro). Su acción se materializa, por lo general, a través del ácido clorhídrico al atacar calizas, mármoles y areniscas con cemento calcáreo. El HCl disuelve el material carbonatado formando sales higroscópicas favorecedoras de deterioros importantes (alveolización y desagregación arenosa, entre otros).

En cuanto a los compuestos fluorados, su acción agresiva es grande, pero su presencia en la atmósfera no suele ser elevada, por lo que su incidencia sobre las piedras es relativamente escasa. Proviene, sobre todo, de ciertas actividades industriales (fabricación del aluminio, acero, vidrio, fertilizantes...). El F₂ es muy reactivo y se convierte fácilmente en HF. Ataca a las calizas generando fluoruro cálcico (de volumen menor que la calcita, por lo que tiende a aumentar la porosidad del material). También afecta a las rocas silíceas, dando lugar a nuevas fases minerales.

5.2.3 - Compuestos orgánicos volátiles

Dentro de esta categoría se encuentran los hidrocarburos de diferentes tipos (alcanos, alquenos, aromáticos...), provenientes mayoritariamente de combustibles de automoción (transportes). Los mayores niveles de inmisión se alcanzan, pues, en las áreas urbanas. Los COV contribuyen al enmugrecimiento de las fachadas y de sus costras y pátinas negras.

5.2.4 - Partículas sólidas

En el aire existen diferentes partículas sólidas (polvo, hollín, cenizas volantes, aerosoles salinos, etc.) en diferentes concentraciones. Su tamaño oscila por lo general entre 0,001 y 100 micras de diámetro. Su composición es muy variable (metálicas, carbonosas, sulfuradas, carbonatadas...), al igual que sus formas (esféricas, irregulares, huecas, macizas, horadadas...)

La sedimentación de material particulado en la superficie de las piedras colabora al ensuciamiento de las mismas. Además, debido a su gran superficie específica tienden a aumentar la humedad de las piedras, absorbiendo vapor de agua de la atmósfera y facilitando las reacciones piedra-contaminaciones.

En la Tabla 7. se recogen algunos de los factores exógenos relacionados con la acción de los contaminantes en los edificios. La incidencia de la contaminación en el deterioro de la piedra viene condicionado, además, por otros aspectos, tales como: la naturaleza y concentración de los contaminantes presentes en el ambiente y las características intrínsecas de cada tipo de piedra.

Los productos secundarios más frecuentes, generados en las piedras por la acción de la contaminación, suelen ser sales solubles, entre las que se destacan los sulfatos, los nitratos y los cloruros.

<p>Mineralógico Velocidad y dirección del viento Humedad relativa Temperatura ambiente Gradiente vertical de temperaturas Nieblas Lluvias</p>	condicionan	concentración concentración depósito de contaminantes
<p>De emplazamiento Geográficos Microclimáticos Nanoclimáticos</p>		
<p>Arquitectónicos Diseño del edificio Orientación del parlamento Acabado superficie de la piedra (labra)</p>		

Tabla 7 - Factores exógenos relacionados con la acción contaminante en los edificios.

5.2.5 - Las sales solubles.

Las *sales solubles* ocasionan daños físicos y químicos en las piedras cuando cristalizan en su interior o en la superficie de las mismas. Su grado de nocividad es variable, y depende no sólo de las características de sal sino de las condiciones ambientales (variaciones de humedad y temperatura), las cuales controlan los mecanismos de disolución y precipitación. La procedencia de las sales solubles en las piedras es diversa. Lo más frecuente es que provengan de fuentes externas: suelo, materiales de construcción (p. ej. morteros y cementos de unión), aerosoles atmosférico; o marinos, metabolismo de organismos o antiguos tratamientos de conservación. Más raramente son inherentes al propio material rocoso (p. ej. yeso en algunas calizas o margas).

Las sales solubles más frecuentes en las piedras de los monumentos son los sulfatos, seguidos de los cloruros, carbonatas, nitratos y, más raramente, nitritos. En cuanto a los cationes, los más abundantes son los de calcio, magnesio, sodio y potasio. El número de sales que pueden encontrarse en las piedras de los monumentos es elevado (Tabla 8).

Sulfatos		Cloruros	
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Halita	NaCl
Thenardita	Na_2SO_4	Silvita	KCl
Mirabilita	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Nitratos	
Arcanita	K_2SO_4	Nitronatrina	NaNO_3
Bleodita	$\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Nitrokalita (nitro)	KNO_3
Kieserita	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Nitranmita	NH_4NO_3
Hexahidrita	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Nitrocalcita	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Epsomita	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$		
Carbonatos			
Termonatrinita	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$		
Natrinita (natrón)	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$		

Tabla 8 - Sales solubles más frecuentes generadas por acción de la contaminación.

Su distribución en los muros de los edificios depende de las condiciones termohigrométricas (**Figura. 10**).

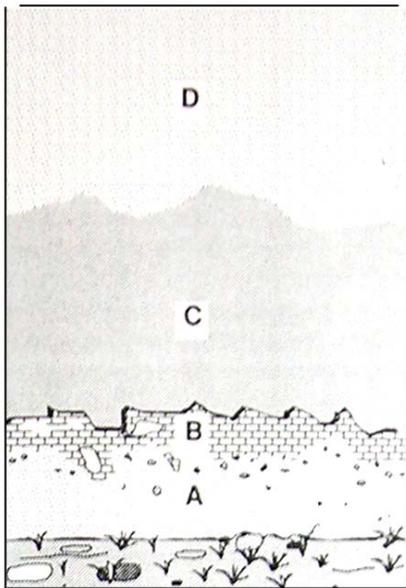


Figura. 10 - Diferentes zonas de deterioro por sales en un muro con ascensión capilar de agua.

Nivel A: Precipitación ocasional de sales. Poco deteriorado.

Nivel B: Zona de mayor concentración de eflorescencia y degradación del material.

Nivel C: Poco deteriorado. Cristalización ocasional de sales. **Nivel D:** No alterado.

El deterioro producido por las sales solubles puede llevarse a cabo a través de varios mecanismos, siendo los más generalizados la cristalización y la hidratación. En el primer caso los daños se producen cuando las tensiones locales generadas por el empuje del cristal al crecer

en el interior de un poro o microfisura sobrepasan la resistencia a la tracción de la roca. En el segundo caso, el paso de la sal anhidra a la hidratada comporta asimismo presiones en las paredes de los poros, las cuales pueden provocar fenómenos disruptivos (**Figura. 11**). Otros mecanismos, como los cambios estructurales en la sal, contribuyen también, aunque en menor medida, al deterioro de la piedra.

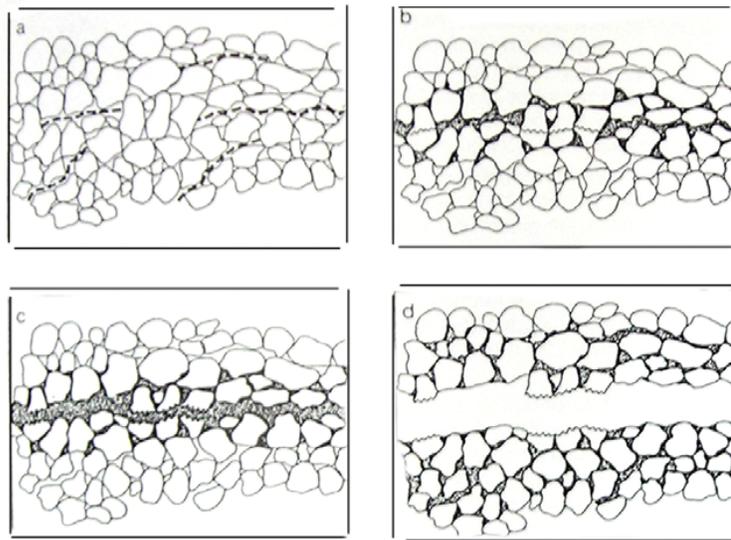


Figura. 11. Mecanismo de deterioro producido por las sales solubles.

5.3 - Organismos vivos.

Determinados organismos vivos que se asientan sobre las piedras participan de la alteración química y física de la misma, también conocido como biodeterioro. No siempre, sin embargo, la presencia de organismos supone necesariamente un daño para la piedra, al margen de apreciación estética. Entre los agentes bióticos de mayor incidencia se destacan: las bacterias, hongos, algas, líquenes, briofitas, plantas superiores y animales.

Las bacterias atacan los soportes lapídeos mediante procesos químicos. De las numerosas especies de bacterias, las que ejercen mayor influencia en el deterioro de las piedras son las sulfúreas, las nitrificantes y las ferrobacterias. Las

sulfobacterias oxidan el azufre a sulfato. El azufre al combinarse con el calcio de la piedra, en presencia de agua, origina yeso. Las nitrificantes producen nitritos y nitratos que, ocasionalmente, pueden formar nitrato cálcico. Las bacterias de hierro participan en los fenómenos de oxidación-reducción de este material.

La presencia de algas, al igual que la de briofitas (hepática y musgos), es indicador de zonas húmedas. Sus efectos sobre la piedra lo son principalmente por vía indirecta, al favorecer la colonización para otros organismos (bacterias, hongos, líquenes, plantas superiores). Algas y musgos producen agentes quelantes que se combinan con metales y ácidos orgánicos que, a su vez, reaccionan con los minerales formando sales solubles.

La acción de los líquenes es doble: física, al penetrar en el sustrato pétreo; y química, al producir acúmulos de oxalato cálcico, debido a la combinación de ácido oxálico metabólico con el calcio de la piedra. Las sustancias quelantes, que también producen, transforma mucho minerales en compuesto solubles.

La vegetación herbácea o arbustiva constituye focos de humedad, al tiempo que sus raíces dañan mecánicamente el material pétreo. Por otro lado, los excrementos de animales (principalmente aves) contribuyen a degradar químicamente a la piedra, debido a las sustancias que contienen (especialmente ácido fosfórico). No hay que olvidar, finalmente, las lesiones de carácter antrópico.

5.4 - Graffitis o pinturas.

Graffitis o pinturas ya sea intencional o fortuitas constituyen un daño estético frecuente sobre los materiales pétreos, que no por poco dañino debe excluirse de los agentes agresores sobre las edificaciones de piedra natural como material de construcción.

5.5 - Choques y presiones mecánicas.

Choques y presiones mecánicas: los impactos y presiones mal distribuidas sobre los elementos constructivos arquitectónicos producen fisuras, fracturas o la fragmentación de piezas enteras.

5.6 - Antropogénicas.

Antropogénicas: incluimos aquí los factores relacionados con la acción del hombre, ya sea previamente a la instalación del material, o durante la misma (tipo de labra, tratamientos que reciba, cargas estructurales que se le apliquen, posición geométrica

en que se dispongan, tipo de elemento arquitectónico: los suelos sufren efectos muy distintos que las paredes o las fachadas), o tras la misma (instalación de letreros).

Por otra parte debemos incluir en este apartado el tráfico. Por un lado, favorece la presencia de contaminantes en la atmósfera, que resultan especialmente agresivos en el ámbito urbano. Por otro, las vibraciones que se relacionan con el tráfico pesado pueden afectar a la estabilidad de las construcciones próximas. A esto debemos agregar las calefacciones que utilizan calderas a carbón, y las refinerías de petróleo que muchas veces están cerca de los núcleos urbanos.

5.7 - Variación de temperaturas.

Provocan dilataciones y contracciones de los materiales pétreos, de acuerdo con sus características térmicas. Repetidos ciclos de expansión y retracción, motivados por la insolación y las oscilaciones de temperaturas (diurnas, estacionales), generan tensiones internas capaces de provocar microfisuras y descohesiones en el material rocoso.

5.8 - Otros.

Oros factores de deterioro de las piedras a tener en cuenta son: la acción del viento

(erosión eólica); la corrosión que afecta a los elementos metálicos unidos a las piedras, así como la humedad y organismos que afectan a la madera unida a las piedras; las vibraciones; los accidentes naturales (incendios, terremotos, etc.).

5.9 - Agentes de alteración (intrínsecos).

5.9.1 - Mineralogía.

Mineralogía: la composición mineralógica del material de construcción es siempre fundamental para explicar las transformaciones que pueda sufrir, pues cada mineral presenta distintas susceptibilidades a los agentes externos descritos: unos son fácilmente solubles o hidrolizables, o sufren más la acción de los agentes atmosféricos, o se desgastan con mayor facilidad por presentar menor dureza. Por ejemplo, la calcita, un mineral presente en algunas rocas de construcción, o en el mármol, es fácilmente hidrolizable: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ y consecuentemente $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$. Por su parte, el dióxido de azufre atmosférico produce ácido sulfúrico, que reacciona con la calcita generando yeso.

5.9.2 - Textura.

Textura: la disposición textural de los minerales puede afectar también a su comportamiento frente a la meteorización. Por ejemplo, las rocas de grano más grueso se degradan, por lo general, más rápidamente que las de grano más fino.

5.9.3 - Tectónica.

Tectónica: el hecho de que una roca haya sufrido los efectos de deformación tectónica suelen implicar la aparición de diaclasas o microfracturas, que pueden ser prácticamente invisibles. Sin embargo, bajo la acción de cargas se manifiestan por fenómenos de rotura, que a su vez favorecen la acción de otros agentes externos, como la infiltración de soluciones.

6 Conclusiones

Los materiales pétreos naturales sufren alteraciones del medio ambiente desde épocas muy antiguas siendo más severos y acelerados a partir de la revolución industrial y el gran crecimiento de las ciudades.

El examen del estado de los materiales pétreos y su diagnóstico posee especificidad y fases concretas, que los diferencian del resto de los materiales de la construcción.

La contaminación ambiental ha sido considerada como un factor primordial en el deterioro de los monumentos y otras construcciones de piedra, pero es de importancia tener bien presente cómo se vincula su acción a la del resto de los componentes del medio ambiente.

Las patologías obedecen a la acción combinada de elementos físicos (viento, agua, temperatura), químicos (disolución e hidrólisis) y biológicos (proceso biofísico y bioquímico). Incluidas bajo el término “deterioro” en el presente trabajo para recopilar las principales y mayor cantidad de lesiones en una extensa lista.

Los agentes deteriorantes, inciden en las rocas convirtiendo al material pétreo en un elemento constructivo que inicialmente pierde el valor estético al alterar su superficie y más tarde, si no se toman las medidas pertinentes, puede ir perdiendo progresivamente su cohesión, ya que al reducir notablemente su masa, va disminuyendo su capacidad resistente.

Los tratamientos que se aplican a los materiales pétreos naturales dañados, utilizando la diversidad de técnicas y métodos recopilados en el capítulo, deben ser previamente profundizados y estudiados, en el caso que lo exija supervisado por expertos. Teniendo en cuenta que los errores pueden acelerar la lesión o inducir nuevas.

Capítulo II: Procedimiento para el diagnóstico patológico de edificaciones construidas de piedra natural.

1- Objetivos del capítulo.

El presente trabajo persigue como objetivo principal la adecuación de un **Procedimiento** realizado anteriormente por el *MSc. Arq. José Armando Chávez Hernández* y el *Dr. Ing Carlos A. Recarey Morfa* para el estudio patológico de edificaciones patrimoniales, en este caso especificamos en cada aspecto el proceder para su aplicación en aquellos edificios que están compuestos generalmente con piedra natural como material de construcción, este procedimiento permitirá estructurar, dirigir e integrar los resultados de todas las actividades que preceden a la formulación de los proyectos de intervención en dichas edificaciones.

2- Enfoque y utilidad de la investigación.

El enfoque de la investigación parte de combinar las diferentes técnicas de levantamiento de patologías, con las modelación e instrumentación y ensayos para lograr un correcto diagnóstico para la elaboración de un adecuado proyecto de conservación de la edificación. Este enfoque se representa a continuación de modo esquemático en la **Figura 12**.

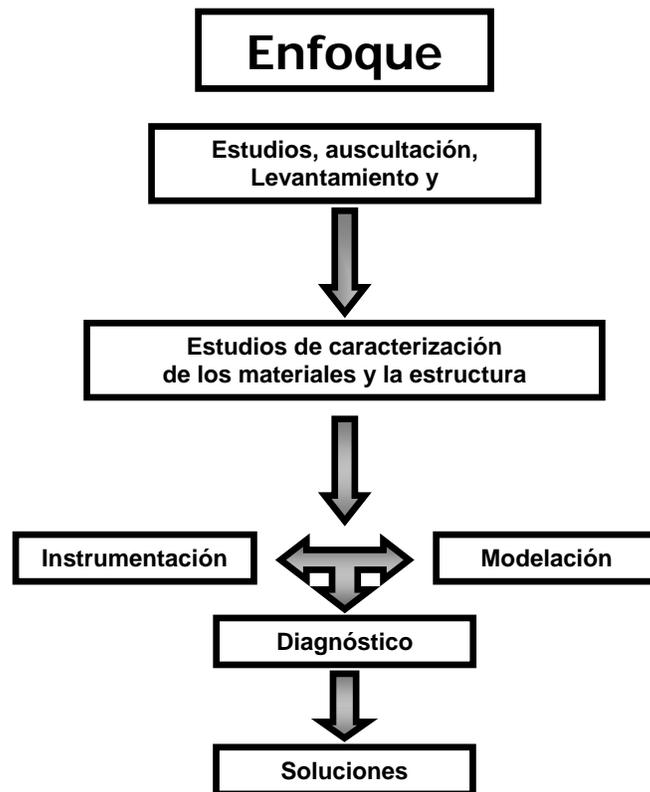


Figura 12. Enfoque de la investigación.

Utilidad:

1. Estudio más detallado, viable y científicamente fundamentado.
2. Búsqueda y definición concreta de las causas que propiciaron las lesiones, manifestaciones y estados patológicos.
3. Cuantificación de parámetros técnicos y características necesarias para el proyecto de restauración y ejecución de los trabajos.

El objetivo central del estudio patológico de las edificaciones es conocer, a partir de síntomas y lesiones y toda la información adicional que se tenga de la misma, el proceso patológico, para llegar a un diagnóstico acertado y poder establecer la terapéutica correcta ya sea preventiva o curativa.

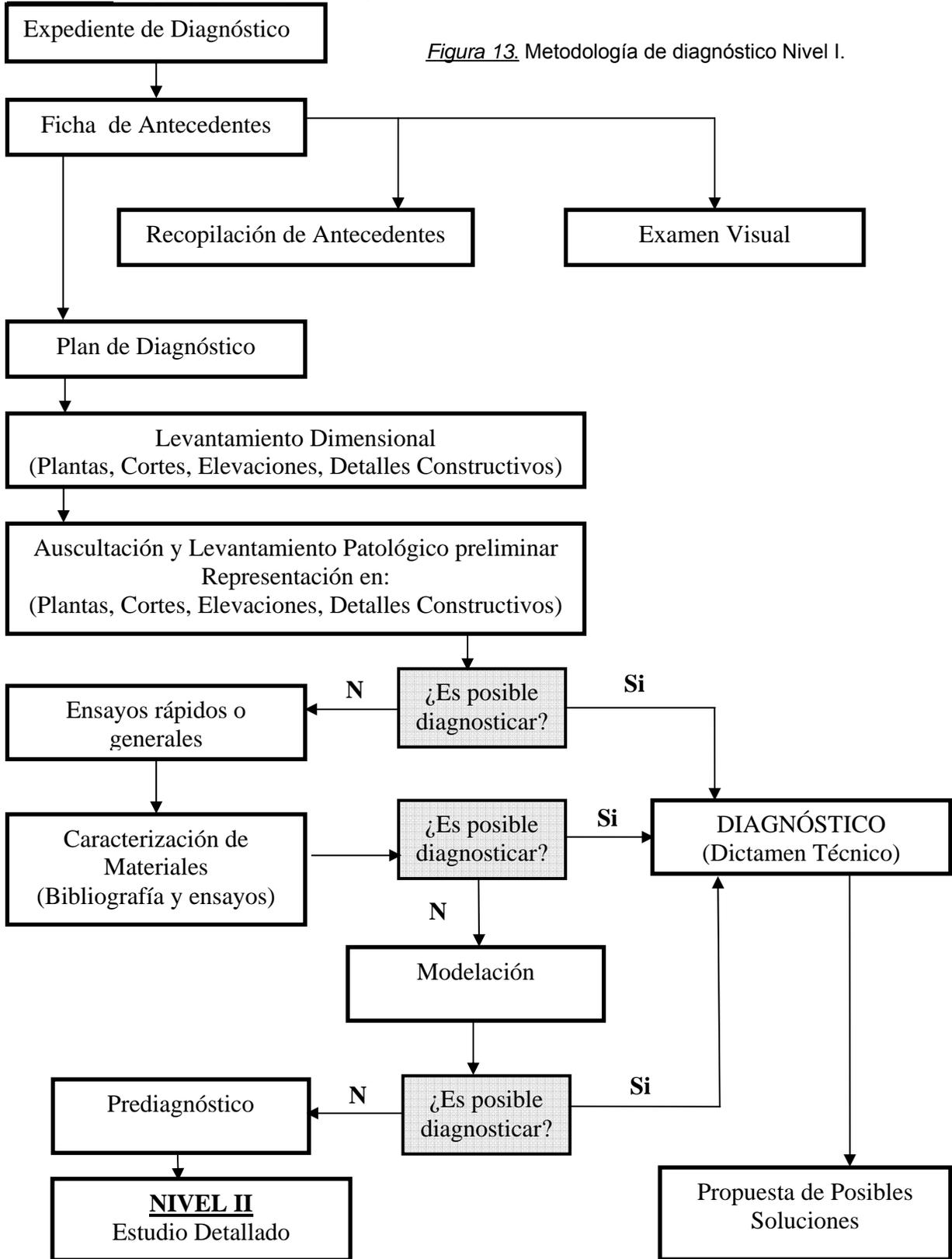
3- Procedimiento para el estudio patológico de edificios patrimoniales.

La importancia primordial de una obra y el valor arquitectónico e histórico de la misma implica que antes de comenzar los trabajos de investigación, es sumamente importante establecer una metodología general que permita enfocar y dirigir estos trabajos tan necesarios e indispensables para la realización de un correcto proyecto de intervención. Una metodología adecuada para el diagnóstico de los daños presentes en una edificación, así como la determinación de su evolución y pronóstico de desarrollo deberá repercutir directamente en una mejor calidad de los proyectos de rehabilitación a realizar, así como en la obtención de mejores resultados desde el punto de vista científico, técnico y económico.

3.1- Niveles de estudio.

En los esquemas a continuación en las **Figuras 13-14-15**, aparecen los puntos específicos que conforman cada uno de los Niveles de Estudio planteados en el procedimiento desarrollado por José A..., y se detalla la relación entre cada uno de ellos. Es decir, para algunos de estos puntos, se define si serán realizados o no en dependencia de la valoración de los resultados alcanzados en el aspecto anterior más los resultados de los que antecedieron a este, y en la cual se determina si el grado de información que se alcanza es suficiente para establecer un diagnóstico acertado o no.

Nivel I. Estudio Preliminar



Nivel II. Estudio Detallado

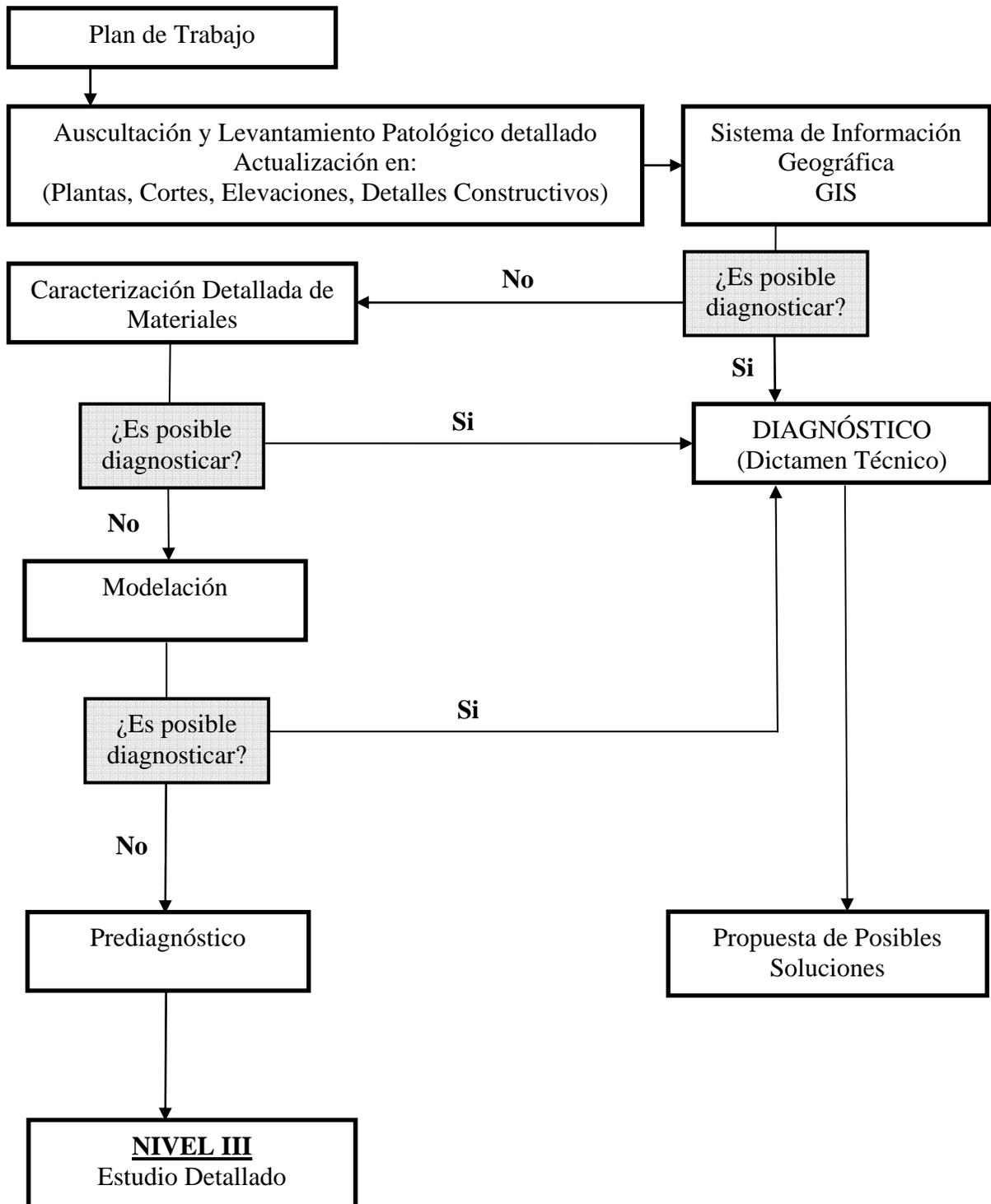


Figura 14. Metodología de diagnóstico Nivel II

Nivel III. Estudio Avanzado

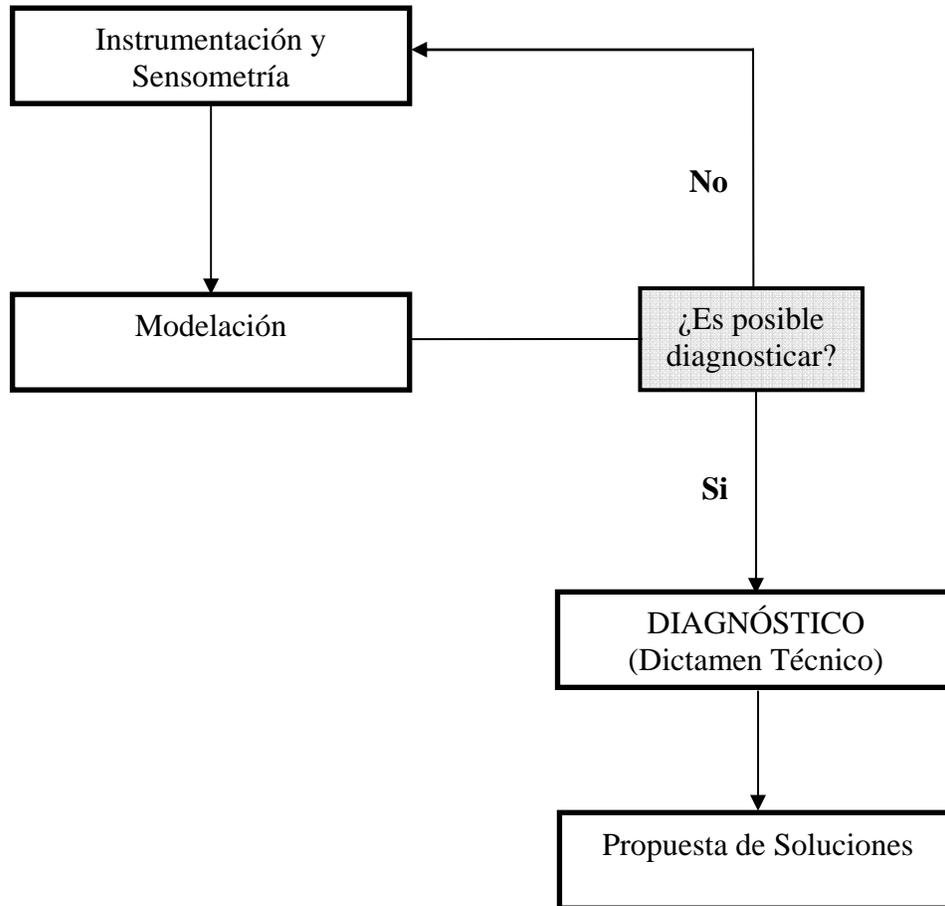


Figura 15. Metodología de diagnóstico Nivel III

A continuación se ofrece, para el entendimiento de las metodologías planteadas en estos esquemas, la descripción de cada uno de los estudios específicos por cada Nivel, así como la forma en que se abordarán y los resultados o el nivel de información que deberá alcanzarse.

3.1.1- Nivel I. Estudio Preliminar.

3.1.1.a- Generalidades

El llamado **Estudio Preliminar** permitirá tener una idea general de la estructura con problemas y del contexto que la rodea. Puede estar sustentado en una visita previa y, en caso de ser necesario, en un análisis más profundo para la elaboración del diagnóstico correspondiente - lo cual dependerá principalmente, de la complejidad del problema, riesgos involucrados y de la experiencia de la persona responsable de la evaluación.

En el estudio preliminar se puede lograr un conocimiento *a priori* del estado patológico de los elementos estructurales fundamentales, del estado constructivo y seguridad de escaleras, balcones, entresijos y cubiertas, el nivel de accesibilidad a los puntos principales que deben ser reconocidos y otra información que permita tener una idea del estado de la seguridad, la estabilidad y posible situación ruinoso de la construcción o partes de la misma, todo lo cual puede limitar la accesibilidad y circulación por su interior, todo lo cual puede complicar y encarecer el reconocimiento, a la vez que puede demandar de determinadas medidas de apuntalamiento técnico y protección.

En base a la información obtenida mediante esta etapa, es posible ya determinar la naturaleza y el origen del problema, o bien constituir sólo la etapa previa a un estudio más detallado.

Los estudios preliminares permiten la elaboración de un diagnóstico en algunos casos o de un prediagnóstico en aquéllos más complejos.

3.1.1.b- Habilitación del Expediente de Diagnóstico.

Se creará un **Expediente Técnico de Diagnóstico**. Este será un documento que contendrá los planes y resultados del diagnóstico que se le realice a la edificación y que quedará como una memoria técnica que forme parte del expediente técnico de la edificación o del expediente de la rehabilitación.

El contenido del **Expediente Técnico de Diagnóstico** será el siguiente:

- Fecha de habilitación del expediente.
- Identificación de la entidad que solicita el diagnóstico.
- Nombre, calificación, años de experiencia y entidad a la que pertenece el especialista que realiza el diagnóstico.
- Datos sobre la edificación objeto del diagnóstico:
Dirección, propiedad, descripción del inmueble y otros datos generales, año o época de construcción, planos o levantamiento de la planta y fachadas
- Plan de diagnóstico.
- Dictamen técnico final.
- Informaciones anexas sobre resultados de pruebas y ensayos, etc.

3.1.1.c- Estudios propios de esta etapa

3.1.1.d- Elaboración de una Ficha de Antecedentes de la estructura y del medio ambiente (en base a Información Documental y/o Examen Visual General de la Estructura).

3.1.1.e- Examen Visual General de la Estructura.

Este proceso debe permitir determinar si los problemas se presentan por igual en todos los elementos de las mismas características, o si existen diferencias por causas locales (puntuales). Para ello, debe realizarse un examen diferenciado por elementos, registrando los signos aparentes de deterioro.

Es importante elaborar un registro fotográfico amplio que acompañe las observaciones. Luego, además de binoculares (para acceder a zonas en donde no es posible una observación directa), se debe incluir una cámara fotográfica apropiada como parte del equipo necesario para llevar a cabo la inspección preliminar.

Tal como se señaló antes, si el problema no es complejo y los evaluadores son experimentados, puede ser suficiente la información hasta aquí obtenida para dictaminar la(s) causa(s) y elaborar el prediagnóstico. Se procederá entonces a la elaboración de croquis/planos con el levantamiento de daños, para proceder a la rehabilitación.

3.1.1.f- Elaboración del Plan de Diagnóstico

Se elaborará un **Plan de Diagnóstico**, en el cual se preverán los aseguramientos técnicos y organizativos del estudio diagnóstico. Se definirán los siguientes elementos:

- Se definirán las necesidades más importantes a las que se dará respuesta con el estudio para con estas definir qué pasos de cada uno de los niveles serán los más necesarios de ejecutar.
- Propuesta de trabajos técnicos y medidas organizativas necesarias para ejecutar el diagnóstico (por ejemplo: reforzamientos emergentes, habilitación de escaleras para acceder a los puntos de revisión o reconocimiento, desobstaculización de zonas o espacios, apuntalamientos y apeos emergentes, etc.)
- Tipo y alcance de la revisión diagnóstica (esto incluye: partes y zonas que serán objeto de la inspección).

Capítulo 2. Procedimiento para el diagnóstico patológico de edificaciones construidas de piedra natural.

- Planteamiento de la estrategia de diagnóstico (orden y trayectoria del reconocimiento, acorde con el estado de deterioro, características y complejidad de la revisión).
- Estimación o cálculo de los recursos humanos, financieros y materiales necesarios para el diagnóstico.

3.1.1.g- Levantamiento Geodésico y Levantamiento Arquitectónico.

1. Levantamiento Geodésico.

Toma de niveles iniciales.

Este trabajo consiste en establecer los niveles de los puntos más representativos del edificio y establecer un nivel 0.00 para a partir de este realizar el Levantamiento Arquitectónico preciso del inmueble.

Medición de desniveles en piso y desplomes de columnas y fachadas.

El trabajo que se realizará en estos momentos prevé constatar mediante la nivelación topográfica y mediciones del desplome de las columnas a los mismos puntos que se hallan medido con anterioridad, si esos puntos han sufrido o no variación, como consecuencia de los fenómenos de desplome o asentamiento de las estructuras.

Medición de flechas de vigas.

Este trabajo consiste en tomar las medidas de las flechas de algunas vigas representativas con el objetivo de comprobar la deformación sufrida por las mismas.

2. Levantamiento Arquitectónico.

El levantamiento arquitectónico de la edificación estará formado por el levantamiento planimétrico, altimétrico y volumétrico, trabajos que darán como resultados los planos de planta actualizados y los valores altimétricos y volumétricos de la edificación y los diferentes elementos que conforman la estructura.

El levantamiento planimétrico consistirá en ubicar la posición (x, y) de los elementos en un sistema arbitrario de referencia.

La altimetría consistirá en primer lugar en establecer un nivel absoluto con referencia al sistema geodésico nacional (Levantamiento Geodésico), y a partir de allí tomar todas las alturas de los elementos con respecto a este nivel y ubicar su posición (z), se conformarán entonces las elevaciones de todos los elementos del edificio, tanto estructurales como decorativos. Este levantamiento se realizará en diferentes secciones transversales y longitudinales, ubicando varios puntos en cada una de ellas. El trabajo de levantamiento altimétrico se realizará en dos fases. La primera por la parte inferior de la estructura y con posterioridad por su parte superior. Para realizarlo por la parte superior se tomarán los niveles correspondientes en los diferentes puntos estudiados, aspecto que permitirá completarlo y estimar de esta forma el espesor de las estructuras investigadas.

La volumetría se realizará de forma detallada tanto a los elementos estructurales como decorativos combinando la posición (x, y, z) de cada uno, todo el edificio se modelará geoméricamente de forma tridimensional.

Toda la tecnología utilizada para todo este proceso, levantamiento planimétrico y altimétrico podrá utilizar el sistema de medición a través del láser el cual permite mayor agilidad y precisión en el proceso.

Como posibles resultados de este levantamiento arquitectónico podemos tener:

- Maqueta electrónica
- Levantamiento Técnico en 3 dimensiones
- Planos de Niveles.
- Elevaciones
- Cortes principales

3.1.1.h- Auscultación y levantamiento inicial de deterioros y daños

Se realizará un análisis de deterioros y daños preliminar, lo cual permitirá conocer el estado actual de la edificación. Este estudio permitirá establecer de forma general el grado de conservación o deterioro de cada uno de los elementos o partes constructivas; y a su vez establecer un diagnóstico lo más consecuente posible, dada la magnitud cuantitativa y cualitativa de las patologías y el deterioro existente. Sobre la base de este análisis es que se debe diferenciar y definir para cada caso y tipo de patología como se realizará el proceso de levantamiento y defectación detallada de los materiales, sus elementos y de la edificación en su conjunto, aspectos que permitirán definir con claridad el tipo y alcance de la intervención a realizar.

El objetivo de esta etapa es buscar la presencia de lesiones que se manifiesten como síntomas del proceso patológico y a partir de las cuales podemos conocerlo.

Lo primero es detectar las lesiones e identificarlas e independizar las lesiones y procesos patológicos diferentes con el objetivo de seguirlos adecuadamente, sobre todo teniendo en cuenta su posible relación.

Esta fase concluye con la confección del levantamiento de daños por locales, ello implicará un número reiterado de visitas y la utilización de una cámara fotográfica que permita plasmar gráficamente las lesiones en el momento del inventario. De este modo, se puede obtener una serie de datos físicos que faciliten la comprensión del proceso. Dentro de los datos que se recogen se encuentran: el tipo de lesión, la

descripción, las posibles causas, los materiales afectados, los elementos constructivos dañados, la localización de las lesiones en el edificio o unidad constructiva, el nivel de exposición del punto de aparición del síntoma con respecto al nivel de la calle y a la proximidad de otros edificios, etc.

Para esta primera etapa del estudio es muy útil tener un listado con la clasificación de las posibles lesiones y materiales afectados.

3.1.1.i- Análisis y realización de ensayos rápidos o generales

Este paso se realiza con el objetivo de evaluar de forma rápida los puntos más críticos del lugar para poder determinar si necesitan ser intervenidos de forma urgente, para ello se usarán aparatos o equipos de medida sencillos o muestras de materiales como extracciones de testigos para saber de qué y cómo está compuesto un elemento que no pueda ser observado a simple vista, entre otros ensayos que tendrán un carácter muy puntual y simple.

3.1.1.j- Caracterización preliminar de los materiales

Se detallará si los materiales fueron de producción nacional o no. Elementos que los conforman y lugar de procedencia. Caracterización de los mismos señalando si su estado es aceptable o desfavorable y en caso de ser desfavorable referirse de forma general a los principales deterioros que presentan. Luego se detallarán las principales lesiones que presentan.

Plantear de qué forma han incidido varios factores en el estado de deterioro actual:

- Años de explotación y/o abandono.
- Existencia o no de un mantenimiento efectivo a las instalaciones.

- Condiciones especiales de la micro-localización tales como nivel de humedad, cercanía al mar, etc.
- Calidad de los materiales empleados en la construcción.
- Consideración a cabalidad, en las técnicas constructivas y los métodos de diseño de la época, de los conceptos de vida útil y durabilidad de los que se ha tenido conciencia recientemente.
- Respuesta ante intervenciones anteriores las cuales dan respuesta a problemas pero por otra parte pueden acentuar y acelerar el deterioro de algunos materiales.

3.1.1.k- Modelación.

Esta actividad será opcional de acuerdo con el criterio de los especialistas que realicen el diagnóstico según el grado de información que se halla alcanzado y su necesidad para el entendimiento de los problemas y deterioros encontrados en este nivel de trabajo. Podrá ser utilizada para toda la edificación en conjunto así como partes parciales o elementos específicos de la misma. La información que se utilice para este fin será la encontrada hasta el momento y los datos provenientes de la literatura. En caso que se decida modelar se realizará para este fin el levantamiento dimensional de los elementos objeto de este estudio.

Los datos que se obtendrán de esta modelación tendrán importancia, fundamentalmente, desde el punto de vista cualitativo con relación a los deterioros existentes, sus causas y comportamiento de la estructura o los elementos que las constituyen ante estas. Cualitativos debido a que todos los estudios son abarcados con un enfoque general, y los datos acerca de los materiales y sus características vendrán de ensayos rápidos o generales o bibliografía al respecto. Aun así, la modelación en este nivel, en algunos casos fáciles, nos puede llevar junto con el resto de la información reunida en esta etapa, hasta un diagnóstico acertado, y en otros no tan fáciles, servir como base para la continuación del estudio de la edificación en otros niveles de trabajo.

Los aspectos relacionados específicos de la **modelación** se detallan más adelante en el **Capítulo III** de este trabajo.

3.1.1.I- Prediagnóstico

El prediagnóstico es un tipo de conclusión a la cual se puede llegar con los datos obtenidos hasta el momento. Es como establecer hipótesis que serán comprobadas en las siguientes etapas o pasos de esta Metodología. Se parte de los datos y evidencias que se han detectado en los diferentes elementos de la edificación y que constituyen síntomas del proceso patológico que la aqueja. Luego estos son comparados o cotejados con los cuadros sintomatológicos, esquemas de lesiones-tipo, o incluso con las experiencias que posee el investigador sistematizadamente en su memoria, cuando se trata de especialistas experimentados y de gran calificación. Con toda esta información se puede definir la necesidad de acciones emergentes tales como apuntalamientos, reforzamientos emergentes y otras. El prediagnóstico se tomará como base para la continuación del estudio en el Nivel II.

3.1.2- Nivel II. Estudio Detallado.

3.1.2.a- Generalidades

En el Estudio Detallado se llevarán a cabo los ensayos y mediciones requeridas para obtener datos suficientes - en naturaleza y en número - y confiables, que permitan una evaluación acertada del problema y, en los casos que sea posible, definir los sistemas de intervención (pronóstico de vida residual, reparaciones, rehabilitación, etc.).

3.1.2.b- Proceso de auscultación y levantamiento de deterioros detallado de la edificación.

El levantamiento patológico tendrá como objetivos:

- Obtener el inventario, caracterización y levantamiento de todas las patologías existentes.
- Evaluación patológica de las diferentes lesiones, patologías y manifestaciones patológicas existentes.
- Crear un Sistema Automatizado de Representación gráfica y administración de datos del levantamiento patológico (combinación de técnicas de bases de datos e información gráfica de la información). ArcView., permite contar con una herramienta poderosa para el estudio de la edificación, permitiendo localizar las zonas de concentración de lesiones, definir las características de cada una de las patologías presentes, aspectos importantes para realizar un inventario del estado patológico del inmueble. Estas herramientas son muy útiles para evaluar la eficacia de las soluciones o caracterizar nuevos problemas.
- Crear los mapas temáticos de cada una de las patologías estructurales, no estructurales y de las humedades. Adicionalmente obtener otros mapas temáticos de otras manifestaciones patológicas.
- Crear los mapas temáticos de combinaciones de patologías y manifestaciones patológicas.
- Se brindarán, tomando como base los estudios realizados y reflejados en este informe y que a su vez tome en cuenta los aspectos técnicos-económicos y que se respete el valor patrimonial y arquitectónico del inmueble, un grupo de orientaciones a la entidad que ejecute la intervención, acerca de la forma y extensión del posible proyecto a realizar, su enfoque y los principales aspectos a tener en cuenta en este, como pueden ser los referidos a las características de los materiales con los cuales se dará solución a las distintas patologías, el tipo de intervención en función de la

magnitud del problema, categoría, estado técnico y gravedad y las técnicas a emplear.

El enfoque conceptual para el levantamiento patológico estará basado en una clasificación de las patologías por tipos y categorías debido a la diversidad de formas, materiales y estructuras que se manifiesta en las edificaciones.

El estudio patológico partirá del reconocimiento de las diferentes familias de lesiones: formas de manifestarse, comportamiento, magnitud, importancia, etc.; El análisis de las posibles causas tanto de lesiones aisladas como de la combinación de varias, y también se ofrecerá información sobre la peligrosidad de las mismas.

Se emplearán métodos organolépticos e instrumentales. Se utilizarán dispositivos para medir las deformaciones en grietas, juntas y desplazamiento entre elementos o partes de ellos, también estos datos se registrarán permanentemente. Se emplearán métodos geofísicos que permitirán conocer los perfiles del suelo y algunas de sus principales propiedades. De ser necesario se realizarán calas para el reconocimiento del suelo y las características de la cimentación.

Después de haber realizado la auscultación de la edificación y el levantamiento de las patologías se realizará la ordenación de las patologías por familias y se llevará a cabo un estudio individualizado de las mismas. Esta subdivisión y clasificación tiene un carácter didáctico ya que en la práctica no suelen presentarse aisladamente, lo normal es que una misma obra o zona se vea afectada por varias familias de patologías al mismo tiempo.

Dentro de este proceso de auscultación y levantamiento patológico de la edificación podemos definir un grupo de acciones:

1. Estudio de las patologías de origen microbiológico y biótico y otros estudios, auscultación, levantamiento y defectación patológica de la estructura.
2. Levantamiento de fisuras y grietas.
3. Levantamiento de patologías en estructuras de madera.
4. Estudio de los perfiles del suelo y de la cimentación y algunas de sus principales propiedades.

1. Estudio de las patologías de origen microbiológico y biótico y otros estudios, auscultación, levantamiento y defectación patológica de la estructura.

El procedimiento queda estructurado de forma general por:

- Auscultación de las patologías de origen microbiológicas.
- Análisis preliminar de las patologías de origen microbiológico.
- Clasificación preliminar de los agentes microbiológicos.
- Selección de zonas a estudiar y muestreo selectivo.
- Estudio de Laboratorio (siembra y cultivo de los microorganismos).
- Clasificación definitiva de los microorganismos.
- Levantamiento de las patologías de origen microbiológico y biótico.
- Recomendaciones para la eliminación de los microorganismos y limpieza de las superficies afectadas.
- Estudios, auscultación, levantamiento y defectación patológica de la estructura.

Primeramente se procederá al muestreo selectivo y aleatorio de diferentes zonas representativas en cuanto a las alteraciones. Una vez logrado el desarrollo de las muestras se procederá a la clasificación definitiva de los microorganismos empleando los manuales de clasificación.

Capítulo 2. Procedimiento para el diagnóstico patológico de edificaciones construidas de piedra natural.

Después de realizar los estudios de laboratorio y clasificación de los microorganismos se procederá al levantamiento de las patologías de origen microbiológico y biótico conjuntamente con otros estudios, auscultación, levantamiento y defectación patológica de la estructura que guardan estrecha relación y vinculación con estas, como pueden ser las de las humedades.

- Humedad.
- Eflorescencia.
- Capilaridad.
- Corrosión.
- Desgaste.
- Condensación.
- Desprendimiento.
- Vegetación parásita.
- Arbustos y arborescencia.
- Drenes, gárgolas y sistema de drenaje y evacuación de aguas pluviales en mal estado u obstruidos.

En este estudio se debe llegar a zonificar, clasificar puntualmente cada patología y definir una categoría que delimita las afectaciones sobre la edificación. Toda esta investigación estará referenciada y ubicada en la planta de la edificación, con el objetivo de que los trabajos de restauración y intervención de la edificación orientados a ejecutar la terapia correspondiente para este tipo de patología, disponga de una guía y zonificación. Toda esta información será recogida en soporte digital, computarizado y papel para facilitar los trabajos correspondientes a la inversión, los proyectistas y los ejecutores.

2. Levantamiento de fisuras y grietas

Se realizará el levantamiento y clasificación de cada grieta o fisura encontrada en la estructura, poniendo especial énfasis en las zonas más afectadas.

A cada grieta o fisura encontrada se le realizarán los siguientes trabajos: señalarla, enumerarla in-situ, medir su dimensión y profundidad, tomar una foto y clasificar en cuanto a su gravedad. Conjuntamente con este trabajo, el equipo en conjunto, discutirá las hipótesis preliminares para cada una de ellas. Con toda esta información se creará una base de datos la cual se sustentará en un Sistema de Información Geográfica (ArcView) para su fácil manipulación.

3. Estudio de los perfiles del suelo.

Caracterización geólogo-estructural del Objeto estudiado.

El procedimiento geofísico para apoyar la investigación de la obra puede ser la Tomografía Eléctrica (hole-hole y cross-hole) que es la única variante disponible en la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicada (ENIA) para resolver esta tarea en una obra que, por su carácter patrimonial, requiera de técnicas que afecten lo menos posible el entorno y la estructura de la misma.

Perforación y Muestreo.

Los trabajos de perforación se pueden realizar con una máquina perforadora del tipo Mark V de fabricación inglesa u otra que se seleccione. Terminado el proceso de perforación se retirarán las camisas metálicas y se sustituirán las mismas por plásticas ranuradas para facilitar la comunicación del agua y de esta manera la transmisión de la corriente eléctrica del proceso de medición Geofísica. En los casos necesarios se encamisarán los intervalos de litologías alteradas para evitar los derrumbes y obstrucción de los accesorios de perforación utilizados en el proceso. Se perforarán las calas que sean necesarias y con la profundidad requerida empleándose el muestreo continuo por rotación con el portatestigo simple tubo con corona de tungsteno.

Capítulo 2. Procedimiento para el diagnóstico patológico de edificaciones construidas de piedra natural.

El muestreo y descripción estará dirigido fundamentalmente a la totalidad de la cala para el estudio general del corte litológico, por lo que el muestreo se realizará con rigor técnico.

Trabajos Topográficos.

Los trabajos topográficos consistirán en el levantamiento planimétrico del área de trabajo, el replanteo y posicionamiento de las calas al comienzo del trabajo y después de terminada la perforación. Para la ejecución de este trabajo se podrá utilizar el siguiente equipamiento:

- Teodolito T1 Wild
- Nivel N1 Wild
- Cinta métricas y Accesorios.

Como resultados de las mediciones de campo se deben obtener los planos de la obra, con la ubicación final de las calas.

Trabajos geofísicos.

La variante eléctrica de tomografía que se puede utilizar en este trabajo, puede ser la polo-polo u otra que se escoja por el equipo de trabajo.

Para referenciar correctamente las imágenes tomográficas se debe comprender el número con que se identifican las imágenes se corresponderá con el número de las perforaciones y el orden en que se mide. Siempre la imagen será observada como si nos encontráramos en el exterior del área del perímetro.

Todo el proceso de medición puede ser totalmente automático usándose para ello el sistema inteligente de nodos, este procedimiento de la programación de las secuencias de mediciones de los cuádrupolos se realiza mediante el software “Electre”, el que además se usa para transferir al equipo de medición la forma de

Capítulo 2. Procedimiento para el diagnóstico patológico de edificaciones construidas de piedra natural.

ejecutar las mediciones automáticamente. De esta manera se procede a las mediciones en orden lógico para confeccionar la imagen o corte de resistividad eléctrica aparente (ρ_a).

Para todas las secciones tomográficas que se midan se elaborará la *Imagen Tomográfica* de ρ_a .

Resultados a obtener.

Definir los elementos ingeniero – geológicos que yacen en el área de estudio y caracterizarlos (formación, color, resistencia, textura, composición de las partículas, valoración de la plasticidad y la granulometría, clasificación, ect).

La descripción de estos elementos se realizará a partir de las descripciones tacto-visuales de las muestras de cada una de las calas, igualmente se indicarán los detalles básicos (diámetro, tipo de muestreador con su diámetro, nivel freático, coordenadas, etc.) Algunas de las propiedades se podrán archivar como se muestra en la tabla a continuación: (Tabla 9)

Propiedades de las rocas y suelo			
Roca o Suelo	γ (Kn/m ³)	E (Mpa)	μ
Roca Calcarenita			
Caliza			
Arcilla			
Otros			

Tabla 9

5. Recolección de datos

Todos los levantamientos realizados podrán ser representados en soporte magnético en AutoCAD y/o en papel. Otra forma mucho más eficiente para representar el gran volumen de información obtenida en el proceso de auscultación y levantamiento, es conformar un sistema de gestión, administración y manipulación de la información, así como su representación e interpretación gráfica aplicando técnicas de avanzada y combinando bases de datos y gráfica orientada a la ingeniería, específicamente a la restauración. Este sistema será montado sobre un GIS (Sistema de Información Geográfica), que puede ser por ejemplo el ArcView.

La combinación de toda esta información con las fotos propiciará como resultado la creación de mapas orientados a la ubicación de las lesiones, manifestaciones y procesos patológicos de toda la edificación.

Este levantamiento de las patologías con técnicas de GIS se irá enriqueciendo en cada fase de estudio (modelación, instrumentación, soluciones y proyecto de restauración) convirtiéndose en una herramienta de uso imprescindible

Para lograr conformar el sistema de trabajo con el GIS se crearán varias bases de datos conteniendo toda la información del levantamiento patológico y fotopométrico con el objetivo de combinar la información obtenida. Las bases de datos serán elaboradas a partir de las investigaciones preliminar y detallada de campo, donde se ubica y describe cada manifestación, lesión y proceso patológico. Las bases de datos se organizarán por elementos estructurales y no estructurales afectados tanto por patologías y lesiones relacionadas con las humedades, como por otras de carácter estructural.

Las bases de datos para grietas y fisuras contendrán la siguiente información:

Id: Este campo indica un número identificador de cada registro.

Elemento: Este campo indica el elemento afectado por la grieta o proceso patológico.

Grieta: Este campo indica un número consecutivo de grietas según fueron estudiadas.

Longitud-Ancho-Profundidad: Estos campos indican las magnitudes que fueron medidas en el trabajo de campo en cada grieta, medidas en cm.

Volumen: Este campo se obtiene de la multiplicación de los 3 campos anteriores y la unidad en que se da es cm^3 .

Tipo de Patología: Este campo indica una diferenciación de la grieta por su tipo o sea si es estructural o no.

Manifestación: Este campo se refiere a la caracterización del fenómeno en si, o sea a su forma física, fisura o grieta.

Categoría: Este campo no es más que una clasificación se hará según el ancho y profundidad de la grieta o fisura, clasificándolas en leves, medias y graves.

Causas (hipótesis): Este campo se refiere a las causas hipotéticas que provocaron la grieta.

Causas reales: Este campo se refiere a las causas reales del fenómeno las cuales ocasionalmente corroboran las hipótesis, serán obtenidas a través de la modelación de la estructura.

Posible Solución: Este campo posee una posible solución del problema, aspecto que puede ser tenido en cuenta o no por parte del proyectista.

En las demás bases de datos, relacionadas con las humedades, existen los mismos campos explicados arriba y además los específicos que se apuntan a continuación:

Corrosión, Capilaridad, Desgaste, Eflorescencia, Microorganismos, Desprendimiento, Vegetación, Drenes tupidos.

3.1.2.c- Estudio de caracterización físico-mecánica y térmica detallada, de los materiales que conforman la edificación.

Plan de Trabajo

Para la realización de este estudio detallado de los materiales, la elaboración de un Plan de Trabajo constituye una etapa importante.

La concepción del Plan de Trabajo en general, incluye las siguientes actividades:

1.- Elaboración de:
Plan de Muestreo.

2.- Selección de:
Las técnicas de ensayo/medición/análisis más apropiadas.
Las zonas y el número en que serán efectuados los ensayos/mediciones.

3- Planificación de:
Materiales
Equipamiento.

1. Elaboración del Plan de Muestreo

Una vez reconocida la estructura - a través de la inspección preliminar – se realizará una división de ella en zonas, clasificadas de acuerdo a ciertas características y/o condiciones, que sean representativas dentro del conjunto de la estructura. Luego, los puntos de muestreo serán identificados con cada una de estas zonas, de manera que la evaluación considere y enmarque cada situación particular.

La clasificación de las zonas estará basada en los objetivos de la inspección y orientada a facilitar la determinación de las causas que han originado los daños. Se sugiere los siguientes criterios básicos:

- Diferenciar las zonas con distintas exigencias estructurales/mecánicas.
- Diferenciar las zonas sometidas a distintos medios (agresivos, principalmente).
- Diferenciar las zonas de acuerdo con los grados de deterioro.

En base a estos criterios, se realizará una división más específica de estas zonas - para la identificación final de las muestras - para lo cual debe distinguirse las subdivisiones por medio de términos apropiados. La terminología a emplear no está universalmente definida; sin embargo, es de práctica común la aplicación de la siguiente clasificación:

- **Elemento o Componente:** Parte de la estructura sometida a una exigencia estructural/mecánica específica, tal como vigas, losas, pilares, paredes, cimentaciones.
- **Lote:** Conjunto de elementos o componentes fabricados con las mismas características y en las mismas condiciones.
- **Fracción:** Subconjunto de elementos o componentes de un lote sometido a un mismo medio.
- **Muestra:** Conjunto de probetas extraídas de (o de mediciones efectuadas en)

los componentes o elementos seleccionados como representativos de un lote. El tamaño de la muestra o número de ejemplares que la constituyen es variable, dependiendo principalmente de las dimensiones de la estructura y de la magnitud del problema.

La división de la estructura en base al grado de deterioro de las diferentes zonas estará soportada por los resultados de los estudios realizados hasta el momento.

Los croquis y/o planos de la estructura elaborados para el levantamiento de daños deben resumir esquemáticamente y de manera simple y clara los criterios de identificación aplicados y, lo mismo que en las tablas de tipificación de daños, deberá utilizarse términos (normalizados o previamente definidos en un glosario) que describan inequívocamente la situación que se desea reflejar.

2. Selección de técnicas y zonas de ensayo/mediciones/análisis.

Realizada la división de la estructura según los criterios arriba mencionados debe estimarse en esta etapa, qué tipo de ensayos, mediciones y/o análisis deberán ser llevados a cabo en la inspección detallada, y en qué (y en cuántos) puntos de muestreo serán realizados.

Los aspectos relacionados con las **técnicas de experimentación y ensayo** se detallan más adelante en este propio capítulo.

Las propiedades de los materiales se estiman recurriendo a índices numéricos establecidos mediante ensayos de acuerdo con los estándares. Cada país suele tener sus propias normas para calcular o interpretar las propiedades de los materiales.

3.1.2.d- Modelación.

La modelación en el Nivel II “Estudio Detallado” presenta un carácter opcional y está en función del estado técnico de la edificación, de la experiencia de los profesionales que realizan el estudio y de la existencia de problemas estructurales en elementos, porción de la estructura o en la edificación de modo generalizado. En esta fase de estudio se cuenta con el respaldo de diferentes ensayos de laboratorio e in situ de caracterización de los materiales y comportamiento estructural de los elementos, lo que permite delimitar las propiedades físicas y constitutivas de los materiales, además de las térmicas de estos ensayos. El empleo de las técnicas de modelación tiene una finalidad cualitativa y cuantitativa lo que permite validar las causas estructurales que propician las diferentes patologías de esta naturaleza que se puedan manifestar en la edificación.

En este nivel se realiza un proceso de calibración del modelo tomando como variables de control las que aporta el sistema de ensayos de laboratorio e in-situ de caracterización de los materiales y comportamiento estructural de los elementos. En este caso para la calibración del modelo se emplean técnicas de regresión múltiple con el objetivo de conocer el nivel y peso de influencia de las variables de control sobre las diversas variables de respuesta que a su vez aporta dicho sistema y de modo análoga el modelo. Para completar este proceso de calibración se hace necesario emplear técnicas de superficie de respuesta con el objetivo de determinar con exactitud y precisión, los parámetros constitutivos degradados (por efectos de las diferentes patologías) que delimitan las variables de respuesta que arroja el modelo y que a su vez se acercan con la mayor exactitud posible a las variables de respuesta que aportan los ensayos y pruebas.

Los aspectos relacionados específicamente con la **modelación** se detallan más adelante en el **Capítulo III** de este trabajo.

3.1.2.e- Prediagnóstico

El prediagnóstico es un tipo de conclusión a la cual se puede llegar con los datos obtenidos hasta el momento. Es como establecer hipótesis que serán comprobadas en las siguientes etapas o pasos de esta Metodología. Se parte de los datos y evidencias que se han detectado en los diferentes elementos de la edificación, a través de los estudios realizados, y que constituyen síntomas del proceso patológico que la aqueja. Luego estos son comparados o cotejados con los cuadros sintomatológicos, esquemas de lesiones-tipo, o incluso con las experiencias que posee el investigador sistematizadamente en su memoria, cuando se trata de especialistas experimentados y de gran calificación.

El prediagnóstico se tomará como base para la continuación del estudio en el Nivel III.

3.1.3- Nivel III. Estudio Avanzado.

3.1.3.a- Instrumentación.

Como se expuso en el primer capítulo, la forma más eficiente para adquirir un conocimiento detallado y preciso acerca de las propiedades de una estructura es a partir de algunos ensayos ligeramente destructivos y la técnica de instrumentación. Para no ser repetitivos, en este nivel lo que se intenta no es explicar la importancia de la instrumentación, sino dar a los lectores una mejor idea acerca de los instrumentos utilizados, la forma en que se usan, para que se utilizan y sus propiedades. Los aspectos relacionados con lo anteriormente planteado se detallan más adelante en este capítulo en el epígrafe titulado **Técnicas de experimentación para el estudio de edificaciones en proceso de restauración.**

3.1.3.b- Modelación.

La modelación en este Nivel III “Estudio Avanzado” tiene una importancia primordial, ya que combinado con los resultados del sistema de instrumentación con lectura en tiempo real, permite estudiar las cadenas de concatenación de fallos estructurales y además validar las causas de las diferentes patologías estructurales existentes en la edificación. La modelación en esta fase de estudio presenta un carácter obligatorio e imprescindible, ya que si los especialistas deciden llegar a este nivel de estudio es porque la edificación o porción de ella presenta serios problemas estructurales. El empleo de las técnicas de modelación en este nivel tiene una finalidad cualitativa y cuantitativa, lo que permite validar las causas estructurales que propician las diferentes patologías de esta naturaleza que se puedan manifestar en la edificación. Las propiedades físico mecánicas de los materiales en esta fase se adquieren de los estudios y ensayos realizados en el Nivel II y además se complementan y mejoran con los que aporta el sistema de instrumentación.

En este nivel se realiza un proceso de calibración de modelo tomando como variables de control las que aporta el sistema de instrumentación. En este caso para la calibración del modelo se emplean técnicas de regresión múltiple con el objetivo de conocer el nivel y peso de influencia de las variables de control sobre las diversas variables de respuesta que a su vez aporta el sistema de instrumentación y de modo análogo el modelo. Para completar este proceso de calibración se hace necesario emplear técnicas de superficie de respuesta con el objetivo de determinar con exactitud y precisión, los parámetros constitutivos degradados (por efectos de las diferentes patologías) que delimitan las variables de respuesta que arroja el modelo y que a su vez se acercan con la mayor exactitud posible a las variables de control que aporta el sistema de instrumentación.

Los aspectos relacionados específicamente con la **modelación** se detallan más adelante en el **Capítulo III** de este trabajo.

4- Técnicas de experimentación para el estudio de edificaciones de piedra en proceso de restauración.

4.1- Resumen

La técnica de experimentación más importante destinada para evaluación de las condiciones estáticas de una estructura de mampostería se replantea en este epígrafe.

La fase preliminar de la investigación incluye una encuesta geométrica, investigación del patrón de la grieta y unos análisis históricos. La atención es luego afecta a determinar los parámetros mecánicos de las estructuras de mampostería usando pruebas poco destructivo o ligeramente destructiva. La mayoría de las pruebas poco destructivas dan sólo resultados cualitativos, lo cual luego puede ser utilizado como índices de calidad de la mampostería.

Una evaluación fidedigna de los parámetros mecánicos de mampostería de la estructura puede ser lograda sólo por empleador prueba ligeramente destructiva, con este propósito el énfasis es dado a las técnicas duras **Flat Jack** para determinar al estado de las características de esfuerzo, deformación y de fuerza características de la estructura.

4.2- Introducción

Conocimiento de las características mecánicas y físicas de los elementos soportantes en las edificaciones históricos son necesario para el correcto análisis de las condiciones estáticas de la edificación. La metodología típica adoptada para el análisis de la condición estática de una estructura de mampostería existente, involucra encuestas que incluyen encuestas geométricas y fotográficas, una

encuesta detallada de las grietas existente y otros danos inducidos a la estructura durante su vida. A esta etapa inicial investigaciones y diagnósticos están hechos usando técnicas de ensayos no destructivos que son simples y rápidos aunque no es suficiente para resolver problemas estructurales. El único medio competente para determinar los parámetros relacionados al comportamiento estático de la estructura es lo que involucra el uso del método poco destructivo que comprende intervenciones del elemento de la estructura (coring y recorte).

4.3- Las investigaciones preliminares.

Primero un estudio geométrico preciso es necesario ya sea por métodos tradicionales u otros. Esto posibilita identificar irregularidades eventuales (desviaciones verticales, etc.)

De particular atención está el patrón de la grieta en los elementos que suporta carga. Una encuesta detallada de la extensión de las grietas y sus aperturas permite una evaluación temprana de la condición estática de una estructura y el reconocimiento de causas posibles de inestabilidad. De hecho esto es importante para reconstruir la fase constructora de la edificación y coleccionar información acerca de la técnica de la construcción y el material usado.

4.4- El Análisis de la estructura y las características mecánicas

Esta fase es abordada en la mayoría de los casos usando sólo la **técnica no destructiva** pero ésta sola no es suficiente para resolver el problema satisfactoriamente. Estos experimentos son incapaces de suministrar los parámetros mecánicos necesarios para un análisis estático de la estructura, su uso tiene mucha importancia como proveedor de información importante en la homogeneidad de las características de la mampostería y en la presencia prospectiva de áreas de comportamiento anómalo.

La única forma fidedigna para determinar los parámetros que influyen en el comportamiento mecánico de la mampostería está por la técnica de experimentación **ligeramente destructiva** que requiere taladrar con barrenos y secciones pequeñas incisivas.

4.5- Las técnicas no destructiva de experimentación.

Las medidas sónicas

La prueba sónica puede ser efectuada a través de mampostería por la aplicación de una fuerza impelente en una superficie y recibiendo una señal en la superficie opuesta. Colocando los sensores en las alturas diferentes en la misma pared, eso es posible (basado en el principio de reflexión de la onda en superficies de contacto) estimar la profundidad de la fundación

La Tomografía Sónica

Esta técnica da un mapa detallado de la distribución sónica de velocidad en una sección del plano de la estructura bajo investigación. El cálculo es conllevado con la hipótesis que (en un campo de velocidad no uniforme) los impulsos sónicos no propagan en línea recta pero sigue una línea curvada causada por la refracción.

La investigación de radar

La investigación se basa en la reflexión de ondas electromagnéticas de las superficies de contacto entre materiales de constantes dieléctricas diferentes así es que los defectos internos en la obra de mampostería (áreas húmedas, cavidades, presencia de estructuras de metal).

La Prueba de rebote

La prueba al rebote está dirigida a una evaluación cualitativa de la fuerza compresiva de mortero y de la fuerza superficial de piedras de materiales de ladrillo.

Reflectometría del Domino del Tiempo (RDT):

Capítulo 2. Procedimiento para el diagnóstico patológico de edificaciones construidas de piedra natural.

Es un método basado en física para medir humedad en materiales de construcción porosos tales como, ladrillos, piedra natural u hormigón.

Análisis ultrasónico para acertación de fallo

Determinación de la velocidad ultrasonido dentro de una cierta tipo de piedra natural permite deducir acerca de las condiciones y estructuras tales como grietas de las rocas, humedad o salinidad.

$$VI = l / t_l$$

VI = velocidad de onda longitudinal shock en Km./s

l = distancia en mm

t_l = tiempo de recorrido de velocidad de onda longitudinal

4.6- Las pruebas ligeramente destructivas.

Técnicas de perforación

Esta operación se vuelve indispensable en el caso muy frecuente cuando la mampostería consta de dos estratos de la superficie en unión normal con empaque irregular interno. La perforación debe haber terminado con una máxima rotativa usando un borde del recorte del diamante.

(Figura16)

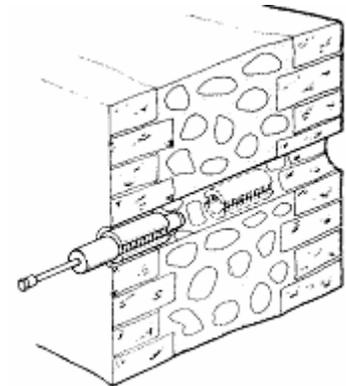


Figura 16.
Dilatómetro de perforación

La encuesta del video del barreno

Una cámara de vídeo pequeña de color puede ser introducida en los barrenos permitiendo un estudio detallado de los resultados del frente y los lados del hueco. Los resultados de este estudio pueden grabarse y ser archivados para un análisis posterior, después de esto los barrenos se revisten y deben ser sellados.

La información obtenida puede ser:

- La característica estructural de mampostería

- La medida de las cavidades internas de mampostería.
- El análisis de la propagación de grietas internas y las medidas de sus aberturas.

La Prueba de Flat Jack

Una técnica de experimentación interesante basada en el uso de **Flat Jack**, (Figura 17) fue desarrollada en el laboratorio ISMES acerca de 15 años atrás para el análisis de las características mecánicas de estructuras de mampostería existente. Usted puede lograr información fidedigna en las características mecánicas principales de estructuras de mampostería (o sea la deformabilidad, la fuerza, el estado de esfuerzo).

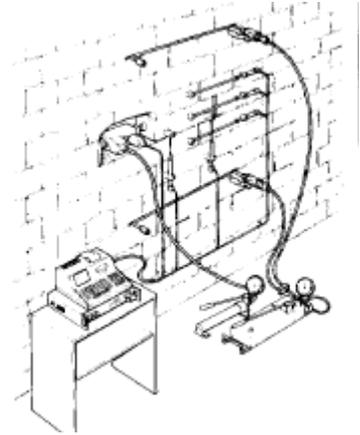


Figura 17.
Esquema de una prueba a cortante

4.7- La resonancia magnética nuclear.

Deterioro de los materiales de construcciones se puede considera como un proceso de esfuerzo-corrosión en que los ataques químico y físico combinados, dando una alteración mecánica de la piedra. La cantidad de agua dentro de la piedra porosa juega un papel crucial en la mayoría del proceso de deterioro.

Experimentos han sido realizados usando método experimentales innovativos basados en la técnica de resonancia magnética nuclear (NMR). NMR aprovecha el campo magnético del agua bajo un alto campo magnético externo, estudiando la longitud de tiempo necesario para el sistema de giro magnético llegar al valor equilibrio, una cantidad de información sobre el cambio de energía entre las sistemas y su ambiente se obtiene. Por secuencias de pulsos correctas, alta-resolución 2D-imagen de la distribución de agua fue obtenida. Análisis de la velocidad de relajación del protón del agua suministra información sobre la estructura porosa.

5- Conclusiones del capítulo.

En este Capítulo II se adecúa el procedimiento general realizado por los autores anteriormente mencionados al caso específico de las edificaciones construidas con piedra natural. Contando así de esta manera con un procedimiento para el diagnóstico o estudio patológico de edificaciones que se adecua a nuestras condiciones y posibilidades y ofrece una serie de variantes o formas de trabajo de acuerdo con las características del material de las edificaciones, en este caso la *Piedra Natural*, en donde se definen, para cada caso, que estudios son imprescindibles, cuales tendrán un carácter opcional y cuales serán considerados como innecesarios lo cual trae como resultado un diagnóstico patológico mas ágil y eficiente. Además se cuenta, en dicho procedimiento, con la descripción de cada uno de los puntos que lo conforman, así como la forma en que se desarrollarán y el nivel de información que deberá alcanzarse en cada uno de ellos, lo cual constituye y será utilizado como una guía para el desarrollo y aplicación del procedimiento planteado. En los puntos de este procedimiento, relacionados con los ensayos, la instrumentación y modelación, se describe como se realizarán, pero además, se detallan los instrumentos y técnicas utilizados y se brindan una serie de recomendaciones para su correcta utilización las que garantizan la obtención de los resultados correctos y así la consecución de un diagnóstico mas acertado.

El uso combinado de micro y macro-modelos permite la simulación precisa de la respuesta de elementos de mampostería con base en una cantidad limitada de datos experimentales. El Micro-modelo nos permitirá obtener los datos requeridos de aporte para el macro-modelo, como la superficie de fallo y las relaciones de tensión de esfuerzo, de conocidas propiedades geométricas y mecánicas de los componentes.

Capítulo III - Modelación y comportamiento estructural de las Edificaciones de Piedra para su restauración.

1. Resumen

En los últimos 40 años se ha llevado a cabo un crecimiento enorme en el desarrollo de los métodos numéricos para el análisis estructural. El uso de tales métodos demanda ensayos avanzados para obtener características experimentales del comportamiento mecánico del material. Este papel suministra una revisión de los resultados de los experimentos de desplazamiento controlado y set-ups en la última década que son relevantes para el propósito de la modelación numérica sofisticado de la mampostería.

El estudio incluye una representación gráfica de ensayos en el modelo de mampostería.

2. El análisis estructural moderno y la mampostería.

El método de elementos finitos es usualmente adoptado para lograr simulaciones sofisticadas del comportamiento estructural. Una descripción matemática del comportamiento material, que produce la relación entre el esfuerzo y deformación del tensor en un punto material del cuerpo, es menester con este propósito. Este modelo matemático es comúnmente llamado un modelo constitutivo. Los modelos constitutivos de interés para la práctica son normalmente desarrollados según una forma fenomenológica en el cual los mecanismos observados son representados en tal modo que la simulación está en acuerdo razonable con los experimentos. No es realista intentar formular modelos constitutivos que completamente incorporan todos los mecanismos que interactúan de un material específico porque cualquier modelo constitutivo o la teoría es una representación simplificada de la realidad.

Se cree que un entendimiento más profundo puede ser ganado rastreando la respuesta entera de una estructura, luego modelándola con un modelo de material altamente sofisticado o una teoría que no da como resultado una solución enfocada

Capítulo III: Modelación y Comportamiento estructural de las edificaciones de piedra para su restauración.

cerca de la carga de fallo. Un objetivo importante de la investigación es obtener herramientas robustas numéricas, capaces de predecir el comportamiento de la estructura de la etapa elástica lineal, a través de grietas y la degradación, hasta la pérdida completa de fuerza. Sólo luego cabe controlar el estado del límite de funcionalidad, para completamente comprender el mecanismo de fallo y evaluar la seguridad de la estructura.

3. La visión general de estrategias para la modelación numérica de estructuras de mampostería.

La mampostería es un material que exhibe distintas propiedades direccionales debido a las juntas de mortero que actúan como planos de debilidad. En general, la forma hacia su representación numérica puede enfocar la atención en el micro-modelo de los componentes individuales.

La unidad (el ladrillo, el bloque, etc.) y el mortero, o el macro-modelo de mampostería como un material compuesto, depende del nivel de exactitud y la simplicidad deseada, cabe usar las siguientes estrategias modeladoras.

Micro-modelo detallado – las unidades y el mortero en las juntas son representados por elementos de continuo mientras que la interfase de mortero y unidad sea representada por elementos discontinuos.

Micro-modelo simplificada – las unidades expandidas son representadas por elementos de continuo considerando el comportamiento de las juntas de mortero y la unidad, mortero y la interfase está representado en elementos discontinuos;

El macro modelo – las unidades, el mortero y la interfase unidad-mortero son ilimitados del continuo.

En el primero método, Módulo de Young, proporción de Poisson, y opcionalmente, propiedades inelásticas de la unidad y el mortero son tomados en consideración. La interfase representa planos potenciales de la grieta /desliz con rigidez de bausán inicial para evitar interpenetración del continuo. Esto permite el

Capítulo III: Modelación y Comportamiento estructural de las edificaciones de piedra para su restauración.

estudio de la acción combinación de unidad, mortero e interface bajo un vidrio de aumento.

En el segundo método, la exactitud está perdida desde que la mampostería es considerada elástica y la proporción de Poisson no es incluida. La tercera método no hace una distinción entre unidades y juntas individuales pero trata la mampostería como un continuum homogéneo y anisotrópico

Aspectos del comportamiento ablandador.

El reblandecimiento es una disminución gradual de resistencia mecánica bajo un incremento continuo de deformación impuesta a la fuerza sobre una estructura o espécimen material. Es una característica saliente de materiales (frágiles) como ladrillos de arcilla, mortero, cerámica, roca o concreto, cuál fallo debido a un proceso de crecimiento interno progresivo de la grieta.

Aun antes de cargar, mortero contiene micro-fisura debido al encogimiento durante el curado y la presencia del agregado. Los ladrillos de arcilla también, usualmente contienen inclusiones y micro-grietas. Los esfuerzos iniciales y grietas así como también variaciones de rigidez interna y fuerza causan crecimiento progresivo de la grieta cuando el material está sujeto a la deformación progresiva. Inicialmente las fisuras de estas micro-grietas son estables que significan que se crecen sólo cuando la carga es aumentada.

Alrededor de la carga culminante una aceleración de formación de la grieta tiene lugar y empiezan la formación de macro-grietas. Las macro-grietas son inestables, lo cual quiere decir que la carga tiene que decrecer para evitar un crecimiento incontrolable. En una prueba de deformación controlando los resultados de las Bases Conceptuales para los estudios diagnósticos de edificaciones de piedra natural

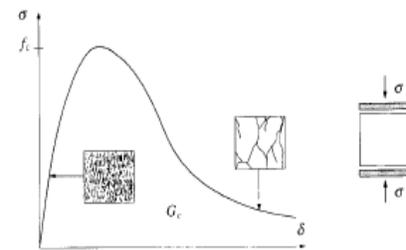


Figura 18. Comportamiento de material frágil bajo compresión uni-axial y definición de modo II energía de fractura (f.denota fuerza compresiva)

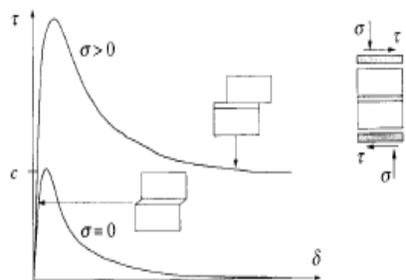


Figura 19. Comportamiento de mampostería bajo cortante y definición de modo II energía de fractura (G_f^{11} denota la cohesión)

Capítulo III: Modelación y Comportamiento estructural de las edificaciones de piedra para su restauración.

posibles pruebas para crecimiento de la macro-grieta resulta en ablandamiento, localización de grietas en zonas pequeñas mientras el resto del espécimen baja la carga.

Pues el fallo de tensión, de este fenómeno se ha sido capaz de identificar para el fallo de esfuerzo a cortante, un proceso ablandador es también observado como degradación de la cohesión en el modelo de fricción de Coulomb. Para el fallo compresivo, el comportamiento ablandador es altamente dependiente en la condición de límite de los experimentos y el tamaño del espécimen. (**Figura 20.**)

Datos experimentales concretos previstos en 14 señalaron que el comportamiento en la compresión uni-axial es gobernado por ambos, continuo local y continuo procesos de fractura.

La **Figura 18** muestran diagramas de característica esfuerzo-desplazamiento para materiales frágiles en la compresión y tensión uni-axial. En el presente estudio, está asumido que el comportamiento inelástico en la tensión y la compresión puede estar descrita por el diagrama de la integral $\sigma - \delta$. Estas cantidades, denotadas respectivamente como energía de la fractura G_f y energía compresiva de la fractura G_c , se asumen como propiedades del material. Por esto método basado basado en la energía, ablandamiento de tensión y compresión puede ser describir como entre el mismo contexto que es posible, porque el mecanismo subyacente de fallo son identical, crecimiento continuo a nivel micro.

Es notado que la mampostería presenta otros tipos de mecanismo de fallo, generalmente identificado como el modo II, eso consta de desliz de la interfase unidad-mortero bajo el esfuerzo de cortante, ver **figura 19**. Otra vez, se asume que el comportamiento inelastico en cortante puede ser explicado por la energía de fractura de modo 11, definido por la integral $\sigma - \delta$ diagrama en el ausencia de carga normal confinado. Cortante es un rasgo saliente del comportamiento de mamposteria que debe ser incorporado en una estrategia de un modelo micro. Sin embargo para modelos continuum, este fallo no puede ser incluido directamente porque la geometria de la unidad y mortero so son discretizado.

4. Propiedades de unidad y el mortero.

Las propiedades de mampostería son fuertemente dependientes en las propiedades de sus componentes. Las pruebas compresivas de fuerza son fáciles de realizar y dar una buena indicación de la calidad general de los materiales usados. El código europeo 6 (15) usa la fuerza compresiva de los componentes para determinar la fuerza de la mampostería, aún una indicación verdadera de esos valores no es simple.

Para unidades de mampostería, las pruebas estándar con platinas sólidas resultan en una fuerza compresiva artificial debido al efecto de atemperación de las platinas. El código europeo 6 (15) minimiza este efecto considerando una fuerza compresiva normalizada f_b , la cuál resulta de la fuerza compresiva estándar, en la dirección pertinente de la carga, multiplicado por un factor apropiado de la forma /tamaño. La fuerza compresiva normalizada se refiere a un espécimen cúbico con $100 \text{ la} \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ y no puede ser considerado descriptivo de la fuerza verdadera. Los experimentos en el comportamiento culminante en un poste uni-axial de ladrillos comprimidos y bloques son virtualmente inexistentes y ninguna de las recomendaciones acerca de la energía compresiva de la fractura G_c puede ser hecha.

4.1- El modo I. El fallo a tensión.

Varios mecanismos de pruebas han servido para la caracterización del comportamiento de tensión de la interfase de mortero-unidad. Estos incluyen a (de tres puntos y de cuatro puntos de unión) e.g ensayo de flexión, compresión diametral (ensayos de fractura), y el ensayo de tensión directa **figura 20**. Con el propósito de la simulación numérica, el ensayo de tensión directa debe ser adoptado como tiene prevista la representación completa del diagrama esfuerzo-desplazamiento y producir el valor correcto de fuerza.

Capítulo III: Modelación y Comportamiento estructural de las edificaciones de piedra para su restauración.

Energía de la fractura: es definida como la cantidad de energía para crear un área unitaria de una grieta a lo largo de la interfase del mortero - unidad.

4.2- El modo II. Fallo a Cortante.

Un aspecto importante en la determinación de la respuesta

de esfuerzo al cortante de juntas de mampostería es la habilidad del mecanismo experimental para generar estado uniforme de esfuerzo en las juntas. Este objetivo es difícil porque las restricciones de equilibrio introducen esfuerzos normales no-uniformes en la junta. Los esquemas experimentales diferentes han servido para la caracterización del comportamiento de esfuerzo al cortante de la interfaz de mortero-unidad.

Estos incluyen esfuerzo al cortante directo, ensayos double y triple (vea **Figura 21**). Para obtener características culminantes, un asunto clave durante un experimento es mantener constante el esfuerzo normal a la junta de la cama.

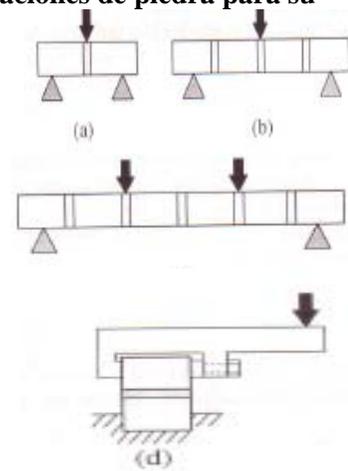


Figura 20.
a) Flexión en tres puntos con una junta.
b) Flexión en tres puntos.
c) Flexión en cuatro puntos.
d) Prueba de Bondwrench.

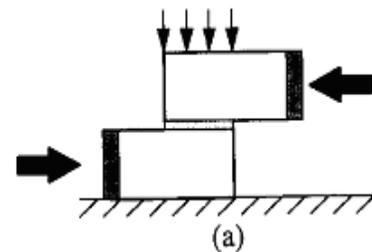


Figura 21 a) Prueba a la fuerza de cortante.

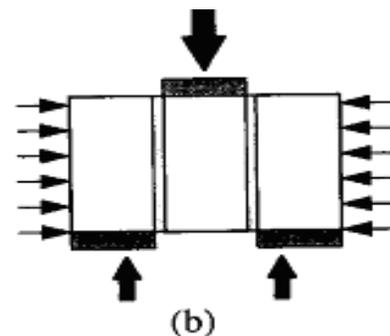


Figura 21.b) Prueba a la fuerza de cortante (doble prueba).

5- Propiedades del material compuesto.

5.1- Comportamiento compresivo uniaxial de la mampostería.

El esfuerzo compresivo uniaxial de mampostería en la dirección normal a las juntas tradicionalmente fue observado como el único relevante propiedad estructural del material, Una prueba



(a)

Fig 22 a

frecuentemente usada para obtener esta fuerza compresiva uni-axial es el prisma apilado, figura 22 a.

Es aceptado que la fuerza compresiva real de mampostería en la dirección normal a las juntas puede ser obtenida a partir de la prueba llamada ensayo RILEM, mostrada en la figura 22b. La prueba RILEM es grande y cara para ejecutar, especialmente cuando se

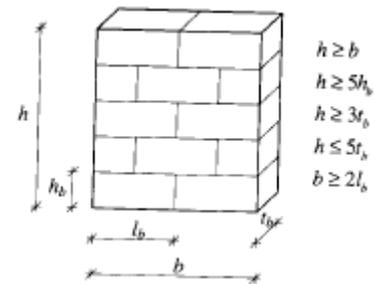


Fig 22 b

asemeja a las pruebas del cubo estándar o del cilindro de hormigón.

5.2 Comportamiento de Tensión uniaxial de la mampostería

El esfuerzo de tensión perpendicular a las juntas de cama, fallo es generalmente causado por la relación de baja esfuerzo de tensión entre las juntas de cama y la unidad. En mampostería con unidades con baja esfuerzo y ligazón mas fuerte que la unidad e.g. mortero de alta resistencia con varias perforaciones , el fallo es posible como resultado de esfuerzos que excede la resistencia de la unidad. Compresión uniaxial de mampostería primacia a un

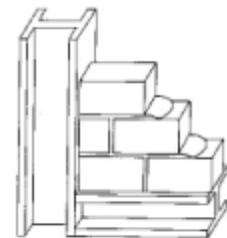


Figura 23 a
Ensayo de una muestra

estado compresión triaxial en el mortero y de tensión de compresión/biaxial en la unidad. Mann y Betzler

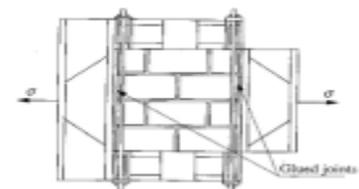


Figura 23 b
Aparato para la rotación de la muestra

Capítulo III: Modelación y Comportamiento estructural de las edificaciones de piedra para su restauración.

observaron que, inicialmente grietas verticales aparecieron en las unidades a lo largo del centro de la muestra, esto provoca el fallo por fractura del prisma..

En el esfuerzo de tensión paralela a las juntas de cama, los ensayos son similares a los que están en la **figura 20** pero sufren desventajas y no permiten una caracterización completa del diagrama de desplazamiento-esfuerzo. Un adecuado ensayo de tensión directo fue arreglado por **Backes**, que consiste de cuatro procesos (figura 23 a). Un aparato fijado a la muestra permite girarlo a 90° al dirección del ensayo como está en la **figura 23b**. La carga es aplicada vía platos de acero fijado a la muestra por un pegamento especial. El diagrama entero de desplazamiento-carga esta rastrada sobre un control de desplazamiento. Dos tipos de fallos es posible, depende del esfuerzo relativo de unidades y juntas como en la **figura 24 ay b**. En el primero el fallo esta en forma zigzag en las juntas de cama y cabeza. El resultado del ensayo de la muestra esta dado por la energía de fractura de las juntas de cabeza y comportamiento de modo II de las juntas de cama. En el segundo fallo, las grietas pasan verticalmente a las unidades y juntas de cabeza. Una diagrama tipico de desplazamiento-esfuerzo muestra una ablandamiento progresivo hasta cero. Los resultados están

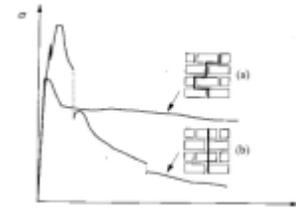


Figura 24 a y b

dados por la energía de fractura de las unidades y juntas de cabeza.

Figura 24 a y b
Diagramas de experimentos de Esfuerzo-desplazamiento para tensión paralela a la junta de cama.
a- fallo de las dos juntas
b- fallo vertical entre juntas de cabeza y unidad.

5.3- Comportamiento biaxial de la mampostería.

El comportamiento constitutivo de la mampostería bajo estado de esfuerzo biaxial no puede ser explicado de los comportamiento constitutivas bajo condiciones de carga uniaxial. La influencia de estado de esfuerzo biaxial ha sido investigada hasta esfuerzo óptimo para suministrar un paquete de esfuerzo biaxial. El esfuerzo biaxial no puede ser explicado solamente en términos de esfuerzos principales porque la

Capítulo III: Modelación y Comportamiento estructural de las edificaciones de piedra para su restauración.

mampostería es un material anisotrópico. Por lo tanto, el paquete de esfuerzo biaxial de mampostería debe ser explicado en términos de un vector de esfuerzo en un conjunto fijo de ejes de materiales o en términos de esfuerzos principales y el ángulo de rotación entre los esfuerzos principales y los ejes de materiales. Básicamente dos métodos de ensayos han sido utilizados, compresión uniaxial orientado a un ángulo con respecto a las juntas de cama (Figura 25).

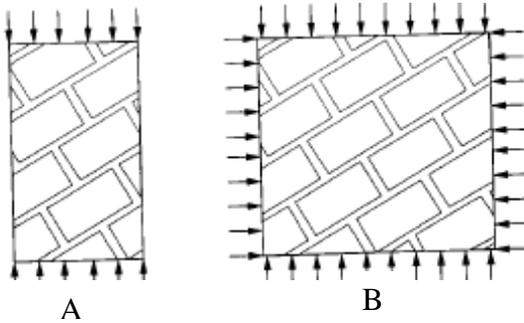


Figura A – Carga uniaxial

Figura B – Carga biaxial

**Figura 25.
Ensayos para esfuerzos biaxial.**

6- Modelos Constitutivos para Fractura.

Se llama modelo constitutivo a una formulación matemática capaz de describir el funcionamiento físico macroscópico de un “sólido ideal”, que resulta luego de aplicar hipótesis simplificativas sobre un sólido real. En la **figura 26** puede verse la interrelación entre distintas disciplinas que establecen las bases en que se fundamenta un modelo constitutivo genérico.

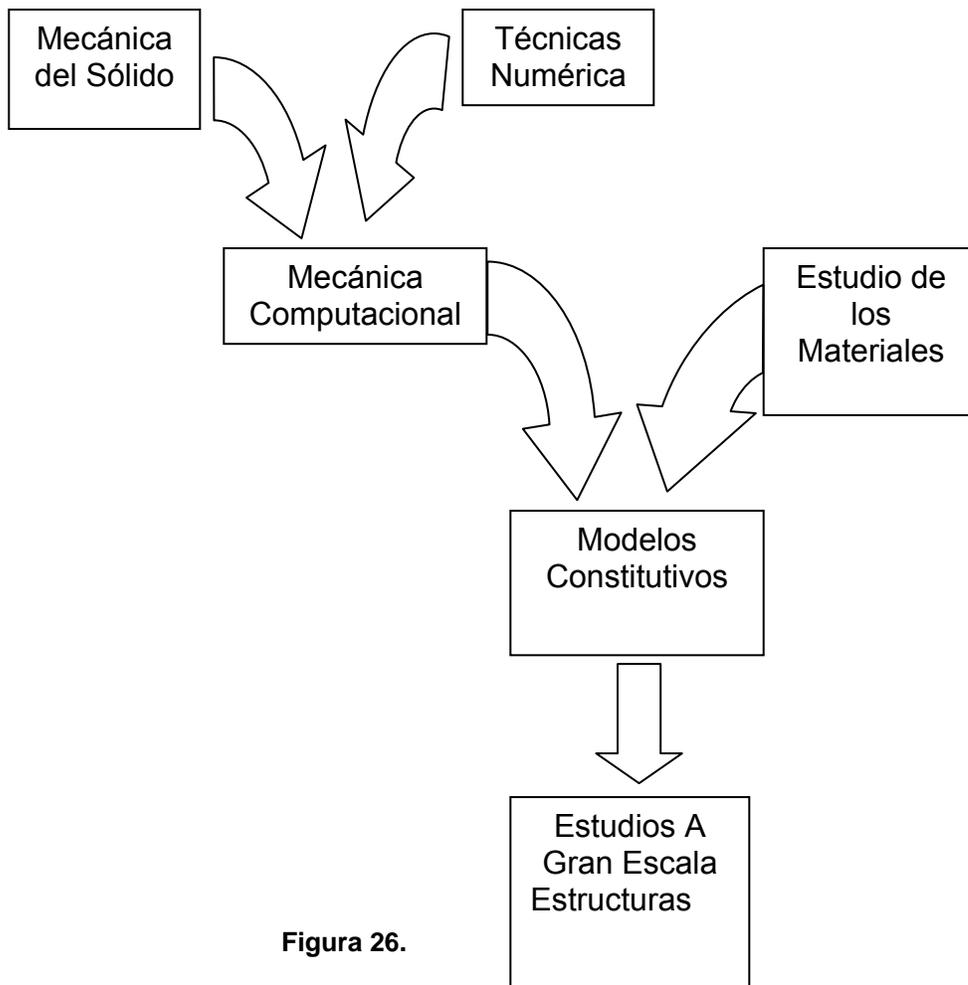


Figura 26.

Modelos constitutivos e interrelación entre las disciplinas que le dan origen.

El comportamiento macroscópico de un sólido puede representarse por distintos caminos, todos ellos permiten obtener muy buenos resultados sin que en ningún caso se esté representando la verdadera física micro estructural que se desarrolla en

Capítulo III: Modelación y Comportamiento estructural de las edificaciones de piedra para su restauración.

el material. Así pues, el denominado fenómeno de fractura puede representarse mediante un modelo basado en mecánica de fractura también mediante mecánica de medios continuos.

6.1- Modelos basados en la Elasticidad Lineal y No-lineal.

Son modelos simples pero inapropiados para representar un sólido en estado de fractura, aunque es importante tenerlos en cuenta para representar su comportamiento dentro del rango elástico.

Estos modelos básicamente son: **Elásticos de Cauchy**, basados en la ley de Hooke, en los cuales el campo tensional σ_{ij} se define a partir del campo de deformaciones ϵ_{kl} en el instante actual mediante una función tensorial.

Hiperelásticos de Green, tales que la tensión σ_{ij} se define a partir de un potencial en función de ϵ_{kl} que es la variable libre del problema.

Hipoelásticos, en los cuales se define en forma arbitraria la variación temporal de tensión en función de la variación temporal de deformación. Estos modelos pueden violar los principios básicos de la termodinámica.

6.2- Modelos basados en la teoría de la plasticidad

Estos modelos permiten la representación de un comportamiento macroscópico no lineal a partir de considerar una disipación energética provocada por el desarrollo de una deformación irrecuperable denominada deformación plástica.

Los posibles modelos basados en plasticidad que permite tratar fenómenos de fractura son:

Plasticidad perfecta: (ensayos metálicos)

Plasticidad con ablandamiento y/o endurecimiento: Permite aproximar mejor el fenómeno de fractura que la plasticidad perfecta

Plasticidad con ablandamiento y/o endurecimiento y/o daño: Completa de mejor manera la formulación no-lineal para tratar problemas de metales y/o geomateriales.

6.3- Modelos basados en la teoría endocrónica.

Estos modelos desarrollados inicialmente para metales y posteriormente adaptados para tratamiento de geomateriales, han significado un gran avance respecto de aquellos basados en la plasticidad clásica. No obstante esto, su vigencia fue muy breve debido a la gran cantidad de parámetros que necesitaban para su definición.

6.4- Modelos de fractura.

Pueden clasificarse en los siguientes tres grupos:

Modelos de mecánica de fractura: Son modelos formulados en factores de intensidad o concentración de tensiones.

Modelos de fisura distribuida: Son modelos basados en la mecánica de medios continuos, pero utilizan conceptos de la mecánica de fractura.

Modelos de fisura discreta: Estos modelos sólo están justificados a nivel de la intuición ingenieril y aprovechan de la representación del sólido en elementos finitos.

A continuación se muestra un cuadro sintético sobre esta clasificación (**Figura 27**).

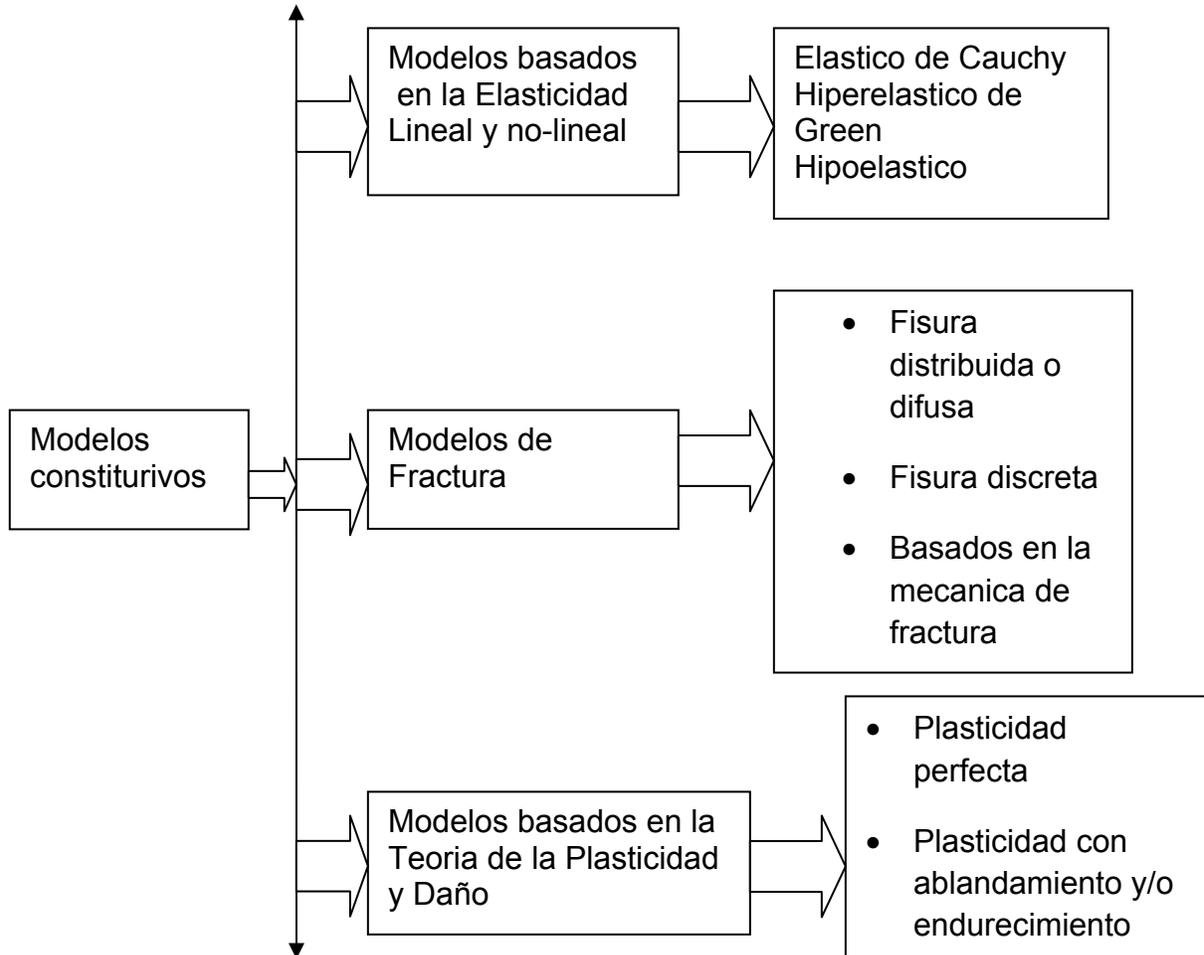


Figura 27: Clasificación de los modelos constitutivos independientes del tiempo, para representar el comportamiento de un sólido.

A continuación serán representados con detalle algunos de estos modelos significativos para el desarrollo de la simulación numérica del fenómeno de fractura.

Modelos basados en la mecánica de Fractura lineal

Se entiende por mecánica de fractura elástica lineal (MFEL) , al proceso mecánico que se desarrolla para generar una fractura sin activar mecanismos plásticos, y por el contrario , cuando en la cabeza de una fisura si producen tensiones que superan el limite de elasticidad, desarrollando plasticidad o cualquier otro mecanismo inelástico, se dice que la fractura es elástica no lineal.

Capítulo III: Modelación y Comportamiento estructural de las edificaciones de piedra para su restauración.

Los parámetros fundamentales que gobiernan la iniciación y propagación de fisuras en los modelos basados en la mecánica de fractura elástica lineal son :

- Los factores de intensidad de tensiones K_1, K_{11}, K_{111}
- Y sus correspondientes magnitudes críticas $K_{1c}, K_{11c}, K_{111c}$

Para los tres modos de fractura respectivamente.

Modelización de un material mediante la mecánica de fractura.

Procedimientos básicos diferentes que se utilizan para estudiar el efecto progresivo de las microfisuras en los materiales en general.

- Modelos basados en la mecánica del sólido continuo: plasticidad, daño etc. Donde se tiene en cuenta la respuesta global de sólido sin considerar la micro mecánica de lo que ocurre en el punto donde se está desarrollando la fractura.
- Modelos basados en la mecánica de fractura, donde se estudian los fenómenos locales de la fractura y su consecuencia en el comportamiento global del sólido.

En cualquiera de las dos familias de modelos mencionados, importa fundamentalmente establecer el comportamiento de toda la estructura y en ambos casos se alcanza este objetivo. No obstante esto, una clara ventaja del primer grupo de modelos respecto del segundo es la posibilidad de combinar fenómenos complejos plásticos, viscosos, daño etc. Junto a la fractura.

Modelos basados en Mecánica de Fractura

Se considera un campo de tensiones plano y homogéneo en una placa isótropa y elástico como la que se muestra en la figura 4.5. se presenta a continuación modelos que son representativos de muchos de los que actualmente se utilizan:

- Modelos de máxima tensión.
- Modelos de la energía de deformación.

Capítulo III: Modelación y Comportamiento estructural de las edificaciones de piedra para su restauración.

- Modelo de la tasa de liberación de energía.

Modelos de la “Máxima Tensión “ Teoría K_{1c}

Este modelo supone que la detección de crecimiento de una fisura se inicia a partir de uno de sus extremos y en forma radial , es decir que se abre ortogonal a la dirección de máxima tensión circunferencia σ_θ . Además, también establece que la propagación se inicia cuando el factor de intensidad de tensiones en Modo 1 , alcanza su valor crítico K_{1c} .

Modelo de la Energía de deformación.

Este modelo ha sido formulado por Sih en el año 1973. Entre sus características, destaca aquella que también considera que la figuración crece en forma radial desde su extremo y siempre ortogonal a la dirección en que la energía de deformación es mínima.

7. Modelos basado en la Mecánica Clásica

Existen distintos puntos de vista para clasificar los modelos constitutivos basados en la mecánica clásica, sin embargo parece adecuado presentarlos ordenados en tres grupos:

Modelos basados en las teorías de elasticidad lineal y no lineal

Modelos de fisura difusa

Modelos basados en la teoría de plasticidad y daño

Cada uno de estos grupos incluye modelos constitutivos que reproducen, en forma numérica, el comportamiento a fractura de materiales frágiles y dúctiles.

Modelos de Fisuras Distribuida-(Hillerberg) (grupo 2)

Este modelo define su estado de comportamiento en función de las tensiones principales. Admite un comportamiento elástico hasta alcanzar el límite de rotura , que habitualmente viene establecido por el criterio de Rankine o de al máxima resistencia a tracción. Luego de alcanzarse este límite, si admite que se produce “el fallo” y el material adopta la forma de un sólido ortótropo, con respuesta diferenciada según la dirección de tensiones principal mayor y menor. En la zona se considera

Capítulo III: Modelación y Comportamiento estructural de las edificaciones de piedra para su restauración.

una pérdida de resistencia, en la dirección normal a la fisura, proporcional al desplazamiento. La ventaja de esta formulación está en evitar así los problemas de objetividad en relación a la malla de elementos finitos que se presentan en las leyes constitutivas tensión-deformación

Modelos de Fisuras Distribuida- Rots (grupo 2)

Entre los modelos de fisura distribuida más difundidos está aquel formulado por J. Rots en 1985 y cuya característica fundamental que lo diferencia del modelo de Hillerborg es la formulación de una ley constitutiva en la zona fracturada, que esta expresada en tensión - deformación y no como en aquel modelo que esta en tensión desplazamiento . Este modelo de Rots, al igual que otros de su tipo, divide el dominio en una parte cuyo comportamiento es elástico y otra donde el comportamiento se descompone en una parte elástica y otra inelástica. Esto implica la siguiente descomposición incremental de las deformaciones.

Modelos basados en la teoría de plasticidad y daño

Se puede clasificar en tres grupos

- 1 modelos de plasticidad con ablandamiento, con o sin degradación de rigidez
- 2 modelos de plasticidad con endurecimiento, con o sin degradación de rigidez.
- 3 modelos de zona inerte combinados con plasticidad con endurecimiento.

Modelos de plasticidad-Chen Chen

Considera tres periodos de comportamiento para cada punto

- 1 periodo Elástico
- 2 periodo Elasto-plástico
- 3 periodo de pérdida total de resistencia.

Apreciaciones sobre el modelo de Chen-Chen

La caída violenta de tensión, constituye una simplificación grosera del comportamiento de un material frágil. Después de límite de fractura no hay concordancia con los resultados experimentales.

Capítulo III: Modelación y Comportamiento estructural de las edificaciones de piedra para su restauración.

El modelo ha sido definido solamente para una superficie de fluencia, esta superficie no es homogénea en las tensiones.

Trabaja con una regla de flujo asociada, que le impide controlar las direcciones de microfisuración.

Modelos de plasticidad y daño – Bazant–kim

Fue uno de los primeros en considerar la combinación de la teoría de la plasticidad con el fenómeno de cambio de rigidez y recibió el nombre de modelo de plasticidad fracturable. Este concepto de fractura como degradación de rigidez había sido ya enunciado por Dougill en su modelo denominado elástico-degradable conocido como “modelo de fractura progresivo”.

Apreciaciones sobre el modelo de Bazanne-Kim

Modelo de compleja implementación

Complicado manejo de los criterios de carga. Por que no hay un único criterio para definir el estado tenso-deformacional de un punto . Este debe ser obtenido por interacciones sucesivas.

Buena aproximación a los resultados experimentales.

No considera la posibilidad de incorporar una regla de flujo plástico no-asociada.

Modelo de plasticidad y daño – Han-Chen

Este modelo, denominado “plástico degradable” presenta una versión mas evolucionada que la que ha formulado Bazant-Kim.

Utilizo sólo una función de carga plástica-degradable, definida en le espacio de deformaciones:

Considera un único decremento de tensión debido a la acción conjunta del fenómeno “plástico - degradable”, permite el uso de una regla de flujo no-asociada, similar a la propuesta por Dougill.

La ley constitutiva tangente, resulta de aplicar la condición de consistencia plástica - fracturable.

Apreciaciones sobre el modelo de Han-Chen

Tiene una ventaja fundamental respecto del modelo de Bazant-Kim, gracias al uso de una formulación plástica en el espacio de deformaciones, elimina así el criterio de fluencia en el espacio de tensiones.

La mayor desventaja consiste en encontrar un criterio de carga en el espacio de deformaciones que considere el fenómeno de la dilatación y el buen comportamiento en altos niveles de tensiones.

Muestra una buena aproximación a los resultados experimentales.

Modelo de plasticidad y daño-Klisinski-Mroz

Es también un modelo del tipo de los denominados plástico - fracturable, por lo tanto puede entenderse como otra versión del modelo de Bazant-Kim.

Supone que el daño interno se refiere a la degradación de rigidez y que viene acompañado de otro fenómeno irreversible en deformaciones, provocado por el proceso plástico. El modelo utiliza dos condiciones de fluencia y dos de degradación en forma alternativa, ya sea se trabaje en el espacio de tensiones o deformaciones.

Apreciaciones sobre el modelo de Klisinski-Mroz

Entre las desventajas de este modelo está la excesiva complicación en definir el comportamiento acoplado entre plasticidad y degradación.

Se observa en los ejemplos de constatación, pues el modelo necesita distintas superficies F_y y D , para cada problema particular con el fin de lograr buena coincidencia con los resultados experimentales.

Las superficies definidas en el espacio de deformaciones, pueden ser deducidas a partir de aquellas definidas en el espacio de tensiones.

Modelos de plasticidad y daño-Simo-Ju

Sus autores le dieron el nombre general de “modelos de tensión - deformación, basado en la mecánica del continuo dañado”. El daño se entiende en este caso como degradación de la rigidez y también como micro- fisuración no direccionada o en todas las direcciones.

Se ha formulada en el campo de las deformaciones y también en el campo dual o de las tensiones. en esta breve presentación se vera la formulación basada en las variables de deformación.

La mecánica del continuo dañado, basada en procesos termodinámicos irreversibles, dependientes de sus variables internas, ha sido formulado para describir el mecanismo previo a la formulación de macro-fisuras. Dentro de esta teoría, Kachanov introdujo el concepto de “tensión efectiva” para describir el comportamiento de un solido degradado.

El modelo supone que la degradación física del material, es el resultado de la iniciación, crecimiento e interconexión entre fisura y poros.

La degradación es modelada a través de una variable de daño escalar, denominada degradación o micro fisuración isótropa, pudiendo también utilizar una variable de daño tensorial para problemas de degradación o microfisuración anisótropa.

Apreciaciones sobre el modelo de Simo-Ju

Se trata del modelo “plástico - fracturable” fundado en los principios de la “mecánica de los solido continuos”

La potente estructura teórica que dispone, hacen de este modelo una herramienta muy versátil.

Ha sido formulado para tratar problemas de grandes deformaciones, fluencia en el tiempo (creep) fisuración ortotropa, etc.

Tiene el inconveniente de considerare una única cuota de degradación, aplicada por igual a la parte volumétrica y desviadora del tensor de rigidez.

Debido a que trabaja con plasticidad asociada, no puede controlar el fenómeno de dilatación.

Tema: El análisis, el diagnóstico y la preservación de monumentos antiguos

Estudio de casos Internacionales y Nacionales

Resumen : El análisis estructural de las edificaciones históricas estudiadas están hecho por métodos de elementos finitos. Primero un análisis histórico de la estructura se hace para saber la edad, posibles reparaciones en el pasado, la geometría etc. La necesidad de una combinación integral por grupos de trabajo en la experimentación y monitoreo para el fin hacer una modelación numérica es imprescindible, porque un conocimiento de las características mecánicas y físicas de los elementos soportantes en las edificaciones históricas son necesario para el correcto análisis de las condiciones estáticas de la edificación. Como sabemos en los edificios históricos las alteraciones son muy restringidas. Monitoreando juega un papel fundamental en los casos estudiados. Varios sistemas de mediciones paralelas han sido implementados para el monitoreo de los desplazamientos de la estructuras para obtener datos cruciales y en muchos casos durante un largo periodo.

En la mayoría de los casos usaron modelos elásticos lineales como comportamiento de los materiales pero también usaron modelos plásticos.

En cada uno de las edificaciones, por método de elementos finitos podían analizar las estructuras por componentes y entonces identificar las causas de las patologías y recomendar soluciones óptimas para una restauración eficiente.

Entre los programas (software) usados son Staad, *SAP 90*, el paquete de elemento finito (ANSYS (1)), El paquete de simulación numérica (Latin Hypercube Sampling), (LHS), Las estructuras están modeladas en 2D y 3D y al final los resultados están comparados.

Los modelos de elementos finitos, tiene grandes ventajas, su rapidez, precisión, menor costo y en sus potentes resultados graficados.

La forma en que el trabajo está hecho se muestra a continuación:

Edificación:

Capítulo III: Modelación y Comportamiento estructural de las edificaciones de piedra para su restauración.

Método de cálculo:

El Modelo del Comportamiento Del Material:

Resumen de como se realizo el trabajo y resultados

Una compilación de cada caso se presenta en el anexo II. El análisis, el diagnóstico y la preservación de monumentos antiguos.

Conclusión

El análisis de construcciones históricas es una tarea difícil debido a las grandes incógnitas en los números de los factores de influencia como el módulo de Young, entre otros.

Una vez que el nivel apropiado de confianza y la comprensión de los principales factores de influencia en las simulaciones son logrados, el analista puede adoptar las simplificaciones necesarias para hacer los cálculos con los factores de seguridad requeridos.

Los modelos constitutivos es una formulación matemática capaz de describir el funcionamiento físico macroscópico de un "sólido ideal", que resulta luego de aplicar hipótesis simplificativas sobre un sólido real.

El comportamiento macroscópico de un sólido puede representarse por distintos caminos, todos ellos permiten obtener muy buenos resultados sin que en ningún caso se esté representando la verdadera física micro estructural que se desarrolla en el material. Así que puede ser basado en la elasticidad Lineal y No-lineal, la plasticidad o de fractura.

El uso de un modelo por encima de otro depende de la simplicidad o la precisión requerida.

Se ha demostrado que la mampostería falla por varios modos, puede ser por tensión (mas crítico), por cortante y por deslizamiento.

De la compilación hecha del estudio de casos, se ha demostrado que es imprescindible el uso de FEM en el análisis estructural de las edificaciones de piedra hoy en día.

Conclusiones generales.

- Considerando los resultados obtenidos por las recopilaciones y observaciones de información realizadas en los capítulos anteriores, se pueden señalar las siguientes conclusiones en relación con los objetivos planteados en la presente Tesis.
- Las fuentes estudiadas mostraron quince formas de deterioro más frecuente en los materiales pétreos naturales de construcción, como consecuencia de distintos procesos mecanismos, químicos, físicos y biológicos; así como once los agentes de alteración, clasificados en extrínsecos e intrínsecos.
- La investigación desarrollada demuestra que los materiales pétreos naturales utilizados para la construcción (piedra natural), lejos de ser imbatible por su aspecto sólido y fuerte por agresiones de origen diverso, se encuentran sometidos a los continuos agentes de alteración que causan su deterioro, envejecimiento y reducción de capacidad resistente.
- La recopilación de la información acumulada durante el desarrollo de la investigación resulta una importante fuente de conocimientos que presenta facilidades de estudio, consulta y distribución, para apoyar la ofensiva contra el deterioro de los materiales pétreos naturales de la construcción en las edificaciones.
- El trabajo de restauración de edificaciones de piedra es muy complicado y necesita personal especializado para la correcta ejecución y óptimo resultado.
- Para el estudio patológico es sumamente importante establecer una metodología general que permite enfocar y dirigir estos trabajos tan

necesarios e indispensables para la realización de un correcto proyecto de intervención.

- Según la complejidad de la edificación se hace necesario tener claro los pasos a seguir para una mayor profundidad en los estudios, explicados y agrupados en este trabajo en los Niveles I, II y III de estudio.
- Las técnicas sofisticadas de análisis son importantes para comprender el comportamiento de este tipo de construcciones y controlar la importancia de los diferentes factores de influencia.
- Independientemente del tipo de estrategia adoptados, los modelos precisos de la mampostería sólo pueden ser usados si una descripción completa del material está disponible.
- Una vista general esta dado de los aparato revelantes de ensayos y resultados, el objetivo no es sólo dar entendimiento profundo en el comportamiento material, sino que también para demostrar que es completamente posible caracterizar el comportamiento de un material en la forma necesaria para el análisis de elementos finitos no lineal.
- En el estudio de los casos se puede aportar la aplicación del estudio aplicado en esta tesis, principalmente en el trabajo integral de análisis estructural y ensayos de experimentación.

Recomendaciones

La investigación sobre patologías y tratamiento de los materiales de construcción pétreos naturales debe continuar, para ello, es necesario crear registros, acumular experiencias que nos aproximen a resultados cada vez más precisos, es por eso que se hace necesario aplicar este trabajo en varios casos para su validación.

Teniendo en cuenta la investigación realizada y las conclusiones que se llegan con el trabajo, se recomiendan que se divulguen los aspectos aquí expuestos, para ampliar el conocimiento sobre los riesgos que presentan las edificaciones de piedra natural y cuales son los procedimientos de anulación y detenimiento más utilizados de los mismos.

Es necesario hacer un estudio detallado de cada patología que se presenta en la piedra según sus características y comportamiento y buscar la forma de introducir sus datos con precisión en los modelos numéricos para la obtención de resultados más fidedignos.

Bibliografía

- (1997) Manual de inspección, corrosión/ Impacto ambiental sobre materiales Rio de Janeiro.
- Alonso E. , G., A. : (1989). Instrumentación de obras. España.
- Alvarez De Buergo Ballester, M., Gonzalez Limon, T (1984). Restauración de edificios monumentales".
- Álvarez Rodríguez, O. "Monografías sobre Conservación de Edificaciones, Monografía 6. "Muros de fábricas. Tipologías constructivas. Principales deterioros. Técnicas de intervención."
- Alvarez Rodriguez, O. (. 2003). Patología, Diagnostica y rehabilitación de Edificaciones
- Alvarez Rodriguez, O. (2004). Metodología para el diagnostico de edificaciones en el centro Histórico de la Habana. Santiago de Cuba.
- Álvarez Rodríguez, O. Patología, Diagnóstico y Rehabilitación de Edificaciones, Monografía, Capítulo 1. "Generalidades y conceptos básicos", ISPJAE. Ciudad de la Habana.
- Astudillo Pastor, R., Garcia Ruiz, P. (1995.). El ensayo de gato piano como técnica para la auscultación in situ de obras de fabrica.
- Babe, M. (1986). Mantenimiento y reconstrucción de edificios. La Habana,
- Beckwith , T., G. and Buck, N.L. , (1993.). Mecanical measurements
- Brendel, A. E. T. t. (1985). From the user"s Viewpoint , society for experimental mechanics,. society for experimental mechanics,.
- Cabrera García, M. J. y. G. M., Rosa Maria (1996). Patología de las Viviendas de Bajo Consumo,, UCLV
- Croci, G. (1998). Los colapsos ocurrieron en la Basílica de St Francis de Assisi y en la Catedral de Noto. LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA RESPUESTA ÚLTIMA DE PUENTES DE ARCOS. Rome (Italia), CIMNE.
- Eldridge , H. (1982). construccion . Defectos comunes. Barcelona.

-
- Eibert, R. M., Ordáz, J., Alonso, F.J. y Montoto, M (1997). Manual de diagnóstico y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos. Colegio de aparejadores y arquitectos técnicos de Barcelona.
 - Feliu, S. y. A., C: Manual de Inspección de obras Dañadas por corrosión de Armadura. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CEN1M) y el Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la construcción, Madrid, España . 1989. (1989). Manual de Inspección de obras Dañadas por corrosión de Armadura. Madrid, España.
 - Fernández Medina, U. (1984.). La calidad en la construcción Havana, Cuba.
 - Ferrari Da Pasano, C. (1995.). Static preservation of the Duomo o Milan.
 - Hoffman, K. O. (1984). Consejos prácticos sobre la aplicación de bandas extensométricas.
 - I.G., G. (1984.). Materiales de construcción.
 - I-DEAS (1990). Structural Dynamics Research Corporation.
 - Johnson , S. (2000). Deterioro, conservación y reparación.
 - Leandro Cámara, P. L. (1998). Catedral de Santa Maria en vitoria. El estudio de su estructura y las Propuestas de Restauración. Análisis estructural de Construcciones Históricas. Madrid., CIMNE.
 - Lombardero, M., García Guinea, Javier (1998.). La Piedra Natural Española y su uso en la Arquitectura. España.
 - Mark, R. (1998). La crítica de la Catedral de Palma de Mallorca. Análisis estructural de construcciones Históricas. Madrid, CIMNE.
 - Mark, R. (1998). Monitoreo, consolidación diferencial y movimiento termal en la Catedral Nacional de Washington LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA RESPUESTA ÚLTIMA DE PUENTES DE ARCOS. USA, CIMNE.
 - Méndez Vivar, J. (1997). Importancia de la Química en la Conservación de Monumentos de Piedra Caliza y Mármol. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México.
 - Menéndez Menéndez, J. (1986.). Desperfectos en construcciones de ingeniería y arquitectura. Ciudad de La Habana. Cuba. .

-
- Menendez, J. (1986). Desperfectos en construcciones de ingeniería y arquitectura. La Habana, Científico Técnica.
 - Monjo Carrió, J. (1998). Tratado de Rehabilitación. Madrid España.
 - Olivera Ranero, A. (1988). Bases Metodológicas para la organización de las tareas de conservación de viviendas en Cuba. Santa Clara, UCLV. **Doctorado**.
 - Olivera Ranero, A. (2003). Apuntes sobre diagnóstico patológico y la evaluación del estado técnico de edificaciones. Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura. Santa clara, Cuba, UCLV. **Maestría**.
 - Olivera Ranero, A. (2003). Apuntes sobre el diagnóstico patológico y la evaluación del estado técnico de edificación Villa Clara.
 - Olivera Ranero, A. Patologías de los materiales de la Construcción.
 - Olivera Ranero, A. Patologías de los materiales de la Construcción. Tecnología VII Plan de Clases № 9, UCLV Facultad de Construcciones, Santa Clara.
 - Ortega Andrade, F. (1999). La Fábrica pétreo y sus patologías. Gran Canaria, España.
 - P. Roca , J. L. G., E. Oñate and P.B. Lourenco. (1998.). Structural Analysis of Historical Constructions 11. Possibilities of Numerical and experimental technique. .Barcelona Spain.
 - Peraza Zurita, Y. (2004). Biodeterioro por Microalgas en Fuentes de Mármol, Universidad de Granadas.
 - Pere Roca, L. P., Eugenio Oñate y Alex (1998). Barcelona Catedral. Análisis estructural de construcciones Históricos. España, CIMNE.
 - Perez Echazábal, L. (2000). Influencia del medio ambiente en la patología de los monumentos de alto valor histórico construidos con materiales pétreos naturales. Departamento de Tecnología La Habana, ISPJAE. **Doctorado**.
 - Pérez Echazábal, L. (2000). Patologías, Medio Ambientes, Monumentos. Facultad de Arquitectura. Ciudad de la Habana, IPSJAE.
 - Ramirez, R. M. y. A. R. S. (1998). El análisis, el diagnóstico y la preservación de monumentos antiguos. Análisis estructural de construcciones Históricas. España, CIMNE.

-
- Río Suárez, O. y. R., Jesús (1998). Aplicación de los materiales Cerámicos, Vidrios y Piedras Naturales en la Construcción. España.
 - Rodríguez de la Fuente, J. (2002.). "Esa Maravilla de la Naturaleza Llamada Piedra." **Vol. ISSN 1680-0354, Nº 4**.
 - Rodríguez Triana, F. M., Viña González, Zenia. (2002). Metodología para el diagnóstico de las edificaciones del Centro Histórico de la Habana. Habana, ISPJAE. **Diploma**.
 - Rossi, E. M. P. R. y. C. (1998). La vigilancia y el monitoreo de estructuras antiguas. LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA RESPUESTA ÚLTIMA DE PUENTES DE ARCOS. Bergamo (Italia), CIMNE.
 - S. Oller. (2000). Fractura Mecánica Un enfoque global. Barcelona, España, Centro internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. (CIMNE).
 - Schindler, R. (1966.). Tratado Moderno de Construcción de Edificios.
 - Segre, R., Cárdenas, Elina y Aruca, Lohania: (1986). Historia de la Arquitectura y del Urbanismo: América Latina y Cuba.
 - Tejera Garófalo, P. ISPJAE, Metodología de la investigación. Ciudad de la Habana.
 - Tejera Garófalo, P. y. o. " Fichas técnicas para la rehabilitación y reparación de edificaciones.
 - Tejera Garófalo, P. y. o. Patologías de las Edificaciones. La Habana.

ANEXO I. Características de los diferentes modelos y sugerencias de aplicación de los mismos.

Modelos de materiales Lineales

Modelo	Definido por	Aplicación	Tipos de material	Características	Elementos	Ejemplos de aplicación
Lineal Elástico Isotrópico	Módulo de Young, coeficiente de Poisson	Para pequeñas deformaciones, cuando el material tiene un comportamiento elástico uniforme a lo largo de todos los ejes	Metálicos, polímeros, materiales frágiles, hiper-elásticos (tipo gomas), materiales geológicos	Usados en escenarios en los que el objeto de interés está diseñado para no llegar al rango no lineal de un material isotrópico	Vigas; 2D deformación plana, tensión plana y axisimétricos; bricks 3D; shell	Test de caída, un ensayo de pandeo de paneles de aluminio sin plasticidad o un Response Spectrum de un cristal en el que las tensiones están por debajo de las de rotura.
Lineal Elástico Ortotrópico	Módulo de Young, coeficiente de Poisson, Módulo a cortante (shear modulus)	Para pequeñas deformaciones, cuando el modelo no tiene propiedades elásticas uniformes en todos los ejes	Composites, polímeros, laminados, maderas	Usados en escenarios en los que los objetos de interés están diseñados para evitar el rango no lineal de un material ortotrópico	Vigas; 2D deformación plana, tensión plana y axisimétricos; bricks 3D; shell	Simulación para determinar la resistencia de una cinta de embalaje.
Termo- Elástico	Coefficiente de expansión térmica dependiente de la temperatura, Módulo de Young, coeficiente de Poisson	Usado en eventos en los que tienen lugar pequeñas deformaciones, cuando las estructuras experimentan variaciones de temperatura que producen dilataciones y contracciones (y por tanto cargas adicionales)	Metálicos, polímeros, materiales frágiles	Usados en escenarios en los que el objeto de interés está diseñado para no llegar al rango no lineal	2-D tensión plana, bricks 3D, tetraedros	Optimización de un panel vitrocerámico, que debe ser capaz de soportar grandes gradientes de temperatura y resistir su uso diario

* Estos modelos de material lineales están disponibles en todos los paquetes de Accupak

Modelos de material no lineales

Modelo	Definido por	Aplicación	Tipos de material	Características	Elementos	Ejemplos de aplicación
Elástico por puntos	Curva por puntos de deformación unitaria-tensiones	Para modelar miembros estructurales que siguen una curva determinada deformación/tensión	Metales, polímeros, hiperelásticos (gomas), geológico, frágiles	Tanto la carga como la descarga son siguiendo la curva definida	Barra (trust)	Análisis de cables de catenaria para predecir su deformada; pandeo de estructuras elásticas reticuladas
von Mises con endurecimiento isotrópico	parte elástica: módulo de Young; parte plástica: límite elástico y módulo de endurecimiento por deformación. Coeficiente de Poisson	Usado para materiales con pequeñas o grandes deformaciones, que tienen un endurecimiento isotrópico al pasar el límite elástico	Metales, polímeros	Permite simular un material plástico por dos rectas, una para el tramo lineal y otra para el plástico (forma estándar bilineal). Se produce un incremento del límite elástico si se entra en la zona plástica, v la	Vigas; 2D deformación plana, tensión plana y axisimétricos; bricks 3D; shell	Análisis de tensiones de una orejeta en un recipiente a presión para determinar si se llega a plasticidad y si se distribuyen las cargas correctamente por la orejeta

				descarga se realiza de forma paralela a la recta elástica definida. En el formato multilineal se puede especificar la curva deformación-tensión mediante puntos		
von Mises con endurecimiento cinemático	parte elástica: módulo de Young; parte plástica: límite elástico y módulo de endurecimiento por deformación. Coeficiente de Poisson	Usado para materiales con pequeñas o grandes deformaciones, que tienen un endurecimiento cinemático al pasar el límite elástico	Metales, polímeros	Permite simular un material plástico por dos rectas, una para el tramo lineal y otra para el plástico (forma estándar bilineal). Se produce un incremento del límite elástico si se entra en la zona plástica, y la descarga se realiza de forma paralela a la recta elástica definida. En el formato multilineal se puede especificar la curva deformación-tensión mediante puntos	Vigas; 2D deformación plana, tensión plana y axisimétricos; bricks 3D; shell	Análisis de una horquilla para guardacabo que soporta líneas de alto voltaje para asegurar que soportarán las cargas dinámicas causadas por el peso de las líneas, el hielo o el viento; plasticidad cíclica de sistemas de piping, sujetos a cargas de presión variables
Termo- Plástico	Coeficiente de expansión térmica, módulo de Young, coeficiente de Poisson, límite elástico uniaxial y endurecimiento por deformación en función de la temperatura	Usado cuando las tensiones pueden exceder el límite elástico, y el comportamiento mecánico es afectado por cambios de temperatura	Metales, polímeros	Adecuado para estructuras donde la carga de temperatura está lejos del punto de fusión de los materiales; no se dan efectos de creeping o movimientos masivos de dislocaciones en el material	2D deformación plana, tensión plana y axisimétricos; bricks 3D; tetraedros	Análisis mecánico de complejas carcasas de bombas, aplicando una carga térmica (calculada con el módulo térmico de Algor)
Mooney- Rivlin	Curva de deformación-tensión definida por las constantes de Mooney-Rivlin o por una curva por puntos	Análisis de pequeñas o grandes deformaciones de materiales hiperelásticos incompresibles	Hiperelásticos (gomas)	La carga y descarga siguen la curva definida por el usuario. No se producen deformación plástica	2D tensión plana, bricks3D, tetraedros	Análisis de apoyos de goma de motores sujetos a vibración; sellos de goma para la industria de válvulas y escobillas de limpieza de parabrisas
Curva de descripción	Módulos instantáneos a tracción y cortante, definidos por una función de pares de puntos en función de la deformación unitaria en volumen	Para describir la respuesta de tensión correspondiente a una deformación unitaria en volumen	Materiales geológicos	No se utiliza una condición de plasticidad explícita. La carga y descarga del material está definida por la historia de la deformación en volumen solamente	2D tensión plana y axisimétrico, bricks3D	Análisis de proyectos de excavación donde la deformación de las paredes después de la excavación es crítica

Módulo tangente variable	Módulos a tracción y cortante son funciones de invariantes de tensión-deformación	Para describir la respuesta en tensión de deformación unitaria en volumen	Materiales geológicos	La relación funcional entre módulo e invariantes reemplazan la condición explícita de plasticidad	2D deformación plana, tensión plana, y axisimétricos	Análisis de rocas en cimentaciones, zapatas de hormigón en puentes y otras estructuras
Descripción por curva y tensión de corte	Módulos instantáneos a tracción y cortante, definidos por una función de pares de puntos en función de la deformación unitaria en volumen	Para describir la respuesta de tensión correspondiente a una deformación unitaria en volumen para materiales que pueden oponer una cantidad específica de tensión	Materiales geológicos	Las mismas que para curva de descripción, salvo que las tensiones a tracción no pueden exceder la presión de la gravedad en el punto en el que se aplica la carga	2D deformación plana	Análisis de suelos e interacción entre estructuras en túneles y áreas de alrededor. El modelo de material permitirá al suelo/estructura entrar en tensión para simular grietas en el suelo o el material de la pared del tunel
Elástoplástico de Drucker-Prager	Condición de plasticidad de Drucker-Prager	Usado para materiales granulados que experimentan un cambio en la condición de plasticidad debido a una deformación unitaria volumétrica	Materiales geológicos	Toma en cuenta el ángulo de fricción y la cohesión	2D deformación plana, tensión plana, y axisimétricos	Análisis de la estructura del suelo debajo de edificios o presas. Este modelo permite que se dé plasticidad durante el análisis, y puede considerar el asentamiento de una plataforma petrolífera en la que el suelo no es infinitamente
Visco-elástico	Parte elástica: módulo de Young; parte plástica: límite elástico y módulo de endurecimiento por deformación. Función general de ley potencial de cedencia	Cuando las tensiones están por debajo del límite elástico con un comportamiento de cedencia representado por una ley potencial	Materiales metálicos y polímeros	La ley uniaxial es ajustada a las condiciones generales utilizando la curva efectiva de tensión-deformación. Las propiedades de material y los coeficientes de creep pueden ser dependientes de la temperatura	2D deformación plana, tensión plana y axisimétricos; bricks 3D	Análisis de creeping en soldaduras de PC a elevadas temperaturas; tensiones de relajación en pernos apretados debido a creep térmico

Visco-Plastic	Parte elástica: módulo de Young; parte plástica: límite elástico y módulo de endurecimiento por deformación. Función general de ley potencial de cedencia	Cuando las tensiones están por debajo del límite elástico con un comportamiento de cedencia representado por una ley potencial	Materiales metálicos y polímeros	La ley uniaxial es ajustada a las condiciones generales utilizando la curva efectiva de tensión-deformación. Las propiedades de material y los coeficientes de creep pueden ser dependientes de la temperatura	bricks 3D	Análisis de conformado metálico o procesado de plásticos donde plasticidad y creeping ocurren al mismo tiempo; deformación y creeping de una caja de embalaje de manzanas debido a calentamiento por el sol
---------------	---	--	----------------------------------	--	-----------	---

**Tema: El análisis, el diagnóstico y la preservación de monumentos antiguos
Estudio de Casos Internacionales.**

Edificación: El Catedral de Ciudad de México

R.Meli y A.R Sanchez Ramirez

El Instituto de Ingeniería

La Universidad Nacional de México

México



Método de cálculo

Figura 6

FEM

El Modelo del Comportamiento Del

Material: Modelo Plástico y modelo elástico

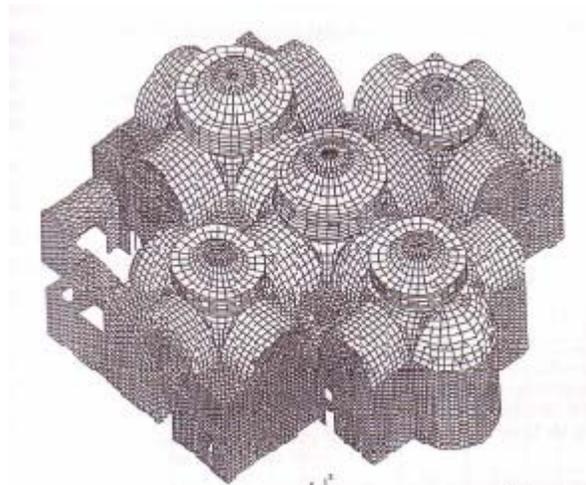


Figura 6

Resumen de como se realizo el trabajo

Primero una descripción geométrica del edificio se hizo junto con sus patologías

Un análisis de esfuerzo y valoración de estructural en forma segura:

Primero un modelo tridimensional (FEM) de la parte central del templo incluyendo su fundación fue estudiado. En adición un análisis plástico de los elementos estructurales principales fue realizado para identificar su mecanismo de colapso y el factor de seguridad involucrado. La preocupación principal fue especialmente en la columna central de la nave.

Para reproducir las pocas linealidades de la estructura, las modificaciones diferentes fueron introducidas en el modelo estructural “los elementos débiles “con módulos muy bajos de elasticidad se usó para representar grietas principales en áreas donde los esfuerzos de tensión apareció en el análisis.

Resultados

De **FEM**, una representación esquemática del flujo de fuerzas derivadas de los resultados de tal modelo de la estructura no deformada. Puede ser apreciado que el peso es transmitido hacia la fundación esencialmente por las fuerzas axiales en las bóvedas, arcos, columnas y paredes.

El **FEM** indicó un nivel casi constante de esfuerzo en las columnas centrales debido a las cargas gravitacionales, al contrario, el estado de esfuerzo determinado por flat jack indicó una variación lineal a través de la sección evidenciando la presencia de momentos de flexión grandes

Conclusión

La suposición de un continuo elástico lineal, estructura isotropica, involucrada en que la **FEM** está muy distante de ser descriptivo de las condiciones de una estructura de esta clase, considerando su fuerza de tensión baja, su agrietamiento grande y las muchas fuentes de discontinuidad. No obstante tal análisis todavía puede proveer un cuadro útil del estado global del esfuerzo y pueden identificar zonas críticas mereciendo más estudios precisos.

Los resultados cuantitativos de análisis de elementos finitos no pueden servir directamente para valoración de la seguridad estructural.

Estructura: Barcelona Catedral

Pere Roca, Lara Pellegrini, Eugenio Onate y Alex Hanganu

Universidad Politecnica de Catalunya

El centro internacional para el método Numérico en Diseñar (CIMNE)

Gran Capita s n 08034 Barcelona, España



Método de Cálculo: FEM y GMF (la Formación Generalizada de la Matriz (No Lineal))

Para el análisis FEM --- Fractura

Resumen de como se realizo el trabajo: El análisis de la Bóveda de la Nave (GMF)

Primero el modelo simplificado de análisis GMF fue efectuado modelando la bóveda como un sistema equivalente enmarcado compuesto de arcos diagonales, transversales y clerestory . La bóveda trezada fue tratada como un conjunto de enlaces rígidos asociándole las costillas y restringiendo su movimiento. La carga muerta fue distribuida sobre los arcos fig 7. que depende del criterio que consiste en rebanar la bóveda en arcos paralelas. Como esperaba este método fue inadecuada.

Análisis de la bóveda usando (3D) elementos finitos sólidos

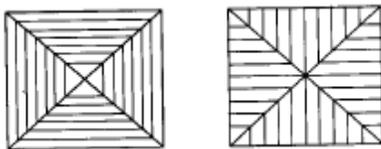


Figura 7 a y b



Figura 8

Fig 7A: criterio de la distribución de la carga

Fig 7b: Discretización de la tejedura como un conjunto de elementos lineales.

Fig 8 : El modelo de la bóveda como un sistema de uni-dimensional

El modelo **FEM** de la bóveda cuenta para el sistema de costillas, el tejedura, el rehincho de relleno al riñón de la bóveda, el relleno del hormigón y los muros laterales, todo definido por las propiedades mecánicas correspondientes. Algunas propiedades de los materiales fueron asumidos. El mampostería ashlar fue estimado a una fuerza compresiva de 74.2 Mpa. Fig 12 muestra una distribución de esfuerzo obtenido de la bóveda sujetado a carga muerta.



Fig. 12

Los resultados: Con el uso de GMF gradualmente aplicándole las cargas gravitatorias por encima, más allá de los pesos muertos, la condición en funciones de la estructura podría ser visualizar, el desarrollo progresivo de grietas y la apariencia final de un número de zonas aplastadas de fallo (el higo .14 - 16) fallos fueron alcanzadas pues un total le aplicó igual gravitacional de carga para dos veces al peso muerto total. Durante el FEM, el fallo ocurrió para una carga igual a dos veces al peso muerto como puede ser visto en (figura 19,20)

Conclusión

Ambos métodos fueron probados satisfactorios en analizar ambos la Nave de Bóveda y de la Nave de armadura hasta un proceso de carga. Ambos comparten aptitud para describir geometría complicada y exactamente computar y distribuir pesos muertos en la estructura, esto incluye ecuaciones constitutivas adecuadas a modelar las características esenciales del comportamiento de los materiales (la incapacidad de la mampostería para conllevar tensión en particular)

La crítica de la Catedral de Palma de Mallorca

Robert Mark

Princeton University

Princeton, NJ08544

EEUU



El método de cálculo

Modelo de foto elástico

Modelo del comportamiento del material.

Elástico

Resumen de como se realizo el trabajo

Para el propósito de modelación, la estructura de una bahía repetitiva típica son primeros reducidos para su forma más básica, una serie de marcos paralelos transversales que consiste en los elementos principales que soportan carga principal, los apoyos de muelles, las paredes laterales y las costilla de bóvedas. Se asume

que fundaciones son no traslado y viento cargando la parte superior de ambas paredes del clerestory. El modelo-plástico de epoxi, cargado con peso dimensionado a la distribución de viento y totalmente los pesos de la estructura real, son calentados en un horno a cerca de 150oC, en cuál temperatura, el epoxi cambia de su temperatura del cuarto (condición vidriosa a estado parecido a la goma). Deformación de carga está cerrada en el modelo y su estado actual lentamente se enfrió y el epoxi vuelve a su estado vidrioso. Observado en un Polariscopio el efecto de deformación dentro del modelo que son interpretadas indicando distribuciones de fuerza.



Figura.5

Figura.5: Patrón de interferencia photoelastico en modelo del Nave de Palma bajo carga muerta

Conclusiones

Los estudios de modelos numéricos más detallados y ahora destinados para restauración de edificios históricos que también pueden dar razón de la secuencia de la construcción edificadora, el estado presente del material de la edificadora (por ejemplo fisuras de la piedra y deslizamiento) el comportamiento no lineal del morteros, y cargas que no pudieron haber sido visualizadas por los diseñadores originales (por ejemplo el terremoto)

Catedral de Santa Maria en vitoria. El estudio de su estructura y las Propuestas de Restauración.

Leandro Cámara, Pablo Latorre.

Larorre y Camara, SL

Puerto de los Leones, yo

Majadajonda, 28220 Madrid.

El correo electrónico: Lyc@arquired.es

Espana.

El método de cálculo

FEM

El resumen del análisis estructural

Una descripción elaborada del edificio se hizo junto con el plan del primer piso.

El edificio aparece en la primera visita como un cuerpo anormalmente deforme, con numerosas fisuras. La mayoría ha estado históricamente curada. Puede verse que la reparación y el refuerzo han tenido lugar sobre los años que es una ventaja para ofrecer un punto de partida en la revisión del comportamiento reciente de la estructura. Las fisuras selladas que desde entonces han abierto otra vez demuestran que estos daños están todavía en vigencia y por consiguiente que las soluciones dadas en la restauración previa al trabajo fueron falsas.

El análisis estructural: El modelo numérico

Dado la geometría del edificio y suponiendo que los materiales son homogéneos, modelos numéricos fueron una ventaja, el edificio tenía ciertas tensiones, este descubrimiento ayuda dibujar zonas de compresión y para evaluar ciertas variables estructurales. Algunos de los resultados obtenidos no es lo que se habría esperado,



como omiten numerosas variables, e.g. El comportamiento de largo plazo de terrenos, heterogeneidad intrínseca de la técnica diferente de mampostería, el surgimiento de fisuras y la formación pseudos goznes debido a la sobre-compresión de ciertos miembros.

El monitoreo y movimientos activos

La activación de algunas de fisuras y el cambio de dirección de la estructura ha sido constantemente y precisamente controlando la evolución de estos movimientos y relacionándolos con los cambios termales y registrándolos a todo lo largo de un período de cuatro años, a través de un sistema informatizado.

Las acciones transversales

Con la excepción de esta mejora de la construcción existente haremos un uso multidireccional de otras propuestas de restauración.

E. g. La sustitución de las estructuras del techo que están en muy mal estado.

En el refuerzo del punto con técnicas modernas

El arrostramiento de bóvedas

Conclusión

El continuo registro de seguimiento e informatizado:

Una propuesta para la necesidad de un seguimiento continuo e indefinido del estado de la estructura, Esto nos dejará reaccionar con la ayuda de esos post esfuerzo sistema para interactuar con el edificio histórico en caso nos hayamos equivocado.

La prótesis por consiguiente servirá para el propósito con que fue hecha: Suplementar las deficiencias la estructura demuestra.

Monitoreo, consolidación diferencial y movimiento termal en la Catedral Nacional de Washington

Construyendo historia

Los períodos de construcción se extienden a lo largo de del 1907 al 1990. Como los arquitectos de esta catedral del siglo veinte trataron de seguir precedente arquitectónico gótico, la vasija principal de mampostería de compostura de carga se construyó sin juntas de expansión termal.

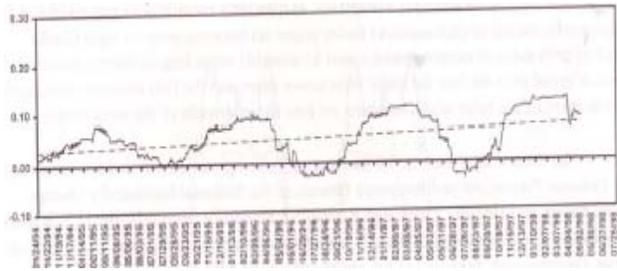


Los asuntos estructurales de diseño y la función

El propósito de la catedral ha tenido generalmente éxito; Algunos problemas referentes a los detalles locales de construcción han salido a relucir como la infiltración en el corazón del ladrillo, consolidación diferencial y expansión termal. El rango normal de servicio de clima es muy alto, esta variación de temperatura le da lugar al movimiento apreciable a todo lo largo de la edificadora, más notablemente, apertura y cierre cíclico de juntas y grietas en las paredes, pisos, y bóvedas adyacentes para las torres centrales y del oeste.

La observación y la instrumentación

El monitoreo en la Catedral es ser llevado a cabo usando dos estrategias imbricadas. La primera (1) grabación trimestral de anchuras de la abertura en diez posiciones por medio de la antena automotora calibra puesta entre pares de bloques rígidos fijados a ambos lados de g



Movimiento de brecha vs. Tiempo

(2) La grabación mensual de elevaciones del nivel regordete.

La segunda grabación de cada hora de movimiento de la grieta en modelo Technovision de cuatro posiciones. Las medidas mecánicas de movimientos de la abertura (1) indica variación estacional, abertura en el invierno y cerrando en el verano. Los datos de los potenciómetros de la cuerda generalmente están de acuerdo con las medidas mecánicas de la abertura, sin embargo grabación automática, eficazmente continua de datos de estos instrumentos facilita discriminaciones de tendencias de largo plazo.

Conclusión

En lo que se refiere a la estrategia monitorea, la combinación de dispositivos mecánicos y electrónicos, especialmente donde hay un traslado de puntos de medidas, le provee más allá la credibilidad a los datos. Además, como discutido en la sección de monitorear, el registrar continuo automático de datos facilita la discriminación de tiende de largo plazo.

Estudio de Casos Nacionales.

Estudio de Casos Nacionales.

Estudio de Casos Nacionales.

Estructura: El Tempete

Metodología para enfrentar los trabajos de investigación.

La importancia primordial de la obra y el valor arquitectónico e histórico de la misma implica, que antes de comenzar los trabajos de investigación se establezca una metodología general que permita enfocar y dirigir los trabajos de investigación, con el objetivo de conocer los parámetros técnicos constructivos necesarios e indispensables para la realización de un correcto proyecto de restauración. De forma colegiada entre toda la comisión técnica se estableció la siguiente metodología de trabajo:

1. Recopilación de toda la base documental de la edificación.
2. Estudio tipológico de la estructura, identificación del comportamiento estructural de la edificación y forma de transmisión de las cargas.
3. Estudio y levantamiento dimensional de la edificación y los elementos estructurales que la conforman.
4. Caracterización de los materiales.
5. Proceso de auscultación y levantamiento patológico de la edificación.
6. Proceso de análisis de las patologías y definición preliminar de sus posibles causas (hipótesis iniciales)
7. Modelación y análisis aproximados de la edificación.
8. Modelación y análisis 3D inicial de la edificación.
9. Estudio de contraposición de las patologías con los resultados de la modelación.

10. Calibración definitiva del modelo y realización del análisis de la edificación modelando las afectaciones patológicas.
11. Análisis final de los resultados y validación de las hipótesis.

Estudio tipológico de la estructura.

Consta el monumento de un arquitrabe de seis columnas de capiteles dóricos y zócalos áticos, con cuatro pilastras más en los costados.

De la explicación anterior se deriva que los elementos estructurales que se evidencian dentro de la edificación son:

- Cubierta.
- Sistema portante de vigas de maderas que soportan la cubierta.
- Muros de cargas.
- Columnas
- Solución de cimentación.

El resto de los elementos de la edificación juegan una función decorativa que le imprimen a la edificación una singular y excelente elegancia.

Estudio y levantamiento dimensional de la edificación y los elementos estructurales que la conforman.

En el estudio de levantamiento dimensional de la edificación y los elementos estructurales que la conforman, primeramente se realizó un levantamiento planimétrico y altimétrico de la edificación, trabajos que dieron como resultados el plano de planta y los valores altimétricos que conforman la estructura (figura 7).

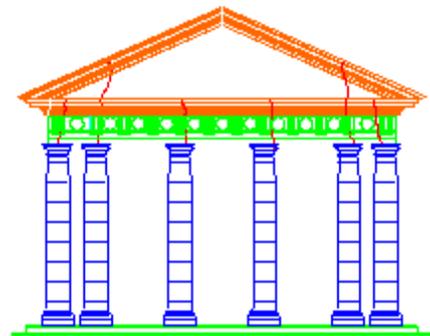


Figura 7

Figura 7: una vista de la edificación con sus correspondientes patologías estructurales.

El levantamiento planimétrico consistió en ubicar la posición (x,y) de cada parte componente de la edificación en un sistema arbitrario de referencia. En todo este trabajo de levantamiento planimétrico se empleó un distanciómetro láser -Laser Power-Disto - de alta precisión.

La altimetría consistió en medir con el distanciometro láser y otros equipos las dimensiones de las estructuras y además la altura desde el piso hasta la parte inferior de techo de la edificación. De forma análoga al estudio de levantamiento planimétrico en el levantamiento altimétrico se estudiaron las secciones transversales de la estructura y sus elementos componentes, para de esta forma determinar la geometría y dimensiones exactas de la misma.

Aspectos Generales y Teóricos del Proceso de Auscultación y el Levantamiento Patológico de la edificación.

El enfoque conceptual para levantamiento patológico del Templete, está basado en una clasificación de las patologías por tipos y categorías que se manifiesta en la edificación. La afirmación esta asociada al uso generalizado de materiales de fabricación artesanal hace más complejo el levantamiento patológico y la restauración.

Primeramente se realizó un análisis de defectación patológica preliminar, lo cual permitió conocer el estado actual de la edificación. Este estudio ha permitido establecer de forma general el grado de conservación o deterioro de cada uno de los elementos o partes constructivas; y a su vez establecer un diagnóstico lo más consecuente posible, dada la magnitud cuantitativa y cualitativa de las patologías y el deterioro existente.

En este estudio de forma singular se combinan tres técnicas (levantamiento de patologías, instrumentación y modelación) de forma combinada estableciéndose y siguiente enfoque general de trabajo:

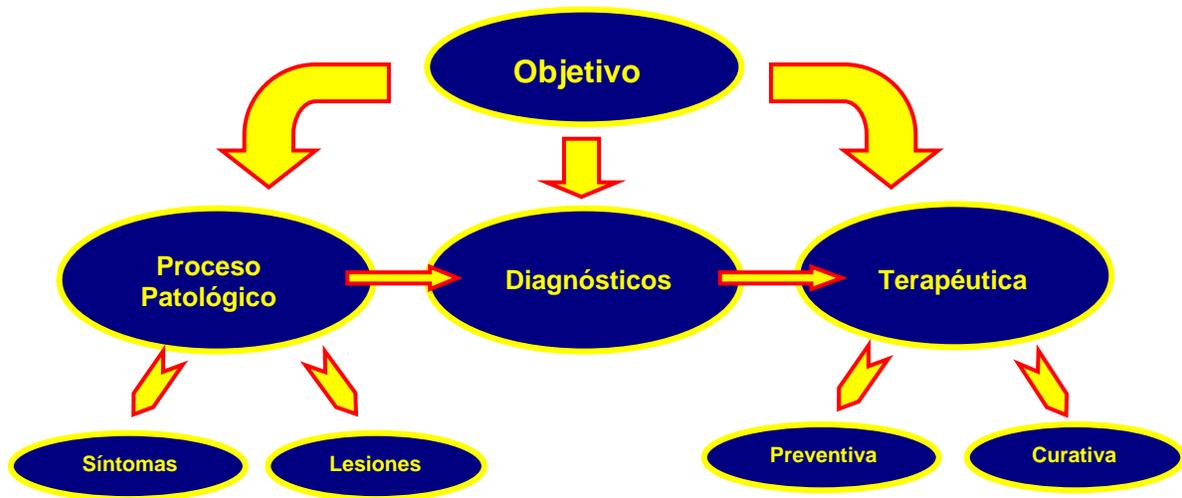
- La auscultación, levantamiento y clasificación de las patologías.
- Instrumentación y caracterización de las patologías.
- Modelación de la Edificación y sus patologías.
- Calibración del Modelo.
- Definición de causas de las patologías.
- Modelación de las intervenciones.

En el proceso de diagnostico y levantamiento patológico de la edificación se sigue una secuencia lógica de pasos, que permiten realizar un correcto estudio patológico de la misma. Este proceso de investigación queda detallado por:

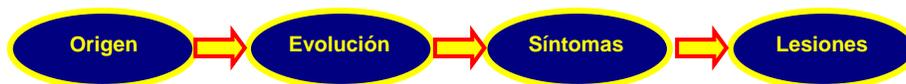
- Auscultación preliminar de la edificación.
- Levantamiento patológico preliminar
- Estudio de las naturaleza de las enfermedades a través de los cambios estructurales y procesos morbosos que presenta la edificación.
- Definición preliminar de origen del mal y establecimiento de diagnostico preliminar.
- Calificación y clasificación de las enfermedades según su origen.

- Definición de posibles causas.
- Aplicar preliminarmente preceptos y remedios para su tratamiento, definición de terapéutica clínica preventiva.
- Levantamiento patológico detallado.
- Realización de diferentes ensayos de caracterización y estudio de la edificación y sus materiales.
- Diseño y montaje de un sistema de instrumentación de la edificación con el triple objetivo de caracterizar in-situ los materiales, investigar el comportamiento de las patologías y como herramienta de calibración del modelo numérico que se empleará para definir las causas de las patologías (estructurales) y a su vez estudiar las posibles vías de erradicación de las mismas (modelación y estudios de variantes de intervención en cada caso puntual).
- Modelación de la edificación y calibración del modelo.
- Estudio y definición de causas reales.
- Definición de la terapéutica curativa a aplicar al inmueble ya afectado incluyendo la terapéutica preventiva a fin de proteger al edificio para su vida futura.
- Modelación y estudio de variantes de intervención.
- Proyecto de restauración o reconstrucción de la edificación.
- Ejecución de la restauración.

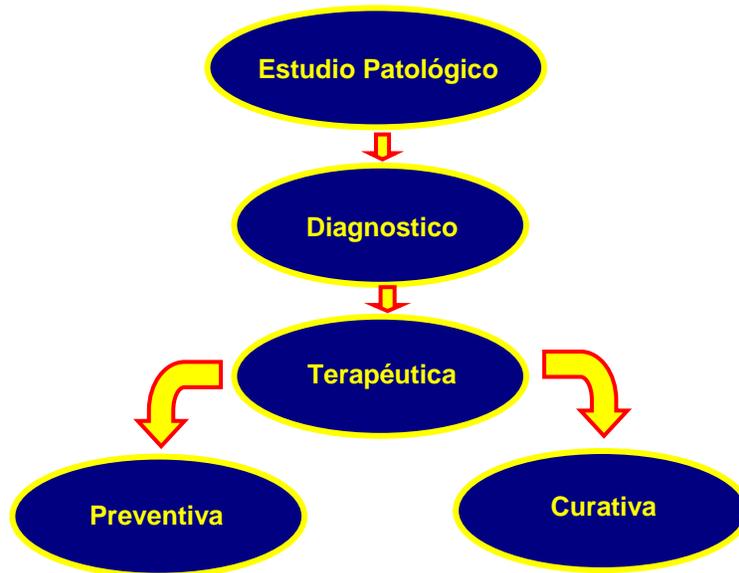
El objetivo central de la defecación y el levantamiento patológico de la edificación se ilustra de forma detalla y esquemática a continuación:



Toda enfermedad de una edificación sigue un proceso patológico cuyo origen es un mal, que posteriormente evoluciona y se manifiesta a través de un síntoma y que, de no atenderse a tiempo, termina en lesiones. Este proceso se representa en el siguiente esquema:



Por último se aplica el remedio o terapia para su tratamiento. En este último caso en esta investigación se emiten terapias curativas y preventivas.



Fuentes de humedades en la edificación durante los procesos constructivos.	
Las debidas al agua	<ul style="list-style-type: none"> • Retenidas por algunos materiales. • Contenidas en otros materiales. • Aportadas para amasar morteros. • Necesarias para la realización de ciertos procesos. • Procedente de las lluvias.

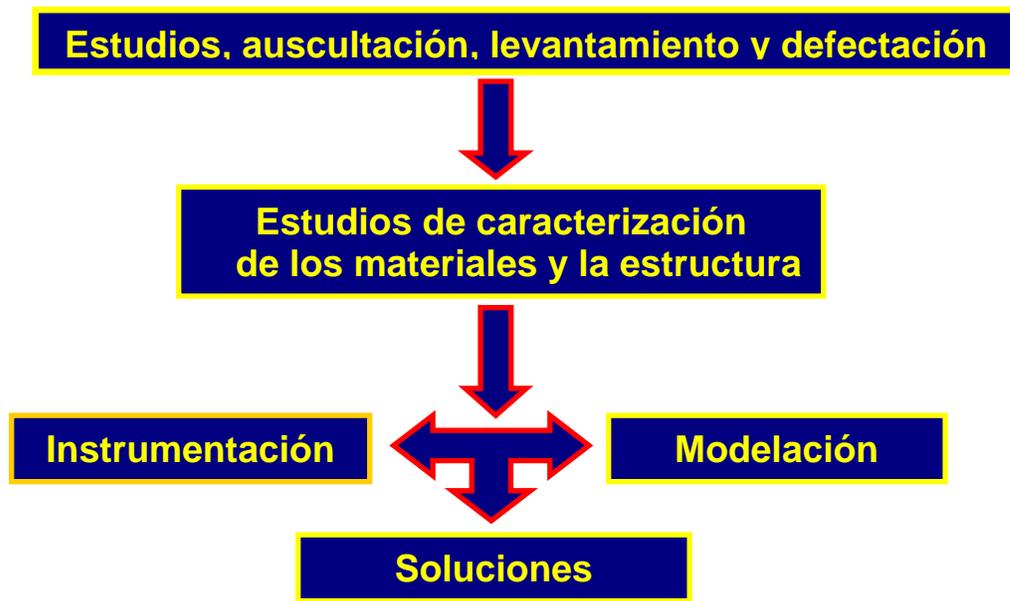
Humedades en fachadas, muros, columnas y otros elementos		
Humedades	Posibles Causas	Manifestaciones
Absorción	Transferencia del vapor de agua entre la estructura y la atmósfera en el restablecimiento del equilibrio Hidrométrico	Manchas de humedad Mancha de sales. Disgregación. Descorchado.
Infiltración	Entrada de agua a través de fisuras e intersticios por acción conjunta de lluvia, viento y succión capilar	Manchas en diferentes partes de la edificación.
Penetración	Entradas francas a través de huecos, y poros. Mal	Inundación.

	funcionamiento del sistema de drenaje.	
--	--	--

Levantamiento Patológico de la edificación.

Levantamiento Patológico preliminar de la edificación.

Enfoque de trabajo



Modelación de la estructura.

En esta fase de estudio se procede a modelar la estructura en tres dimensiones 3D para refinar los cálculos y los estudios. En este caso se emplea el programa profesional, el cual dispone de una biblioteca de elementos suficientemente abarcadora de los posibles casos que puedan presentarse, además de un potente pre y post-procesador gráfico para la creación y procesamiento de la respuesta de modelos estructurales

En la modelación se emplean elementos (elementos finitos) que son los que modelan geométrica y físicamente el medio continuo que ocupan estas estructuras. Después de haber concebido y creado el modelo se identificaron y escogieron las zonas características a investigar, las cuales coinciden con las patologías zonificadas en el proceso de levantamiento patológico de la edificación. Este estudio se realiza para varios estados de cargas y sus correspondientes combinaciones para poder identificar cual estado de carga o combinación es la causante de las patologías estructurales estudiadas. Este estudio permite al la hora de realizar el proyecto de restauración tomar soluciones consecuentes con la causa que provocó dicha patología.

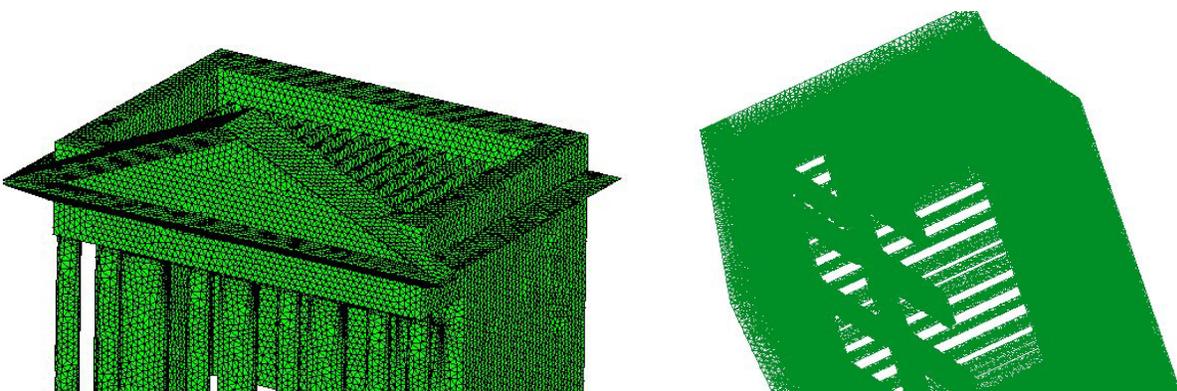


Figura 34: Modelos de calculo en 3D volumétrico y malla del modelo en 3D de superficie.

Interpretación de la modelación.

En el proceso de modelación se concibieron dos modelos uno que toma en cuenta la rigidez del terreno por debajo de la cimentación y otro que considera el terreno como un sólido rígido. Los resultados obtenidos con el modelo que considera el suelo como rígido no posibilitó delimitar las causas que provocan las patologías estructurales existentes en la edificación. Este resultado obtenido con el modelo que considera el suelo como rígido, posibilitó orientar el trabajo hacia un análisis de interacción terreno estructura con el objetivo de valorar la influencia de la deformabilidad del terreno y su interrelación con las patologías estructurales existentes. Este análisis de interacción terreno-estructura permitió contraponer las zonas de concentración de tensiones con la ubicación de las patologías estructurales dentro de la edificación. Este enfoque de trabajo posibilitó demostrar que la formación de fisuras y grietas eran debido a los asentamientos diferenciales. En este caso las patologías están propiciadas por la acción de las cargas verticales, que al actuar sobre la compleja forma geométrica de los estratos, hace que la edificación sufra un asentamiento diferencial y a su vez un giro.

Conclusiones Finales.

Entre las conclusiones finales son:

1. La categoría y magnitud de las lesiones permitieron emitir el nivel de intervención a realizar. Las manifestaciones clasificadas en función de su magnitud y

nivel de afectación, permite tener una orientación inmediata de los trabajos de restauración a realizar.

2. El estado técnico general de la edificación se puede clasificar como regular, no tanto por las lesiones actuales sino por las que amenazan con manifestarse, sobre todo debidas a los asentamientos diferenciales y las humedades.

3. Antes de realizar el proyecto de intervención sería conveniente realizar una inspección más a fondo de la estructura de cubierta para conocer los posibles daños debido a la humedad, así como hacer algunas calas en la impermeabilización para conocer la altura de relleno y poder proceder a la rectificación de las pendientes.

4. Es necesario y obligatorio realizar la restauración y reparación del sistema de drenaje pluvial existente en la edificación. Referente a este aspecto es necesario reparar el sistema de drenaje por bajante pluvial y además realizar trabajos adicionales como el estudio y reproyección de las pendientes, conjugándose este último aspecto con lo señalado en el punto 3.

5. En la esquina orientada al Suroeste, se aprecian varias lesiones que son causadas por un giro propiciado por asentamiento diferencial de la base de la cimentación.

Recomendaciones.

1. Se recomienda el montaje de un sistema de instrumentación en la edificación. Este aspecto permitiría emitir un dictamen técnico que posibilite delimitar los diferentes trabajos de restauración a realizar. Como es lógico los resultados de la instrumentación de la edificación permitirá completar todo el trabajo técnico realizado hasta el momento. Referente a este tema se recomienda contactar con los especialistas de la ENIA que abordan este tipo de trabajo en el país.

2. Se recomienda valorar con los especialistas indicados estudiar el posible seccionamiento de las raíces de la ceiba en función del nivel de frondosidad de la misma. Este aspecto evitaría una posible agresión de las raíces a la edificación.

Modelación del Palacio de Capitanes General



El objetivo esencial de esta etapa es confeccionar un modelo tridimensional de la estructura, que nos permita interpretar la forma de trabajo del conjunto, reacción de la estructuras antes los estados de cargas a la que está sometida y la relación existente entre el estado de agrietamiento y el comportamiento estructural de la misma, además nos permite del modelo obtenido conocer información que será muy útil para evaluar diferentes problemáticas como puede ser carga que le transmite el edificio al terreno, tensión de trabajo de los muros, sollicitaciones actuantes en vigas, efecto de la variación de la temperatura y otros.

La estructura fue madelado en **3D** con el uso del programa *stadd-111 v.223 WM*
 En la modelación se emplean **elementos lineales** para el caso de las columnas, vigas en forma de arco (tensor) y las vigas de madera y acero. Por su parte para la modelación de las bóvedas, arcos y muros se emplean Element (elementos finitos) que son los que modelan geométrica y físicamente el medio continuo que ocupan estas estructuras.

Tabla 2: Modelación de los elementos que conforman la edificación

Elementos en la estructura real	Modelación de la geometría.
Muros de Cargas	Elemento Placa/Cascarón.
Vigas de madera	Miembro Lineal.
Vigas metálicas.	Miembro Lineal.
Marcos de vanos	Miembro Lineal.
Entrepiso	Elemento Placa/Cascarón.
Cubierta	Elemento Placa/Cascarón.
Terreno.	Modelo de Winkler.

3 Resultados de la modelación

Estado tensional en la cubierta y bóveda.

En la figura 12 con un mayor grado de precisión se destaca, como en la parte superior y en los planos de unión entre ambas bóvedas se generan tracciones lo que da lugar a fisuras y grietas, que acompañada a los cambios térmicos en esta parte de la estructura s aquí presentados.

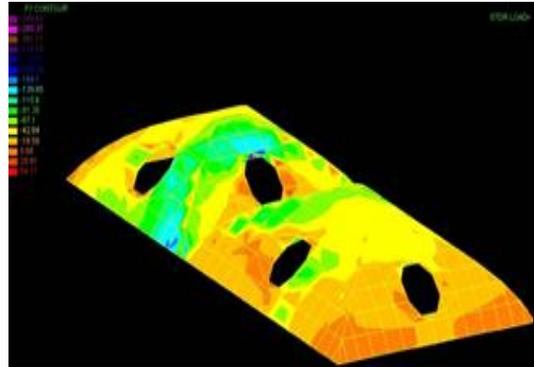


Figura 12. Estado tensional en la Bóveda

Grietas en vanos y clave de los arcos.

En la figura 15, debido a la falta de rigidez de la columna de la derecha, existe un desplazamiento de la misma, generada por el peso propio de la

estructura, lo que da como resultado la aparición de tensiones de tracción

en la clave del arco, y por ende la aparición y desarrollo de la grieta.

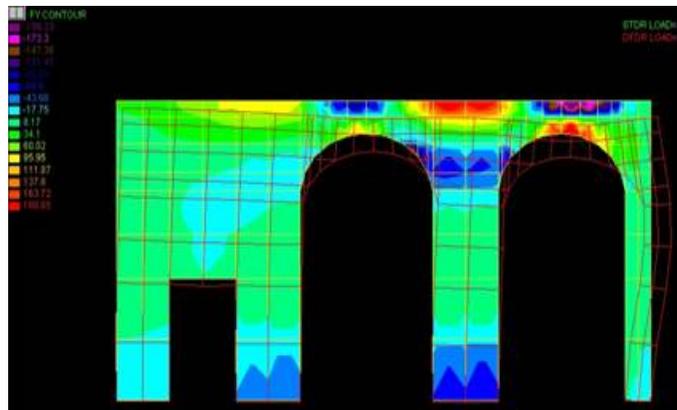


Figura 15

A partir de los resultados obtenidos se puede apreciar estados tensionales, concentraciones de tensiones, estado deformacional, flechas etc. De todos los elementos en la estructura y entonces mejor preparado para enfrentar y diagnosticar los problemas existentes.

Se puede apreciar la instrumentación en la búsqueda de datos para la modelación.

Aquí, (Figura 16)



Figura 16

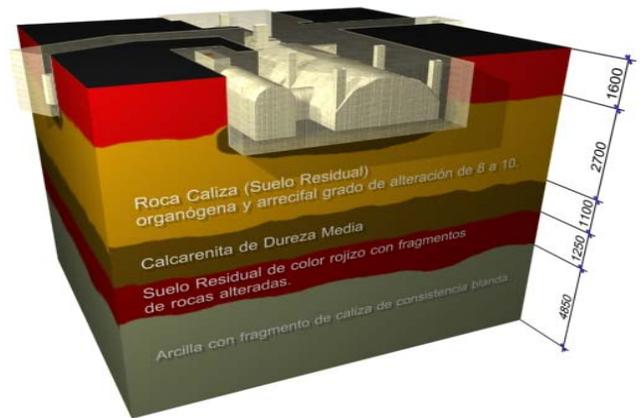
están monitoreando el desarrollo de una grieta para saber si está activo o no.

Modelación del efecto de temperatura.

En cada punto de la edificación ubicaron monitoreados. Para obtener estos valores se colocaron sensores de temperatura en ambas caras de los elementos de la estructura (ejemplo Cubierta exterior e interior, muro de fachada y muro en el interior) y poder establecer la diferencia de temperatura en tiempo real en las 24 horas de un día. Estos resultados también aparecen tabulados para los diferentes meses del año.

9 Modelación del terreno.

La modelación del terreno se realizó a través de calas en diferentes puntos de la obra y el uso del geo-radar. Una vez definido los perfiles de suelos presentes en la estratigrafía y sus propiedades físico mecánicas se realizan todos los cálculos, comprobándose la poca influencia en las patologías de la edificación.



modelación Tridimensional del terreno



Imágenes de toma de muestra

ENTRE LOS RESULTADOS DE LA MODELACIÓN SON:

- Modelación en 2D y 3D de la edificación, partes componentes y elementos estructurales puntuales.
- Se obtiene un modelo geométrico de la cimentación y el terreno a partir de técnicas de tomografía y geo-electricidad. Se delimita la solución y tipo de cimentación del Palacio.
- Estudio de las patologías estructurales a partir del uso de técnicas de modelación con previa calibración de los modelos con respecto a diferentes resultados y pruebas físicas.
- Se estudio a nivel de modelación los desaplomes de los muros (calle de Mercaderes) detectados en el Levantamiento Geodésico y posibilito validar la hipótesis que el estado técnico de los muros es seguro y q su vez que los estados tenso-deformacionales que se generan en la edificación no son considerables. Este resultado permite afirmar que no existen problemas técnicos graves y a su vez no esta afectado el nivel de seguridad de la edificación en estos puntos.
- Se estudio a nivel de modelación una posible degradación de las propiedades mecánicas de las vigas de maderas colocadas debajo del tanque del agua. Para ello se emplearon curvas que interrelacionan degradaciones mecánicas con respecto al efecto de la humedad. Este estudio permite afirmar a nivel de modelación (sin haber tenido una respuesta física de calibración del modelo) que el estado técnico de las vigas de maderas provocado por la presencia de la humedad no afecta la seguridad estructural de las mismas.

ORIENTACIONES:

Este posible proyecto integral de restauración debe tomar en cuenta las siguientes orientaciones:

- Se recomienda modelar todas las posibles soluciones que se estimen conveniente realizar en el proceso de rehabilitación del palacio.
- Restaurar primeramente las causas que propician cada una de las patologías, con posterioridad resolver las mismas en función de su importancia, categoría y grado de actividad.
- Las grietas horizontales en los pasillos de entresijos, en muros y en la cubierta deben ser resueltas con el uso de materiales elastoméricos o flexibles que posibiliten absorber los movimientos cíclicos que se obtienen a través del proceso de modelación de las cargas cíclicas de temperatura.
- Las grietas, fisuras o el estado de agrietamiento generados por efectos de flexión en el centro de la luz de los vanos, detectado en el proceso de modelación, deben ser resueltos eliminando las causas que propician esta patología y a su vez después intervenir la restitución y regeneración de las discontinuidades a través de técnicas de inyección. La magnitud de la intervención y restauración dependerán del estado técnico de cada patología puntual.
- Las lesiones que se manifiestan en la clave de los arcos, que a nivel de modelación se demuestra que se generan por cuestiones de geometría de los arcos, forma de aplicación de la carga y problemas de rigidez en el arranque deben ser resueltos aumentando la rigidez de estas zonas puntuales, redistribuyendo las cargas puntuales o colocando elementos de transición que absorban los estados tenso-deformaciones y principalmente contrarresten los desplazamientos que se propician por la falta de rigidez. Puntualmente después de haber solucionado la causa que propicia la patología es necesario intervenir en la restitución y regeneración de las grietas y fisuras existentes en las claves empleando para ello técnicas de inyección y regeneración de fisuras y grietas.
- Las fisuras y grietas presentes en la bóveda de cubierta que a nivel de modelación se demuestran que se forman por estados tensionales complejos, que propician zonas donde se generan esfuerzos de tracción que agotan el material deben ser intervenidos puntualmente. En este caso en función de la magnitud, categoría, estado técnico y gravedad se realizarán soluciones específicas en cada

caso. En su gran mayoría se emplearan técnicas de inyección, regeneración de fisuras y grietas y de forma puntual en los casos más complejos se puede valorar un reforzamiento local de la zona siempre y cuando la solución no agreda el valor del inmueble..

- Realizar una intervención puntual y preventiva en las vigas de madera ubicadas en la zona del tanque del agua. Principalmente orientar la solución a contrarrestar los efectos de las humedades, a pesar de que a nivel de modelación se demostró que en el estado actual no existen problemas de seguridad estructural en estos elementos. Por las razones comentadas esta solución tiene una finalidad preventiva y sobre todo de conservación de las vigas de maderas antes el efecto de la humedad.