

Prob. 8/16-24

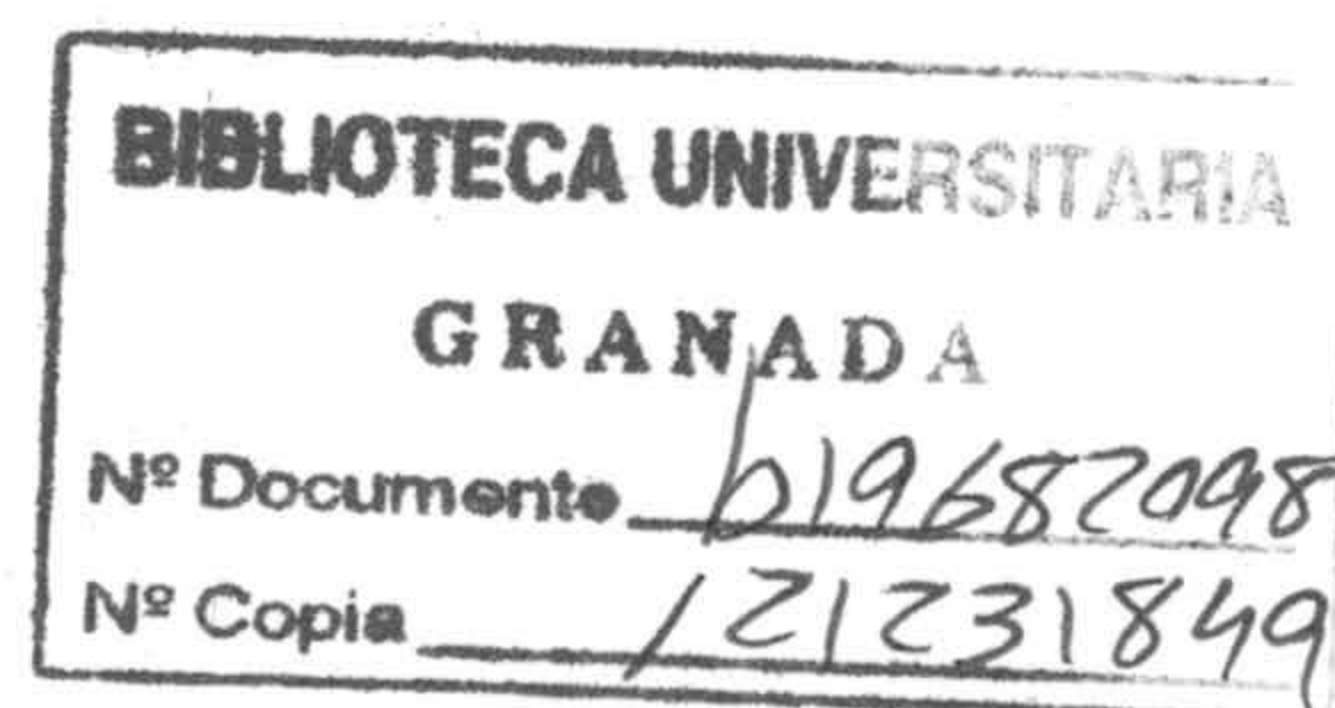
T
16
50

UNIVERSIDAD DE GRANADA



**ESTUDIO DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN
DE LOS TAPIALES DE LAS MURALLAS DE GRANADA.**

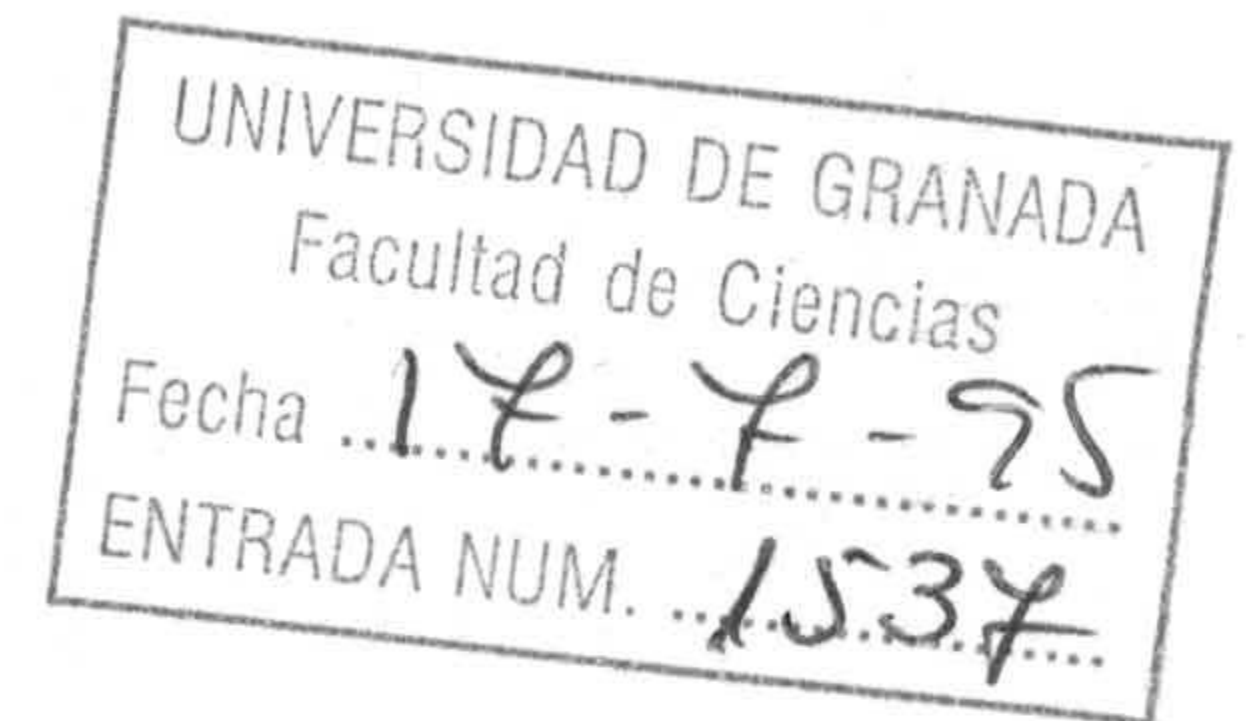
TESIS DOCTORAL



ESTHER ONTIVEROS ORTEGA
Granada, Septiembre 1995



UNIVERSIDAD DE GRANADA



**ESTUDIO DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA
CONSTRUCCIÓN DE LOS TAPIALES DE LAS MURALLAS DE
GRANADA.**

TESIS DOCTORAL

ESTHER ONTIVEROS ORTEGA
Granada, Septiembre 1995

UNIVERSIDAD DE GRANADA.

**ESTUDIO DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN
LA CONSTRUCCIÓN DE LOS TAPIALES DE LAS
MURALLAS DE GRANADA.**

UNIVERSIDAD DE GRANADA

**ESTUDIO DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN
LA CONSTRUCCIÓN DE LOS TAPIALES DE LAS
MURALLAS DE GRANADA.**

**ESTHER ONTIVEROS ORTEGA
GRANADA, SEPTIEMBRE 1995**

Tesis doctoral dirigida por: ; D. I. Valverde Espinosa, Catedrático de la Escuela de Arquitectura Técnica de la Universidad de Granada. D. E. Sebastián Pardo, Profesor Titular de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada y D. F.J. Gallego Roca, Catedrático de la Escuela de Arquitectura Técnica de la Universidad de Granada.

DPTS. MINERALOGÍA-PETROLOGÍA Y

CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS DE LA UNIVERSIDAD DE GRANADA.

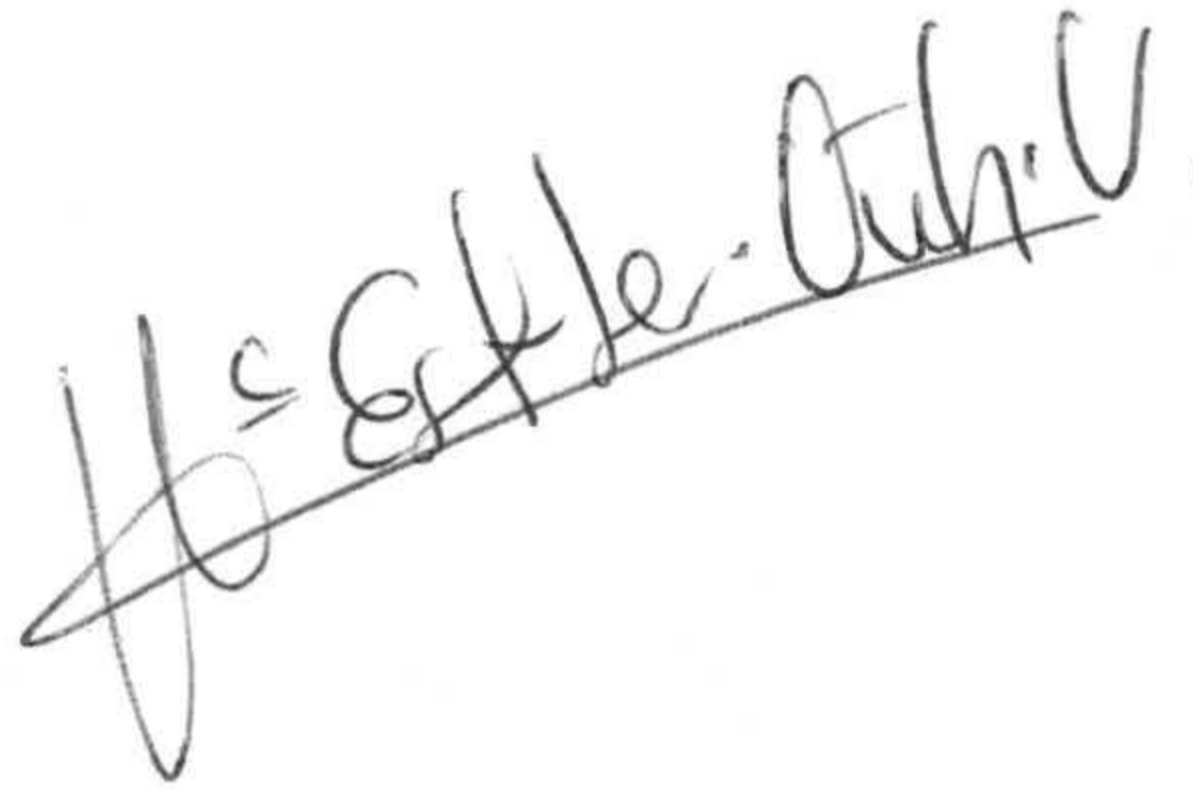
**ESTUDIO Y ANALISIS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA
CONSTRUCCION DE LOS TAPIALES DE GRANADA**

por

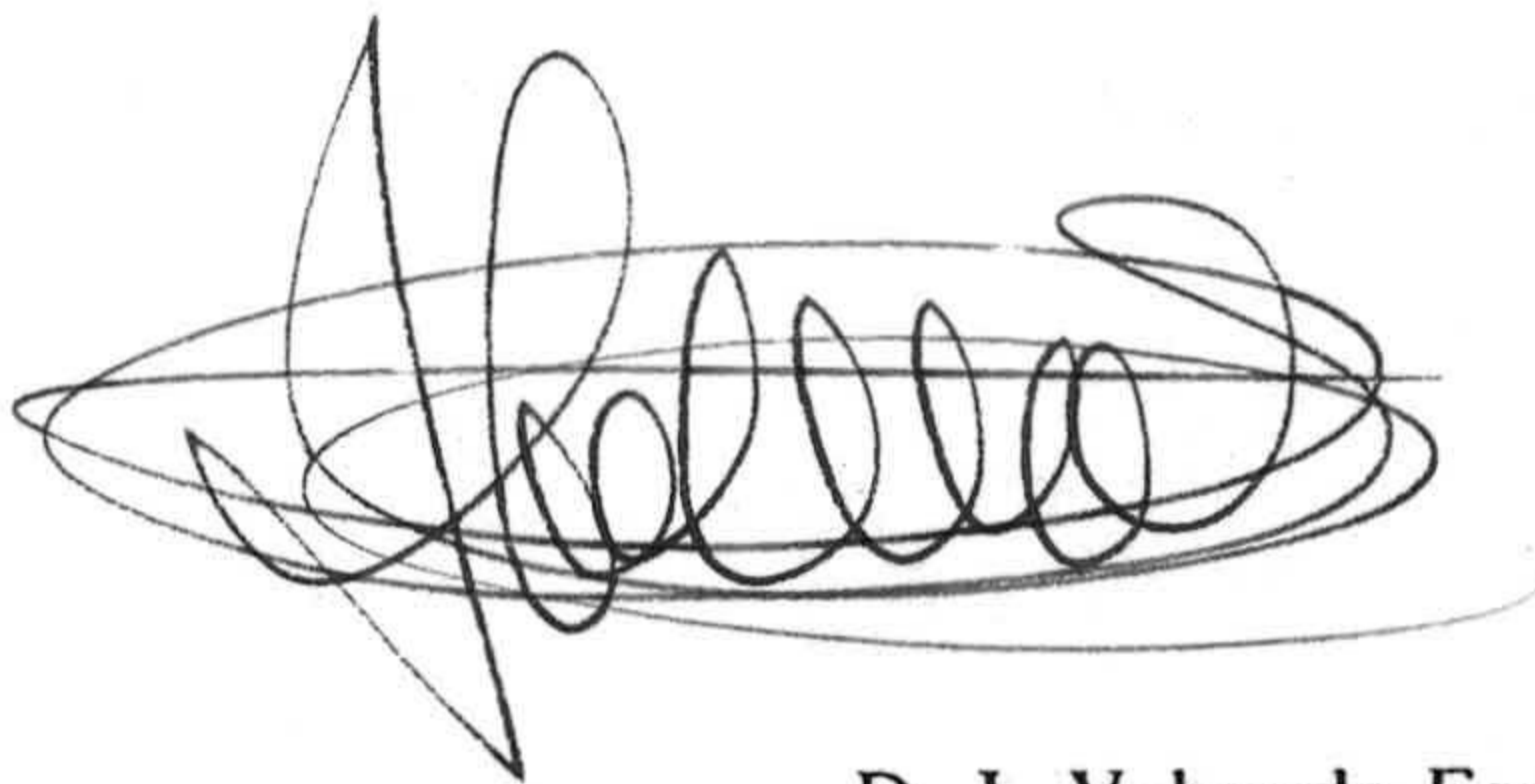
Esther Ontiveros Ortega

Memoria presentada para aspirar a Grado de Doctor en Ciencias, Sección Geológicas.

Fdo.: E. Ontiveros Ortega.



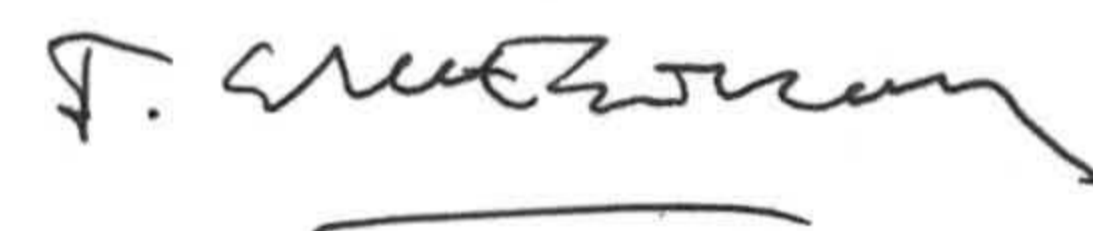
Directores de la Tesis:



D. I. Valverde Espinosa.



D. E. Sebastián Pardo.



D. F. J. Gallego Roca

AGRADECIMIENTOS.

Antes de comenzar la exposición de esta memoria quiero agradecer a todas las personas que me han ayudado en la realización de esta Tesis doctoral, por el apoyo y la amistad que han sabido ofrecerme en estos cuatro años, nombrar aquí a todos sería imposible.

En primer lugar quiero dar mi más sincero agradecimiento a los directores de esta tesis doctoral, D. I. Valverde Espinosa, D. E. Sebastián Pardo y D. J. Gallego Roca ; por haber puesto en mis manos su profesionalidad y experiencia científica. Ellos han orientado las líneas de investigación, eligieron el tema y me han ayudado en la superación de las dificultades que se han planteado a lo largo de su realización.

Agradezco a **D. I. Valverde Espinosa**, haber sugerido la idea de la realización de esta tesis, el apoyo e interés dedicado y la valiosa ayuda prestada a lo largo de su realización. Junto a él quiero dar gracias a todo el personal que forma parte del laboratorio de Materiales del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Escuela de Arquitectura Técnica de la Universidad de Granada, por las facilidades dadas para la utilización del laboratorio, facilitándome en todo momento el trabajo. En particular:

A D. David López, por la ayuda prestada en la realización del ensayo Proctor.

A D. José María Ruiz Sánchez, por la ayuda y orientación en temas informáticos.

A D. José Rodríguez Montero, por sus ideas orientativas e información en todo lo referente a normativas en materiales de construcción.

Y por último a José Luis Piqueras, F^{co} Ortega y Carlos Aguirre, profesores del Departamento de Construcciones Arquitectónicas, por su ofrecimiento siempre incondicional.

A **D. E. Sebastián Pardo**, quiero agradecer muy especialmente, haberme iniciado en la investigación orientada a la conservación de edificios históricos, y haber puesto en mis manos gran parte de los medios materiales que han sido necesarios para la realización de esta tesis, así como, su orientación y apoyo. Junto a él quiero dar gracias al Departamento de Petrología y Mineralogía de la Facultad de Ciencias de Granada, y en especial M^a José de la Torre y Carlos Rodríguez, por la ayuda prestada en todo momento.

A **D. J. Gallego Roca**, quiero agradecer haber puesto en mis manos gran parte de la bibliografía que me ha permitido adentrarme en los aspectos históricos, evolutivos y constructivos de estos edificios. Junto a él quiero dar gracias:

A todo el grupo de investigación de "La Tierra en la arquitectura granadina" su aportación ha sido un punto de apoyo muy importante para la realización de este trabajo: a J. Manuel López Osorio, Adela Parejo Fernández, Marina López Robles, M^a Gracia Rodríguez Gallego, M^a José Martín Barrancos, Ana M^a Santos Fernández y muy especialmente a Reyes Fajardo Martínez; con ella he realizado la extracción del material, recogida de material bibliográfico y fotográfico, la realización de planos y dibujos, así como, las salidas a campo y visitas al monumento.

A Dña. M^a Auxiliadora Moreno y con ellas al resto de compañeros del Departamento de Arqueología de La Universidad de Granada, la buena disposición prestada para la extracción de material de algunos puntos de las murallas y por sus ideas orientativas.

A D. Jesús Soriano por la ayuda prestada en las observaciones del SEM llevadas a cabo

sobre morteros.

A D. Manuel Merlo Vallejo, administrados de publicaciones de la Facultad de Teología de Granada, quiero agradecer la valiosa información cedida de la climatología de la zona (datos recogidos personalmente por él, en los últimos 35 años, que no están publicados, hecho que quiero resaltar especialmente), y poner de manifiesto la sincera amistad y aprecio personal que me unen a esta persona.

A Dña. E. Puga y D. J.M. Martín por sus orientaciones sobre la geología de la zona.

A D. Pascual y D. Agustín (técnicos del Departamento de Mineralogía) y D. Daniel Ramos por la ayuda en el manejo del difractor y el programa de tratamiento de datos Polvo.

A Alfonso Ontiveros, por la ayuda prestada en aspectos informáticos.

A José F^o Palma, compañero de estudios y doctorando del Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad de Granada, por su amable ofrecimiento de programas informáticos de tratamiento de datos.

A Emilio Mesa Madero (arquitecto Técnico) por la ayuda prestada en todo lo referente a la presentación de la tesis y montaje de las láminas de fotos.

A mis familiares y amigas por el ánimo y la amistad que han sabido brindarme a lo largo de todo este tiempo.

Al Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, gracias al cual he podido disfrutar de una beca, durante gran parte de período empleado en la realización de esta tesis, y por haber financiado económicamente gran parte de ella.

Mi agradecimientos al laboratorio de calidad de control Volvevi e Hisalba, por el ofrecimiento del Trolex para realizar medidas de la densidad "in situ" y la realización de algunos análisis químicos.

A mis tres hermanos, por el apoyo, ánimo y ayuda que he recibido siempre de su parte.

A mis padres, por esa entrega incondicional hacia mí, por el ánimo y fuerza que han sabido transmitirme siempre sin la cual posiblemente no habría podido realizar este trabajo,

A todas estas personas además de expresarles nuevamente mis más sincero agradecimiento, les pido sepan perdonar los errores que puedan encontrar en este trabajo.

*a mis padres,
a mis abuelas
y a mi sobrino Miguel A.*

INDICE

INDICE

I. INTRODUCCION.....	1
II. JUSTIFICACION Y OBJETIVOS.....	5
III. EMPLAZAMIENTO GEOGRAFICO.....	9
IV. ANTECEDENTES HISTORICOS.....	13
IV.1. INTRODUCCION.....	15
IV.2. DESARROLLO Y EVOLUCION DE LAS MURALLAS.....	18
IV.3. TRAZADO Y ELEMENTOS DE LAS MURALLAS DE GRANADA.....	24
IV.3.1. Introducción.	
IV.3.2. Las Cercas y Puertas de Granada.	
V. EL TAPIAL.....	39
V.1. INTRODUCCION.....	39
V.2. TECNICA CONSTRUCTIVA.....	41
V.3. EL MATERIAL EMPLEADO EN LA CONSTRUCCION.....	54
V.3.1. Generalidades.	
V.3.2. ¿Que tierra emplear?.	
V.3.3. Tratamiento previo del material.	
V.3.4. Estabilización de la tierra.	
V.3.4.1. Introducción.	
V.3.4.2. Estabilización mecánica.	
V.3.4.3. Estabilización por refuerzo.	
V.3.4.4. Estabilización por armado.	
V.3.4.5. Estabilización por adición de cal.	
VI. METODOLOGIA.....	103
VI.1. METODOLOGIA DE CAMPO.....	103
VI.1.1. Datos previos.	
VI.1.2. Toma de muestras.	
VI.1.3. Denominación de las muestras.	
VI.1.4. Determinación de la densidad in situ.	
VI.2. METODOLOGIA DE LABORATORIO.....	112
VI.2.1. Introducción.	
VI.2.2. Granulometría por tamizado.	
VI.2.3. Límites de Atterberg.	
VI.2.4. Clasificación del suelo.	
VI.2.5. Ensayo Proctor.	
VI.2.6. Análisis mineralógico.	
VI.2.6.1. Difracción de rayos X.	
VI.2.6.2. Microscopía óptica.	
VI.2.6.3. Microscopía electrónica de barrido.	
VI.2.7. Análisis químicos.	
VI.2.7.1. Por espectrometría de rayos X.	
VI.2.7.2. Por espectrometría de emisión por Plasma acoplado.	
VI.2.8. Determinación de materia orgánica.	
VI.2.9. Determinación de la porometría.	
VI.2.9.1. Pesada hidrostática.	
VI.2.9.2. Porosimetría de mercurio.	

VII. ENTORNO MEDIO-AMBIENTAL.....	145
VII.1.MICROCLIMA.....	145
VII.2.CONTAMINACION AMBIENTAL.....	151
VIII. MATERIAL CONSTITUYENTE DE LAS MURALLAS.....	155
VIII.1.ENCUADRE GEOGRAFICO.....	156
VIII.2.ENCUADRE GEOLOGICO.....	156
VIII.2.1. Antecedentes.	
VIII.2.2. Características geológicas de la F. Alhambra.	
IX. RESULTADOS.....	171
IX.1. RESULTADOS EN CANTERA.....	171
IX.1.1. Granulometrías por tamizado.	
IX.1.2. Plasticidad.	
IX.1.3. Clasificación del suelo.	
IX.1.4. Densidad y compactación.	
IX.1.5. Mineralogía.	
IX.1.6. Análisis químicos.	
IX.1.7. Materia orgánica.	
VII.2. RESULTADOS EN MURALLAS.....	197
IX.2.1. Granulometrías por tamizado.	
IX.2.2. Plasticidad.	
IX.2.3. Clasificación del suelo.	
IX.2.4. Densidad y compactación.	
IX.2.5. Mineralogía.	
IX.2.6. Análisis químicos.	
IX.2.7. Materia orgánica.	
X. DISCUSIONES GENERALES Y CONCLUSIONES.....	271
X.1. DATOS Y APORTACIONES PARA LA FABRICACION DEL TAPIAL.....	271
X.1.1. Tipologías de tapial empleadas.	
X.1.2. Revestimientos exteriores.	
X.1.3. Características que presenta el material utilizado.	
X.2. APORTACIONES SOBRE LA EVOLUCION CONSTRUCTIVA.....	277
X.3. ANALISIS DEL ESTADO DE CONSERVACION.....	278
X.3.1. Degradaciones macroscópicas.	
X.3.2. Degradaciones microscópicas.	
XI. BIBLIOGRAFIA.....	285

I.INTRODUCCION

I. INTRODUCCION.

Los estudios de investigación dirigidos a la conservación del Patrimonio Histórico Artístico, han sufrido un impulso en la actualidad, como consecuencia del alarmante estado de deterioro que hoy sufren la mayor parte de estos edificios. La investigación sobre problemas aplicados al mal de la piedra se viene realizando desde el siglo pasado, avanzando notoriamente en los últimos años; sin embargo la investigación que se ha llevado a cabo sobre edificios construidos en Tapial, es más reciente y por tanto más escasa.

La tierra es un material empleado en construcción desde la más remota antigüedad. Granada es una ciudad con una importante trayectoria arquitectónica en tierra, cuya tradición se remonta al período preromano, prueba de ello es el elevado número de restos arqueológicos existentes, así como la gran cantidad de edificios que aún quedan en pie. Este legado constituye una herencia cultural de incalculable valor, siendo ello más que suficiente para investigar sobre esta técnica constructiva a fin de aportar a los restauradores mayores conocimientos para sus intervenciones; pues no hay que olvidar que estamos obligados por imperativos sociales, a mantener esta heredad, a conservarla y, por supuesto, a devolverla a las generaciones futuras en mejor estado que las recibimos. Es cuestión de cultura, y porque no, de sensibilidad.

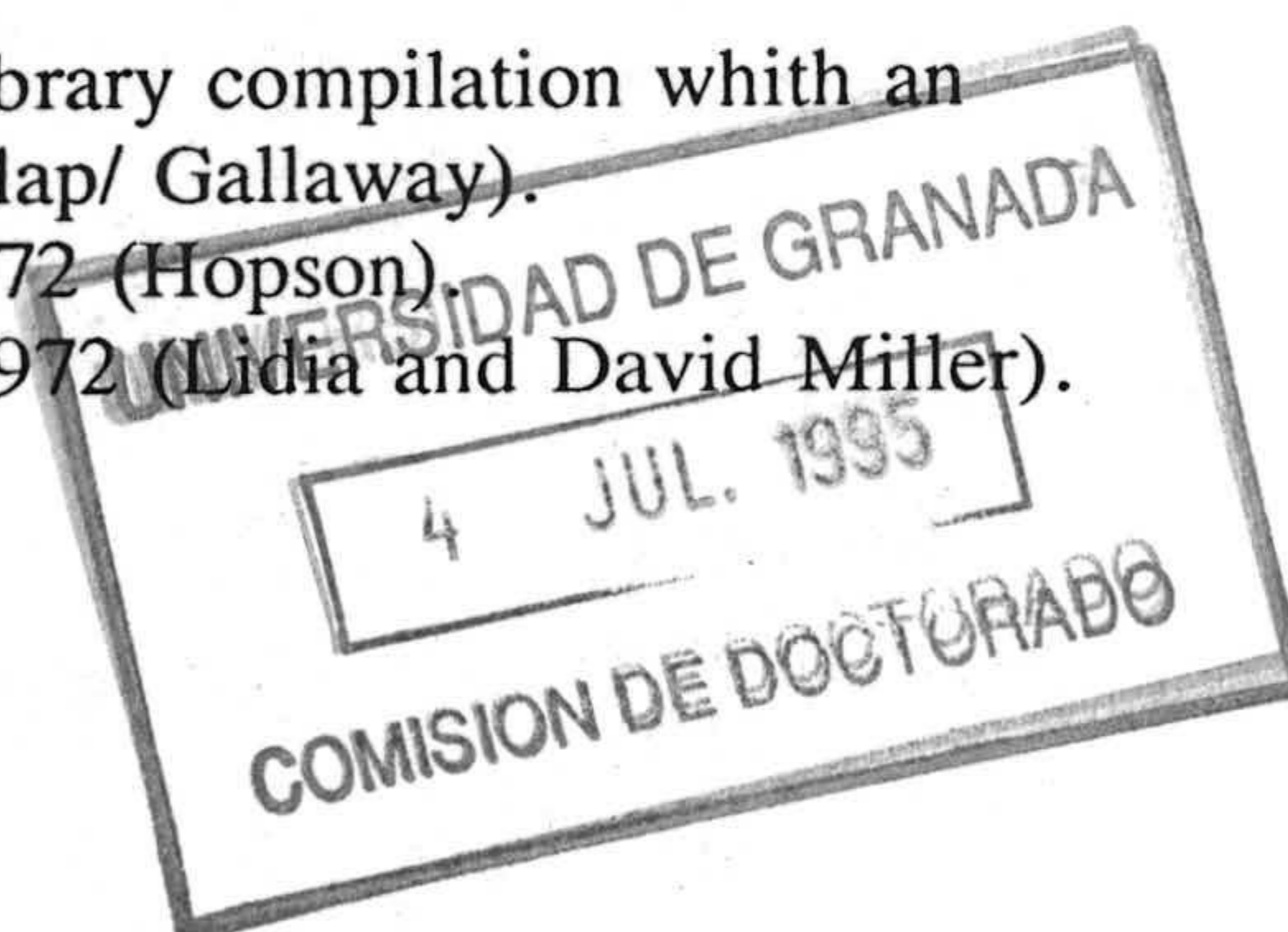
Las construcciones de tierra encuentran su origen en los primeros tiempos de la historia de la construcción. Esta aparece directamente relacionada en la mayoría de los casos con la arquitectura vernácula (Binda Compton, 1990) y popular, siendo ésta la primera referencia importante que nos muestra la tierra como material de edificación.

Entre los libros y manuscritos más antiguos que hacen alusión a este tipo de construcciones, nos encontramos el "Manual de albañilería de Villanueva" en el que se describe con detalle como se debía levantar un tapial. En 1772, Goiffon publica en Francia "L'Art du maçon Piseur", que puede considerarse como el primer tratado sobre la arquitectura en tierra. Posteriormente, entre 1777 y 1823, François Contreaux publica numerosos escritos sobre este tema.

En el siglo XIX, básicamente en Francia, se publican algunos textos técnicos sobre esta materia. Entrados ya en el s. XX, con la aparición de los nuevos materiales de construcción, las antiguas técnicas se abandonan, encaminándose la investigación a las nuevas alternativas constructivas.

Los tratados más recientes, que intentan ordenar y clasificar la documentación, corresponden a tres publicaciones norteamericanas, país que, en cierto modo, releva a Francia, a este respecto:

- "Earthen Home Construction" a field an library compilation with an anotated bibliography. 1962 (Wolf Skill/ Dunlap/ Gallaway).
- "Adobe" a comprehensive bibliography. 1972 (Hopson).
- "Rammed earth" a selected bibliography. 1972 (Lidia and David Miller).



Existe una colección internacional con cerca de 2000 obras que han sido reunidas por el grupo CRAterre, equipo francés al que debemos numerosas publicaciones. Es destacable también la fundación de un Departamento de construcciones en tierra creado por el ICCRON, organismo dependiente de la Unesco con sede en Roma, que ha elaborado una relación de títulos sobre esta materia.

Actualmente, se observa un renacimiento y un interés por esta arquitectura, y organismos de prestigio internacional, como el Centro Pompidou de Francia o The Getty Conservation Institute en California, han publicado numerosos estudios y organizan congresos internacionales que actúan como punto de encuentro de especialistas en la materia. La primera Conferencia Internacional sobre la Conservación de la Arquitectura en tierra, se llevó a cabo en Yard, Iran (1972), y contribuyó en gran medida a apreciar la tierra como material de construcción. En conferencias posteriores como por ejemplo Roma, (1978) se intentó promover una cooperación entre las instituciones involucradas en proyectos de investigación sobre este tema, recomendando las directrices claras para la preservación de este tipo de construcciones. En la última conferencia internacional, celebrada en Portugal (1993) se pretendió divulgar los conocimientos relativos a las técnicas de conservación y el empleo de este material de construcción.

En España estas publicaciones son escasas. Son de destacar las elaboradas por el Instituto Eduardo Torroja y las experiencias realizadas por Erhard Romher en Navapalos (Soria).

El trabajo aquí desarrollado, se concreta en el estudio y análisis de los materiales que conforman los tapias de las Murallas de la ciudad de Granada. La mayoría de los restos que en la actualidad se conservan de este conjunto monumental se encuentran emplazados en el Albayzín, un barrio de gran tradición histórica, que ha sido proclamado recientemente por la Unesco Patrimonio de la Humanidad.

Tal investigación toma mayor sentido por la escasa documentación que nos ha llegado sobre este conjunto Monumental, siendo de destacar, la información recogida por Torres Balbas, (1985), y algunas referencias en citas históricas, por ejemplo la de Gómez Moreno, (1892).

«El tapial andalusí de tradición almohade es una mezcla de arcilla, arena gruesa, casquillos y mortero de cal, lo que viene llamándose hormigón pobre. La fábrica no escupía la cal ni los revocos, sino que se adherían bien. Al batir la mezcla con el encofrado se carbonata más la superficie y un simple talochado lo dotaba de un duro acabado» (Torres Balbas, 1985).

«Las torres y muros que se conservan permiten apreciar que esta fortificación (Alcadima) fue construida de duras tapias de argamasa, hechas con piedra de río sujetas con mezcla de cal y arena formando un mortero solidísimo» (Gómez Moreno, 1892).

Gárate manifiesta en su libro "Artes de la cal" (1993):

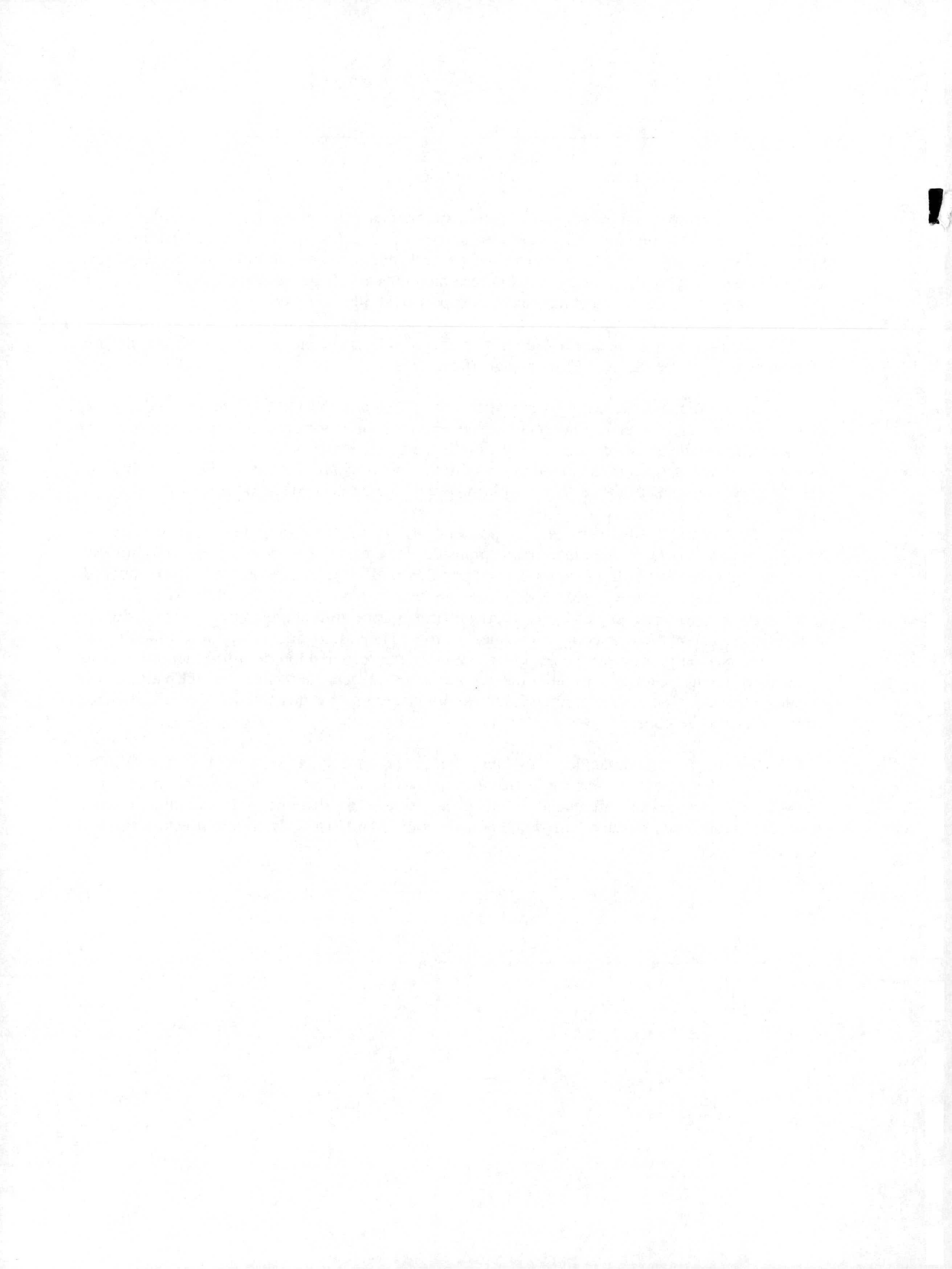
«Los morteros resultantes de esta metodología constructiva era de mala calidad según Ville-le-Doc a pesar de contener tejoleta en su composición. Según este autor: los morteros fabricados en los siglos IX, X, y XI eran en general mediocres en relación con los romanos, que eran de gran calidad. En el siglo XII parece mejorar hasta llegar al siglo XIV y XV, donde los morteros empleados se caracterizan por no poseer arcilla en su composición».

No disponemos de información que haga referencia a las proporciones de los componentes de estas fábricas ni de sus dosificaciones.

La investigación sobre estos morteros (de cal) es hoy día todavía escasa. Jedrzejewk, (1960) lleva a cabo las primeras tentativas de estudio sobre morteros antiguos, y aunque su metodología resulte en la actualidad muy simplista e insuficiente, a ella debemos los primeros estudios realizados sobre este material en edificios históricos. Más tarde, Furlan y Bissen, (1975) proponen una forma de abordar el problema aunque no una metodología.

En este trabajo, se ha pretendido por una parte, la identificación de los parámetros que nos permitan conocer el material empleado en estas construcciones, basándonos fundamentalmente en los trabajos realizados por Cope, (1984), Doat et al (1985) y Houben & Guillaud, (1987), sobre edificios construidos en tierra; y por otra se ha llevado a cabo un análisis de los morteros empleados en estas fábricas, donde se incluye estudio de los áridos y aglutinantes, características composicionales y procesos de alteración. Esto ha ido unido a un previo análisis del monumento, en el que se ha incluido: recopilación de información histórica basada en fuentes escritas, estudio del ambiente en el cual se encuentra (climatología y contaminación), y en último término analizar los aspectos que nos pueden dar información sobre el estado de conservación del mismo.

Los resultados obtenidos nos han permitido conocer la estructura interna de los materiales y las características de la tierra empleada para la fabricación, cuestión de suma importancia para poder diferenciar el material del que se dispone y la tecnología de la fabricación empleada en cada período de construcción y en tal sentido se manifiesta Koenraad Van Balen, (1990).



II. JUSTIFICACION Y OBJETIVOS DEL TRABAJO.

Este trabajo está incluido en una línea de investigación orientada a la Conservación del Patrimonio Histórico Monumental. Ha sido fruto de un estudio conjunto que se ha llevado a cabo por los Departamentos de Construcción Arquitectónica y Petrología y Mineralogía de la Universidad de Granada.

Escasa atención se ha venido dando al estudio y análisis de Cercas y Murallas, que van desapareciendo debido quizás a su desnudez, y a lo complejo y árido del tema. Las murallas de las ciudades, abandonadas desde hace siglos, caen sin que de unos ni otros queden a penas inscripciones y análisis arqueológicos. Esto es una consecuencia del escaso interés artístico que se ha venido dando a este tipo de edificios, construidos la mayoría en tierra. Este desinterés se remonta al siglo XVIII, cuando comienza el derribo indiscriminado de la mayoría de las murallas medievales, símbolo, entonces, de atraso económico y oscurantismo político (Torres Balbás, 1985).

En la actualidad, por el hecho de descubrirse un importante Patrimonio en tierra y la necesidad de conservarlo, unido al interés por recuperar este material de construcción, ha hecho resurgir todo lo relacionado con esta arquitectura. En este sentido, Gerrero, 1982 afirma:

«Cuando los costes energéticos aumentan, y se produce la expansión de las tesis ecologistas, se ha puesto en un primer plano las energías alternativas, desarrollándose reciclajes y recuperaciones de algunos métodos constructivos vernáculos. En este sentido, la tierra presenta una serie de ventajas considerables. Es un material local, con una puesta en obra no vinculada al mercado y un coste reducido; resulta idóneo como una arquitectura ecológica por su capacidad de volver al entorno y su carácter bioclimático que favorece el ahorro energético».

El interés por todo lo relacionado con la arquitectura en tierra y la conservación de este tipo de edificios de carácter monumental muy frecuentes en nuestra ciudad, nos llevó a la elección de la zona de estudio; que se concreta en las Murallas de la Alcazaba de Granada, La cerca de la Medina y la de los Arrabales, entre los que se incluyen el de Nayd, Bib-arrambla y Albayzín.

Los árabes dejaron en Granada un importante legado de construcciones en tierra, donde permanecen hasta nuestros días numerosos edificios de traza árabe, que constituyen un patrimonio de primera magnitud. Las murallas que en el pasado rodearon la ciudad de Granada y que en la actualidad se conservan en determinados puntos de su trayecto original, obligan a que sobre ellas se realice un trabajo de investigación, con la finalidad de poder aportar datos concernientes a su construcción, características del material, así como, dar posibles soluciones para su restauración.

La elección de estos recintos amurallados se debió:

- a la relación histórica que existe entre las distintas murallas;
- a la información de carácter constructivo que nos puede aportar realizar un estudio comparativo de los distintos recintos y, por otra parte, conocer nuevos aspectos sobre estas edificaciones árabes, así como, conocer los procesos de alteración que puedan tener lugar en este tipo de construcciones;
- y para llamar la atención sobre la necesidad urgente de conservar este conjunto monumental de primera magnitud, que en la actualidad se encuentra en un estado alarmante de deterioro.

En este sentido, los principales objetivos de este trabajo se han encaminados:

- a caracterizar del material empleado en la construcción de las Murallas, aquí se incluyen características petrográficas, porosidad, composición mineralógica y química;
- a conocer como trataban el material antes de su puesta en obra y la evolución de la metodología constructiva a lo largo de los distintos períodos y recintos;

Una vez conseguidos estos objetivos se podrá abordar otros adicionales, como son:

- caracterizar las variedades de tapial empleados en los distintos recintos amurallados;
- conocer aspectos sobre los procesos y formas de alteración que se están produciendo, así como los mecanismos que controlan la alteración;
- y en último término esclarecer algunos aspectos sobre su estado de conservación.

II. JUSTIFICACION Y OBJETIVOS DEL TRABAJO.

La utilización de materiales similares a la fábrica del muro original, es fundamental para realizar cualquier intervención. Nuestros esfuerzos van dirigidos: a estudiar a fondo las características de estos materiales de fábrica, y a partir de aquí deducir el material ideal para emplear en futuras intervenciones.

III. EMPLAZAMIENTO GEOGRAFICO.

III. EMPLAZAMIENTO GEOGRAFICO.

Las Murallas, se localizan en la parte alta del casco urbano de Granada, constituyendo un elemento esencial en su paisaje urbano, y un testimonio vivo de su pasado histórico.

Granada se encuentra emplazada en la provincia del mismo nombre, situada al suroeste de la península Ibérica, en la denominada Andalucía Oriental (figura 3.1).

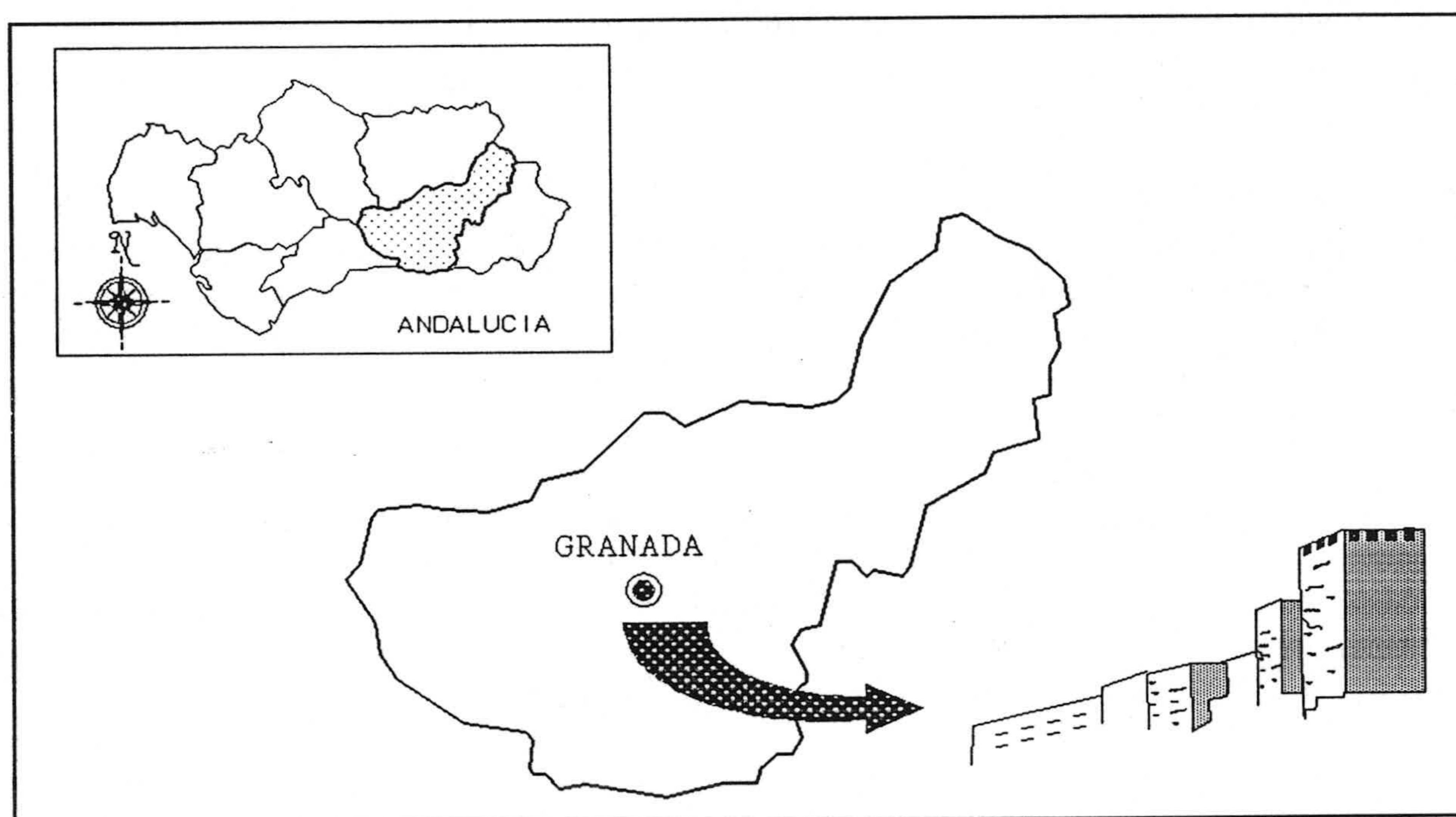


Figura 3.1 .- Emplazamiento geográfico

Las Murallas de esta ciudad están adaptada perfectamente a las condiciones del relieve donde están emplazadas, a diferencia de otros construcciones, que en su trayecto han modificado los trazos del paisaje natural.

En la topografía granadina, como describe Bosquel Maurel, (1988):

«Se distinguen tres colinas que presentan una altura similar, en torno a los 750 mts.. La de San Cristóbal, donde estuvo emplazada la cerca del arrabal del Albayzín, al norte, se eleva hasta 760 mts. en su punto más elevado; es sumamente escarpada y cubren las cuevas y algunas edificaciones en su parte inferior. El cerro de S. Miguel a

974 mts. de altura, ofrece escasas superficies llanas para la extensión urbana, descendiendo en brusco declive hacia el norte y enlazándose con la ladera donde se encuentran las dos Cartujas. Su vertiente meridional forma una breve vaguada, que sigue la cuesta de la Alhacaba; ocupada por el antiguo barrio del Albayzín, en contacto con la colina donde está la Alcazaba Cadima.

Esta última, asiento de la primitiva ciudad, tiene una altura menor. Su relieve presenta en su cumbre una extensa superficie llana de unos 300 mts. de ancho por un kilómetro de longitud muy favorable para la ocupación humana. Su perfil desciende hasta la Vega con un descenso de 60 mts. Su ladera meridional al descender por el Darro lo hace más lentamente. La colina asciende con suavidad por el este hacia el cerro de S. Miguel mediante una especie de umbral amplio y llano que, solo en su parte, se alza bruscamente hasta la Ermita de este nombre.

La tercera colina, la de la Alhambra, es la más alta, 790 mts., y, en conjunto la más extensa. Se alza en duros escarpes sobre el valle del Darro, cortado a pico en unos 40 mts; en contacto con el Genil, tras un brusco salto de 100 mts. La colina, que a oriente está separada del cerro del Sol (980mts.), se encuentra prácticamente aislada por escarpes y gargantas de la Vega y de las montañas que las respaldan.

Las colinas supusieron siempre un atractivo importante para el hombre, motivado sobre todo por su valor estratégico. Este valor se ve acentuado como en el caso de la ciudad de Granada por la existencia de ríos. La existencia, a retaguardia en la ciudad, de Sierra Nevada, con sus inmensas reservas de agua, ha determinado la creación de una red fluvial que hasta llegar al río Guadalquivir atraviesa toda la depresión granadina».

A esto hay que unir un elemento esencial, las murallas, que con su colorido y trazado adaptado al terreno, se pierden en este emplazamiento topográfico tan característico.



Fig. 3.2 .Vista general Cerca D. Gonzalo.

IV. ANTECEDENTES HISTORICOS.

IV. ANTECEDENTES HISTORICOS.

El elemento quizás más característico que presenta el paisaje de una ciudad de la antigüedad, es el desarrollo en su perímetro de murallas, cuyo objetivo era, servir de muro protector para los habitantes que allí se albergaban. Restos de estos muros aún se conservan en muchas ciudades, como testimonios de su historia, e íntimamente relacionados con su evolución posterior. Granada, originada en una colina en la zona denominada Albayzín, presenta un amplio desarrollo de cercas procedentes de los distintos períodos de la ciudad, de los cuales solo nos han llegado los de origen musulmán. Testimonio de ello son los grabados que sobre la ciudad se han venido realizando desde hace tiempo por diversos autores (Figuras 4.1, 4.2 y 4.3).

En este apartado se ha pretendido conocer la evolución histórica de las Murallas, incluyendo el trazado, crecimiento y parcial desaparición de las mismas (Figura 4.4).



Fig. 4.1. "Granada desde el Oeste", grabado de Hoeangle para la obra "Civitatis Orbis Terrarum" (1563).



Fig. 4.2 "Granada desde el Oriente", Grabado de Hoefangle para la pbra "Civitas Orbis Terrarum" (1563).

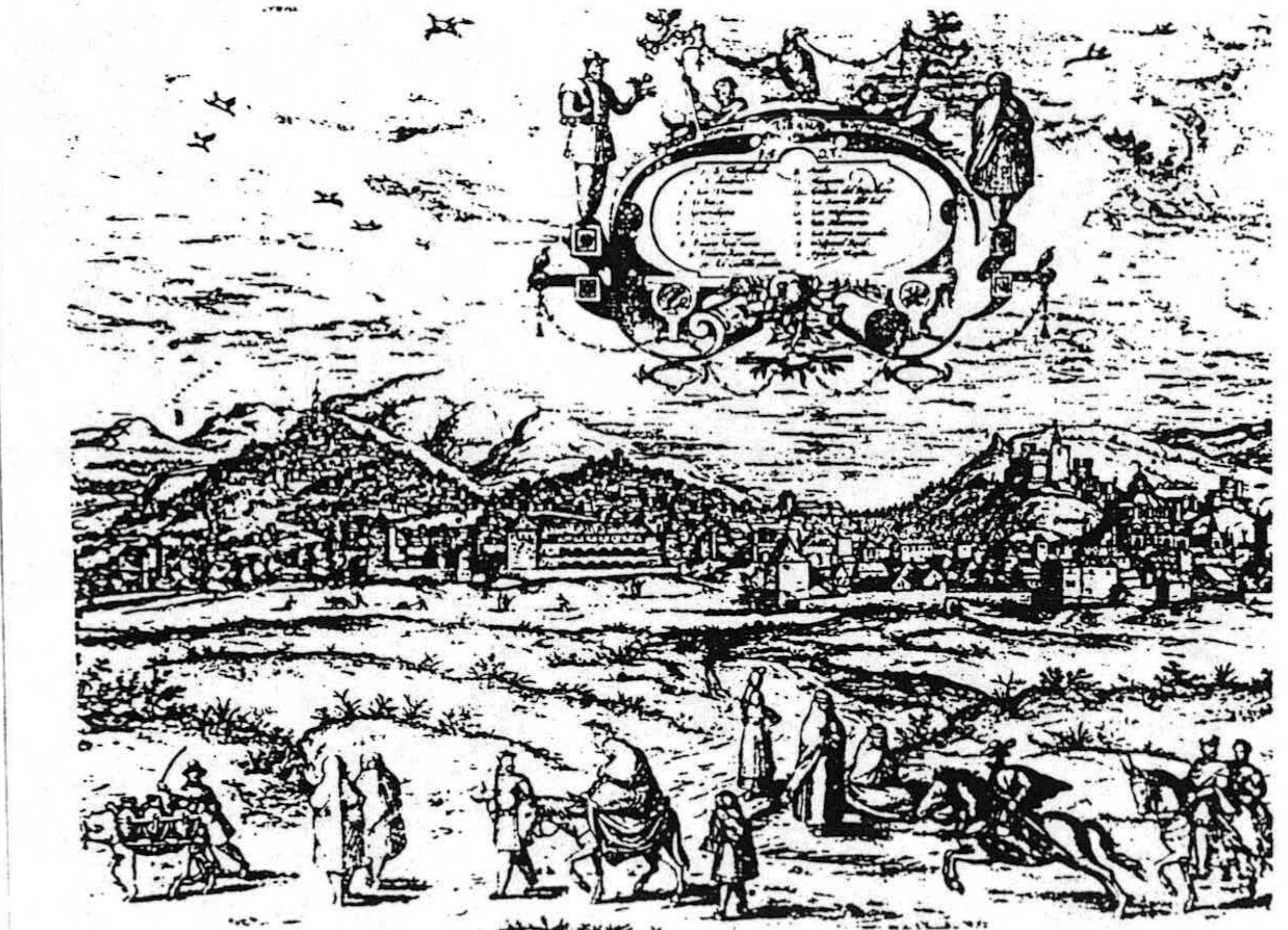


Fig. 4.3. "Granada desde el Sur", grabado de Hoefnagle para la obra "Civitis Orbis Terrarum" (1563).

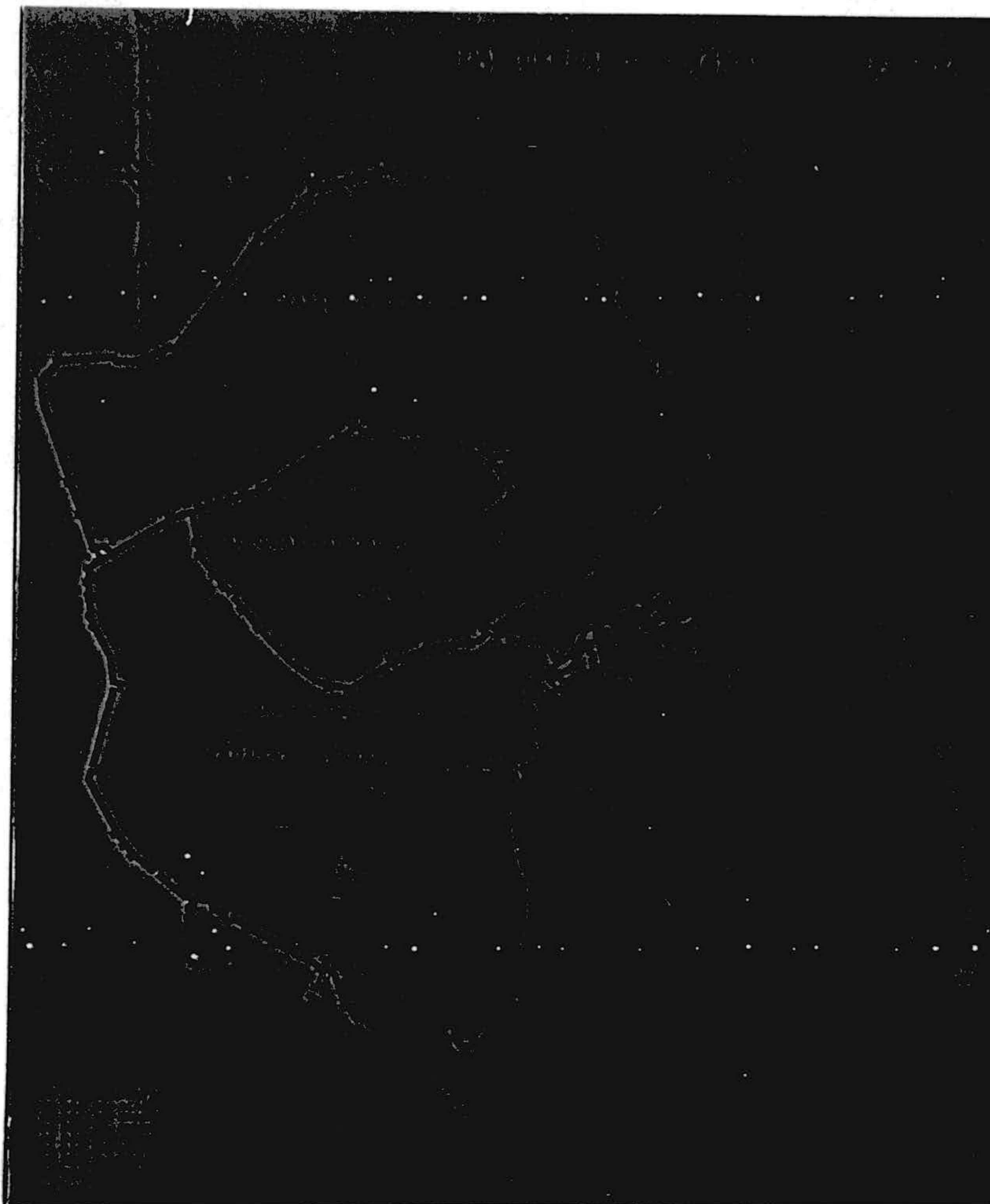


Fig. 4.4. Plano de las Murallas según Seco de Lucena Paredes (1974).

IV.1.INTRODUCCION

El nacimiento de la ciudad de Granada es muy antiguo remontándose al menos al s. II a. C. Desde entonces, con más o menos seguridad, se sabe su trayectoria histórica hasta la aparición por vez primera del nombre de Granada, en el s. VIII (Bosquel Maurel, 1988).

Entre las muchas leyendas que se le atribuyen a su origen, podemos destacar por una parte, la que afirma que la ciudad de Granada tubo su origen en un asentamiento de hebreos llegados a España con Nabudoconosor y, por otra la que afirma haber sido fundada por el griego Pirro y su esposa a la que llamaban Iberia. Bajo este tipo de afirmaciones mitad leyenda mitad fábula, se mantiene escondido el posible origen de

Granada. Pero sin duda y debido a su situación y lo extenso y fértil de sus llanuras, debió ser una zona de foco principalísimo de vida (Gallego y Burín, 1987).

¿ En qué momento surgió ILiberris ?. Las pruebas más antiguas y fiables encontradas, indican que en época remotísima se asienta en esta zona la población ibérica más civilizada (los túrdulos), y que sobre esta primitiva población se asienta la romana. Sin embargo, los distintos autores no se ponen de acuerdo en cuanto a la ubicación inicial. Dos han sido las principales hipótesis que se han dado desde el s. XVI: para unos investigadores (Mármol, La Fuente Alcantara y Seco de Lucena), se encontraba en las proximidades de S. Elvira, donde más tarde estaría la primitiva Elvira; otros, (Bermúdez de Pedraza, Simonet, Fernández Guerra, Gómez Moreno y Gallego y Burín), la sitúan en lo más alto de la Alcazaba granadina, por encima del Albayzín.

Nacida Granada en el mundo extraordinariamente urbanizado que fue el Imperio Romano, en un período tan favorable a la creación de las ciudades, habrían de influir numerosos factores históricos. Ya en este momento, las ciudades romanas de nuestra península se vieron obligadas a partir del s. III a rodearse de murallas, como consecuencia del eminente peligro de invasión visigoda, siendo evidencia los restos de cercas romanas encontradas en excavaciones arqueológicas realizadas en esta ciudad (figura 4.5)

Bajo el dominio visigodo se carece de documentos que revelen como era entonces esta población, sin embargo, conservamos datos que muestran que bajo él, y particularmente al terminar las luchas religiosas, seguía manteniendo Ilíberis su grandeza civil y eclesiástica (Gómez Moreno, 1892).

La decadencia del resto de las ciudades en este período favoreció el auge de la ciudad de Granada, convirtiéndose en una de las urbes más importantes de la Bética, solo superada por Híspalis y Cordura.

La falta de información sobre las ciudades visigodas, obliga a ir a períodos anteriores para establecer una conexión entre el mundo islámico en la península y sus antecesores. De la sobria y larga etapa que va desde el esplendoroso Imperio Romano hasta el siglo X, surgió el Al-Andalus.

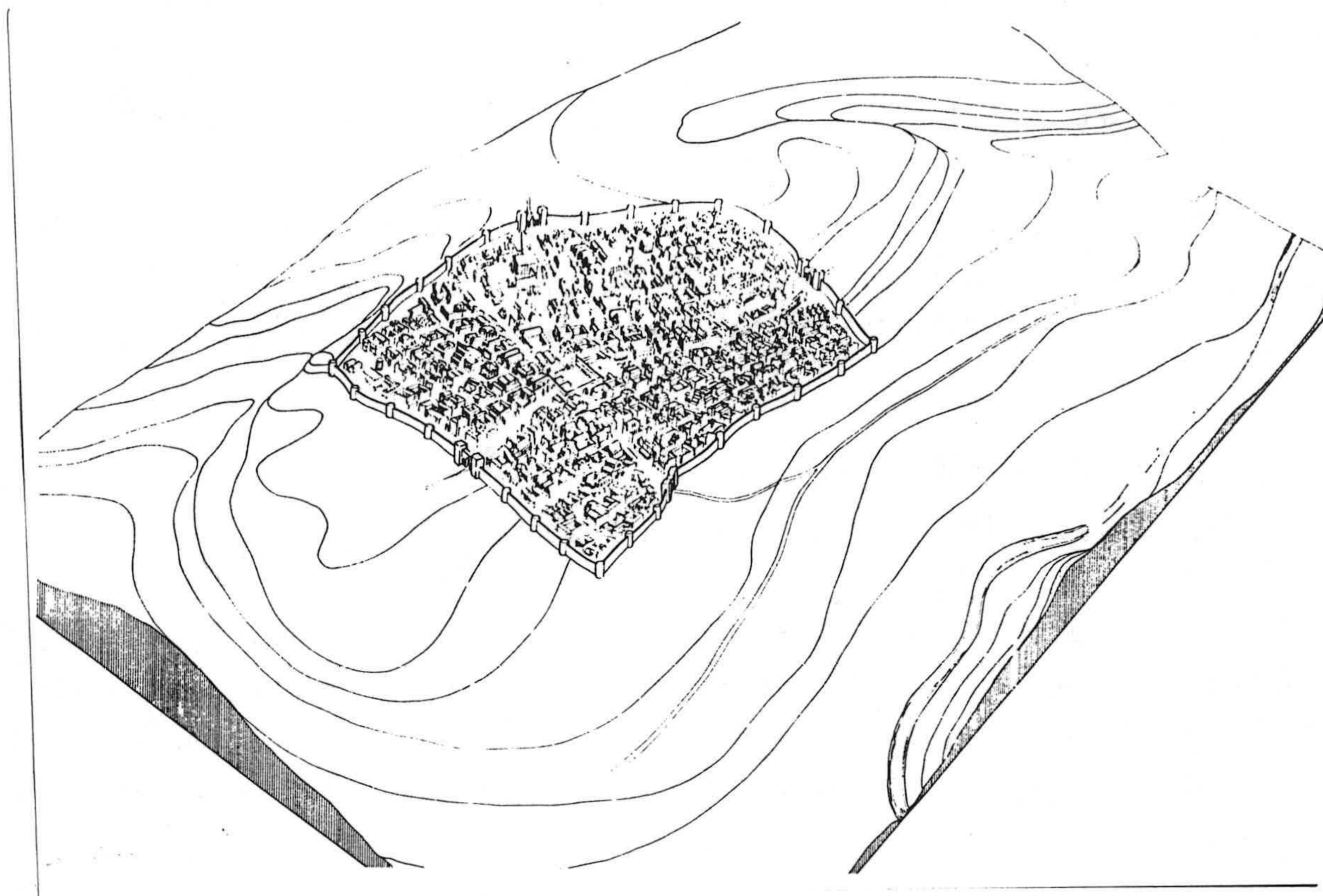


Fig. 4.5. Bloque diagrama de la ciudad romana por Mercedes Roca y otros (1988)

Se sabe que en el ámbito de Granada actual y en sus tierras más inmediatas, coexistieron desde la antigüedad tres importantes ciudades: Castilia, situada a 10 Km. de Iliberis que más tarde se llamaría Elvira; Garnata, barriada de la población autónoma judía, situados en la colina de la Alhambra; e Iliberis, situada en la Alcazaba que daba nombre a toda la comarca.

Con la entrada en el 711 de los árabes y debido a la proximidad de estas tres ciudades, la comarca Iliberis queda bajo el dominio musulmán. En esta zona se establece la colonia militar de Damaso, Alda-Rahmen convirtió a Castilia, posteriormente llamada Elvira, en capital del territorio, que llegó a ser uno de los más importantes del Islam.

A mediados del siglo VIII y debido al magnífico emplazamiento de la colina del "Albayzín", se reconstruyó la antigua fortaleza, siguiendo un trazado paralelo al recinto amurallado de la ciudad de Iliberis, por el gobernador de Elvira Ased Ibn Abderrahaman. Es posible que en esta época también se rehiciera la Alcazaba de la Alhambra y Torres Bermejas (figura 4.6). Con la reconstrucción de estas antiguas murallas se comienza a

perfilar la morfología que habría de caracterizar a Granada.

IV.2 DESARROLLO Y EVOLUCION DE LAS MURALLAS

No hay noticias de las ciudades del Al-Andalus entre los siglos VIII y X, y apenas si podemos seguir la evolución de Córdoba, la capital. En el s. IX en el pacífico reinado de Abd Al-Rahman (821-852), se observa la influencia de la corte de Bagdad y su relación política con Constantinopla.

Hacia el año 1000, Córdoba llegó a la cumbre de su grandeza. Entre el 1010-1015 el asedio de los Berberiscos contribuyó a su decadencia.

En el territorio granadino estas luchas, entre mozárabes, muldies y los árabes dominados, devastaron la ciudad de Elvira en el año 1010, preparando la caída del califato de Córdoba. Como consecuencia la corte del valí de Elvira se trasladó a la colina de la Alcazaba granadina, asentándose aquí gran parte de los ciudadanos, así como, en la parte llana.

El último valí de Elvira, Zawi Ben Ziri, tras su victoria, se retiró a Africa con una inmensa fortuna. En 1013, año de su marcha, reconstruyó las deterioradas murallas, y su sobrino Habus (primer monarca Ziri) consiguió hacerse con el poder. Durante el reinado de Habus, se fortificó y amplió la primitiva fortaleza, que paso a llamarse la "Qasaba Qadima" o alcazaba Vieja. Su sucesor Habus Badis (1035) amplió el recinto de la muralla, y en el sitio llamado vistillas de San Miguel construyó un suntuoso palacio llamado Casa del Gallo. En este período se pobló el barrio del Zenete, al pie del nuevo recinto, por tribus berberiscos con la finalidad de defender la fortaleza. Además se alzaron varias mezquitas, aljibes y baños, se construyó la acequia de Ainadamar, y el puente del Cadí, para comunicar la alcazaba de Granada con la de la Alhambra. Durante su reinado que duró hasta el 1073, continuó el ensanche de la ciudad, añadiéndose nuevos arrabales, lo que obligó a que se construyera una nueva alcazaba, que autores recientes llaman Gidida "Nueva" (existe cierta confusión en este sentido ya que es posible que al mencionarse en escritos antiguos este nombre, fuese referido a la alcazaba de la Alhambra). Al construirse el primitivo núcleo de la Alcazaba, la ciudad se extendió por la ladera sur hasta el río Darro, y así surgió el Barrio de la Cauracha y el de los Renegados. Esto provocó un gran desarrollo de la ciudad que pasó de ser un asentamiento militar a principios del s. XI, a una gran ciudad a mediados de este mismo

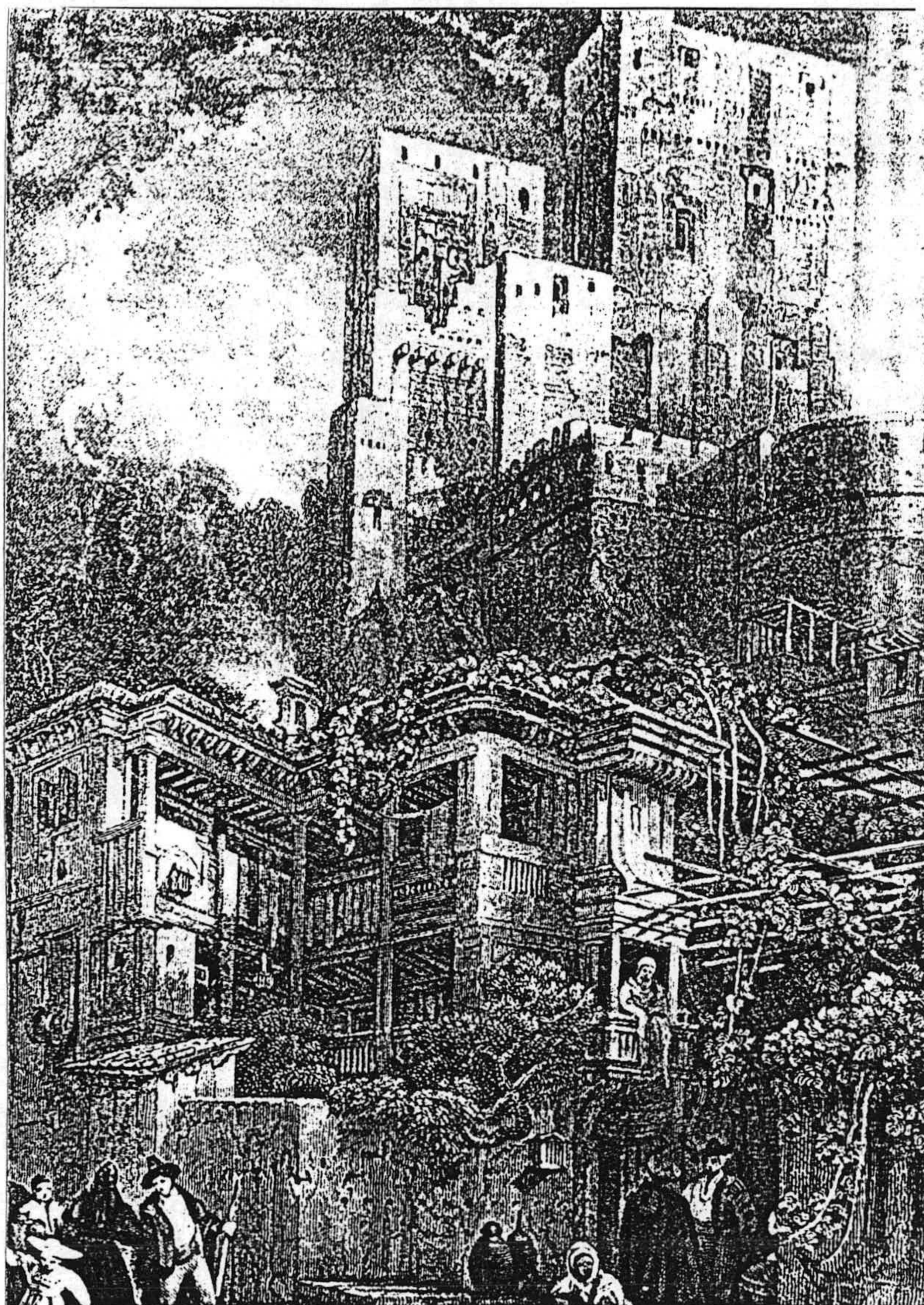


Fig.4.6. Grabado de Torres Bermejas.

siglo. Con el monarca ziri Abd-Alla (1090), se termina la dinastía, en su reinado nació el barrio de Haxariz entre S. Pedro, la cuesta del Chapiz y S. Juan de los Reyes.

Garnatha Alehud fue otro núcleo de crecimiento. La continua afluencia de nuevos emigrantes judíos, le hizo abandonar el refugio de Torres Bermejas y ganar terreno, a lo largo de la orilla izquierda del Darro, hasta la actual Puerta Real. Al pie de la Alhambra, se crea el barrio de la Almanzora que, a través del Mauror, se relaciona con

Garnatha.

Granada cae en 1090 en manos de los Almorávides. En este período creció nuevamente su valor militar, que se caracterizó por una importante persecución a los cristianos. Destruyeron una antigua iglesia que se alzaba en el Triunfo y construyeron en su lugar, una Mezquita y sus Baños. Su período no conllevó grandes cambios, si bien es de destacar que la nueva dinastía prefirió la nueva Garnatha Alehud a la Alcazaba creando, en su entorno una amplia alameda, palacios y fincas de recreo de infinita riqueza.

La labor urbanística de los Almohades (1149-1238), se ciñó a la renovación interna de la ciudad, especialmente en el sentido religioso y administrativo. En el s. XII Granada era ya una gran ciudad, con gran desarrollo de barrios, tanto en la parte llana como en todo el borde de la colina. Su gran aumento de población estaba muy relacionado con el avance de los cristianos sobre territorio musulmán.

A lo largo del período que va del 1035 al 1238, se construyó la cerca de la Medina, a la que pertenece la puerta más importante del recinto amurallado de Granada, Puerta Elvira, cuya construcción se llevó a cabo en varias etapas, se tiene constancia de que ya existía en el s. IX (como lugar de paso a la antigua ciudad de Elvira, formando parte de una fortaleza militar existente en la colina del "Albayzín").

El año 1238 marcó el inicio de la dinastía Nazarí, cuando Al-Ahmar, un príncipe feudal, conquista Granada y consigue consolidar el último reino islámico que por entonces quedaba todavía en la península. Esta situación convierte a la ciudad en refugio de los musulmanes de Ubeda y Baeza, recién conquistada por el rey Fernando, y que al asentarse en la colina dan al barrio su nombre definitivo, Albayzín (pequeña Baeza). Esta zona fue creciendo paulatinamente durante toda la época nazarí.

La principal atención de la nueva dinastía se concedió a la fortificación y población de la Alhambra, a partir de la Alcazaba. Ya en el s. XV la triple estructura alhambrense: fortaleza, palacio real y ciudad cortesana quedó ya perfectamente esbozada (figura 4.7).

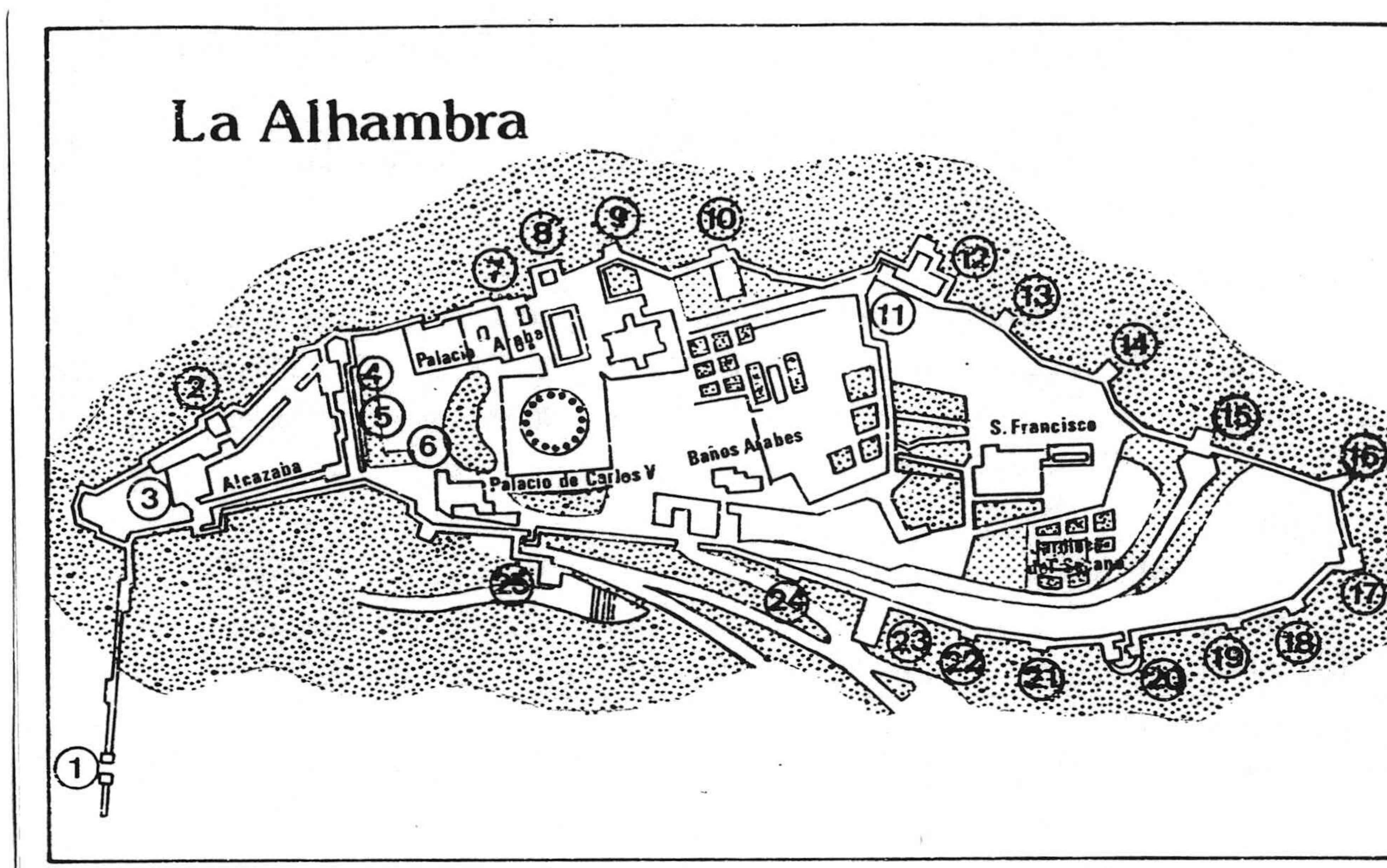


Fig. 4.7. Ciudadela de la Alhambra.

Al-Ahma, fundador de la dinastía nazarí, y bajo la protección de una vieja fortaleza, emplazó su palacio frente a la colina del Albayzín. Al pie de esta colina y al amparo de las murallas se desarrolló la actividad mercantil e intelectual de esta ciudad. Veinte monarcas rigieron este reino en sus dos siglos y medio de existencia. Los palacios y recintos de la Alhambra se completaron y enriquecieron hasta llegar al esplendor con Yusuf I (1333-1353) y su hijo Mohammed V (1353-1391); ellos labraron las grandes puertas, construyeron la Alondiga Yidita y la Madraza.

En el período nazarí Granada llegó a ser una de las ciudades más importantes de Europa, con un gran desarrollo comercial y cultural. Como consecuencia de la emigración de musulmanes procedentes de las tierras conquistadas, en la ciudad se formaron nuevos arrabales, cada uno de los cuales se rodeó de su propia cerca. Así tenemos el arrabal del Albayzín situado al norte de la Alcazaba, que fue poblado por lo moros de Ubeda y Baeza; los arrabales de Nayd, la antequeruela y el de los Alfareros, situados próximos a la colina de la Alhambra, y por último, el arrabal de Bib-Arrambla, contiguo a la Medina orientado hacia el oeste (ver figura 4.4).

Siguiendo el trazado antiguo romano, la medina musulmana se configuró con dos grandes vías, así tenemos la calle Elvira, que atraviesa la ciudad de norte a sur y la de San Juan de los Reyes que la atraviesa de este a oeste, prolongándose por el Zacatín hasta la plaza Bib-Rambla.

La arquitectura urbana responde a los conceptos propios de una ciudad musulmana. Arquitectura de interior con muros de separación, más que fachadas, conformando un verdadero laberinto callejero, con alineaciones sinuosas, callejones sin salida que, en ocasiones se invaden por cobertizos, ajimeces o salerizos.

A partir de ese momento se produce un declinar. La mayoría de las ciudades de la península van pasando a manos cristianas, y al final en 1492 Granada es conquistada por los Reyes Católicos, terminando la dinastía nazarí y la dominación musulmana de la península.

Los monarcas cristianos, con un claro sentido político y estético, conservan la estructura de la ciudad aunque urbanísticamente se toma alguna medida para convertir la Granada musulmana en una nueva ciudad más acorde con los tiempos. Se ensanchan las calles, se derriban casas y se abren adarves, no obstante se mantiene la tradición arquitectónica y decorativa musulmana, debido a que son los mismos alarifes o albañiles moriscos los que edifican la nueva ciudad.

Comenzando el período Renacentista, se instalan en la ciudad numerosas órdenes religiosas, parroquias y arquitectura nobiliaria. Los grandes canales de comunicación urbana se instituyeron, en grandes murallas de separación y delimitación de barrios que se autoexcluyen. Así, entre la calle S. Juan de los Reyes y el río Darro, se asientan las principales familias nobiliarias castellanas y órdenes religiosas, mientras que el Albayzín propiamente dicho queda para asentamiento de los moriscos. Una de las primeras ampliaciones que se realizaron en la ciudad, fue el barrio de S. Lázaro.

La expulsión de los moriscos en el 1571 conllevó la destrucción del Albayzín y la aparición de los cármenes, que nada tiene que ver con la vivienda doméstica morisca.

En la Medina se van a producir importantes cambios al ser totalmente modificada con la instalación de aquellos órganos propios de la ciudad castellana, como fueron la Catedral y Chancillería; paralelamente se sistematizan espacios como Bib-Rambla o Plaza

Nueva (figura 4.8.).

Los cambios sociales y estratégicos que se inician en la época moderna, así como el establecimiento de los nuevos límites políticos, se traducen en lo innecesario de las murallas como cerca urbana. De esta forma, Granada durante el s. XVI, se va a extender, superando las murallas en la zona Sur y Oeste, atendiendo a una mayor facilidad de edificación por las características del terreno y por la cercanía del centro representativo.

Durante el Barroco, la ciudad alta fue despoblándose o, al menos no creció en habitantes a lo largo del s. XVII. En cambio, toda una ciudad iba surgiendo extramuro a las murallas musulmanas. La gran zona de expansión urbana de este siglo se sitúa en los barrios de la Magdalena, S. Andrés y la Virgen de las Angustias, que aunque presentando criterio clásico, mantenían características tradicionales.

Durante el s. XVIII la ciudad no sufre grandes cambios; cabe destacar la obra de urbanización en torno al Genil, se diseñaron las plazas de campillo Alto y Bajo y la alamedas de la Alhambra, trazado de los paseos de Biolón y la Bomba, San Sebastián y San Fernando. Ya aparece Puerta Real como centro neurálgico.

En el s. XIX se produce en la ciudad una auténtica renovación urbana. Con la llegada de los franceses tuvo lugar un embellecimiento de los paseos y plazas, iniciándose los derribos de los lienzos de murallas exteriores, que continuó hasta mediados de siglo. Las transformaciones urbanas iniciadas a mediados del s. XIX responden al uso de nuevas técnicas urbanísticas para la eliminación definitiva de las reliquias históricas sobresalientes en el entramado urbano, e imponer criterios obsesivos de regulación, saneamiento o decoro geométrico. Se impulsa el derribo de las murallas y puertas de la antigua Medina, desapareciendo edificios monumentales, que son considerados incompatibles con el ensanchamiento y regularización de plazas y calles.

En 1884 se concluyó el embovedado del río Darro hasta Puerta Real, prolongándose hasta la carrera de la Virgen al final del siglo. Las reformas llevadas a cabo a finales de este siglo, destrozan gran parte de la ciudad vieja; así, en 1895, al abrir la Gran Vía de Colón se eliminó el barrio de la Mezquita Mayor.

Las murallas que han llegado hasta nuestros días se encuentran emplazadas en la

ciudad alta, debido quizás a que la proyección de la futura ciudad viene marcada por los ejes principales en sentido NO-SO, además del continuo y progresivo avance hacia el Oeste, a expensas de la porción de Vega. Esta localización, en cierto modo al margen del desarrollo urbanístico, ha hecho que puedan llegar hasta nuestros días gran parte de ellas.

IV.3 TRAZADO Y ELEMENTOS DE LAS MURALLAS DE GRANADA.

V.3.1 INTRODUCCION.

La inmensa mayoría de las ciudades hispanomusulmanas estaban formadas por un conjunto apretado de edificios rodeados y protegidos por murallas que les separaban radicalmente del entorno.

Estas Murallas constituían cercas ("musallas") torreadas, fabricadas con tapial, mampostería o sillares. En el caso muy frecuente, de localizarse la ciudad sobre una colina o lugar escarpado, la cerca se adaptaba a la pendiente del terreno, bordeando barrancos y cauces. En las zonas llanas se reforzaban las defensas constituyendo un antemuro, "barbacana" (figura.4.10)



Fig. 4.9. Fragmento de la Batalla de Higuera. Puerta Elvira.

Torres Balbás, en su tratado "Ciudades Hispano Musulmanas", (1985), en relación con las murallas árabes construidas en nuestra península manifiesta:

«Las murallas en el caso de ser simples, en los lugares próximos al ataque se levantaban murallas concéntricas bastantes distantes unas de otras. Sus dimensiones eran variables según la importancia del núcleo urbano. En algunos casos los recintos fortificados prescindieron de torres generalmente en la cumbre de un pico o de un escarpe. El trazado en cremallera hacía innecesario el empleo de bastiones de franqueo (Torreones). Casi todas las fortificaciones de Andalucía Oriental presentan una gran acumulación de defensa. Se emplazaban en un lugar elevado, y presentan doble y a veces triple anillo de murallas. El número de sus puertas era escaso pero disminuía en profundidad....»

La disposición de las torres en los recintos amurallados estaba en función del alcance de las armas de tiro. La distancia entre ellas era de 20 mts., la recomendada por Vitruvio. Una distancia de 30-35 mts. era todavía frecuente en las cercas del siglo XIII. En las fortificaciones del s. XII al XV no se ha podido establecer una evolución regular, siendo muy variable las soluciones adoptadas. Sin embargo la tónica general, es que estas torres fuesen o no Abarranas, se emplazarían en el mismo entorno de las cercas, en sus puntos más vulnerables. El período Nazarí se caracteriza por adquirir mayor variedad y fuerza, pero sin caer en el efecto arquitectural de las cercas cristianas. En otros casos bastaba el empleo de un antemuro....»

La torre de planta rectangular, más larga que profunda, fue desde antiguo la más utilizada. El empleo de los encofrados para fabricar el hormigón hizo igualar las dimensiones de las mismas, sin embargo una observación en detalle lleva a encontrar diferencias...

Las torres de ángulo chafanado, que aparecen en el s. XII son poco frecuentes. En cambio abundan las torres Poligonales. Las torres semicirculares, figuran en los castillos Omegas de Siria y excepcionalmente en la España musulmana. Un ejemplo lo tenemos en la Muralla Zirí de Granada (lámina IV.I.Foto 1).»

Toda la vía de comunicación con el exterior de las ciudades fortificadas queda canalizada en las puertas abiertas de las murallas. Estas se cerraban de noche y la ciudad quedaba incomunicada. Además tenían un carácter fiscal. En caso de asedio, acostumbraban a tapiar las puertas con obra de fábrica, para evitar incendios, las hojas solían forrarse de hierro.

Las puertas se sitúan apartadas de los vértices de la cerca, en un ángulo entrante y con torres intermedias, para facilitar el franqueo de los asaltantes. Las puertas más viejas conservadas son de entrada recta (figura 4.11), disposición que se seguía usando hasta el s. XV. Las de más importancia estaban franqueadas por dos torres como las romanas y visigodas. En los últimos años del reinado granadino, ante el desarrollo de la artillería, fue necesario adoptar a las nuevas fortificaciones de nuevos métodos de ataque con la construcción de varios baluartes bajos delante de las puertas, como es el caso de la Alhambra, su trazado era en arco de círculo.

Las puertas eran puntos que el ingeniero militar debía fortificar. Allí se acumulaban los máximos recursos defensivos. No es por tanto de extrañar que fuesen contruidos con un material más resistente que la propia muralla. La entrada en recodo era para dificultar la penetración al enemigo. La existencia de estas puertas en el Magrés oriental y en el central a finales de los s. X y XI, justifican que se encuentren otros del mismo tipo en Granada entre los años 1025 y 1075. Entre las puertas más importantes de este tipo tenemos Puerta Nueva, Puerta Monaita y Puerta Elvira. Las puertas en recodo (figura 4.12), solían ser a veces de un solo recodo como Puerta Bibarrambla y la del Pescado y otras veces de doble recodo como la puerta de la Justicia y de los Siete Suelos en la Alhambra.

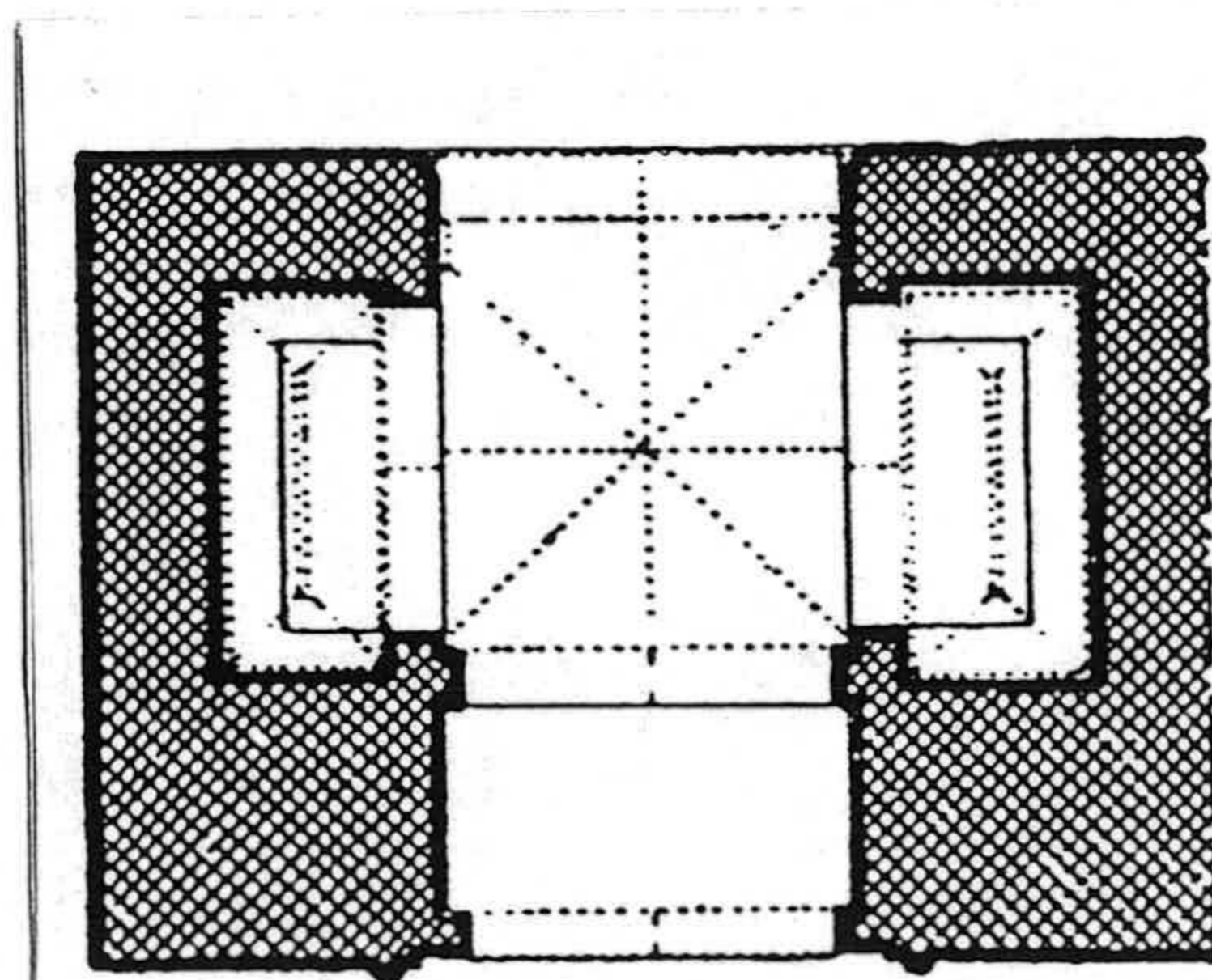


Fig. 4.10. Puertas de acceso directo.

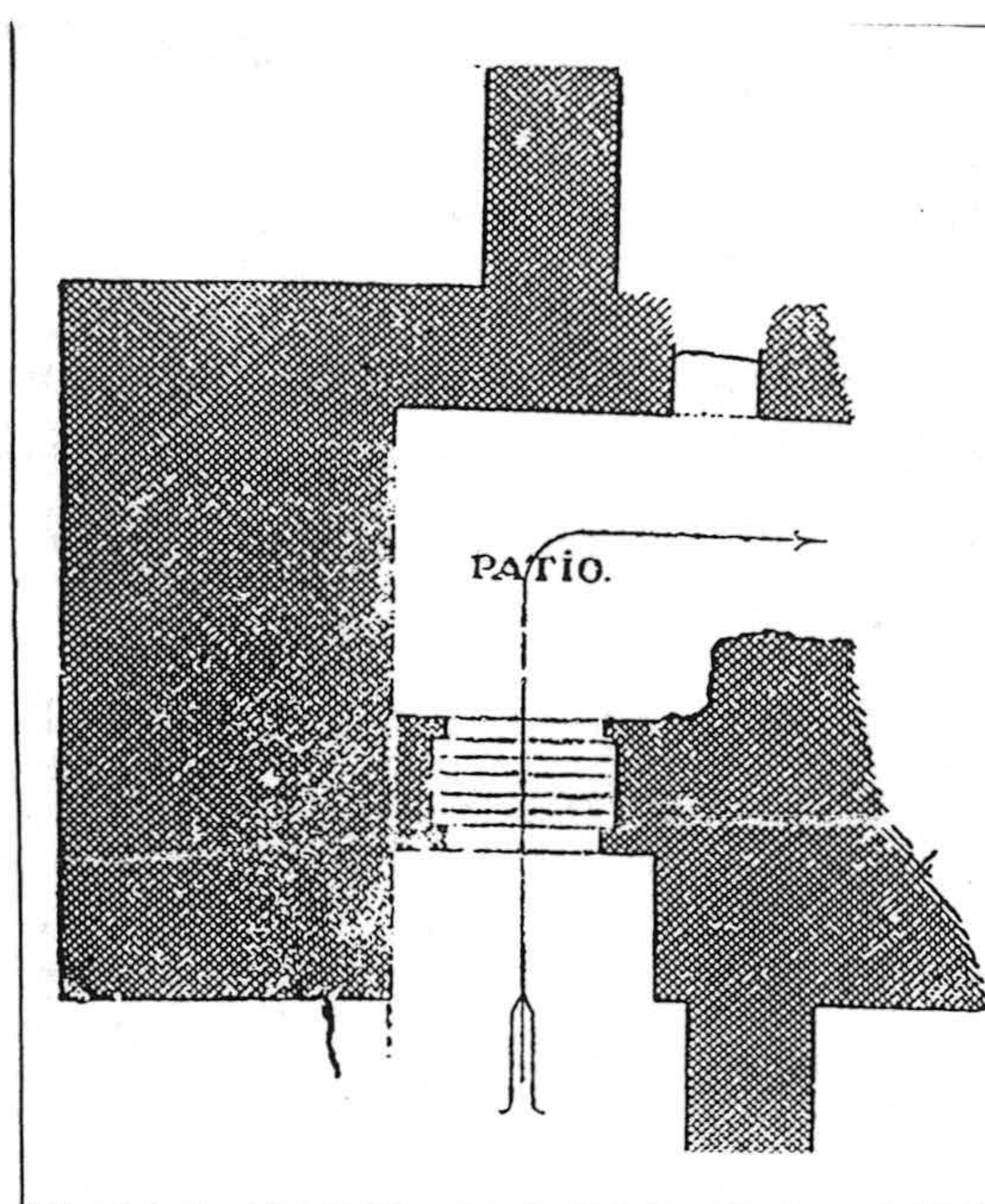


Fig. 4.11. Puertas en recodo.

Cuando en la ciudad, en intramuro no brotaba un manantial o no la cruzaba un río, un lienzo de muralla terminado en torreón descendía hasta la corriente de agua o fuente próxima, la torre y el muro en este caso se llamaban **cauracha**. Este elemento arquitectónico tenía como función abastecer de agua a la ciudad. El constante crecimiento de esta hacía que estos muros quedasen al final incluidos en el en el interior del recinto.

Cada **arrabal** se constituía como una ciudad independiente con sus zocos, tiendas, mezquitas, baños y hornos. Los únicos elementos de unión con la ciudad era la cerca general y la Mezquita Mayor, donde los fieles debían asistir los viernes a la oración, así como el centro comercial más importante, el zoco.

Las áreas urbanas estaban constituidas en general por una red caótica y muy ramificada de calles. En las calles principales no existía tráfico rodado y normalmente eran muy sinuosas. A las calles principales se les comunicaban otras menos importantes, muchas de ellas sin salida, con puertas que se cerraban de noche. Las calles y adarves quedaban a veces cubiertos por cobertizos que unían las plantas altas de las casas limítrofes a uno y otro lado de las calles. Este sistema de vías quebradas, que evitaban

la entrada del viento en la ciudad, siempre en calma, era uno de los aspectos más característicos de las ciudades islámicas (Torres Balbas, 1995).

IV.3.2 LAS CERCAS Y PUERTAS DE GRANADA.

En Granada hubo varios recintos amurallados, iniciados por Hernan-Roman atribuibles a tiempos romanos fenicios. Los abundantes hallazgos romanos descritos por Gómez Moreno, (1907) parecen evidenciar la importancia y riqueza de la ciudad, que se extendía por la colina de la Alcazaba, actuales parroquias de San Nicolás, San José, San Juan de los Reyes y Parte Sur del Albayzín. El estudio topográfico de los restos arqueológicos parece indicar el contorno amurallado de la ciudad, que en algunos puntos coincide con la musulmana de los Ziries.

Su recorrido según Bosquel Maurel, (1988), podría ser el siguiente:

«Corría paralela a la actual calle San Juan de los Reyes, por el carril de la Lona hasta la musulmana Puerta Monaita que torcía al este hasta San Salvador, desde donde bajaría por la cuesta del Chapiz hasta el antiguo convento de la Victoria de aquí giraba hacia el oeste para cerrar el circuito».

Fuera del polémico recinto se encontraban otros núcleos habitables, en la colina fronteriza de la Alhambra y en la zona de la Abadía del Sacromonte y Valparaíso.

En los primeros tiempos de la ocupación árabe, las cercas existentes, herencia de la colonización romana, reparadas en caso necesario, se siguieron empleando para satisfacer las necesidades de los núcleos urbanos.

En la diferenciación de los distintos recintos amurallados hemos seguido la empleada por Seco de Lucena, (1910). El los clasifica en tres grupos.

- Alcazaba Cadima o Vieja
- Alcazaba Gidida o Nueva
- y Alcazaba de la Alhambra (no incluida en este estudio).

Y por otra parte, distingue la cerca de la Medina y la de los distintos Arrabales.

La Alcazaba Cadima.

El valí de Elvira, Ased Ibn Abderrahaman el Xeibaní, inició antes del 765, la construcción de la Qadaba Garnata llamada Alcazaba Cadima o Alcazaba de Granada, que sirvió de acuartelamiento a las fuerzas árabes encargadas de la defensa de los diferentes núcleos de población existentes, tanto en el cerro del Albayzín, como en el cerro de la colina roja. Fue consolidada en el s. XI por Zawi Ben Ziri, último valí de Elvira.

Su construcción se llevó a cabo a base de tapias de argamasa hechas con piedra de río sujetas con mezcla de cal y arena. las torres son macizas y en las esquinas de sus bases aparecen aparejos de lajas de piedra de la Malá alternando con cuatro estrechos sillares de tizón entre dos de frente (Gómez-Moreno,1892).

Recorrido. «La primitiva fortaleza ocupaba un pequeño perímetro, que arrancaba de la placeta de Bibalbonut, desde aquí en dirección este continuaba hasta la placeta del Cristo de las Azucenas, luego continuaba en dirección sur, por la calle de Pilar Seco y Almirante, torcía hasta la placeta de Echevarría, calle Almez, Placeta del rosal y cuesta del Algibe del Trillo, aquí doblaba por la calle Guinea y Algibe Grande para enlazar de nuevo en la placeta de Bibalbonut» (Seco de Lucena,1910),(figura.4.12).

«Crónicas árabes llaman a esta muralla Antigua o Alcadima, sin duda para distinguirla de la Alcazaba de la Alhambra, Mármol no considerando esto probable, hubo de imaginar otra alcazaba a la que llamó Gidida o Nueva; situándola en la parte oriental de la verdadera Alcazaba, cuyos límites no determinó. Todos los modernos admiten estas dos Alcazabas contiguas, pero documentos antiguos no nombran más que una» (Gómez Moreno, 1892).

A este primitivo recinto se podía acceder a través de tres puertas. En la placeta de Bibalbonut se encontraba la **Puerta de Bab al- Bunut**, o puerta de las Banderas. Esta puerta fue mandada demoler en 1556 y de ella solo queda una de las torres que la franqueaba, adosada al convento de las Tomasas (lámina IV.I.Foto 2), reconstruida actualmente en ladrillo con incrustaciones de mampostería. La **Puerta Bab al-Baz** o del Halcón, estaba situada en la cuesta de San Nicolás, fue llamada por los cristianos Postigo de San Nicolás, Teniéndose constancia de ella por las citas de Mármol (XVI) recogidas por Gómez Moreno, (1892). Comunicaba la Alcazaba Cadima con el arrabal del

Albayzín. **Bab Qastar**, vulgarmente conocida como Puerta de Hernan Roman, está en el callejón de San Cecilio, muy restaurada donde hoy en día se encuentra una ermita. La franqueaban dos torreones, tiene paso en línea recta y está formada por un aparejo compuesto de lajas de piedra colocadas de cara, que alternan con otras puestas de canto (Gómez Moreno, 1892). Construida con tapial de cal grasa, se ha reconstruido el zócalo con ladrillo y mampostería la coronación (lámina IV.I.Foto 3).

De este recinto primitivo se conserva el sector norte, el paño que arranca desde Bibalbonut y concluye en el arco de las Pesas, y restos de torreones en las calles Guinea (lámina IV.II.Foto 8) y San Juan de los Reyes, perteneciente a la antigua Cauracha (lámina IV.II.Foto 7) En la alcazaba Cadima existía una Cauracha " Quawraya", término castrense propio del árabe español, que designa al espolón de muralla que arrancando del recinto general protege el acceso para provisionamiento de agua en caso de asedio. (Seco de Lucena, 1910, y Torres Balbas, 1985).

La Alcazaba Gidida.

Durante el reinado del rey Badis el recinto amurallado sufre una serie de ampliaciones que fueron conocidas como Qasada Yadida o alcazaba nueva o Gidida. Este término es un tanto confuso, como hemos indicado antes.

Recorrido. «Este recinto arranca del Arco de las Pesas, constituyendo un lienzo de muralla de más de 400 m de longitud, con cuatro grandes torreones cilíndricos y ocho rectangulares que corresponden al recinto ampliado y que bordeando la cuesta de la Alhacaba desciende hasta la puerta que conocemos como Monaita. Este paño que termina en la puerta llamada unas veces **Bibalbonaida**, otras veces Bonaida y finalmente Monaita (lámina IV.II Foto 5), esta defendido por un formidable torreón con aparejo de piedra, consta de dos arcos de herradura iguales y muy bien labrados en lajas de piedra franca. Tras los arcos hay un pequeño patinillo, y el paso forma ángulo, accediéndose mediante recodo a la ciudadela.

Desde aquí, la cerca ascendía en dirección a las vistillas de San Miguel Bajo, donde hubo otra puerta, **Bab Al- Asad** o del León, franqueada por dos torreones; todo ello ha desaparecido. Desde esta puerta la muralla descendía por el lugar llamado Cruz de Quirós y la cuesta del Perro, donde aún quedan restos, hasta alcanzar la porteria del Convento de San Gregorio el Bético. Aquí se abrió otra puerta de la que no quedan

restos, los árabes la llamaron **Bab Al- Hassarín** o puerta de los Estereros; fue conocida por los cristianos como Arquillos de la Alcazaba. La cerca continuaba por la placeta de Porras y seguía en dirección Este.

La cerca bajaba en diagonal atravesando San Juan de los Reyes hasta la Puerta de los Panderos en la Carrera del Darro, junto a la **Puerta del Alcalde**, actualmente llamado equivocadamente Puente del Cadí (lámina IV.II.Foto 6). De allí seguía en línea recta hasta el final de la cuesta del Chapiz, donde estaba la **Puerta de Bib Güedaix as Softa** o de Guadix Baja y desde allí subía paralela a dicha cuesta hasta la puerta ya desaparecida que se llamó **Bib- Maadame** o del Osario, donde torcía hasta unir con la cerca primitiva en la placeta de Bibalbonut»(Seco de Lucena, 1910).

Respecto a este trazado, al llegar a la calle San Juan de los Reyes existen discrepancias entre los diversos autores; así Seco de Lucena Paredes, (1974) considera que la Cerca discurría casi al borde de la acera izquierda de la calle San Juan de los Reyes, apoyándose que en frente a la portada de la iglesia situada en esta calle, y que más arriba, en la calle Guinea, existen otros restos. Entre ambas torres, según indican la mayoría de los autores, se abrió otra puerta, cuyo nombre árabe se ignora así como la fecha de su desaparición. Desde aquí, y ajustándose a la accidentada configuración del suelo, el citado autor considera que ascendía hasta alcanzar la puerta de Bad Al- Banut (figura 4.15 Recorrido de la Alcazaba Gidida).

Gómez Moreno,(1892), hace mención a este trozo de muralla que va desde San Juan de los Reyes a la Puerta de Bibalbonut, pero a la vez también hace referencia a un lienzo de muralla que va paralelo a la Carrera del Darro, y habla de un torreón situado en lo alto de la cuesta del Chapiz que torcía hasta Bibalbonut. Sin embargo no nos indica que este trozo de muralla pertenezca a la Alcazaba Gidida, sólo que:

«Rodeaba el barrio de los Haxares cuya parte inferior pertenece al s. XI, y lo demás fue reedificado mucho después con mala argamasa...., derribado en 1611».

De este recinto se conservan dos pueras, puerta Monaita y el Arco de las Pesas. Se tiene constancia de ellas por las citas de Mármol recogidas por Gómez Moreno, (1892)

«Al extremo de la muralla todavía se conserva de aquella remota época la Puerta

de Hernan-Roman abierta entre gruesas torres fabricadas igual que las anteriores. A su derecha quedan vestigios de una muralla que proseguía hacía el oeste, pero esta estaba destruida en el siglo XI, cuando se levantó de nuevo y más grande muro enlazado con el viejo sobre los cimientos de la puerta referida, que desde entonces queda inútil, se edificó otra puerta que estuvo cerrada durante mucho tiempo a causa de cierta superstición, hasta que en 1573 se mandó abrir, de ahí el nombre de Puerta Nueva o de Las Pesas» (lámina IV.I Foto 4).

El arco de las Pesas fue llamado por los árabes **Bab Al- Ziyada** o Puerta del Ensanche. Fue construida según Seco de Lucena a finales de la Dinastía Ziri.

De esta cerca se conservan actualmente el muro de argamasa de unos 400 m. de longitud, 6 mts. de altura y 2.5 mts de ancho, hecho de cal y arena con piedras que se alinean en la dirección de poniente desde el arco de las Pesas hasta Puerta Monaita, las cuales se conservan. También existen restos en el callejón del Perro y cuesta de la Lona, además, existe un torreón próximo a la Placeta de la Santísima Trinidad (lámina IV.III.Foto 9) que era de base circular y debido a su reciente restauración en ladrillo presenta planta cuadrada.

La Cerca de la Medina.

La llegada de ciudadanos de la destruida ciudad de Elvira dio lugar al asentamiento de un importante núcleo urbano en la parte llana, situándose allí los principales órganos de la ciudad. Esta ciudad también estaba provista de su propia cerca, que Seco de Lucena, (1910), llamó de Poniente.

Esta cerca comenzó a construirse en el año 1035, incluso antes, y concluyó en el 1238 al comienzo de la dinastía Nazarí.

Recorrido: «Esta cerca comenzaba en Puerta Monaita, y descendía bordeando la cuesta de la Alhacaba hasta **Puerta Elvira**, (este trozo de muralla debió corresponder al siglo XI).

Desde Puerta Elvira (lámina IV.III. Foto 10) la cerca seguía hacia el Suroeste, hasta la calle Arco de la Tinajilla, que toma nombre de una puerta de acceso a la ciudad **Bib al Kuhl** puerta del Alcohol o sulfuro de Plomo, hasta la calle Navarrete y siguiendo

la línea de la de Corazones hasta el Boquerón, sitio donde estuvo la Puerta de las Cuatro Fuentes o **Bib- Arbaatayón**, continuaba más al poniente pasando entre las calles de Cochera, Arandas, por la de Niñas Luchando, Convento de la Encarnación y solar de la iglesia de San Justo y Pastor, abriéndose aquí la **Puerta de Bib- Riha** o del Molino, llamada así porque en sus proximidades hubo un molino; los cristianos la nombraron Puerta de San Jerónimo. Doblabase en ángulo recto, en el sitio que hoy desemboca a la Placeta de la Universidad y continuaba por la calle de Escuelas y la calle del Silencio, donde se encontraba la **puerta Bab Al- Murdi**, Placeta de la Trinidad, calle de la Pescadería, solares de edificios de Poniente de la Plaza Bib-arrambla hasta el principio de la calle Salamanca, donde se abría la **puerta Bab Al Rambla** o Puerta del Arenal, destruida en 1884, la cual daba vista a la calle Mesones. Los cristianos la conocían Puerta de las Orejas y de las Manos, porque en ella se acostumbraban a colgar las que se cortaban a los malhechores. Esta Puerta fue demolida en el año 1884, sus restos se trasladaron al museo Arqueológico y posteriormente fue reconstruida por Leopoldo Torres Balbas en los bosques de la Alhambra (Lámina IV.III. Foto 11 y 12).

En la misma calle Salamanca, y dando vista a la calle Reyes Católicos hubo otra Puerta, **Bab Al- Dabbagin** o de los Curtidores. Desde aquí la muralla seguía tras la acera del Casino hasta llegar al castillo de Bibataubín, aquí se abría otra puerta llamada **Bib Al-Tawwabín** o de los Ladrilleros. Fue una de las más importantes y la incendió el Gran Capitán, Gonzalo de Córdoba, poco antes de la conquista de la ciudad. Quedando restos adosados a una casa de la Plaza Mariana. Tras la puerta, la cerca corría bruscamente hacia el norte casi en línea recta, hasta la Placeta de Fortuni donde se abría la **puerta Bab Al- FAjjatín** o Puerta de los Alfareros, construida probablemente en el s. XI. Fue derribada hacia el 1551. Luego seguía hacia el Norte en línea recta hasta la otra **puerta Bab Al Mauror** o Puerta del Oriente, que se abría en la calle llamada del Sol, al final de la cuesta de Santa Catalina de Siena y cerca de Torres Bermejas. De Torres Bermejas arrancaba otra muralla que seguía el curso que hoy tiene la muralla que baja a la Puerta de las Granadas, donde hubo otra puerta árabe **Bab Al- Jadaq** o del Barranco. Bordeando los pies de la Colina Roja, la cerca bajaba por el Darro, donde enlazaba con una de las Torres que franqueaban la **puerta Bab Al- Difat** o Puerta de los Tableros.

Otro lienzo de muralla partía de Bab Al- Difat, en dirección este siguiendo la ribera derecha del Darro, como hemos indicado anteriormente, hasta el comienzo de la Cuesta de la Victoria, donde formaba ángulo recto hasta el norte donde enlazaba con Bab

Al Banut o puerta de los Estandares. Fue construida al final del s. XI» (Seco de Lucena, 1910).



Fig. 4.13. Grabado del Arco Elvira, Gómez Moreno (1892).

Puerta Elvira (fig. 4.13), de las más antiguas, que parece datar del primer tercio del siglo XI, durante el reinado del Ziri Habus, tuvo torres de protección y fortísimos muros, y lo que hoy conocemos como arco Elvira es sólo una parte de su primitiva estructura. Se tiene constancia de que esta puerta ya existía en el siglo IX, pero será en el siglo XI y XIV cuando adopte su configuración más desarrollada. Este arco de herradura, protegido por dos torreones de fuerte argamasa, daba paso a un patio descubierto, adecuado para la defensa según Vilchez (1988), le seguían otros arcos de los cuales unos constituyeron acceso a la calle Elvira y otros al barrio del Sened. Cuando se desarrolló la cerca del arrabal del Albayzín se construyó otro arco integrante que sirvió de acceso entre la Medina y dicho arrabal. Esta puerta pudo ser Bab Al- Hadid o puerta del Hierro. Rodeada de una barbacana que fue destruida en el s. XVI.

Esta puerta ha sido citada por numerosos autores; Mármol y Carvajal en el siglo XVI, Bermúdez de Pedraza y Jorquera en el siglo XVII, Dalmau a finales del siglo XVIII junto a las aportaciones de los hermanos Oliver Hurtado y Gómez Moreno y en último término Seco de Lucena entre otros.

De esta cerca no se conservan ningún resto; salvo la Puerta de Bib-Arrambla, Puerta Elvira y restos de muralla en la cuesta de los Abarqueros.

Las Cercas de los Arrabales.

No se sabe a ciencia cierta cuando comenzaron a formarse extramuros en Granada. A mediados del siglo XIV existían ya cuatro. Estos extramuros constituyeron núcleos urbanos protegidos por sus propias cercas, y los encontramos citados en la literatura con el nombre de Arrabales.

Arrabal del Albayzín

A este arrabal, Seco de Lucena, (1910) lo llamó cerca del Norte, y ha llegado a nuestros días con el nombre de cerca Don Gonzalo. El sobrenombre le viene porque se ha venido sosteniendo que la cerca que protegió el Albayzín, se construyó con el importe del rescate del obispo de Jaén D. Gonzalo de Zúñiga; pero no parece probable que dicho obispo llegase a estar cautivo en Granada (Gómez Moreno, 1892). Consta de manera evidente, según Gómez-Moreno (1892), que la cerca fue construida en el siglo XIV, entre 1329-1359 durante el reinado de Yusuf I, y a iniciativa de su gran visir, el renegado Ridwán.

Recorrido: «Esta muralla, enlazaba con la Medina al pie de la cuesta de la Victoria, y seguía hacia el este hasta algo más arriba de la cuesta del Chapiz, en donde se abría una puerta que los árabes llamaron **Bab al- Sumays** o del Solecito, y a la que los cristianos conocían como puerta de Guadix baja, Seco de Lucena (1910), sitúa la Puerta de Guadix alta en un lugar conocido como Cuevas de la Fuentecilla, otros autores conocían la anterior como Guadix Alta, no mencionando esta última). De allí, la cerca formando ángulo recto, ascendía hasta alcanzar la ermita de San Miguel Alto, en este tramo se abrió otra puerta, **Bab al- Bayda**, Puerta del barrio de casa blanca, en el Peso de la Harina, al comienzo del camino del Sacromonte; también llamada Bab al- Adam, del Osorio o Guadix Alta. Desde la ermita, el muro discurre en dirección poniente hasta llegar a Fajalauza, donde se abre una puerta del mismo nombre, **Bab Fayy al-Lawa** o puerta del Collado de los Almendros (lámina IV.IV. Foto 13). Muy restaurada se conserva actualmente en la placeta de la cruz de Piedra; hoy forma un largo pasadizo con **Bóveda** apuntalada. La cerca desde allí continuaba casi en línea recta, aún subsisten otra puerta en el callejón de la Alberzana, próxima a la plaza de San Bartolomé. Se

ignora el nombre árabe de esta puerta que pudo ser **Bab al- Bayysin** (del Albayzín), después se llamó de San Lorenzo (lámina IV.IV. Foto 14). Desde aquí la cerca descendía casi en línea recta hasta las cercanías de la iglesia de San Idelfonso, desde donde formando ángulo iba a unirse con la Medina en «Puerta de Elvira» (Seco de Lucena, 1910).

Se conserva casi la totalidad de la cerca, un importante fragmento de lienzo que iba desde el Sacromonte hasta la ermita de San Miguel, así como el lienzo que va desde la ermita a la cuesta de San Antonio con algunas interrupciones. El tramo que iba de la carretera de Murcia a Puerta Elvira ha desaparecido.

Arrabal de Alfajjarín y Nayd.

Este caso Seco de Lucena (1910), la denominó cerca del Sur. Se creó para proteger los barrios situados al mediodía.

Recorrido: «Arrancaba de la Medina en un punto donde la cuesta de Aixa fluye en la placeta de los Campos. Ascendía por la cuesta y subiendo paralela a la calle del Cuarto Real de Santo Domingo, hasta la placeta de la Puerta del Pescado donde se abría una Puerta llamada **Bab al- Hayar** o de Piedra que desde extramuros daba ingreso al Arrabal, fue demolida en el año 1840. Continuaba por el callejón de los Solares y Vistillas de los Angeles al extremo superior de la cuesta de los Molinos, donde se abría la puerta de la Loma, y doblando hacia el norte concluía en la torre del Agua, en la Alhambra.

El barrio de Al-Nayd contiguo al de los Alfareros estaba protegido por una cerca muy endeble, que se pudo constatar porque existió hasta finales del siglo pasado. Estas dos cercas que constituían el arrabal del Alfajjarín y la antequeruela estaban comunicados probablemente por la puerta de Piedra. La puerta que diera ingreso ha este arrabal desde extramuros, fue probablemente la de la Lona o de **Nayd**. Los cristianos la llamaban Puerta de los Molinos o Güejar. Fue derribada en 1833, y no nos ha llegado ninguna noticia de su estructura» (Seco de Lucena, 1940).

El arrabal de al Fajjarín o Alfareros se construyó probablemente a finales del s. XIII o comienzos de XIV.

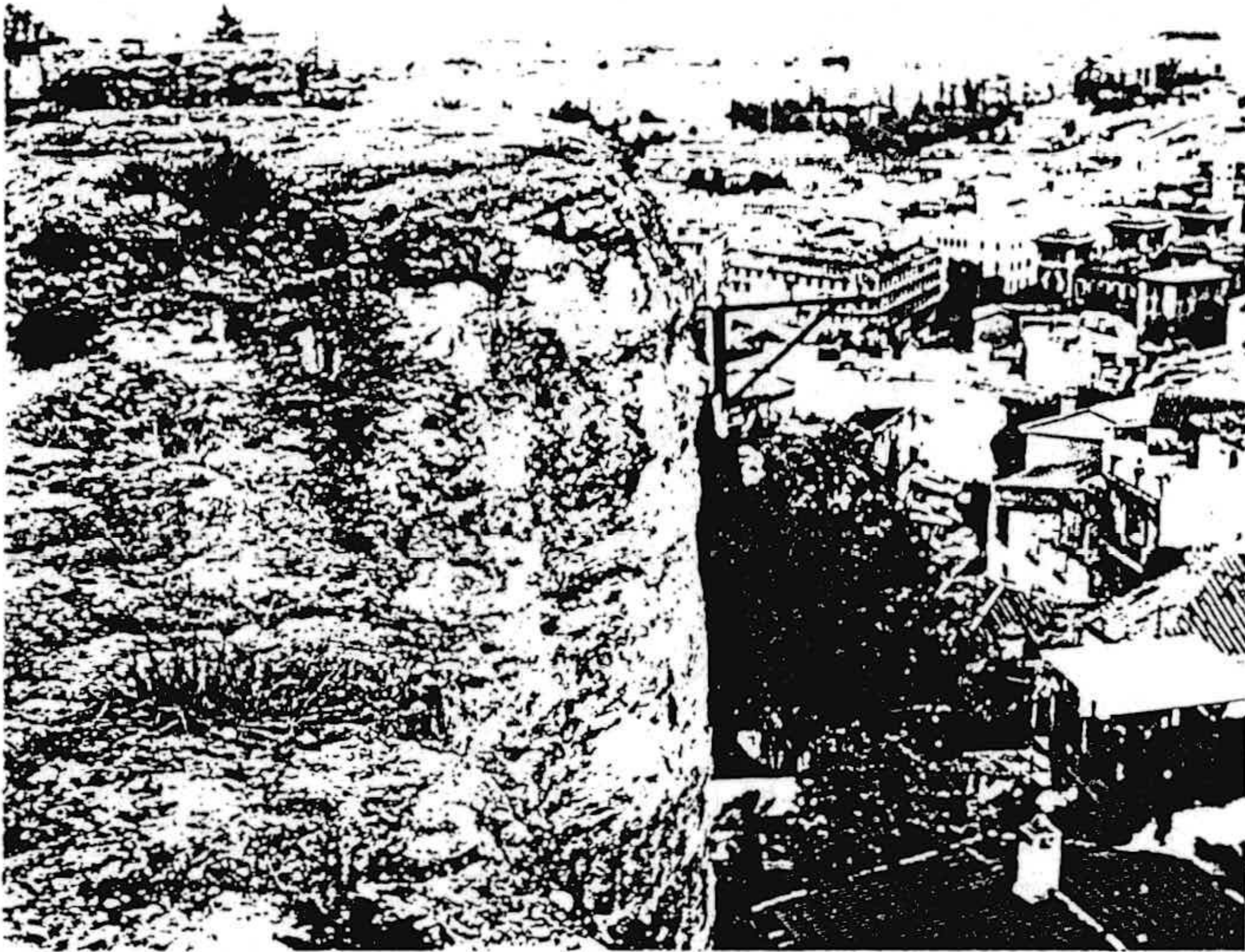


FOTO 1.- Torreones semicirculares de la Muralla Ziri.

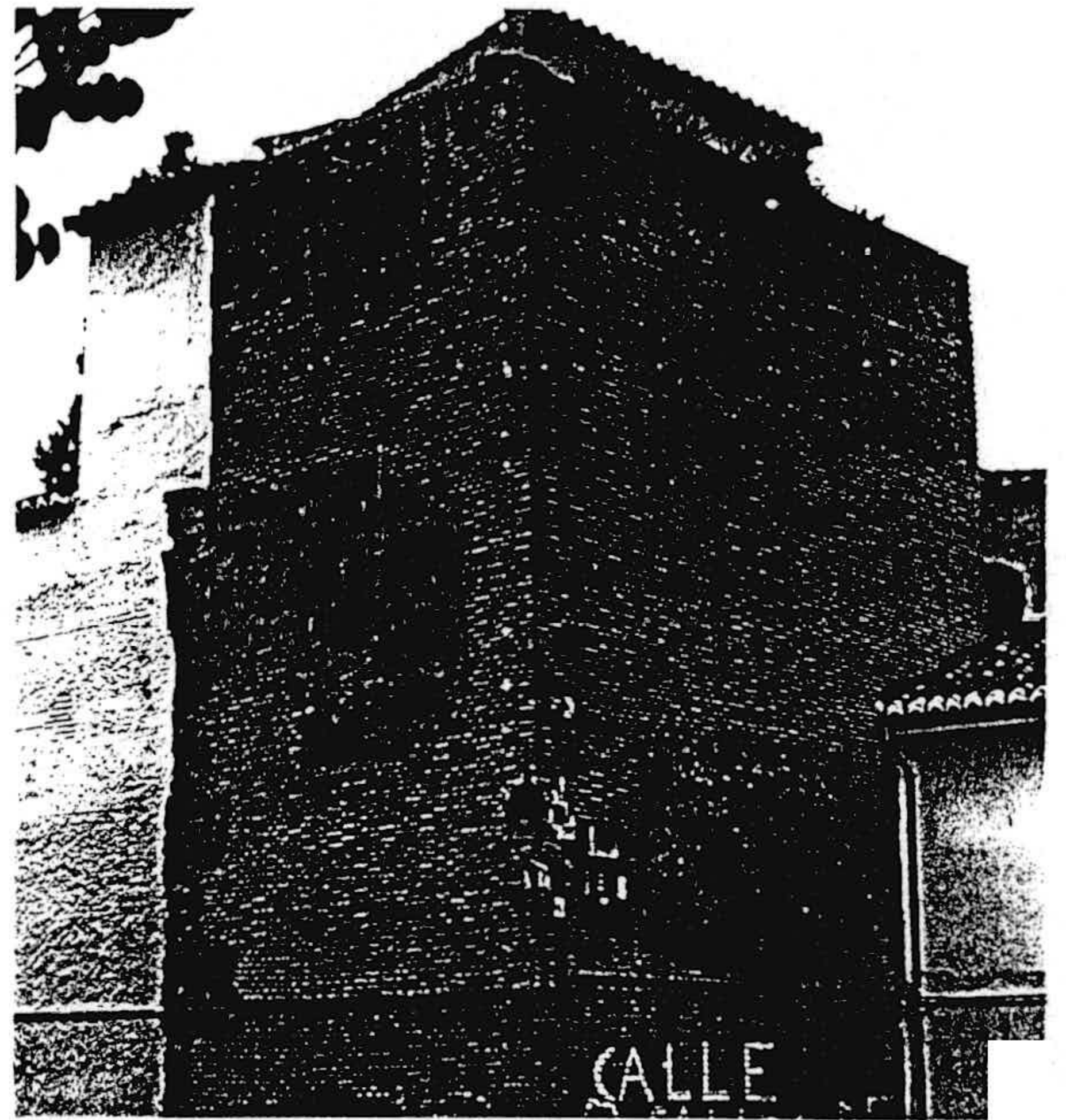


FOTO 2.- Torreón de las Tomasas.



FOTO 3.- Puerta de Bas Qastar.

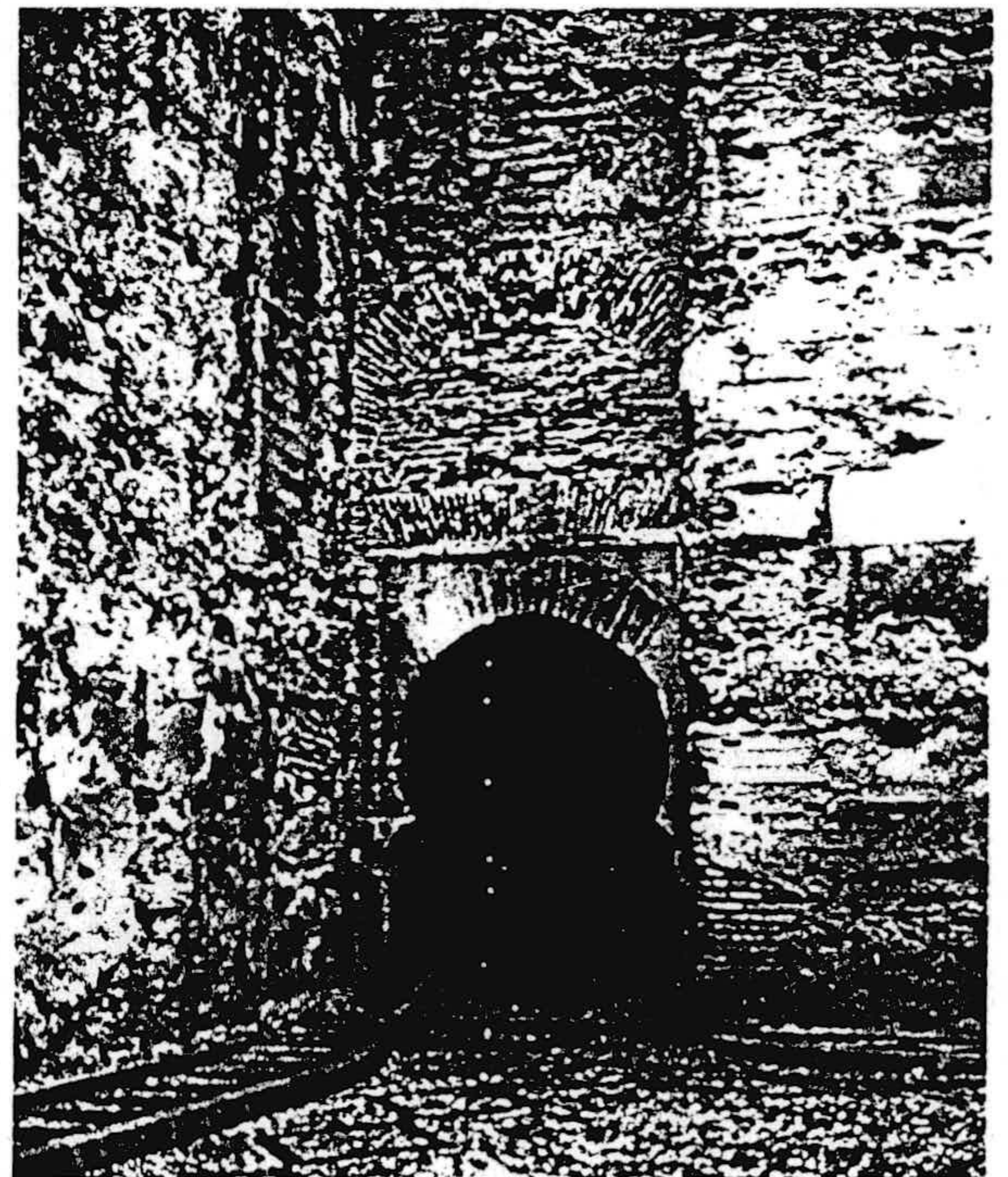


FOTO 4.- Arco de las Pesas.



FOTO 5.- Puerta Monaita.



FOTO 6.- Puente del Cadí.



FOTO 7.- Torreón de S. Juan de los Reyes.



FOTO 8.- Torreón de la calle Guinea.

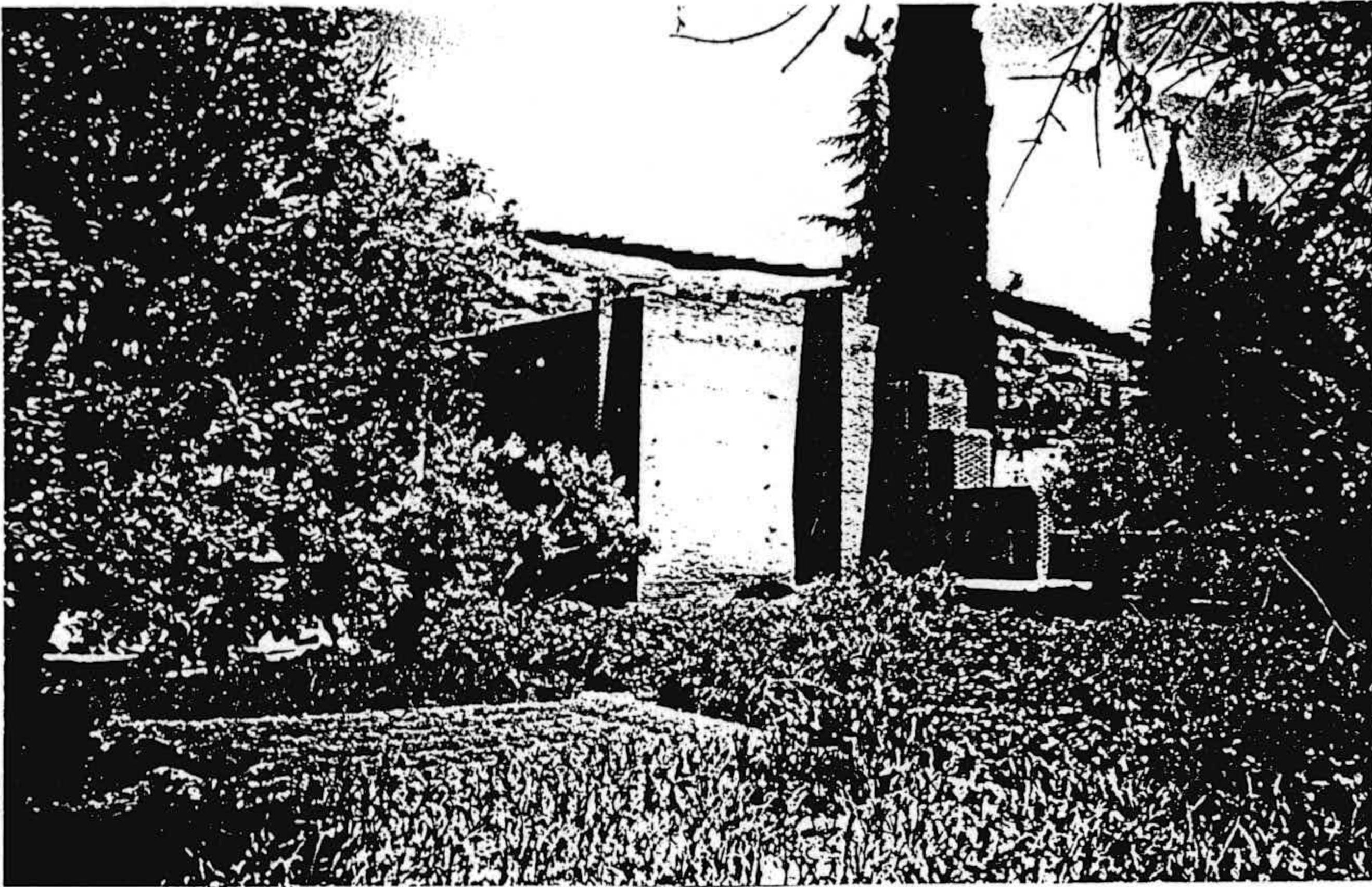


FOTO 9.- Torreón de la Placeta de la Trinidad.

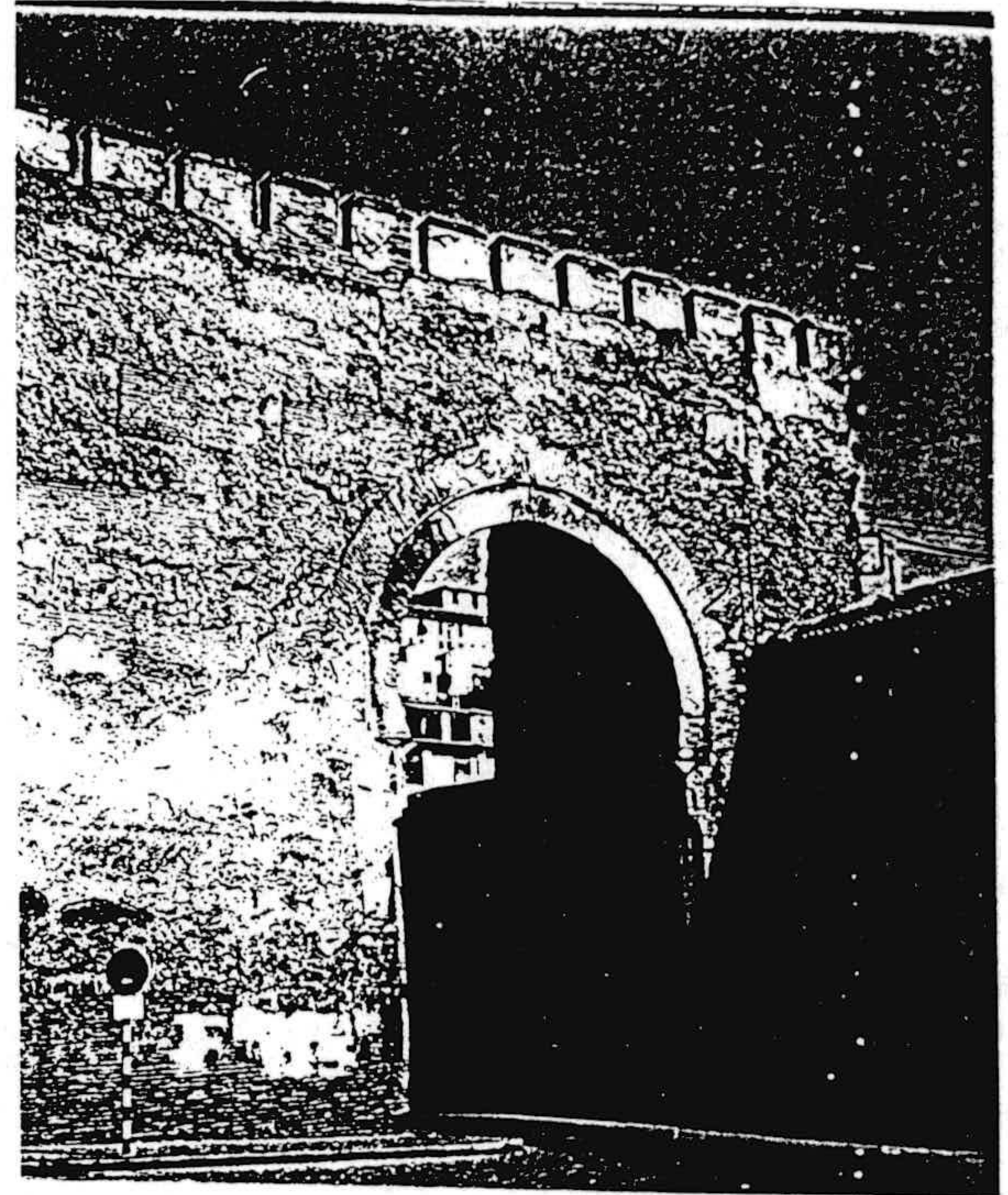


FOTO 10.- Puerta Elvira.



FOTO 11.- Puerta de Bibarrambla (Estado actual).



FOTO 12.- Puerta de Bibarrambla. Grabado de David Roberts (1.832-33).

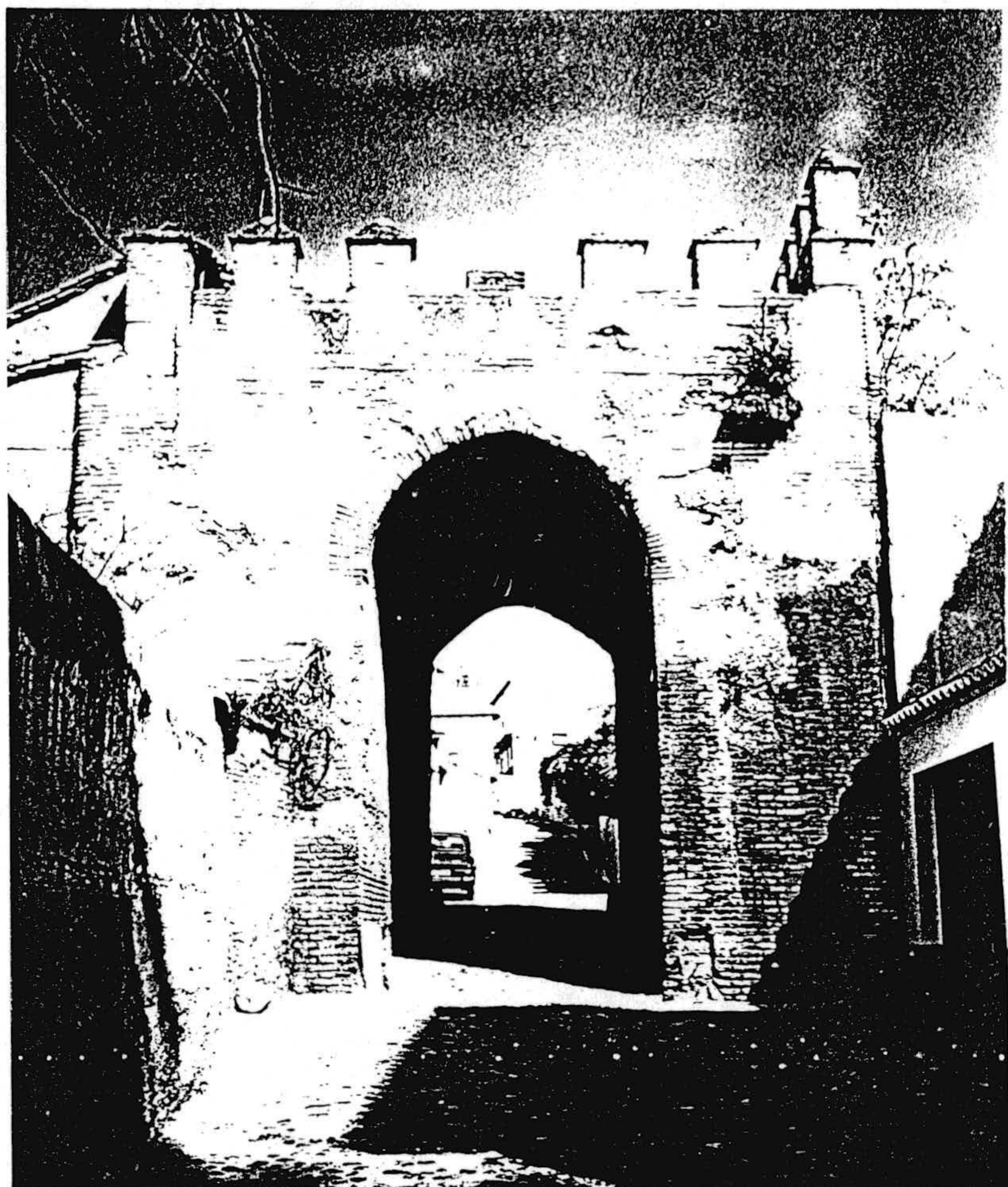


FOTO 13.- Puerta del
Collado de los
Almendros.
(P.Fajalauza).

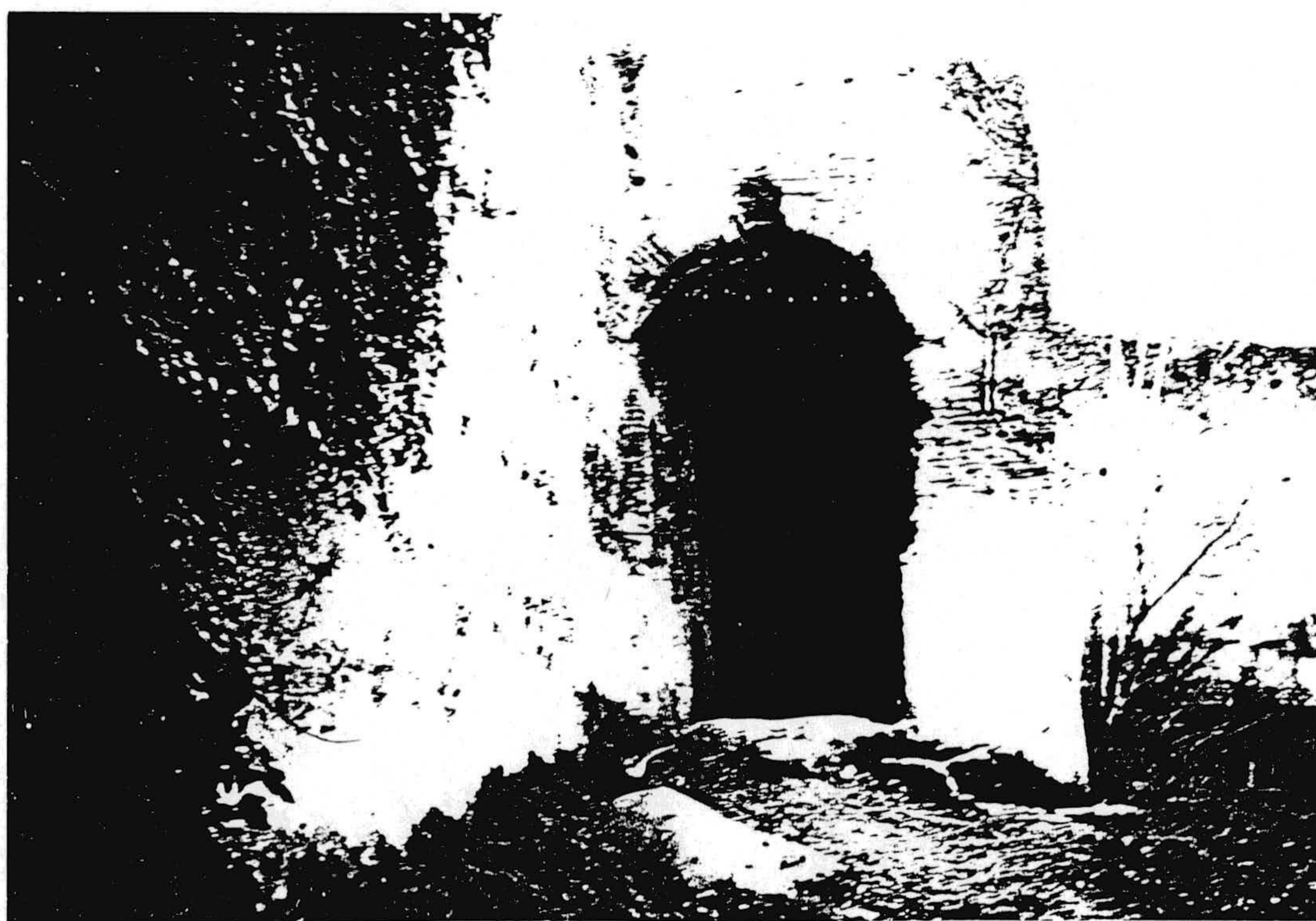
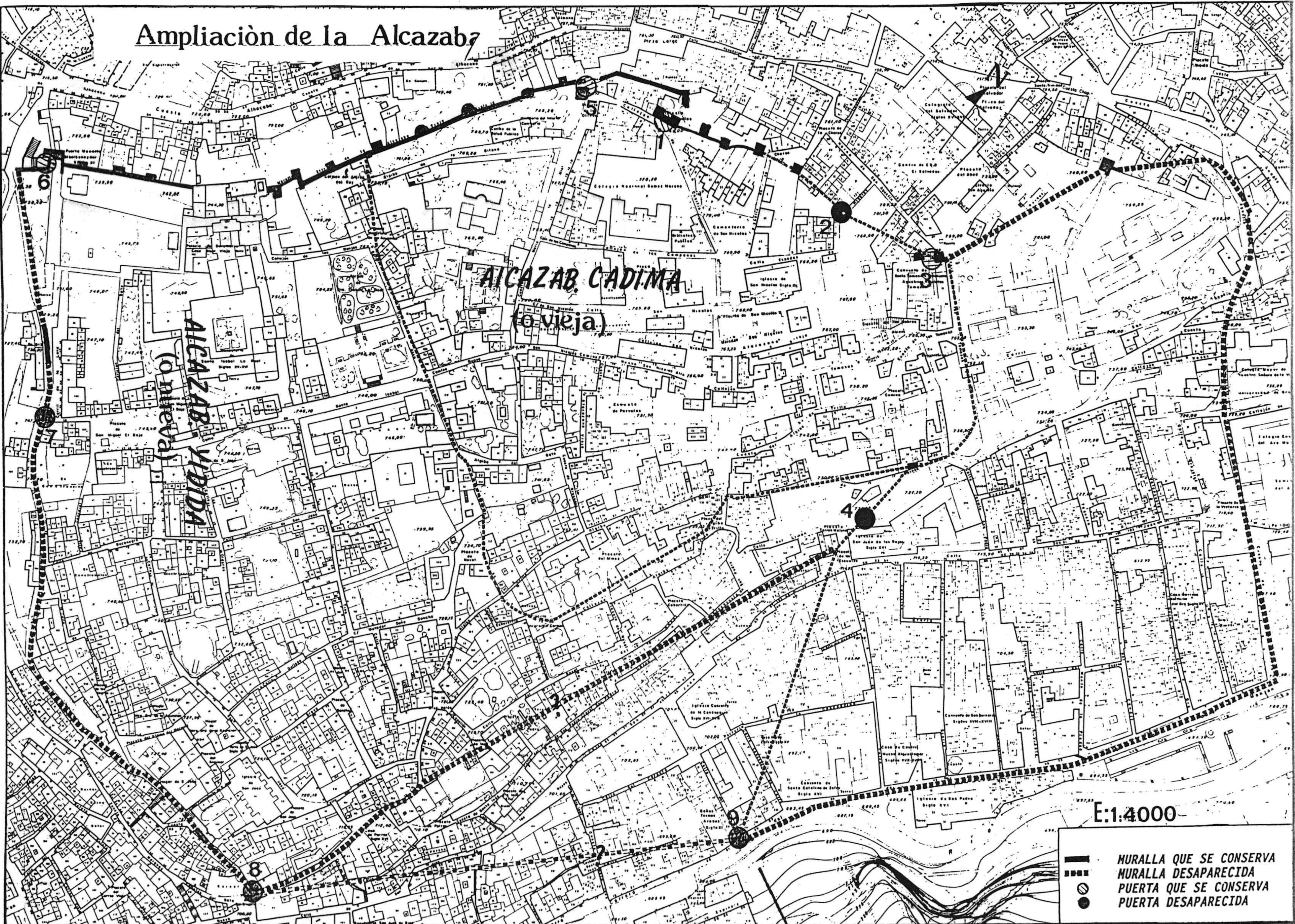


FOTO 14.- Puerta de S. Lorenzo.

Ampliación de la Alcazaba



ALCAZABA CADIMA
(la vieja)

ALCAZABA NUEVA
(la nueva)

E:1:4000

- MURALLA QUE SE CONSERVA
- - - MURALLA DESAPARECIDA
- PUERTA QUE SE CONSERVA
- PUERTA DESAPARECIDA

Arrabal de Bib-Arrambla.

Se extendía a lo largo de la muralla desde la Puerta de Bab-Arrambla que después se llamó Puerta Real, donde está situada en la actualidad la placeta de la Trinidad. Tenía una calle principal, lo que es hoy la calle Mesones. Su Mezquita y su magnífico algibe se hallaban donde se levantó posteriormente la iglesia de la Magdalena y su Alhóndiga Zaida en el solar que ocupa el café Suizo (Seco de Lucena, 1910). De este recinto no se conservan ningún resto.

V. EL TAPIAL.

V. EL TAPIAL.

V.1 INTRODUCCION.

La Real Academia Española, define tapial como: «Un molde de dos tableros en que se forman las tapias y trozos de pared formada de esta manera». Y tapia: «Como cada uno de los trozos de pared que de una sola vez se hacen con tierra amasada y apisonada en una horma».

Bardou (1979), lo define como: «Una obra de albañilería de tierra con cierta cantidad de cantos rodados, sin armadura de paja cortada, de humedad poco excesiva (por ejemplo la de primavera), comprimida en el interior de un encofrado (alrededor de 3 m de largo por 0.90 mts. de alto, dimensiones que varían según los países), con ayuda de un apisonador, una especie de masa de madera manipulada a mano. El muro se levanta en series (tongadas) sucesivas de 90 cm de altura, dando vueltas al edificio».

Díaz Romeral et al.(1980), lo define como: «Unidades de obra de fábricas ejecutadas con tierra, barro o paja, en las que las consolidaciones se producen por medios mecánicos, sin intervención de ningún proceso químico que cambie la naturaleza de sus materiales».

El término Tapial o Tábica, es una transcripción hispánica del término berberer Tābiya que se transformó bajo la forma "Toub" en Africa. Esta es la misma palabra que conocen los países occidentales como tapia para designar una misma realidad.

La técnica consiste:«En colocar dos tableros **hormas** en latín, verticales y paralelas, separadas a distancias iguales al ancho según el grosor que se quiera dar al del muro y sujetos a uno y otro por travesaños, palos de madera horizontales llamados agujas o cárceles, que sirven de molde, y entre ellos se van rellinando con piedra-grava a veces con piedra de río de mayor o menor tamaño y mortero de cal, echado por tongadas o capas bien apisonadas. Al fraguar el mortero, la fábrica del muro se endurece y los tableros pueden trasladarse a ambos lados para continuar la tapia en longitud o sobre la ya levantada. La argamasa variaba mucho pues se podía emplear en ella desde muy pequeña gravilla de río como acostumbraban los romanos, hasta piedras de bastante magnitud, como se encuentran en muros de construcciones hispanomusulmanas» (Torres Balbás, 1985).

Hace ya más de 10000 años que los hombres construyen sus ciudades, la construcción en tierra y en concreto la técnica del tapial fue y ha seguido siendo con la tradición popular, uno de los principales formas de construcción. Desde la antigüedad se ha hecho uso abundante de este material en Mesopotamia y Egipto. En Europa, Africa y en el Medio Oriente, lo emplearon los romanos y después los musulmanes. También fue utilizada en Asia (los indios, los monjes budistas y los emperadores chinos), y simultáneamente en América los indios, antes de la ocupación española (Ceballos, 1990).

En España fue un material también muy empleado; las atalayas de Anibal en la península Ibérica estaban construidas con este material según un conocido texto de Plinio, el cual elogia su dureza y solidez (Torres Balbás, 1985). La primera cita en relación a este tipo de construcciones data del s. IX (Menendez Pidal, 1955), donde se señala la construcción de un castillo (Alcazar) y una muralla de tierra en Toledo.

En relación a su origen, Almagro (1992), manifestó :

«Aunque la procedencia de esta técnica es insólita, se le ha atribuido un posible origen hispánico, basado en el hecho de encontrar numerosos ejemplos de esta arquitectura en restos romanos hispánicos. Tal es el caso de postscaenium, teatro romano de Segóbrige; del edificio con exedras junto al foro de Clunia o de las estructuras ligantes del teatro de Itálica, por citar algunos ejemplos. También son frecuentes las fábricas de tierra en villas romanas como Ampurias y otras villas rurales. El tapiadero aparece abundantemente citado en documentos relativos a nuestra arquitectura Mudejar, como los documentos estudiados por Ovideo Cuellas referentes a San Pedro mártir de Calatayud. En esta área aragonesa abundan los tapiales, pero de yeso».

En este sentido los abundantes testimonios del siglo IV y II a.C mantenidos por un texto de Plinio (XXXV, 48) hacen de la tierra una especialidad africana o española. Lo que si es un hecho, incuestionable es la enorme cantidad de restos hispanomusulmanes que nos han llegado, evidenciando la importancia de esta forma constructiva en la época medieval. En estas construcciones era frecuente ver los agujeros o mechinales dejados por las agujas que perforaban el muro y sujetaban los tableros durante la construcción, visibles con frecuencia, excepto en las construcciones califales o más recientemente, en las que quedaban ocultos por un revestimiento de cal pintado imitando sillares (Torres Balbás, 1985).

Se trata de una técnica constructiva que se ha perseverado invariable desde la más remota antigüedad hasta el siglo XVIII, y en algunos casos se ha mantenido intacta hasta la actualidad.

Como testimonios de estas construcciones, sobre cimientos antiguos se han desarrollado ciudades modernas, donde las que las construcciones en tierra han quedado presentes, por ejemplo Lyon, la segunda ciudad metropolitana de Francia. Hoy en día siguen existiendo ciudades que dan testimonio del uso ancestral de la tierra: Santa Fe, capital del estado de Nuevo Méjico; en U.S.A y en el centro de Bogotá, capital Colombia. De Africa a Medio Oriente, nos encontramos con gran cantidad de ciudades en tierra: Kano en Nigeria, Fomboncton en Mali, Marrakeck en Marruecos, Adras en Argelia, Saade en Yemen del Norte, Shibani en el Yemen del Sur etc.

Con la tierra se han levantado numerosos edificios para dar cobijo, tanto en el ámbito urbano, como en el rural; de la misma manera, este mismo material se ha utilizado desde hace más de decenas de siglos para levantar monumentos de gran importancia como, acueductos, pirámides, monasterios, iglesias o mezquitas. Es en efecto la tierra el material utilizado para levantar, en el siglo VII a.C, la célebre torre de Babel, la cual alcanzó 90 mts. de altura. La famosa muralla china construida en tierra en el siglo III a. C, testimonian hoy en día junto con sus elementos, la resistencia y solidez que este material puede ofrecer y garantizar con su correcta puesta en obra; son también ejemplos de ello las numerosas ciudades de todo el mundo que aseguraron su defensa rodeándose de muros de tierra.

El hecho de ser la tierra un material de construcción universalmente utilizado, ha hecho que este se adapte a las condiciones y culturas más diversas, aprovechando sus cualidades:

- a. Rapidez en la construcción.
- b. Costo mínimo.
- c. Economía de la madera.
- d. Aislamiento térmico.
- e. Resistencia al fuego.
- f. Solidez y durabilidad.

Dentro de la técnica del tapial, existen muchas variedades en función de los

distintos lugares y regiones del mundo a los que hagamos referencia. En este sentido podemos distinguir:

Tapial de tierra ordinaria se caracteriza por poseer en su composición solo tierra sin revestimiento posterior. Se requiere de una buena elección del material para resistir a la intemperie. Dentro de esta modalidad existen variaciones.

* **Tapial de tierra y paja.** Se ejecutaba añadiendo paja de trigo a la tierra húmeda. La misión de la paja consiste en reducir la retracción del muro para evitar fisuras, actuar como armazón y para dar cohesión y consistencia a la fábrica.

* **Tapial de tierra y cal.** La tierra es trabajada de igual forma que en tapial de tierra, aparece mortero de cal y arena en juntas verticales y horizontales cuya dosificación es 3 arena por 1 de cal. El mortero unifica las tongadas, se utiliza en esquinas y jambas y en puntos débiles de la edificación.

Tapial de tierra y brencas. En este caso, las tongadas de tierra iban unidas con una capa de mortero de yeso.

Tapial de tierra calicastro. Se solía emplear para edificios de carácter monumental. El procedimiento constructivo consiste en introducir un mortero de cal sobre las caras internas del encofrado de altura suficiente para poder trabajar las primeras tongadas. Se hecha la tierra de la primera tongada y se apisona. Cuando se empleaba en viviendas solo se calicastro por el exterior y por el interior se reviste con un mortero de cal o yeso.

Tapias Mixtas. Se trata de tapiales en los que se emplea además de la tierra otros elementos como piedra y ladrillo cocido. Las hiladas de ladrillo o piedra están asentadas con mortero de cal en lugar de encofrado. En la primera tongada se verterá en el interior con la tierra hasta enrasar con la hilada de ladrillo, posteriormente se volverá a poner otra hilada de ladrillo que se volverá a rellenar de tierra.

Toda la tierra no es apropiada para la construcción del tapial, los tratados aconsejan una tierra que debe tener una proporción de grava comprendida entre un 0-15%, arena entre un 40-50%, limos entre 35-20% y arcilla entre 10-20%. Es preferible tierra roja, no orgánica, no demasiado húmeda y debe construirse preferentemente en

primavera.

Los parámetros que presenta la tierra como material de construcción dependen de las características del suelo. Esta manera de conocer el suelo, ha sido utilizada desde la antigüedad de forma empírica (por el tacto, aspecto, olor, mezcla natural etc), que se fue transmitiendo de unos constructores a otros.

Durante el siglo XIX, los ingenieros militares y particularmente los responsables de las fortificaciones de las construcciones coloniales, siguieron empleando la tierra y reflexionando sobre sus cualidades.

En muchos países, principalmente en Europa, después de la segunda Guerra Mundial las técnicas de construcción en tierra se abandonaron. Esto se debió a la aparición y empleo de los nuevos materiales en la industria de la construcción, de fácil puesta en obra y a precios competitivos. Sin embargo el hecho de requerir gran mano de obra para la ejecución de estos muros, fue una de las causas que hicieron que esta técnica dejara de ser práctica.

V.2 TECNICA CONSTRUCTIVA.

La construcción del tapial exige el empleo de encofrados adaptados o **tableros** de madera de gran solidez para resistir las presiones y vibraciones que tienen lugar en el proceso de apisonamiento. Suelen ser muy ligeros, de madera de buena calidad, para favorecer el transporte y montaje del encofrado.

Constan, básicamente, de tres o cuatro tablas al derecho de madera seca con un número mínimo de nudos de un espesor de 3 cms., una anchura de 30 cms. y una longitud de 3.25 mts.(figura 5.1). Las tablas pueden unirse por medio del barzán (tablas pequeñas de madera), auxiliándose de unos clavos, quedando en este caso las improntas señaladas en la fábrica exterior del muro, como puede observarse, por ejemplo, en restos de la muralla Ziri. Estas tablas se disponen distanciadas unos cuantos milímetros para evitar las presiones debidas a la dilatación de la madera.

Las tablas en el interior deben ir pulidas, para obtener un parámetro liso e impedir la formación de terrones.

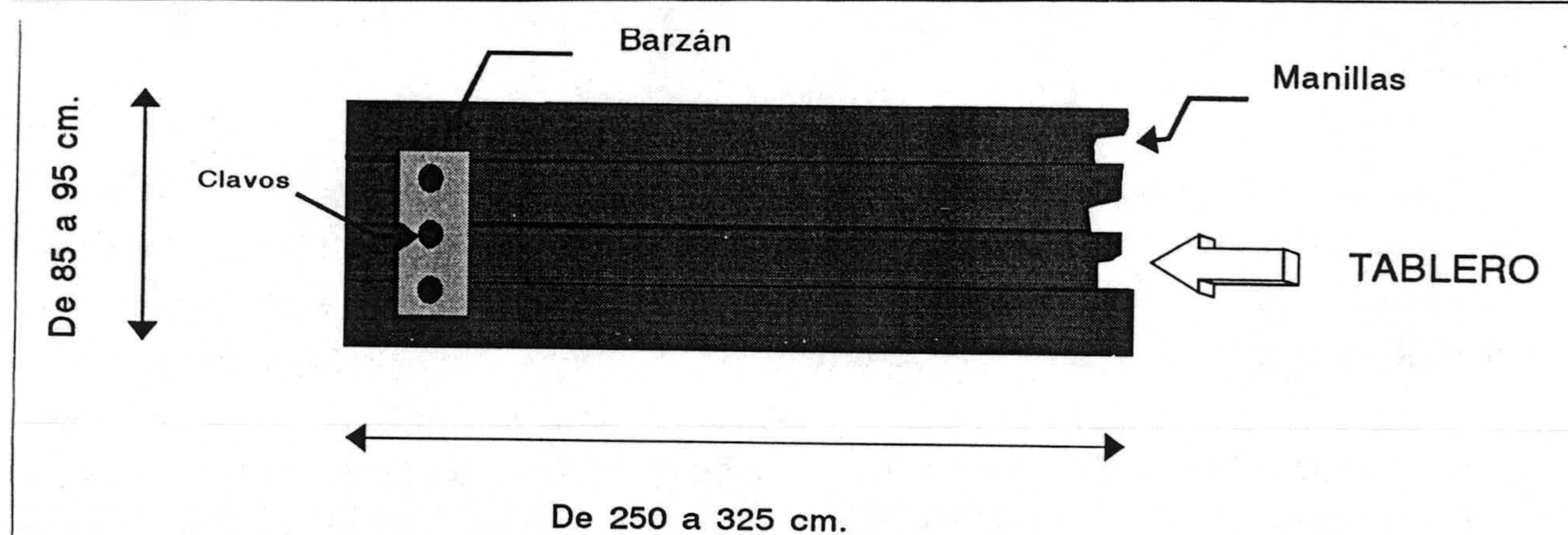


Figura 5.1. Dimensiones de los Tableros.

Los tableros iban provistos de unos mangos de hierro normalmente, para facilitar su transporte.

Las dimensiones de los tableros son variables, si bien dentro de unos límites a los que hacen referencia diferentes autores.

Goiffon (1772), define una longitud entre 1.60 y 4.20 mts., y una latura de 80 cms., como dimensiones óptimas.

En el manual de albañilería de Villanueva (1827), al hablar de los tableros nos dice:

«Se les llama tapiales de 7 a 9 pies de largo y de 2.5 a 3 de alto. Las tablas han de tener de 2 a 2.5 de grueso, asegurados con unos barrotes clavados al exterior.

Los tableros quedan ajustados por 4 piezas, dos de ellas se llaman agujas y las otras dos costas. Cuando los muros se hacen de machos intermedios, se ponen en las extremidades de los tableros otros de su altura, y del ancho que han de tener las tapias, asegurándolas con un canal o gargol que se forman con dos listones clavados en los tableros, de modo que viene a hacer un cajón».

Torres Balbás (1985), hace referencia a datos recogidos por Ibén Jaldün, manifestando que, dentro de la variabilidad de las dimensiones, en general tenían cuatro codos sobre dos (un codo equivale a 42 cms.). Por otra parte, indica que una tapia (medida usual de la altura de los muros, tanto en la España musulmana como cristiana),

venía a tener 835 mm y 9 décimas, que equivale a una vara.

La variabilidad a la que se hace referencia afecta esencialmente a la longitud de los tableros, pues se ha podido constatar que la altura de los mismos ofrece una gran regularidad desde épocas antiguas. A título de ejemplos, la altura de las tapias de las murallas de Sevilla varían entre 82 y 85 cms. y en Alicante oscila entre 80 y 92 cms. Tales medidas están en consonancia con el intervalo entre 82 y 96 cms., altura habitual en construcciones de este tipo en época islámica (Bazzano, 1993).

La construcción del tapial también exige el empleo de otros elementos esenciales:

las **agujas**, de madera o metal, que se muestran en la figura (5.2) al final (en los últimos 9 cms.) se tallan unas endiduras donde se encajan las costas (ver a continuación).

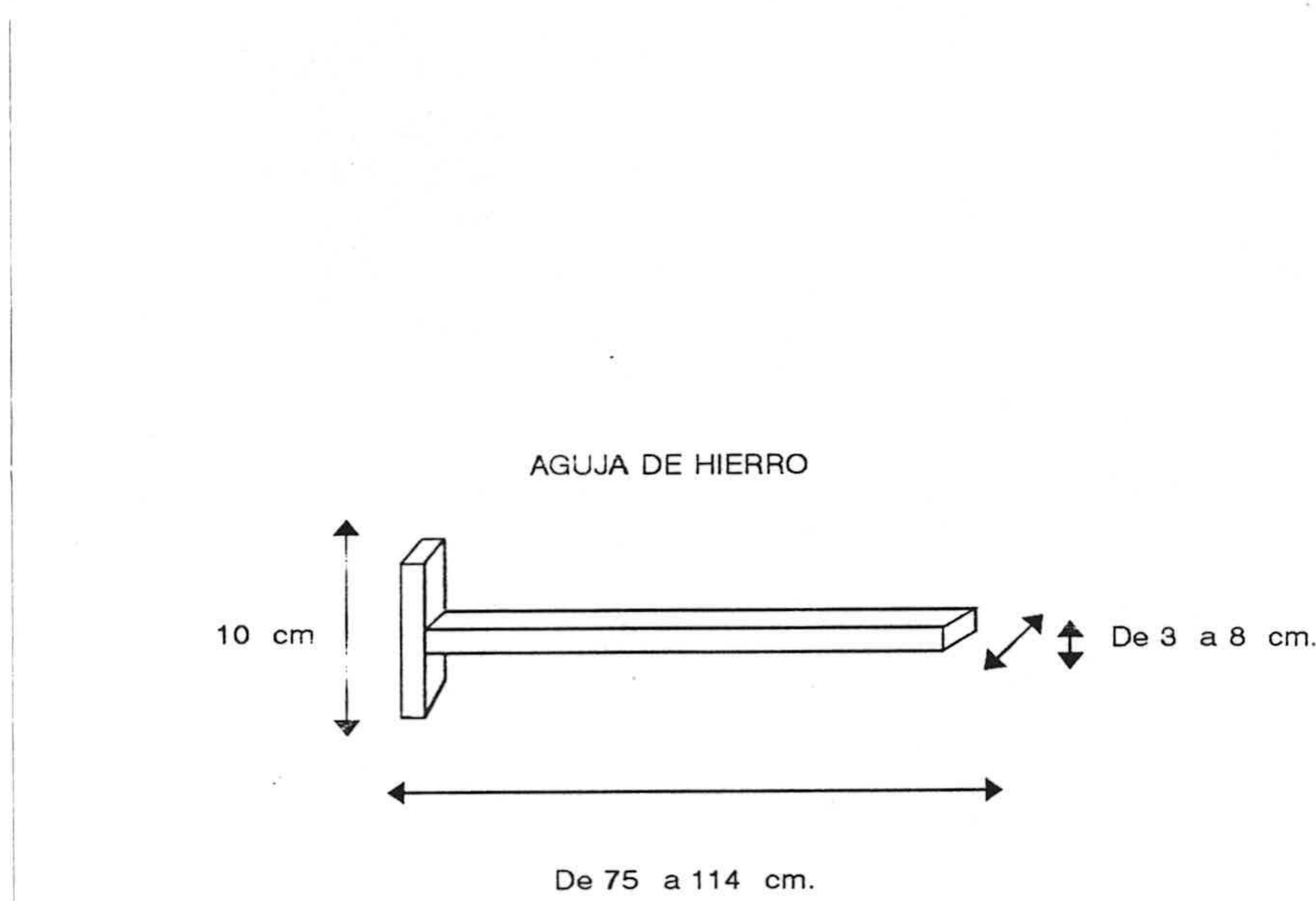


Fig.5.2. Aguja de pleje (hierro).

Las **costas** (costero) son unos utensilios también de madera, de una altura de 1.62 mts. sobrepasando la altura de los tableros en 50 cms. al menos, que se utilizan para ajustar estos.

Estas piezas quedan perfectamente encajadas a los travesaños (agujas), gracias a otras piezas llamadas yugos o bien mediante clavijas. Los yugos en algunos lugares u

ocasiones se sustituían por cuerdas, si bien, este sistema corre el peligro de que los tableros cedan durante el apisonamiento.

Como elementos adicionales, podemos señalar:

Los **tableros de cabeza** o tablas del extremo, están compuestos por unos cuantos tablones del mismo grueso. En la parte superior se fija una pieza de madera, que hará tope contra los travesaños (agujas), cuando convenga y para poder trasladarlo.

Los **bastones** o separadores, son unas piezas troncocónicas de madera que ayudan a mantener la separación de los tapiales y constante el grueso del muro, sobretodo, durante el montaje del tapial y el inicio de los trabajos. Pero también tiene otra misión, se extraen de la masa compactada y en su lugar se colocan las agujas, que sostendrán los tableros en la construcción de niveles superiores. Para que la extracción sea cómoda, se untan los bastones con jabón. El diámetro del bastón debe ser un poco mayor que la sección de la aguja y su longitud será la del muro (Doat & al, 1985).

Todos estos utensilios se disponen como viene indicados en la figura (5.3).

En lo referente al proceso constructivo, Las citas más antiguas que disponemos, datan del s. XVIII que se recogen en diferentes tratados sobre tapial.

En la construcción del Tapial según Goiffon (1772), bajo los tableros de longitud 2.60 mts. se sitúan cuatro agujas con un espaciado de 80 cms.

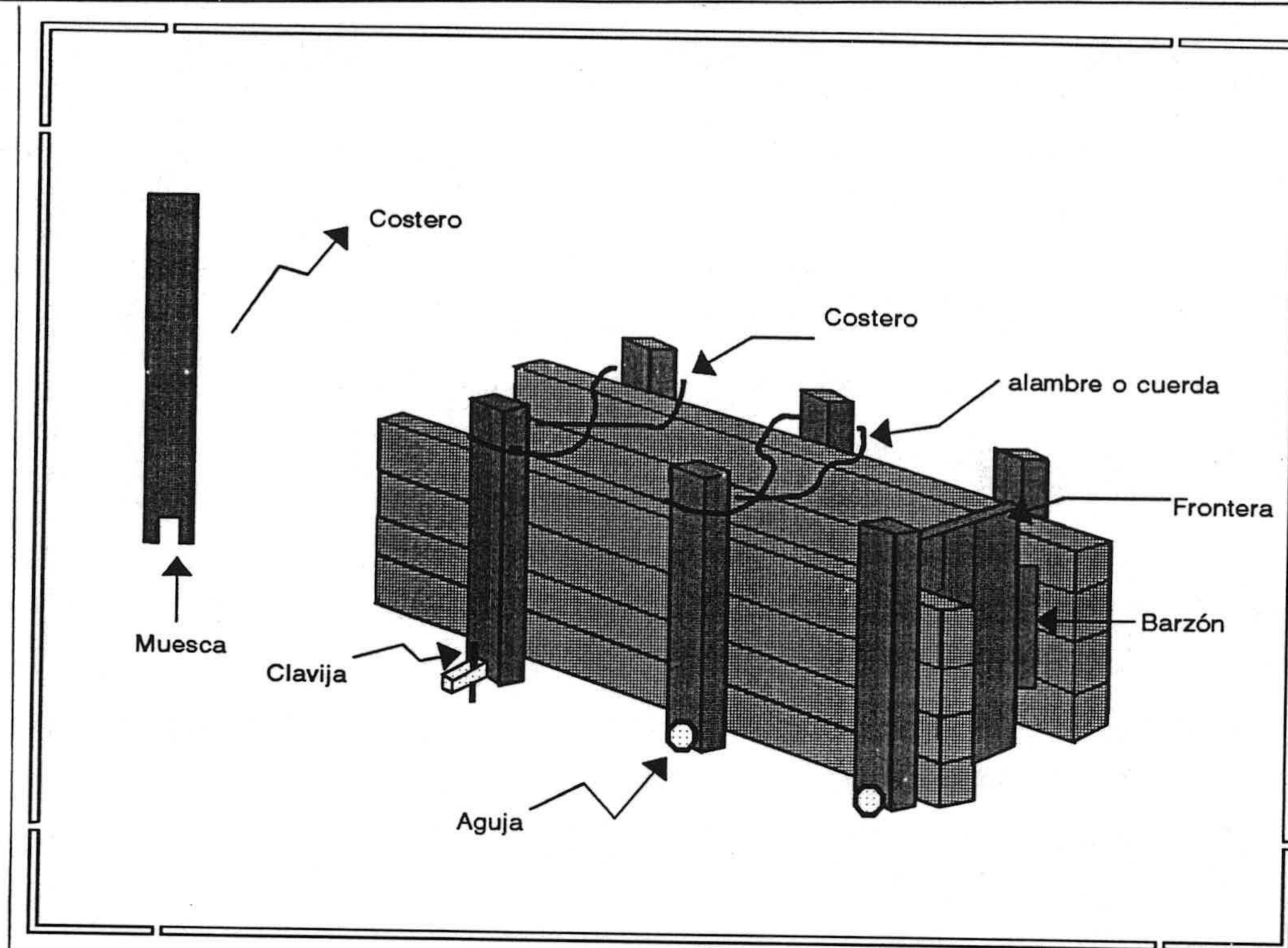


Fig. 5.3. disposición de los tableros en el encofrado.

Villanueva (1827) en su "Manual de albañilería" al explicar el montaje de los encofrados y el proceso de construcción expone:

«Las agujas deben tener sus agujeros y clavos en ellas, se colocarán atravesados a lo ancho de la tapia, y se podrán los clavos en los agujeros a tal distancia que quitando el grueso de los costales y el de los tableros o tapial, dejan el vacío correspondiente al grueso que se quiere dar a la tapia. Colóquense después sobre las agujas por un lado y otro los tapiales de canto, y a plomo, y metiendo las cabeceras en los gargoles, para que determinen el largo y grueso del cajón, pónganse los costales, y métanse por su extremo inferior en las agujas de abajo, y quedarán firmes, sin poder escapar hacia fuera por la sujeción de los clavos. Atense por arriba en la misma forma con las otras agujas, sujetando y obligando a los costales, por medio de un garrote dado por una lia u otra cuerda en la parte superior, a que se aprieten los tapiales según el grueso de la pared; y descúbranse los agujeros de la agujas superiores, donde se colocan unas clavijas o clavos, que se mantengan en tanto se trabaje y macice la tapia».

Por otra parte nos dice:

«Fabricándose las tapias entre machos por distancias entre uno y el otro el largo de los tableros, se excusan la tablas de las cabeceras, pues con los tableros y machos se forma el cajón. Después de excavar el cimiento, se debe de llenar de mampostería u otra materia; y si no lleva cimiento, se colocan las tapias al haz de la tierra, como cuando se hacen simples paredes o cercas de un terreno, se igualará el sitio que debe ocupar la tapia dejándole a nivel lo más que se pueda, y perfectamente llano.

Colocados los tapiales de la manera explicada, comenzarán los peones a echar dentro espuestas de la tierra que se tendrá preparada. Conforme se va cavando si está seca se rocía un poco; y deshaciendo los terrones, recorriéndola y desmenuzándola se amontona para que se conserve el jugo: se ha de cuidar de que no este muy húmeda porque si lo estuviese, encogerían mucho la tapias y formarían rendijas y aberturas entre una y otra. En esta disposición se va echando dentro de los tapiales a tongadas o capas de poco más de medio pie de alto; entonces el oficial o peón inteligente, que debe estar dentro del cajón, pisa, aprieta y maciza esta tierra con un pisón algo pesado, que tiene un plano inferior puntiagudo. El pisón y los pies del trabajador van macizando la tongada por un lado, y sobre la que ya queda apretada y maciza, y los demás peones echan otra tongada de la misma altura,; y así sucesivamente se va llenando el cajón hasta completar la altura de los tapiales. Llenos están y enrasados, se sueldan los garrotes, se sacarán los clavos, se desharán los tapiales, y se colocarán más adelante para formar otra tapia como la rematada. Entonces se excusa uno de los tableros cabezas, porque los dos extremos de los tapiales se arman y ajustarán a la tapia ya concluida, y en lo demás se obra como en lo antecedente; advirtiéndole que en la cabeza y grueso de la tapia acabada, y donde se le ha de unir la que ya va a hacer, se debe abrir de arriba a bajo con la piquetilla una caja, para que la tierra de la nueva tapia se entrelace con la ya hecha. En lo demás se sigue como la anterior y se continua toda la línea hasta el cabo.

Acabada la primera hilada de tapias, se hace la segunda con la misma conformidad colocando las agujas bajas sobre el grueso de las tapias hechas; teniendo presente que el medio de la tapia de arriba debe caer sobre la junta de dos tapias de abajo, y lo mismo se debe de hacer con los ángulos, porque de este modo las paredes quedan con mucha más fortaleza, y no forman aberturas tan fácilmente» (figura 5.4 y 5.5).

Abén Jaldún describe el proceso de la forma indicada a continuación:

«Sírvanse de dos planchas de madera,... Colóquense sobre fundamentos, procurando espacials entre si, según la anchura que el arquitecto quiera dar a aquellas. Sujetándose estas planchas por medio de dos travesaños de madera, ligados por cuerdas o lazos. Con otras dos planchas de pequeñas dimensiones se cierra el espacio hueco que queda entre las dos planchas grandes (por sus extremos) y se vierten en él la mezcla de tierra o cal, que enseguida se apisona con pisones contruidos al efecto. Cuando se ha apretado bien la masa y la tierra se halla suficientemente mezclada con la cal, se sigue echando tierra muchas veces hasta llenar el vacio. Con este procedimiento se mezcla de tal suerte las particular de tierra y cal, que concluyen para formar un solo cuerpo. En seguida se colocan las planchas la parte del muro ya formada, se vierte tierra entre ellas y se continua de este modo hasta que sus masas, dispuestas en muchas líneas unas sobre otras, constituyen el muro, cuyas partes unidas parecen como que no forman sino una sola pieza. Este género de construcción se llama Jabia».

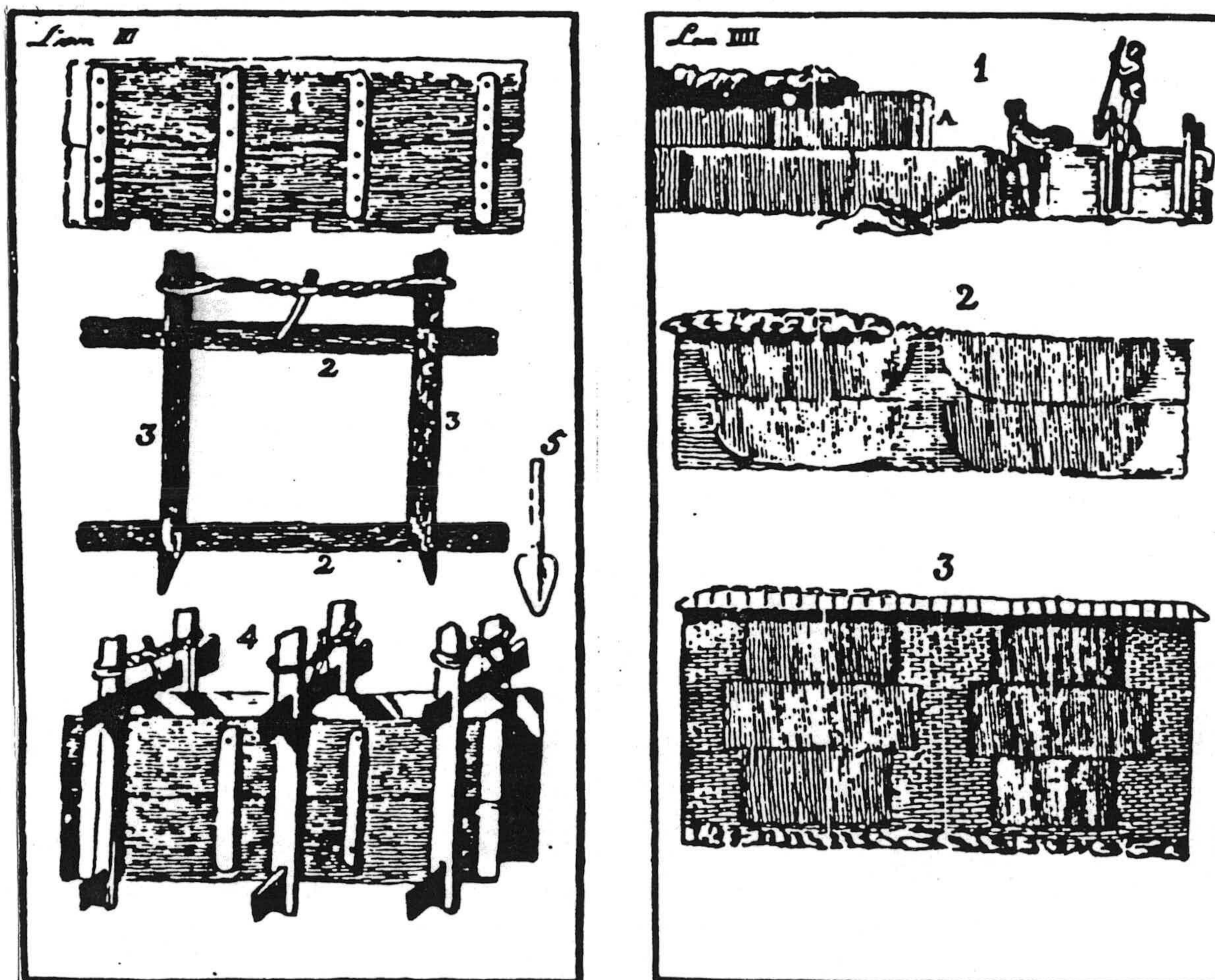


Fig. 5.4. Descripción de Villanueva (1827).

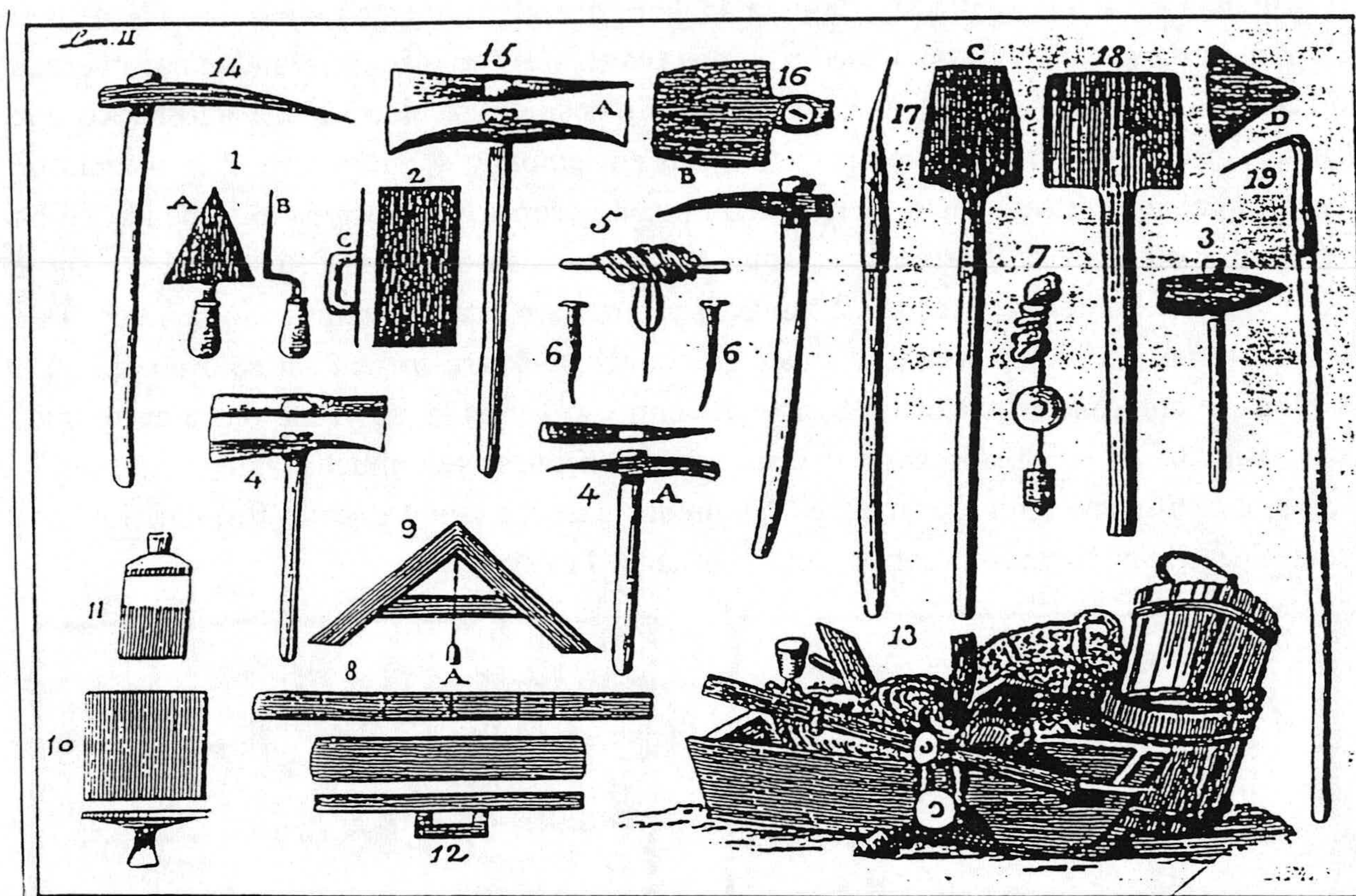


Fig. 5.5. Herramientas y utensilios del Albañil.

1. Paleta 2. llana.3. Pico 4. Piquetilla 5. Cuerda 6. Clavos 7. Plomada 8. Regla 9. Nivel 10. Esparabel 11. Fratás 12. Talocha 13. Cubos, Cuerzos 14. Piqueta 15. Zapapico 16. Azadón 17. Pala de hierro 18. Pala de madera 19. Batidera.

Fernández Balbuena nos describe el proceso de la siguiente manera:

«Exige la técnica de la "tapiería" disponer de un buen "armaje" completo; unas puertas de tapial bien recias, planas y gruesas; unas "cepillas arrembladas", "macho" y "hembra", cuatro por juego de "puertas"; tiene la hembra dos "forquetas" como característica, y el macho una "forqueta" y un espigo; también precisarse unos agujeros y unos "pisones" para hacer el apriete del armaje útil será preciso tener "pina" de negrilla secas y clavos como los de antes. Hecho el cimiento de canto y cal o de barro y canto, se monta el armaje sobre la tierra misma, sin usar por esta vez las cepillas, y una vez acuñadas firmemente las puertas por sus pies, habiéndose así evitado que "abran" y se debaraten la obra, el tapiador dispone cuidadosamente los cantos del puntido, que

ha de tener, y a lo menos, cuarenta o cincuenta de alto, unos cantos encima de otros, bien trabados por tongadas horizontales y; alcanzando el nivel necesario, se empieza a volcar entre las puertas y sobre el puntido la tierra preparada, según la práctica dicha, y se apisona recio y por menudo, que la tapiería de calidad quiere ir muy pisada, y para eso es preciso cuidar de los tapiadores que no se emboben, que para ser un buen tapiador hay que tener brazos duros y mucho empape. Se riegan las tierras alguna que otra vez, aún cuando no mucho, porque pueden embarrarse la masa y eso no conviene.

Acabada la primera hilada de tapiales, debe fabricarse la segunda, no dejando pasar mucho tiempo de una a otra operación, y se procede del mismo modo que antes, sin más diferencia que colocar ahora las capillas sobre el tapial ya construido, para hacer andamio cuando lo pida ello; para apoyar las puertas del tapial, siempre. Y hasta llegar a las barbas, si se construye un muro de cerramiento; hasta el asiento de la carrera, donde han de clavarse las "cabezuelas" o canes y luego la "tercia", que servirá de solera, si se tratase de las paredes de una casa".

Si el muro que se construye lleva hueco de paso o luces, hay que colocar previamente los marcos o cercos para que queden presos y recibidos, cuidando de aplomarlos bien, particularmente los de paso, que, por ser mayores, acusan más claramente los desvíos, y conviene, al montarlos, los desvíos, y conviene, al montarlos, encuadrar con esmero la viga "rastral" con las "enteras", y estas con la vista.

En la buena época, los tapiales al tiempo de construirse se revocaban, jarreando para ello con cal las puertas del tapial, de modo que quedasen bien cubiertas de material, con un grueso de tres o cuatro centímetros, y así, al verificarse el apisonado de las tierras, apretábanse contra la mezcla, y a un mismo tiempo fraguaban los tapiales y sus revocos, resultando estos consistentes y de una dureza extraordinaria».

Antes de situar los tableros, es necesario primero nivelar el basamento y trazar los trayectos destinados para la agujas. Sus distancias deben estar entre 0.97 cm. de eje en eje y 16 cms. de altura de muro a muro, lo que da al basamento alrededor de 80 cms. de altura. Previamente se deben de escavar el cimientó rellenandolo de mampostería. Una vez situados los tableros se comienza a rellenar de tierra los encofrados. La tierra una vez introducida en los tableros se extiende con ayuda de los pies y se comienza a pisonar hasta conseguir un espesor de 8 a 10 cm de altura.

Villanueva (1827) en su manual nos dice:

«Colocados los tapiales, comenzarán los peones a echar dentro expuertas de tierra que tendrán preparada. La tierra se va echando en tongadas o capas de poco más de medio pie de alto; entonces el peón inteligente (especializado) que debe estar dentro del cajón, pisa, aprieta, y maciza esta tierra un pisón algo pesado, que tiene un plano inferior puntiagudo como demuestra la fig.5.6. El pisón y los pies del trabajador van y los pies del trabajador van macizando la tongada por un lado, y sobre la que ya queda apretada y maciza, los demás peones echan otra tongada nueva de la misma altura; y así sucesivamente se va llenando el cajón hasta completar la altura de los tapiales».

La tierra introducida en los tableros se distribuye homogéneamente, y se apisona con un pisón de madera de unos 6 a 8 Kgs. de peso. el apisonamiento se lleva a cabo como indica la figura 5.6.

Al golpear, el pisón produce un ruido sordo, que pasa a resonante cuando la capa esta suficientemente compactada. El proceso de apisonamiento es muy delicado y debe ser realizado por personas entendida, para evitar bien problemas de laminación del material o desmoronamiento rápido de la fábrica.

El manual empleado, es una masa de madera o metal cuya forma es muy variada según la zona del mundo donde se utilice (figura 5.7). Sin embargo todos deben presentar unas mismas características comunes, como es su peso y tamaño.

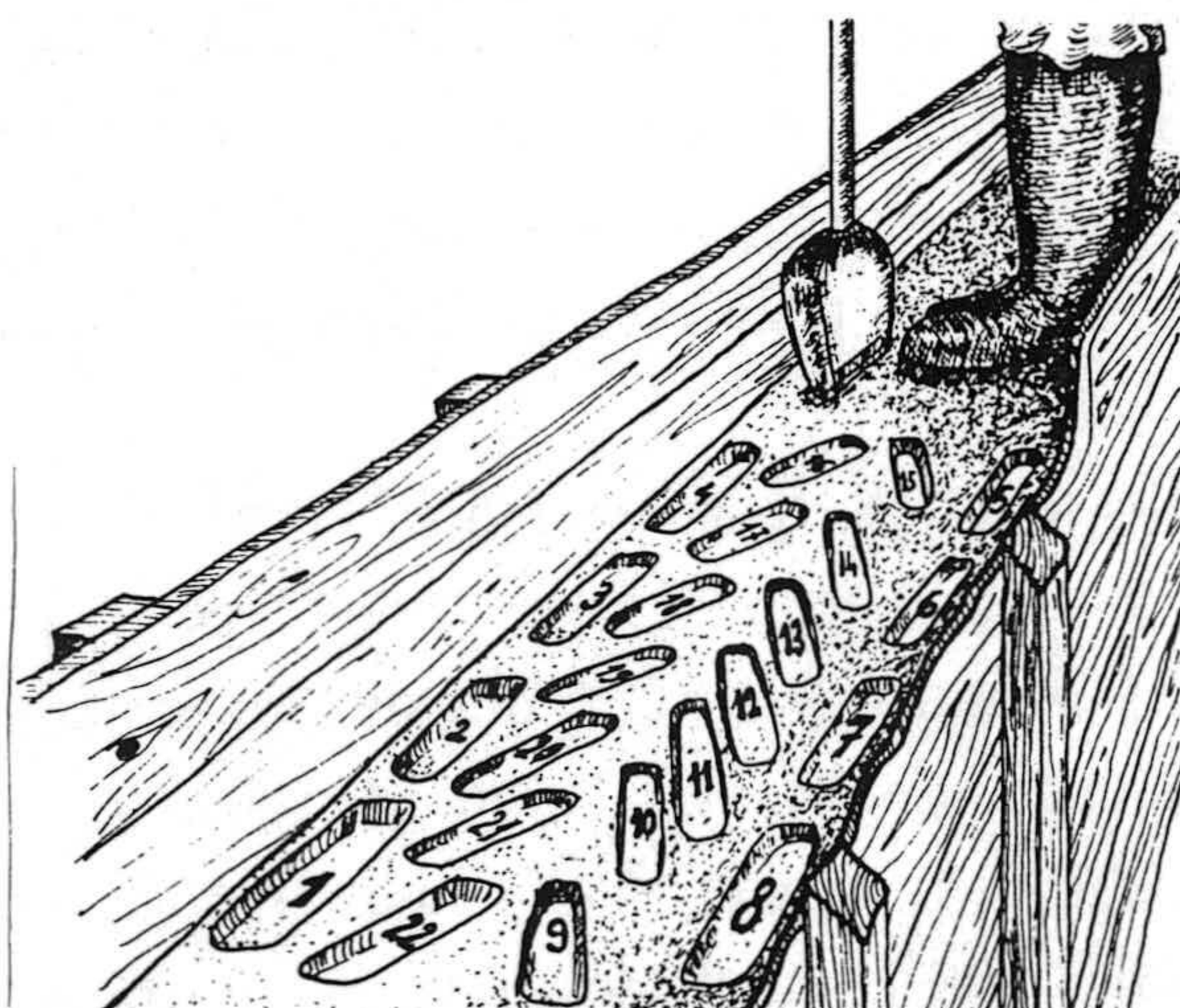


Fig. 5.6 Proceso de apisonado.

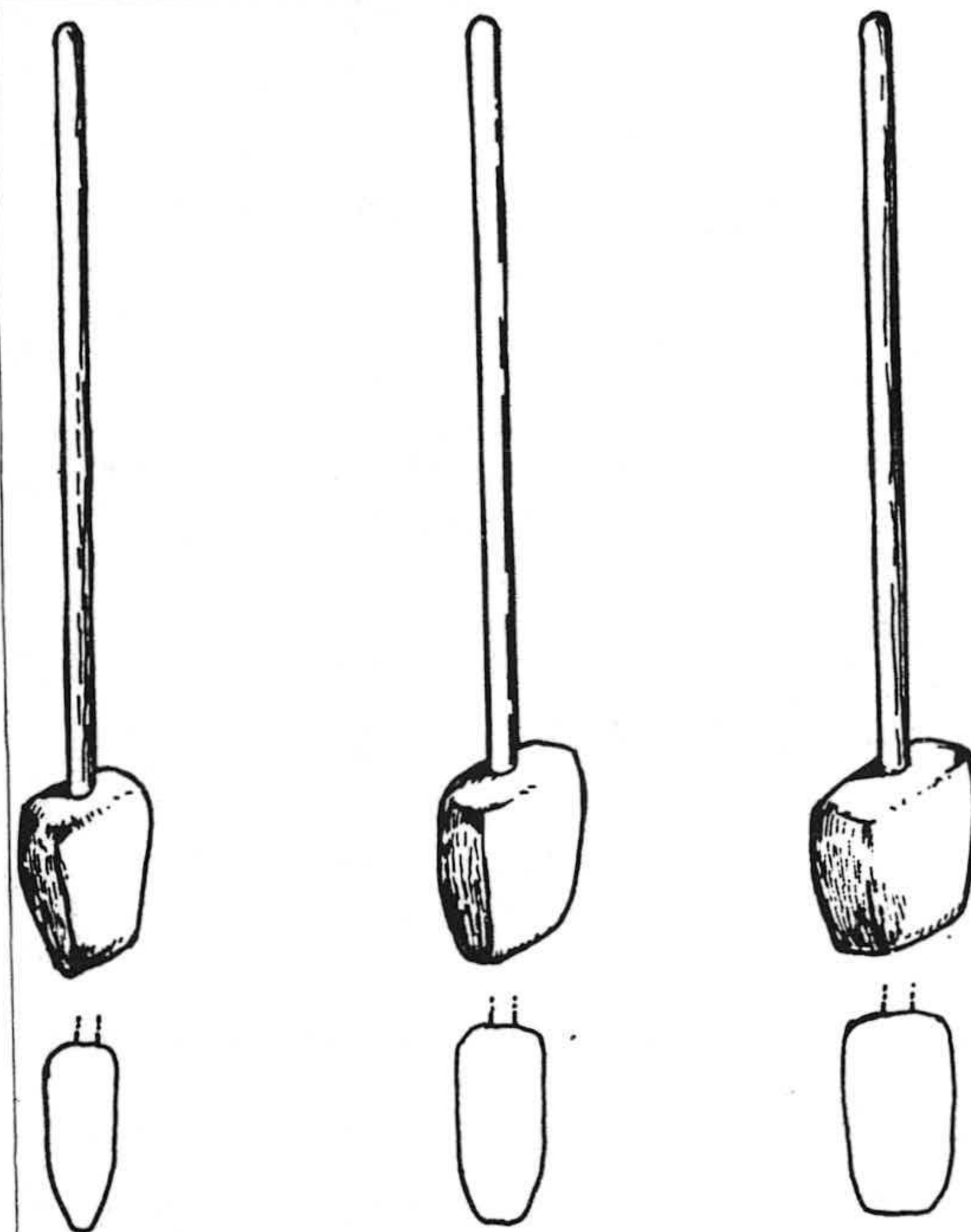


fig.5.7. Variedad de pisonos.

Los principales factores que intervienen en la concepción de un pisón son los siguientes:

1. *Sección del Golpeo.* Son muy diversas y de ventajas muy discutidas. Las formas redondas perservan mejor los tableros, pero son menos eficaces en las zonas angulosas. Es la forma primática en superficie de pisonado plano la que da los mejores resultados. Los ángulos de pisonado a 60° parecen dar resultados casi similares, pero a medida que se cierra el ángulo la eficacia disminuye. Así con un ángulo de pisonamiento de 45° puede hacer perder el 30% de eficacia. Las formas de cono y ángulo favorecen la entrada en lugares difíciles.

2. *Superficie del Pisonado.* Se sitúa preferentemente alrededor de los 64 cm^2 . Los investigadores muestran que para los mejores resultados, es conveniente no pasar de una sección superior a 225 cm^2 .

3. *Cabeza del Pisonado.* Es a menudo de madera o metal. Para el caso de ser de madera estos están protegidos de una placa metálica afín de reducir la erosión demasiado rápida. Los pisonos metálicos son más mareables y sólidos pero suelen tener la cabeza más pequeña.

4. *Peso*. El peso recomendado de un pisón de madera o metal es de 5 a 9 Kg como hemos indicado anteriormente. Este peso debe variar según la talla del pisón y la fuerza de pisonamiento.

5. *El Mango*. El manejo del pisón puede ser simple o doble en madera o metal. El mango hueco permite lastrar el pisón fácilmente.

V.3 EL MATERIAL EMPLEADO EN LA CONSTRUCCION.

V.3.1 GENERALIDADES.

El tapial emplea como elemento básico de construcción la tierra, entendiéndose como tal, la que forma la capa superficial de la corteza terrestre, resultados de los procesos de meteorización.

Es evidente que el conocimiento de las distintas propiedades que presentan los materiales de construcción, en general, resulta de indudable interés para las diferentes aplicaciones de los mismos. en este sentido Torroja (1991) afirma:

«Cada material expresa su propio mensaje, y para comprender su propio mensaje es necesario meditar sobre las propiedades de cada uno de ellos hasta empaparse de su peculiar modo de ser y de expresarse, cada cual presenta su epopeya diferente y específica».

Desde el punto de vista tecnológico, las propiedades de los materiales de construcción pueden entenderse como la forma en que éstos responden ante las acciones exteriores (de tipo físico, químico o mecánico). No sería correcto decir que un material presenta o no una cierta propiedad; lo que sería correcto decir, es que cualquier material presenta siempre algún nivel de respuesta ante los distintos agentes. No obstante, en la práctica se suele decir que un material encuentra cierta propiedad cuando en él se presentan por encima de un determinado nivel, según la perspectiva desde la que estamos considerando.

Aunque la mayoría de las propiedades se ponen de manifiesto al actuar sobre el material los distintos agentes, ciertas propiedades se manifiestan sin intervención de acciones exteriores, siendo éstas las que determinan las otras; la masa, la porosidad, el

volumen, etc. dependen exclusivamente del material. Estas a su vez dependen de:

- *La constitución química*, es decir de las sustancias y elementos constituyentes y de los tipos de enlace existentes entre ellos.

Los enlaces covalentes son muy estables y resistentes, lo que hace que las sustancias que sólo posean este tipo de enlace suelen serlo también. Tal es el caso, del cuarzo, constituido por tetraedros cuyas uniones Si-O son fundamentalmente de naturaleza covalente.

Los enlaces iónicos suelen ser más débiles e inestables, configurando a los materiales bastante sensibilidad a la acción disolvente del agua. El yeso, por ejemplo, es un típico compuesto iónico entre SO_4 y el Ca^{++} , y por tanto bastante soluble en agua. Hay excepciones, ya que algunos minerales, típicamente iónicos, como son las rocas carbonatadas, resultan relativamente resistentes a la acción del agua.

El tercer enlace primario, el metálico, aporta una decisiva influencia en las propiedades de los materiales, traduciéndose en una cierta plasticidad.

Cabe también destacar los enlaces secundarios (por fuerzas de Van der Waals o puentes de hidrogeno).

A parte de los enlaces, la propia naturaleza del compuesto también influye en las propiedades del material.

Las propiedades químicas de los materiales están en función de los componentes que constituyen el material en sales solubles o no, así como la cantidad de óxidos de Fe, Mg o Ca, en carbonatos y sulfatos.

Identificar el contenido en materia orgánica, es importante porque su presencia resulta perjudicial para la construcción, en este caso, de muros de tierra. El humus es de naturaleza coloidal y ácida, tiene una fuerte capacidad de cambio iónico, y de absorción de agua, y por tanto, de cambiar su volumen. Por el contrario, la materia orgánica recientemente descompuesta, está constituida por una serie de macropartículas o fibras relativamente inertes desde el punto de vista químico. La naturaleza ácida de los compuestos orgánicos tiende a provocar una reacción con el agua del suelo que puede

tener un efecto corrosivo sobre el material en contacto.

Otro factor importante es el PH. El ambiente ácido viene provocado por la presencia de protones en el medio, que pueden provenir de tres fuentes distintas:

1. Por oxidación de sulfuros, que origina ácido sulfúrico y hace disminuir el PH (Winter, 1940);
2. Por el intercambio catiónico entre las arcillas minerales y otros minerales, como son olivinos, feldspatos, anfíboles etc. Intercambia protones por cationes Ca y Mg que es lo que se llama Intercambio por contacto (Jenny M., Overtreet, 1938);
3. Por intercambio entre las plantas y las arcillas. Las plantas ceden protones y captan cationes del medio;

- *La estructura cristalina* también influye considerablemente en las propiedades de los materiales. La mineralogía de las partículas del material tienen un efecto importante sobre las propiedades químicas de este, sobre todo la mineralogía de la fracción arcilla. Estas partículas no son eléctricamente neutras y por tanto pueden sufrir cambios positivos y negativos. Los cambios negativos pueden estar motivados por valencias no satisfechas en átomos de oxígeno y disociados en ión H^+ o OH^- con la sustitución de átomos de silicio por aluminio que pueden ser reemplazados por átomos de valencia más baja (Mg^{++}). El agua del suelo actúa como agente de unión entre partículas de arcilla intercambiando iones positivos para contrarrestar los iones negativos perdidos por estos minerales. Los cationes dan origen a unas cadenas de moléculas de agua orientada, cuando un catión hidratado está próximo a una partícula, los dos conjuntos de cadenas hidratadas retienen el ión, y este ión actúa como unión entre arcillas adyacentes.

Por otra parte, el suelo está constituido por tres componentes fundamentales, que determinan en gran medida sus propiedades. Estos componentes son la parte sólida, dividida a la vez en materia mineral y orgánica, el agua y el aire. Este material se dispone de tal manera que el agua y el aire llenan los huecos dejados por las partículas sólidas.

Cualquiera que se adentre en el estudio del comportamiento del agua podrá observar que posee unas características excepcionales las cuales van a influir de manera

importante sobre los materiales. Esto es debido a la estructura de su molécula, la cual posee un carácter iónico parcial, generan enlaces iónicos con otras moléculas de agua o con otras sustancias que se lo permitan (con estructura en dipolo).

Entre las propiedades que más se relacionan con los materiales pueden destacarse:

- Es atraída por casi todas las sustancias inorgánicas, gracias a los enlaces por puente de hidrogeno y debidas al dipolo que establece entre ésta y los átomos de oxígeno, casi siempre presentes en ella. El agua moja cualquier superficie y, por ello, es capaz de penetrar en su interior, si existe una red de poros que lo permitan.

- Gracias a los citados enlaces, también las moléculas de agua se unen unas a otras con gran tenacidad. Por la misma causa, el agua posee una tensión superficial (75 erg/cm^2), lo que le hace ser capaz de soportar cargas relativamente grandes. Esta propiedad junto con el mojado hace que se produzca capilaridad en los materiales que posean poros interconectados.

- Su estructura en dipolo y su elevada constante dieléctrica (aproximadamente 80 veces superior a la del vacío) le facultan para admitir y estabilizar iones en su seno, es decir para disolver gran número de sustancias.

- Al congelar se dilata (aproximadamente un 10%), en lugar de contraerse como ocurre en la mayoría de las sustancias con este cambio de estado.

- Absorbe y libera más energía calorífica por unidad de masa que la mayor parte de los fluidos. Su calor específico es aproximadamente de $1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ ($4186 \text{ J/ K}^\circ\text{C}$) y los calores latentes de fusión y vaporización también son bastante elevados.

- Ebulle a 100°C , pero siempre puede existir cierta cantidad de vapor de agua en el aire a temperaturas inferiores. El máximo valor de presión de vapor de agua que puede existir en un ambiente depende de la temperatura, creciendo cuando esta aumenta. Dicho valor se conoce como presión de saturación, P_s , y a partir de ella, se define la humedad relativa H_r del aire, como la relación entre la presión parcial P_v del agua en el aire, a una determinada temperatura, y la correspondiente a su saturación.

$$Hr = \frac{Pv}{Ps} \cdot 100$$

Si la temperatura desciende por debajo de ciertos valores, puede producirse condensación en las zonas o ambientes con cierto contenido en vapor de agua.

Por otra parte, la fijación de moléculas y su eventual condensación se produce, por tanto, en los poros abiertos y tiene lugar tanto en los materiales porosos de estructura monolítica como en los de naturaleza granular, siempre que estos espacios sean de un tamaño similar al capilar. La cantidad de material retenido será mayor cuanto menor sea el tamaño de los poros y mayor la H_r del ambiente.

La higroscopicidad, entendiéndose como capacidad de un material a tomar agua de ambiente y retenerla en sus poros (Balchere, 1978), puede llevar consigo las siguientes consecuencias: cambios dimensionales que estará a su vez en función del tamaño de poros y la cantidad de agua intercambiada, problemas de solubilidad, bajada de la resistencia mecánica etc.

Por otra parte los materiales que poseen un elevado coeficiente de absorción, suelen ser materiales poco resistentes a las heladas, a la cristalización de sales y pueden sufrir daños como consecuencia de procesos repetitivos de humectación y secado. Los materiales granulares debido a los cambios anteriormente indicados sufren después del secado fisuraciones, constituyendo una característica red de grietas. También las arenas sufren entumecimientos y retracciones, aunque en menor medida que las arcillas. Serán más ostensibles cuanto mayor sea su proporción de partículas finas, por el incremento de superficie específica que conlleva. Las gravas, por el contrario, apenas si modifican su volumen con los cambios de humedad.

La solubilidad de un material puede entenderse como la facilidad con que una sustancia rompe su estructura sólida y se incorpora a otra, generalmente, líquida. Ciertos materiales parecen cambiar su solubilidad a lo largo del tiempo, aunque, en realidad, lo que ocurre es que, con el transcurso del tiempo, se van transformando en otras sustancias diferentes. Tal es el caso de la cal, $Ca(OH)_2$, que muestra una elevada solubilidad en agua en los primeros momentos de su puesta en obra, pero a medida que transcurre el tiempo, van tomando CO_2 del ambiente, y con ello, transformándose en carbonato cálcico, experimentando un fuerte descenso de la solubilidad.

Entrando en la parte sólida, como un elemento importante que influye decisivamente en sus propiedades. La distribución de las partículas sólidas constituyen la textura de éste. La presencia o ausencia de determinados componentes va a influir en las características mecánicas, cohesión, resistencia al desplazamiento, expansiones y humedad del material, en nuestro caso el suelo. Estas son fundamentalmente:

- *Densidad o Peso específico*. Aunque desde el punto de vista físico, son dos propiedades diferentes, a efectos prácticos se emplea indistintamente un término u otro, y se designa como la cantidad de material contenida en la unidad de volumen.

$$D = \frac{\text{Masa}}{\text{volumen}}$$

Los materiales en general no son absolutamente compactos, sino que contienen una cierta proporción de huecos o poros, de tal manera que el volumen que aparentan es mayor que el que le corresponde a la parte sólida. Atendiendo a esto, se pueden distinguir los siguientes tipos de densidades: densidad aparente y densidad real.

La densidad es un dato interesante para la medida indirecta de otras propiedades, por ejemplo, el aislamiento térmico o acústico o para conocer el grado de compactación del material.

- *La Porosidad*, se define como la fracción de volumen total ocupada por los poros. Por tanto:

$$P = \frac{V_h}{V_t}$$

donde V_h representa el volumen de huecos o poros y V_t el volumen total o aparente. Dentro de estos poros podemos distinguir dos tipos, unos poros abiertos al exterior y unos poros cerrados sin accesibilidad desde el exterior.

De acuerdo con esto, pueden distinguirse una porosidad total, P_t , como la fracción del volumen total ocupada por la totalidad de los poros (abiertos + cerrados), una

porosidad abierta, como la ocupada por los poros abiertos o una porosidad cerrada, como la ocupada por los poros cerrados.

la porosidad tiene una enorme importancia en el comportamiento de los materiales. Determina prácticamente todas sus propiedades. Pero, tanto como su proporción, influye de manera determinante su tamaño, tipo (cerrados o abiertos) y forma e interconexión entre ellos. Según puede preverse, la porosidad que resulta más perjudicial para la estabilidad de los materiales frente a los efectos hidrofísicos es, evidentemente, la porosidad abierta.

La forma de los poros también es decisiva en la capacidad resistente de los materiales, especialmente, a la tracción. Aparte de la disminución de sección resistente que supone su presencia, los poros pueden actuar como concentradores de tensiones, tanto más cuanto mayor sea su dimensión y menor el radio de sus vértices. Por ello, la porosidad de tipo esférico es menos perjudicial a efectos de resistencia mecánica que los alargados y con vértices muy águdos.

- *La superficie específica*, se encuentra íntimamente relacionada con la porosidad. Puede definirse como la superficie que representa la unidad de masa y se suele expresar en $m^2/grs.$. Aunque este parámetro es perfectamente aplicable a los poros de un material monolítico, normalmente se utiliza para dar un índice del grado de división de un material granular o molturado, puesto que a medida que disminuye el tamaño la superficie por unidad de masa aumenta. Es una medida que se aplica a las arcillas y que permite apreciar la actividad química de cambio iónico expresado en $cm^2/grs.$ Para las arcillas su valor está en $800 m^2/grs.$, para los limos y arenas el valor es $454 cm^2/grs.$ y $23 cm^2/grs.$ respectivamente, cantidad máxima de cationes que la tierra es capaz de retener, el valor de saturación es la relación base cambiante y capacidad total de cambio expresado en tanto por ciento. El valor es muy variable de una tierra a otra y depende de la riqueza en cationes de la roca madre, de la frecuencia y de la importancia de aportes catiónicos (sobre todo Ca).

El contenido en arcilla, va a determinar la cohesión del material, contrubuyendo a su estabilización, no obstante de existir arcillas expansivas, el efecto es contrario en presencia de agua. Las partículas finas deben su cohesión esencialmente a las siguientes fuerzas:

- Debidas a la tensión superficial en la interfase aire agua.
- Debidas a la interacción entre las arcillas y las moléculas de agua polarizadas.

La succión es otra fuerza que se origina por la combinación de la hidratación de la superficie de las partículas y la tensión superficial, la cual crea una reducción del contenido en agua.

La retracción lineal de un material está en función de la naturaleza de los minerales de la arcilla que contenga en su constitución, la caolinita presenta una retracción lineal del orden del 3 al 10%, las ilitas del 4 al 11% y las esmectitas del 12 al 23%. El valor de la resistencia en seco de la tierra también depende de la naturaleza de las arcillas de la distribución de sus partículas así como de su tamaño, cristalinidad, y de la naturaleza de sus iones cambiables. Sus valores están comprendidos entre 0.7 a 50 bars. para la caolinita, entre 15 y 70 bars. para la ilita y entre 20 y 60 bars. para la esmectitas.

Centrandonos en la tierra como material, vamos a destacar aquellas propiedades del suelo que mejor caracterizan la tierra como material de construcción, y en nuestro caso como un constituyente esencial en la fabricación del Tapial.

La granulometría o textura de la tierra representa el contenido en fracción de granos de diferentes medidas en porcentajes. Se mide por análisis granulométrico para la fracción de grano grueso (bloque, gravas, arenas), y por sedimentación para la fina (limo y arcilla). Por este método se define con precisión los constituyentes del suelo. La separación en distintas fracciones de acuerdo con las normas americanas ASTM viene indicado en la tabla V-1.

Tabla V-1

Partículas.	Diámetro(mm.)
Bloques.	200-20
Gravas	20-2
Arenas gruesas	2-0.2
Arenas finas	0.2-0.06
Limos	0.06-0.002
Arcillas	< 0.002

En la determinación de la curva granulométrica es interesante definir los coeficientes de curvatura y uniformidad, ya que, a partir de ellos obtenemos información sobre la forma y pendiente de la curva.

Hazen denominó "diámetro eficaz", D_{10} , al correspondiente al 10% de la curva granulométrica, concediéndole un papel importante sobre la permeabilidad de suelo. Definió también C_u como la razón del diámetro correspondiente al 60%, D_{60} , y al diámetro eficaz (Jimenez Salas & Justo Alpañes, 1975).

El coeficiente de uniformidad es una medida de la dispersión, así de manera general puede decirse que un valor de $C_u = 2$ corresponde a un suelo muy homogéneo (arena de playa) y un $C_u = 10$ corresponde a un suelo de granulometría muy extendida.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

En las clasificaciones basadas en las características granulométricas es costumbre distinguir las distintas fracciones por el nombre de algunos tipos de suelos. Desgraciadamente, las distintas clasificaciones no coinciden en la especificación de los límites adecuados. A continuación vienen indicadas tres clasificaciones, que corresponden a las más utilizadas por los ingenieros constructores (Tabla V-2):

Tabla. V-2

Tamaño de las partículas	D.I.N (4022)	M.I.T Y Normas Británicas	U.S. Public Roads Administration y AST
Arcillas	$\phi < 2\mu$	$\phi < 2\mu$	$\phi < 2\mu$
limos	$\phi 2\mu - 0.05\text{mm.}$	$\phi 2\mu - 0.06\text{mm.}$	$\phi 2\mu - 0.05\text{mm.}$
Arenas	$\phi 0.05\text{mm.} - 2\text{mm.}$	$\phi 0.06\text{mm.} - 2\text{mm.}$	$\phi 0.05\text{mm.} - 2\text{mm.}$
Gravas	$\phi 2\text{mm.} - 60\text{mm.}$	$\phi > 2\text{mm.}$	$\phi > 2\text{mm.}$

La combinación de estos tres componentes nos dan los diversos tipos de suelos que se pueden dividir:

- *Suelos arcillosos*: 60% arcillas, 20% arenas, 20% limos.
- *Suelos Franco arcillosos*: 40% arcillas, 30% arenas, 30% limo.
- *Suelos Franco*: 20% arcillas, 40% arenas, 40% limo.
- *Suelos Franco-arenosos*: 15% arcilla, 67% arenas, 20% limos.
- *Suelos Franco-limosos*: 15% arcillas, 20% arenas, 65% limos.
- *Suelos limosos*: 10% arcillas, 5% arenas, 85% limos.

Las propiedades de los suelos granulares, varían en función de la dureza de los granos, su forma y la textura de su superficie.

Al someter a compresión unas arenas de granos redondeados y duros, se produce una variación de volumen debido a la deformación de su estado sólido, sin ocasionar a penas rotura de sus granos. Las arenas de granos blandos y esquinas pronunciadas representan, a débiles esfuerzos de comprensión, un comportamiento análogo al caso anterior. Pero a partir de presiones algo elevadas (35 Kg/cm²) se advierte una transformación en su comportamiento mecánico, como consecuencia de una paulatina disminución de la granulometría al producirse un incremento de la fracción fina por rotura de los ángulos y esquinas de los granos iniciales.

La forma de las curvas granulométricas, nos puede dar cierta información sobre las características del material estudiado.

Los estudios que se han venido realizando sobre este tema no delimitan ningún tipo de tierra para la fabricación del tapial, sin embargo aconsejan una granulometría ideal que viene expresada en la figura 5.8 (Houben & Doat, 1982).

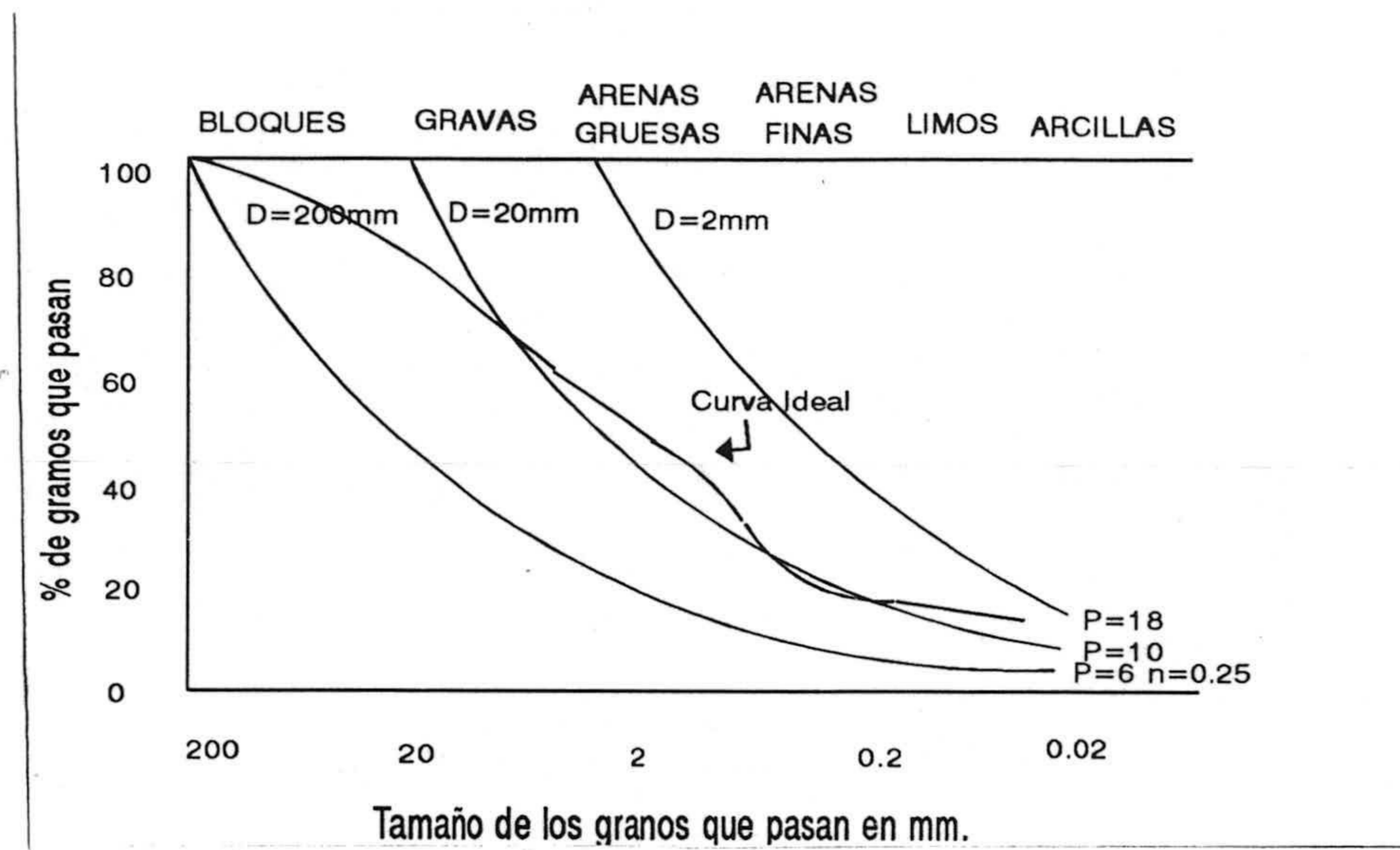


Fig.5.8. Granulometría ideal según Doat & Houben, 1982)

En relación con esto, Bazzano (1993) manifiesta, la existencia de una cierta homogeneidad en cuanto a la textura de las construcciones de tierra musulmanas; estas se componen de al menos 5% de finos (limos y arcillas) y un 40% de partículas mayores a 0.5 mm. La distribución granulométrica es la que viene indicada en la tabla V-3.

La consistencia del suelo viene determinada a través de los límites de Atterberg, de los que puede deducirse el índice de plasticidad del suelo, atendiendo a parámetros de compresibilidad y plasticidad.

La plasticidad define la propiedad de la tierra a sufrir una deformación sin reacción elástica notoria, caracterizada por una fisuración o pulverización. Los límites entre diferentes estados de consistencia son determinados por los límites de Attenberg, que se establecen a partir de partículas menores de 0.4 mm.

Tabla V-3

<i>Tamaño.mm.</i>	<i>Retenido.%</i>
220	1.01
200	2.08
100	3.01
60	4.7
30	3.85
10	2.54
2	39.77
0.5	42.24

La cantidad de agua expresada en tanto por ciento que corresponde al límite de transición entre el estado de consistencia fluido y estado plástico, es designado como límite líquido. Entre el estado plástico y estado sólido, la transición es llamada límite plástico.

En el límite líquido, el suelo comienza a manifestar una cierta resistencia al cizallamiento, y en el límite plástico la tierra deja de ser moldeable. La diferencia entre ambos parámetros se conocen como índice de plasticidad (IP). A la plasticidad, los parámetros que más afectan son: la textura y naturaleza mineralógica de las arcillas, que influyen, a su vez, directamente sobre la cohesión de la tierra (Figura 5.9).

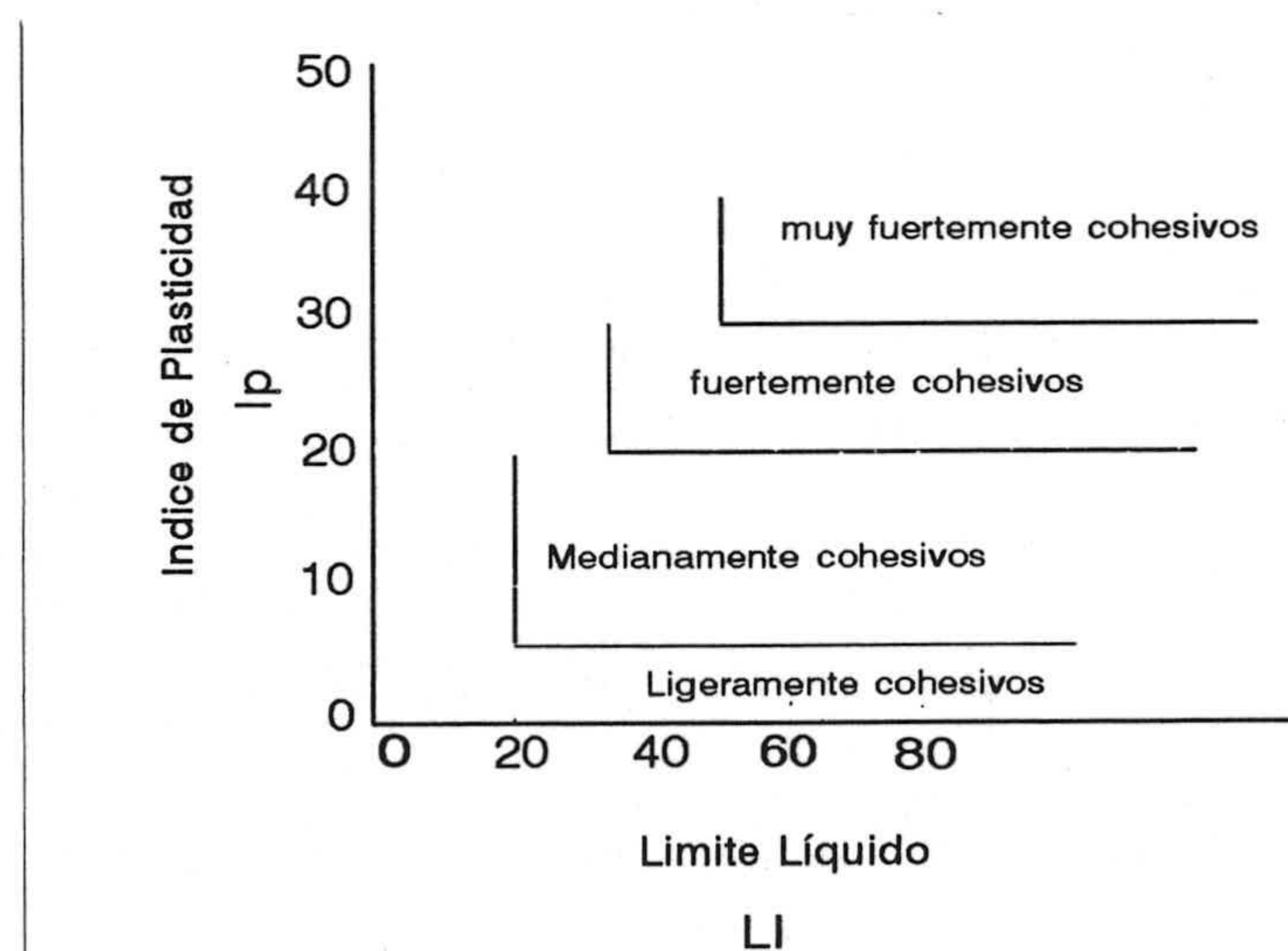


Fig.5.9. Distintos estados de cohesión de la tierra.

Un I_p mayor $1/4 LI$ representa la cantidad de agua necesaria para vencer la cohesión existente que depende también de la mineralogía. A igualdad de otros factores, cuanto mayor es el I_p de un suelo menor es su permeabilidad (Houben & Guillaud, 1989).

Con sólo los datos del límite líquido e índice de plasticidad de un suelo, es posible, en muchos casos, formar un juicio sobre el tipo al que pertenece su fracción fina. Para ello, el procedimiento más sencillo es hacer uso del ábaco de Casagrande representado en la (Figura 5.10).

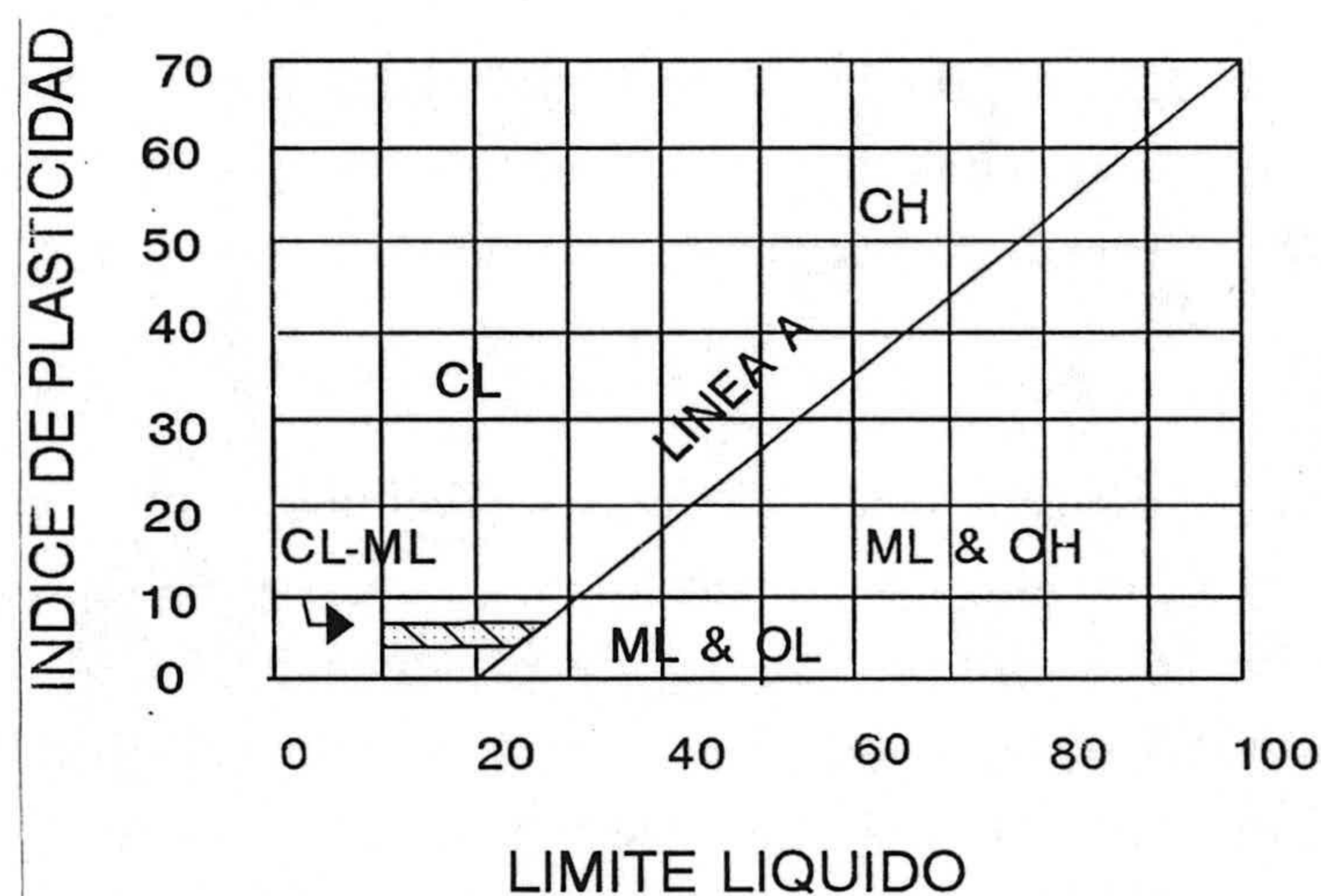


Fig. 5.10. Abaco de Casagrande.

La línea A es un límite establecido empíricamente que separa las arcillas (CL e CH) de los limos (ML y MH).

En la zona rallada con I_p de entre 4 y 7 se superponen los suelos arcillosos y limosos por lo que se emplea una doble nomenclatura CL-ML.

El coeficiente de actividad de las arcillas se define, como la relación entre el índice de plasticidad y su relación con el % de fracción menor de $2\mu m$. Si relacionamos la actividad de las arcillas, con su contenido para poder explicar la expansión que puede sufrir un material; podemos obtener resultados contradictorios, ya que se puede tener fuerte actividad del material y una débil expansibilidad, si el contenido en calcio es del

orden de 0.75 (Houben & Guillaud, 1989) (Fig. 5.11 y 12).

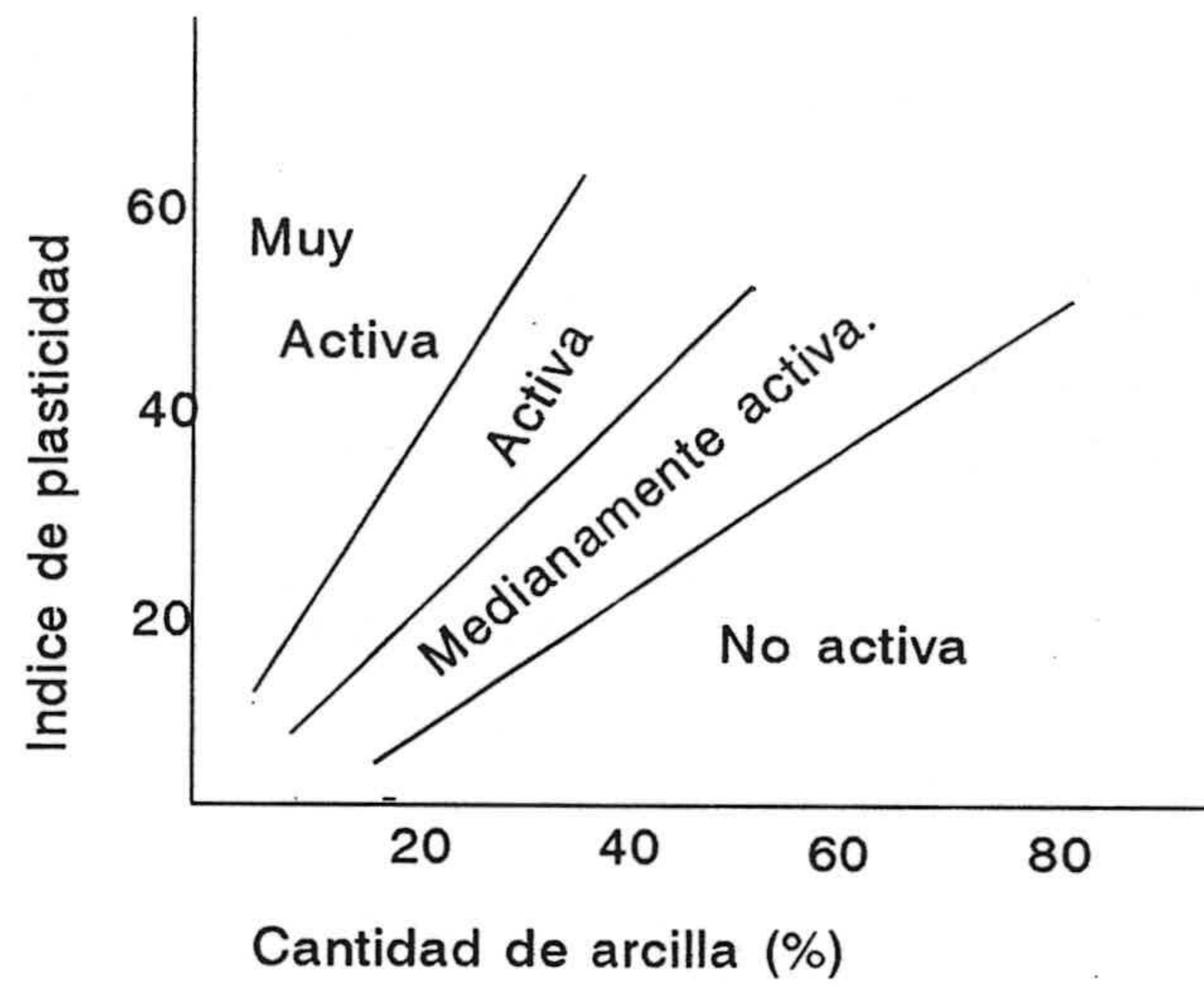


Fig.5.11. Actividad de las arcillas.

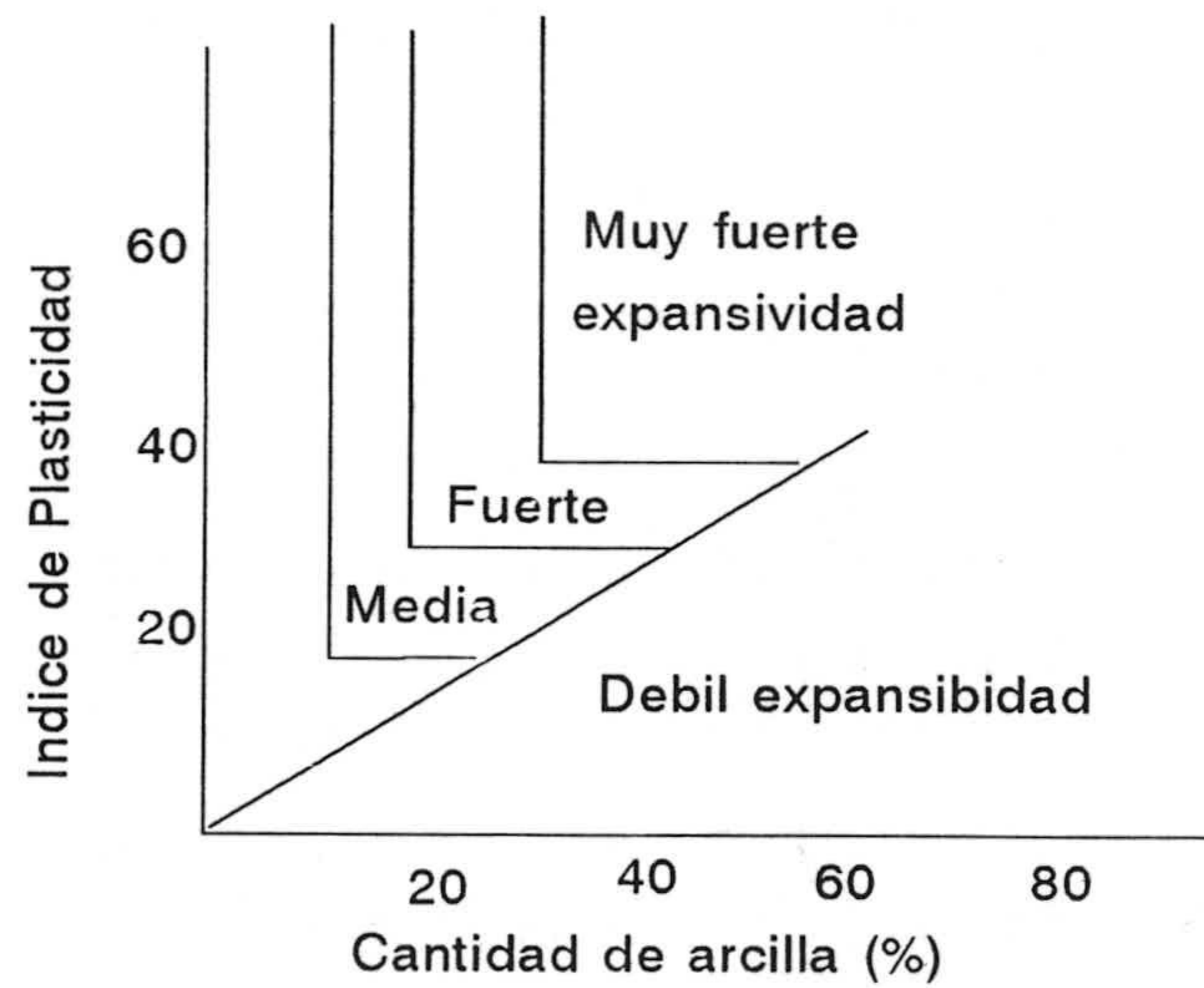


Fig. 5.12. Expansividad de las arcillas.

Los límites de Atterberg están también en interacción con otros parámetros como son:

- densidad máxima seca,
- contenido en agua óptimo,
- retracción lineal,
- y resistencia a la compresión.

En general, para la construcción en tierra conviene utilizar suelos con un bajo índice de plasticidad, ya que cuanto más alto sea, mayor será la retracción por secado.

Otra propiedad de gran importancia es la compresibilidad, que en nuestro caso se refiere a su actitud a ser densificada artificialmente para una determinada humedad y energía de compactación.

Cuando la compactación de la tierra sea máxima, para una determinada energía de compactación, ésta debe poseer un contenido en agua óptimo (TEO) que es determinado por el ensayo Proctor. Los resultados son expresados en un diagrama, donde se reproducen en ordenadas la masa volumétrica seca (g/cm^3) y en abscisas el contenido en agua expresado en tanto por ciento.

En general, la tierra como material de construcción, debe compactarse para que forme una masa resistente y poco compresible. En la compactación de un suelo juegan un papel muy importante el agua que contiene, a igualdad de otros factores variando la humedad obtenemos una curva como la del tipo de la figura 5.13. Como vemos la curva presenta un punto característico, que indica la densidad máxima para una humedad óptima.

Si empleamos energías de compactación cada vez mayores obtenemos curvas más densas con humedades óptimas menores como puede verse en la figura 5.14.

Las variables principales que afectan a la compresibilidad de la tierra son tres: la textura, el estado hídrico y la energía de compactación.

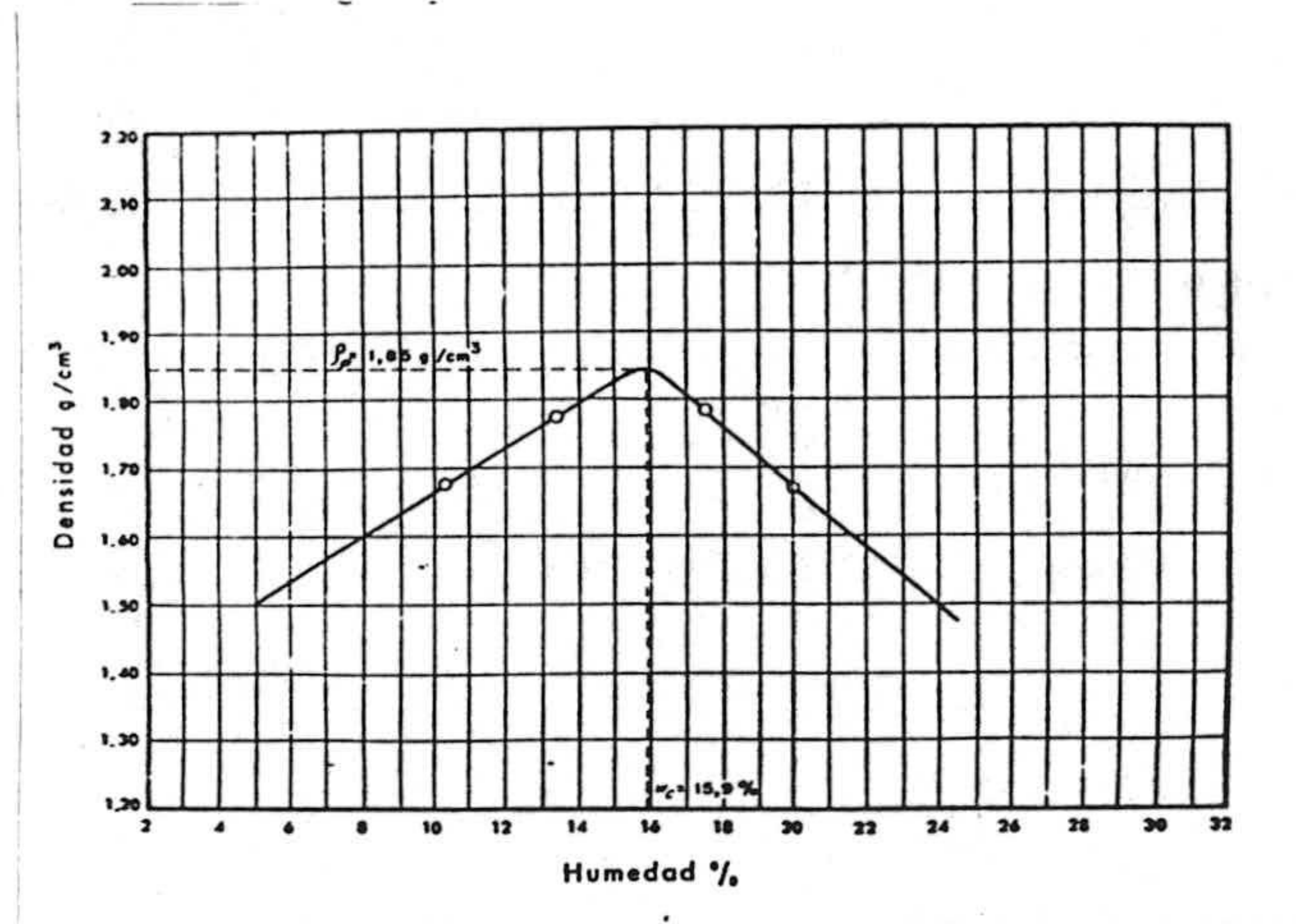


Fig. 5.13. Curva Proctor de compactación.

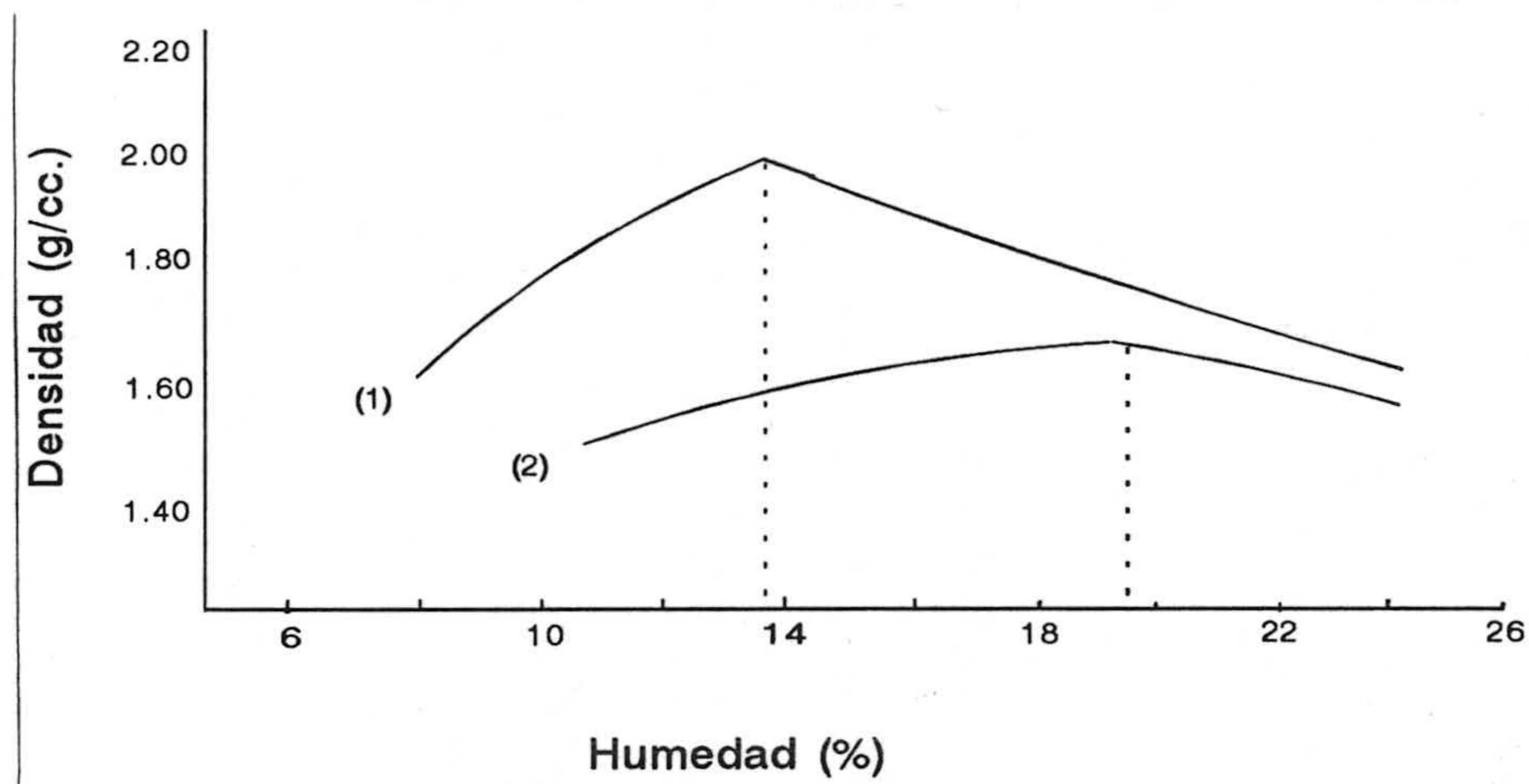


Fig. 5.14. Variables que afectan a la compresibilidad de la tierra.

Un aumento de la energía de compactación lleva consigo un incremento de la densidad seca y una disminución de TEO. En general para una compactación creciente, el vértice de la curva Proctor está acentuado y se aplana para una compactación menos energética. Con un valor en agua superior al TEO y para un volumen de aire insignificante, no se puede obtener la compactación óptima y por tanto la densidad deseada (figura 5.15a).

La textura también influye en el grado de compactación de la tierra, para una

textura uniforme la porosidad es elevada y se reduce la sensibilidad al contenido en agua, las curvas son más planas. Cuando la tierra posee una mayor proporción en partículas menores a 0.08 mm., se acentúa las variaciones de densidad según el contenido en agua, dando curvas más puntiagudas (figura 5.15b).

De las gráficas de la figura 5.15, se deduce por una parte, que la masa volumétrica seca y el TEO están influenciados por la energía de compactación y por la textura de la tierra.

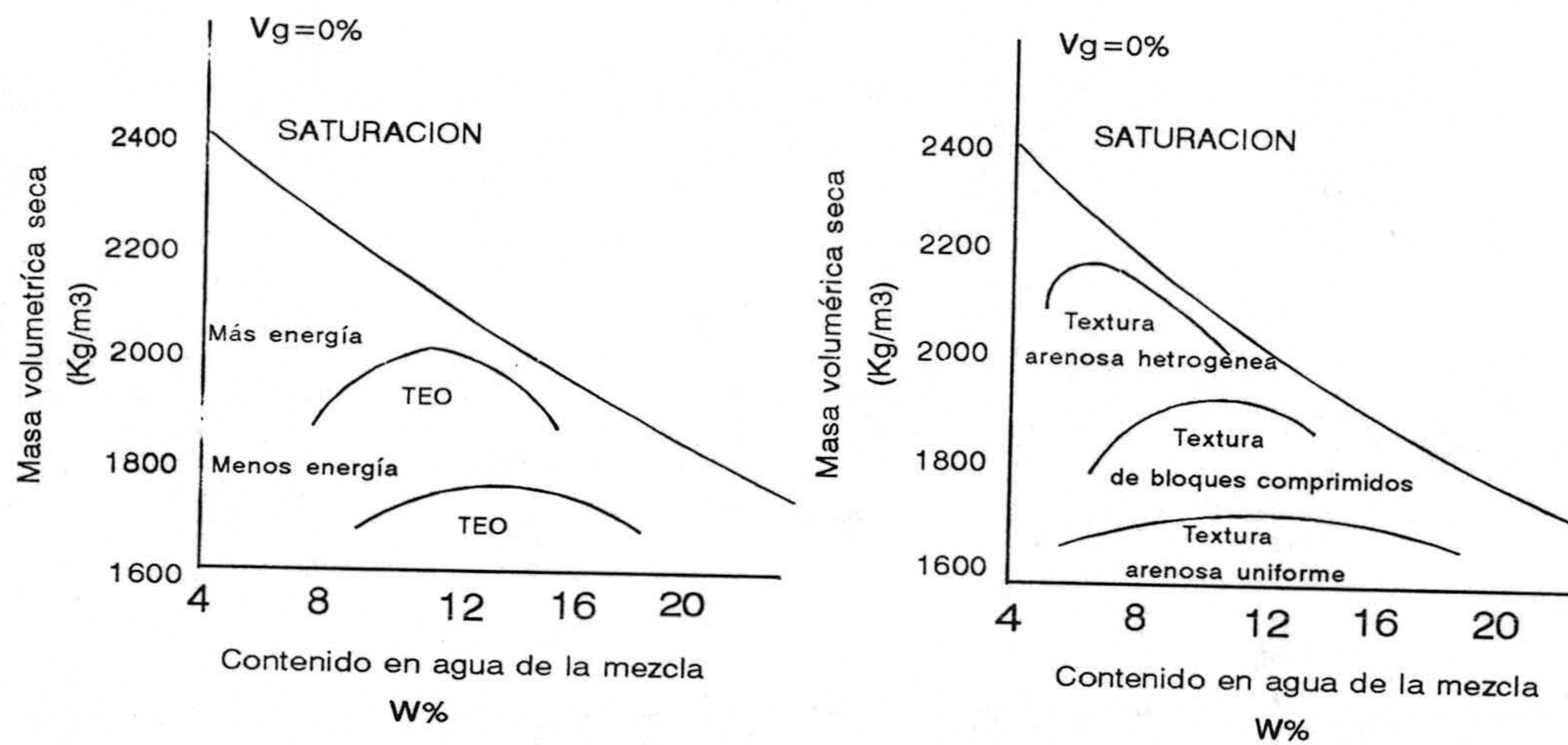


Fig. 5.15 Variación de la compactación en función de la energía de compactación y textura del material.

Mediante la investigación de la tierra, como material de construcción, podrá obtenerse de este el máximo partido, conociendo sus posibilidades bajo la acción de agentes que influyen y mejoran sus características, aumentando su campo de aplicación en condiciones en las que su empleo sería imposible.

V.3.2 ¿QUE TIERRA EMPLEAR?.

Los técnicos conocen bien, por ejemplo, las propiedades del cemento, el agua, el ladrillo cocido, etc.; sin embargo la tierra no es tan conocida, en cuanto a su aplicación como material de construcción. El hecho de ser un material que ha carecido de interés constructivo en los últimos tiempos, ha llevado a que los estudios realizados, en concreto sobre este tema, sean escasos.

Las propiedades de la tierra se conocen bien, y actualmente tenemos técnicas para identificar y para cuantificar su comportamiento de cara a la construcción; metodología que no es propia de este tema, pero que se ha extraído de lo que tenemos a mano, en lo que se refiere a normativa aplicada al estudio geotécnico del suelo en general.

No obstante, el problema no radica en la determinación de las propiedades, sino que está en establecer en cada una de ellas, los límites en valores absolutos para la idoneidad del material.

Podríamos decir, por tanto, que desde este punto de vista, la tierra es poco conocida en cuanto a su aplicación como material de construcción; lo cual debe achacarse a una "falta de interés" en los países de tecnología puntera, debido al escaso uso que se hace de este material en edificaciones de nueva planta.

Podríamos preguntarnos, ¿como seleccionaban, desde antiguo, la tierra para ser utilizada en construcción?. La respuesta entendemos se encontraba en la ciencia más tradicional, es decir en la experiencia, la cual se fue transmitiendo de generación en generación.

¿Como transmitir la idoneidad?. La experiencia parece ser el elemento más importante, pero para ello es necesario establecer un canal de comunicación, que para el caso de la tierra el verbal no era suficiente, dada la heterogeneidad del material. Eran necesario establecer unos parámetros de medida.

Desde muy antiguo los entendidos en tierra han empleado una serie de técnicas previas que les permitían conocer el material que tenían disponible, y saber si era o no apropiado para la construcción. Estos eran de carácter sensorial y de varios tipos:

- *Olor*. Esta prueba tiene como objetivo identificar por su olor la presencia de materia orgánica, por el olor a moho. Este olor se amplifica si se humedece o se calienta la tierra en cuestión.

- *Mordedura*. Con esta prueba es posible detectar por medio de rechinado del material entre los dientes, el contenido en arenas y limos de los suelos. Si rechina desagradablemente, es arenoso; si rechina pero no especialmente desagradable, es limoso; si se tiene una sensación "lisa o harinosa" es arcilloso.

- *Vista*. Un vistazo permite hacerse una idea de la proporción y del grueso de las partículas más voluminosas, por deducción, de aquellas más finas. Las partículas más finas visibles a simple vista, son las arenas de 0.074 mm.

El color varía de acuerdo con la humedad, pero este puede darnos una información importante de las características que presenta ese suelo. En términos generales, para suelos secos el color castaño oscuro, verde oliva a negro puede indicar que se trata de un suelo orgánico, mientras que en general, colores claros y brillantes, indican que se trata de suelos inorgánicos. Un color blanco, blanco grisáceo, azul marino, café o negruzco, son señales de un suelo con materia orgánica activa. Suelos con colores gris claro pueden existir en depósitos limosos fluviales y en suelos que contengan gran cantidad de carbonatos de calcio; los colores blancos, grises indican la existencia de corales, yesos, caliche y material calcáreo; el color amarillo y ocre indica que contiene hidratos de carbonato, y de rojo a castaño oscuro que contienen óxidos de Fe.

- *Tacto*. Esta prueba se manifiesta mediante el tacto de las partículas contenidas en los suelos.

Se toma un poco de tierra en el palma de la mano, y con el dedo índice de la otra, se detecta la presencia de arenas, limos y arcillas, a partir de su mayor rugosidad (figura 5.16).

- *Brillo*. La prueba se realiza para detectar la presencia de arcillas mediante el brillo de sus partículas. Se toma un poco de material, se desmorona perfectamente para después amasarlo con agua hasta formar una bola compactada del tamaño de la mano, se corta por la mitad para observar las superficies; se trata de arcillas cuando las



Fig. 5.16 Prueba del tacto.

superficies son brillantes; de limos cuando son poco brillantes y arenas cuando son opacas.

- *Sedimentación.* Esta prueba tiene como propósito conocer de una manera clara los componentes de los suelos mediante la decantación.

- *Prueba de la cintilla.* La elaboración de esta prueba sirve para verificar el grado de plasticidad del material. Un poco de material perfectamente molido se amasa con agua y sobre una superficie lisa se fabrica una cintilla de 20 cm. de longitud, y se alza para observarla; si la cintilla se rompe antes de 5 cm. el suelo es arenoso, y podrá ser utilizado para la fabricación de adobe estabilizado con cemento.

- *Contenido óptimo de humedad.* a) Prueba de Vicat. Esta prueba tiene como finalidad determinar el límite líquido en el material, el cual sirve para efectuar entre otras pruebas, la de contracción, la volumétrica, o para conocer el contenido óptimo de humedad en la fabricación de adobe tradicional.

El ensayo consiste en moler un poco de tierra y se la agrega agua hasta que el material sea maleable. Después se coloca el material al ras en un recipiente y se apoya sobre el mismo una varilla sostenida con una mano y guiada con la otra; se suelta la varilla y si ésta penetra 2 cm es el momento en que el material se encuentra en su límite

líquido. En caso de que la penetración sea diferente se agregará mayor cantidad de tierra o agua y se repetirá la prueba.

Prueba de lavado de las manos. Con esta prueba se define, mediante el lavado de las manos después de haber manipulado la tierra en estado húmedo, si contienen limos y/o arcillas. Cuando al lavarse las manos, éstas se sientan jabonosas y presentan dificultad a una rápida limpieza, se trata de arcillas; si al contrario la tierra se presenta polvorosa y es de fácil enjuagar, se trata de limos.

Villanueva (1827) al hablarnos de la construcción en tierra nos indica el tipo de material aconsejado para la construcción del tapial:

«La tierra empleada para construir las tapias y paredes debe ser arcillosa, pegajosa, compactada, limpia de guijo y con poca mezcla de agua y cascajo. En casi todos los países se halla con abundancia, y puede construirse con ella paredes muy fuertes y durables».

Estudios que se han realizado en la actualidad han conducido a determinar, por medio de ensayos de laboratorio una serie de parámetros que permiten identificar las características del material empleado en estas construcciones. Los parámetros que más afectan a las propiedades del suelo de cara a la construcción, como hemos indicado anteriormente son: la granulometría, plasticidad y densidad.

La tierra empleada como material de construcción debe contener una porción de arcilla para garantizar la cohesión a la masa y la arena suficiente para dar esqueleto interno al muro. Porcentajes bajos de fracción arcilla están condicionados por la susceptibilidad de esta, dependiente a su vez de sus propiedades químicas y mineralógicas. La arcilla, en presencia de agua puede originar importantes desórdenes en la estructura, derivados especialmente de hinchamientos y retracciones.

La densidad es el parámetro que en último término permite definir la "calidad" del elemento constructivo ejecutado, pues está en relación directa con la capacidad y consecuentemente, con la resistencia mecánica. Por este motivo, y al objeto de lograr un elemento durable, es decir evitar su rápida degradación, es imprescindible cuidar rigurosamente todos aquellos aspectos que permiten lograr una adecuada densificación del material (granulometría, adición de agua y energía de compactación).

En relación con lo anterior está la plasticidad, debiendo evitarse aquellos suelos finos muy plásticos, pues son sinónimos de peligrosos o susceptibles.

Con independencia de la escasa selección que tradicionalmente se ha tenido de la tierra al ser usada como material de construcción, estudios recientes aconsejan unos rangos de variación para los diferentes parámetros tales como los indicados en la figura 5.17. (Houben & Doat, 1982).

Como puede deducirse de las gráficas, la granulometría se caracteriza porque el contenido en arcilla no debe superar el 20% y el contenido en arena debe ser superior al 45%; los suelos deben presentar una débil plasticidad, y al ser compactados adquieran una compactación entre 1.7 y 2.3 g/cm₃. Debe entenderse que el máximo establecido dentro del rango está condicionado por el tipo de utensilios que se pueden utilizar en la compactación para la construcción de estos elementos.

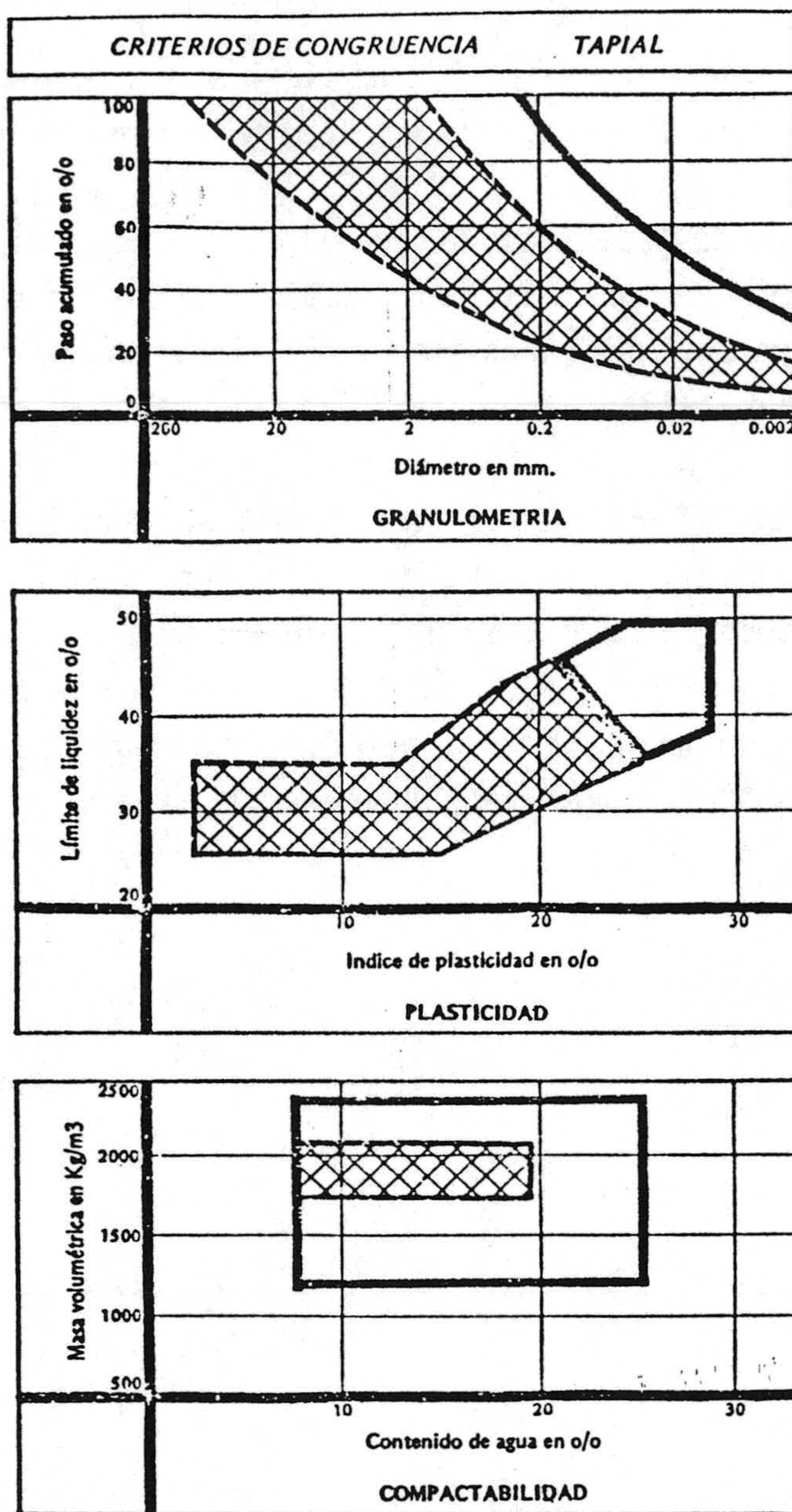


Fig. 5.17. Condiciones que debe cumplir una tierra para ser empleada en construcción de tapial (Houben & Doat, 1982).

V.3.3 TRATAMIENTO PREVIO DEL MATERIAL.

La tierra como materia prima para la ejecución de tapiales, necesita ser preparada antes de su puesta en obra. Este proceso, tienen lugar en varias fases:

- *Extracción de la tierra.* Debe ser un proceso sencillo, es decir, llevarlo a cabo en materiales fáciles de extraer, además de realizarlo en zonas muy próximas a la construcción. Puede realizarse de manera manual, con pico o pala, tal como se hacía en la antigüedad o recurrir a maquinarias que es como se hace en la actualidad.

- *Cribaje.* Para una selección textural del material, especialmente cuando presente partículas muy gruesas.

- *Pulverización y Amasado.* Para lograr la humedad óptima de compactación y la homogeneidad de la masa. Consiste en mezclar bien la tierra después de ser extraída del suelo. Esta operación debe realizarse si a la tierra se le va a añadir un estabilizante o arena o arcilla.

- *Transporte de la tierra al encofrado.* Esta operación puede influir en la calidad final de la tierra. Al igual que en el transporte y puesta en obra del hormigón, deben evitarse aquellas operaciones que puedan ocasionar la disgregación de la masa (Houben, 1989).

V.4.4 ESTABILIZACION DE LA TIERRA.

V.4.4.1 Introducción.

Agrupamos aquí el conjunto de procedimientos que permiten mejorar las características de este material y hacerlo útil desde el punto de vista constructivo.

La gran sensibilidad de este material al agua, hace necesario la utilización de ciertos tratamientos, que permitan hacerlo más resistente, y por tanto, más durable para la construcción. Estos pueden ser de dos tipos: de naturaleza mecánica, y de tipo físico-químico.

Normalmente, el tratamiento que se lleva a cabo, está en función de la naturaleza

del material base, del tipo de elemento constructivo y de las consideraciones de coste (Guinea Díaz, 1986).

La utilización de estabilizantes es una práctica muy antigua; el hombre ha estudiado sus propiedades, resultado de una serie de métodos derivados de las características que eran capaz de transmitir a la tierra.

El interés despertado a partir de 1920 por la investigación del cemento y el estudio de sus propiedades, ha hecho avanzar notoriamente la investigación de todo lo relacionado con adiciones empleadas para el endurecimiento y estabilización de los materiales de aportación. Este avance ha sido más importante a partir de 1940 y ha continuado hasta la actualidad.

Mejorar los puntos débiles de la tierra con la cual se va a trabajar, implica mejorar la resistencia a: la lluvia, al agua estancada, a la compresión, a la flexión, a la tracción, a la abrasión y a la acción eólica.

La estabilización de la tierra aparece como una necesidad para la construcción del tapial por varias razones;

- porque la experiencia muestra que la tierra "adecuada" es difícil de encontrar,
- porque las condiciones ambientales reducirían ampliamente el período de construcción,
- y para aumentar la durabilidad del elemento constructivo.

Un aspecto importante en la estabilización del suelo, es conocer lo que podríamos llamar propiedades resistentes de éste.

Para la determinación de estas propiedades, se utilizan ensayos "in situ" (SPT, placas de cargas, penetrómetros estáticos y dinámicos) y los ensayos mecánicos-geotécnicos de laboratorio.

La mecánica de suelos ha sido organizada de tal manera que el estudio del equilibrio de un suelo cargado se traslada al instante de la rotura y como mecanismo resistente se establece la resistencia a esfuerzos constantes. Un suelo es apto para ser solicitado por esfuerzos de compresión, pero no por esfuerzos de tracción.

La resistencia de un suelo viene dada por las fuerzas de cohesión y rozamiento:

La cohesión es la fuerza de atracción entre las partículas y se debe a que los granos quedan enlazados entre sí, en virtud de las fuerzas capilares, por unas delgadas capas de agua o membranas, es decir, se debe a una atracción entre las partículas y este efecto es tanto más importante cuanto más juntos se encuentran los granos.

Un suelo cortado sobre sí mismo, posee un coeficiente de fricción que queda determinado por el ángulo de rozamiento interno o fricción, que corresponde aproximadamente al del talud natural.

El rozamiento se debe a la fricción entre las partículas; en el caso de las arcillas, se considera que no tienen superficie para rozar, de ahí que considere un rozamiento nulo a corto plazo, es decir, en condiciones sin drenaje.

A diferencia de la cohesión, que es independiente de la presión vertical que se ejerza sobre el suelo, la fricción, por ejemplo para el caso de una arena, variará en función de la tensión normal que la solicita.

Coulomb estableció la relación entre ambos parámetros para definir la resistencia al corte de un suelo, según la expresión:

$$\tau = C + \sigma \tan \phi$$

En definitiva, lo que interesa definir es la recta que define esta ecuación y a partir de ella la cohesión y el ángulo de rozamiento.

La estabilización, va a afectar esencialmente a las propiedades de la tierra, tales como:

- Volumen de huecos. Reduciendo estos.
- Resistencia mecánica. Mejorando la unión entre las partículas.
- Cambios de volumen. Reduciendo estos.

Esto se puede lograr mediante densificación artificial (compactación) y/o a partir de fenómenos físico- químicos, por la adición de productos (aglomerantes

usualmente), que dan lugar a la formación de nuevos elementos.

Durante la estabilización, la tierra se puede someter a una serie de procesos, como son:

- *Densificación*. Es de carácter mecánico y supone un aumento de la compacidad por reducción del volumen de huecos.

- *Armado*. Consiste en agregar a la tierra un material que le de cohesión, generalmente fibras de naturaleza diversa (vegetales, animales, sintéticas etc.), originándose una estructuración mecánica omnidimensional de la tierra (Cope, 1984). Estos elementos funcionan como un esqueleto interno, que aumentan ligeramente la resistencia mecánica de la tierra, y aseguran una buena resistencia contra la erosión (lluvia y el viento). El inconveniente secundario de la utilización de materias vegetales reside en el riesgo de pudrimiento, y en el que se instalen parásitos en las obras de albañilería (Bardou, 1972).

- *Enlazar*. Introduciendo en la tierra un ligante insoluble que rellene los vacíos. Supone un encadenamiento químico (consolidante).

- *Unir*. Consiste en mejorar las propiedades de la tierra añadiendo diversas sustancias capaces de formar compuestos estables con elementos de la arcilla. Los productos químicos utilizados varían según la composición de la tierra, y es necesario un análisis previo para determinar qué elemento puede reaccionar químicamente con otro. Es de carácter químico y supone la formación de ligantes hidráulicos estables. Así, en algunos casos, la estabilización a base de cal se revela como una estabilización por tratamiento químico más que por cementación. La cal puede reaccionar con los silicatos y aluminatos para formar compuestos puzolánicos estables, disminuyendo la plasticidad de la tierra (Bardou, 1981).

- *Impermeabilizar*. Consiste en rellenar poros, fisuras y microfisuras de un material no sensible al agua. Las partículas de arcilla quedan envueltas por un capa impermeable con el fin de formar unos compuestos estables y volverlos insensibles a la acción de la humedad. Los ligantes bituminosos son los más conocidos para asegurar la impermeabilización; su utilización se remonta a varios milenios antes de Cristo. Se presentan como líquidos pastosos siendo necesario mezclarlos con agua o solventes

volátiles. A pesar de la gran superficie específica de las arcillas, esta estabilización solo requiere cantidades reducidas de emulsión bituminosa. Por otra parte, la tierra conserva su cohesión; en cambio pierde su plasticidad y no queda sujeta a las indeseables variaciones de volumen. Además la lubricación de las partículas de arcilla mejora el proceso de compactación. También se han utilizado otros productos impermeabilizantes en las técnicas tradicionales, como el aceite de coco, la sabia de ciertas plantas de caucho, el pudrimiento de plantas de sabia oleaginosa o latex, las hojas de platano tropical, los aceites vegetales. En la cuenca mediterránea, los residuos del prensado de las aceitunas han sido utilizados como adyuvante -pobre- en la preparación de morteros de tierra.

- *Hidrofugar*. Consiste en actuar sobre el movimiento del agua y vapor por el interior de la masa de tierra, cambiando la naturaleza del agua o reduciendo la sensibilidad de las capas de arcilla, lo que se traduce en tapar poros.

A continuación, pasaremos a describir con detalle las técnicas de estabilización más usuales utilizadas en el proceso constructivo de los tapiales.

V.4.4.2 Estabilización mecánica.

Se realiza mediante compactación, que consiste en lograr una densificación del material, una mayor proximidad e imbricación de sus partículas por diversos procesos que agrupamos bajo el nombre genérico de *compactación*.

Este procedimiento de compactación es un proceso extremadamente antiguo. Sin embargo, el estudio sistemático de la compactación no se inició hasta los comienzos de este siglo, impulsados por la necesidad de perfeccionar las construcciones de presas de tierra.

Cuando el terreno del que disponemos se encuentra en unas condiciones de baja capacidad de carga, es necesario, si queremos utilizarlo como cimentación, mejorarlo, y para ello uno de los procedimientos es compactarlo.

El término compactación se emplea para designar el incremento artificial de densidad por medios mecánicos. Puede realizarse sobre un suelo "in situ" o en un relleno, después de su transporte, como ocurre en la caso de la construcción de un tapial.

La compactación está en íntima relación con la densidad. La densidad mínima es la que se obtiene en un suelo cuando se deja caer libremente desde una altura determinada sin compactación alguna. La densidad, senso estricto, es aquella que tiene un suelo "in situ", es decir, con sus poros. Esta puede ser seca, húmeda o saturada, según que sus poros no tengan agua, estén parcialmente saturados o totalmente saturados, respectivamente. La densidad máxima es la que se alcanza en un suelo, por medios artificiales, para una energía de compactación prefijada.

Si amasamos una porción de suelo con una determinada cantidad de agua y lo compactamos en un molde estandarizado, y con una serie de golpes también normalizados, al igual que demás operaciones y aparataje del proceso, este adquirirá una densidad seca Γ_1 para una humedad de compactación h_1 , siendo:

$$\gamma = \frac{Ps}{Vt}$$

donde Ps peso del suelo seco y Vt volumen total que ocupa.

Si añadimos más agua, llegamos a una humedad h_2 , y nos dará, con la misma energía de compactación, una densidad Γ_2 , mayor a la primera. Si seguimos repitiendo el proceso, iremos obteniendo Γ crecientes hasta un valor de h a partir del cual la densidad seca final, para la misma compactación, empieza a disminuir. La densidad en ese momento es la máxima y la humedad es la óptima para el grado de compactación fijado. En este sentido, los suelos con poca humedad presentan gran resistencia a deformarse, son muy ásperos. Al añadir agua, ésta actúa de lubricante y se favorece la compactación para la misma energía gastada; pero si pasamos el límite que podríamos llamar "lubricante", el agua empieza a sobrar separando las partículas del suelo, aumentando el volumen y por tanto, disminuyendo la densidad seca de éste. Si variamos la energía de compactación, variarán las condiciones, y en el caso de aumentarla obtendríamos una densidad máxima mayor con una humedad óptima menor.

La sistematización del proceso de apisonado se basa hoy en los trabajos de PROCTOR, que fue el primero que utilizó este procedimiento para una presa de tierras en el año 1933. El ensayo Proctor se realiza normalmente en laboratorio, y con él definimos la humedad óptima y densidad máxima de un suelo que posteriormente será compactado en obra.

Hay dos tipos de ensayos Proctor:

- El normal (NLT-107/72)
- El modificado (NLT-108/72)

Las diferencias estriban esencialmente en el volumen del molde y energía de compactación, mayores, en el proctor modificado. En ambos casos, este ensayo tiene por objeto determinar la relación entre la humedad y la densidad seca de un suelo, cuando se compacta en un molde mediante impactos de una maza.

Las diferencias entre el proctor normal y el modificado vienen indicadas en la tabla V-4:

Tabla V-4. Condiciones del ensayo Proctor normal y modificado.

	Proctor Normal	Proctor Modificado
Volumen del Molde	1000 ± 9 cm ³	2320 ± 24 cm ³
Peso de la Maza	2.5 Kg	4.54 Kg
Altura de caída de la Maza	305 mm.	457 mm
Nº de golpes	26	55
Nº de capas	3	5

En la construcción del tapial, y teniendo en cuenta lo anteriormente dicho, influyen la energía de compactación y la textura de la tierra. La energía de compactación va a depender de los útiles empleados y del número de golpes que sufra la tierra durante el proceso de apisonamiento; la compactación resultante no debe ser excesiva, para evitar el fenómeno de laminación del material, ni insuficiente ya que esto puede provocar el desmoronamiento de la fábrica del muro.

La textura va a depender por otra parte, de la distribución granulométrica: así una granulometría uniforme no permite obtener elevadas compactaciones; por contra, con una granulometría muy extendida pueden lograrse curvas de compactación con máximos acentuados.

En el proceso de compactación de la tierra, tienen un papel importante las fuerzas de repulsión o atracción de las arcillas. En estructuras dispersas (contenido en agua elevado), las capas de arcilla están distantes con tendencia a estar paralelas; por el

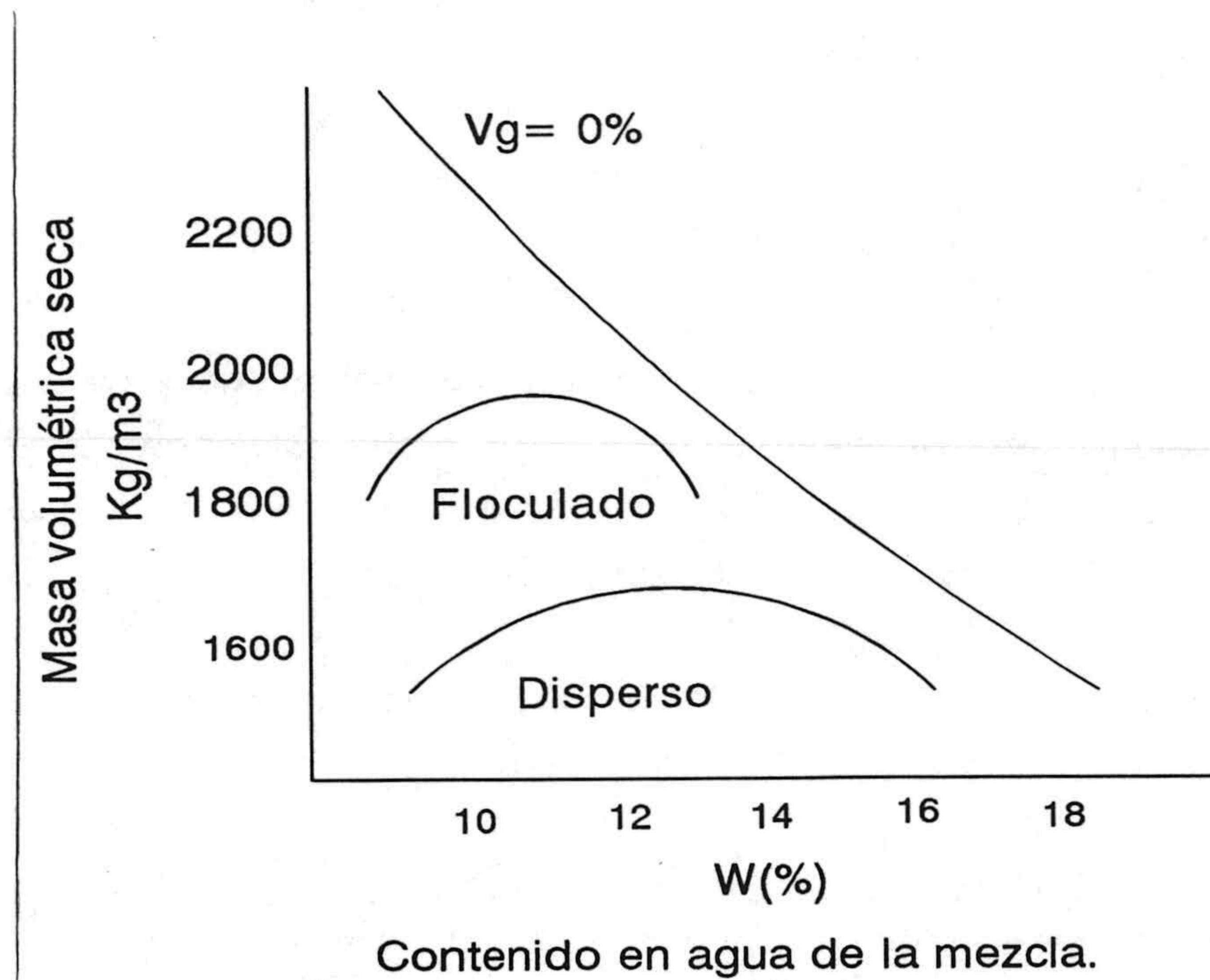


Fig. 5.18. Estado de las arcillas en función del agua.

contrario, en estado flocculado las láminas estarían desorientadas, impidiendo así el máximo grado de compactación (figura 5.18).

En la estabilización mecánica es preferible favorecer las condiciones óptimas de compactación, más que recurrir al empleo de un ligante para la estabilización. De ahí la importancia que supone conseguir las condiciones óptimas de compactación del suelo, para su estabilización (Cope, 1998).

Estudios llevados a cabo por Accetta (1984), indican que el índice de huecos, para un contenido en agua, varía linealmente con el logaritmo de la energía, no existiendo una relación directa entre la densidad máxima Proctor y la resistencia.

La densificación de la tierra supone multiplicar los contactos entre los granos. Para granos esféricos, es posible calcular la proporción relativa de cada fracción de granos de diámetro diferente organizado en un medio lo más denso posible. Para ello puede emplearse la fórmula de Fuller, entre otras.

$$P=100 \cdot \left[\frac{d}{D} \right]^{\frac{1}{n}}$$

P: % de granos de un tamaño dado.

d: tamaño de grano para % P dado.

n: coeficiente de gradación.

El valor de n para granos esféricos es 0.5, mientras que en construcción en tierra n toma un valor comprendido entre 0.20 a 0.25 (Houben & Guillaud, 1989).

La tierra disponible puede ser mejorada por medio de correcciones granulares. Es posible corregir tierras con un contenido demasiado elevado en grava, arena o material fino. Para modificar la textura de una tierra demasiado rica en grava, es suficiente con tamizarla eliminando la fracción demasiado gruesa. La tierra muy rica en finos puede mejorarse eliminando parcialmente éstos por lavado.

Una tierra con textura discontinua presenta una curva granulométrica muy característica. La curva describe una ascensión muy neta para una fracción de grano determinado (la más abundante). En este caso, será necesario tamizar o equilibrar el exceso añadiendo granos de otras fracciones, es decir, corregir la granulometría.

La corrección se realiza normalmente utilizando el módulo granulométrico como parámetro de cálculo, "obligado" a que el módulo de la mezcla (suelo por corregir + la fracción correctiva) sea el mismo que el de la granulometría elegida como referencia, es decir,

$$MG(mezcla) = MG(ref.) = MG(Ar) \frac{Ar(\%)}{100} + MG(corr.) \frac{corr(\%)}{100}$$

donde:

- HG(ref) módulo granulométrico de la granulometría de referencia;
- MG (Ar) módulo del suelo que se pretende corregir;
- MG(corr) módulo de la fracción correctora;
- Ar(%) y Corr(%) las proporciones representativas de ambas fracciones.

La otra ecuación complementaria es:

$$100 = AR(\%) + CORR(\%)$$

V.4.4.3 Estabilización por refuerzo.

El reforzar un suelo, para hacerlo más resistente a la tracción, es algo que se viene haciendo desde antiguo. El adobe, es posiblemente el primer material compuesto reforzado fabricado por el hombre, a modo de como actualmente se hace por el método "refuerzos con fibras distribuidas aleatoriamente".

Llamaremos suelo reforzado al material compuesto, formado por:

- Una matriz de suelo, resistente, a compresión.
- Elementos embebidos en la matriz, que trabajan predominantemente a tracción.

No se consideran suelos reforzados a aquellos mejorados por adiciones o tratamientos, pues en éstos no se pueden separar los papeles mecánicos de la matriz y de la adición (cemento, cal etc.).

V.4.4.4 Estabilización por armado.

La tierra armada se obtiene mediante la asociación de este, con unos elementos lineales que soportan bien los esfuerzos de tracción (las armaduras).

El principio del funcionamiento es simple: Los granos independientes de un macizo de tierra están solidarizados por las armaduras, gracias a los esfuerzos de rozamiento que se desarrollan en el contacto tierra armadura. Resulta de esta asociación un material coherente, económico, flexible y de fácil colocación.

Es esencial asegurar la durabilidad de las armaduras, debiéndose utilizar pletinas de acero galvanizado y evitar medios agresivos.

Esta tierra queda protegida por un revestimiento, la piel, constituido por escamas de hormigón, separadas por juntas que aseguran la flexibilidad indispensable al buen funcionamiento de la tierra armada.

Este procedimiento no es de utilización tradicional.

V.4.4.5 Estabilización por adición de cal.

Esta estabilización se caracteriza por la adición de un aglomerante a la tierra. Los aglomerantes son materiales empleados en la construcción obtenidos artificialmente mediante procesos de elaboración más o menos complejos, que se utilizan como elementos de unión o ligazón de otros materiales. Son capaces de sufrir un ciclo de transformación (figura 5.19) durante el proceso de fabricación y utilización: en una fase inicial purulenta, para facilitar su transporte e hidratación posterior; una fase plástica, tras su amasado con agua que permite su trabajabilidad y puesta en obra, y una fase final de endurecimiento, con pérdida de agua y carbonatación, reproduciendo así la génesis de una roca geológica de tipo sedimentario (Garate, 1993).

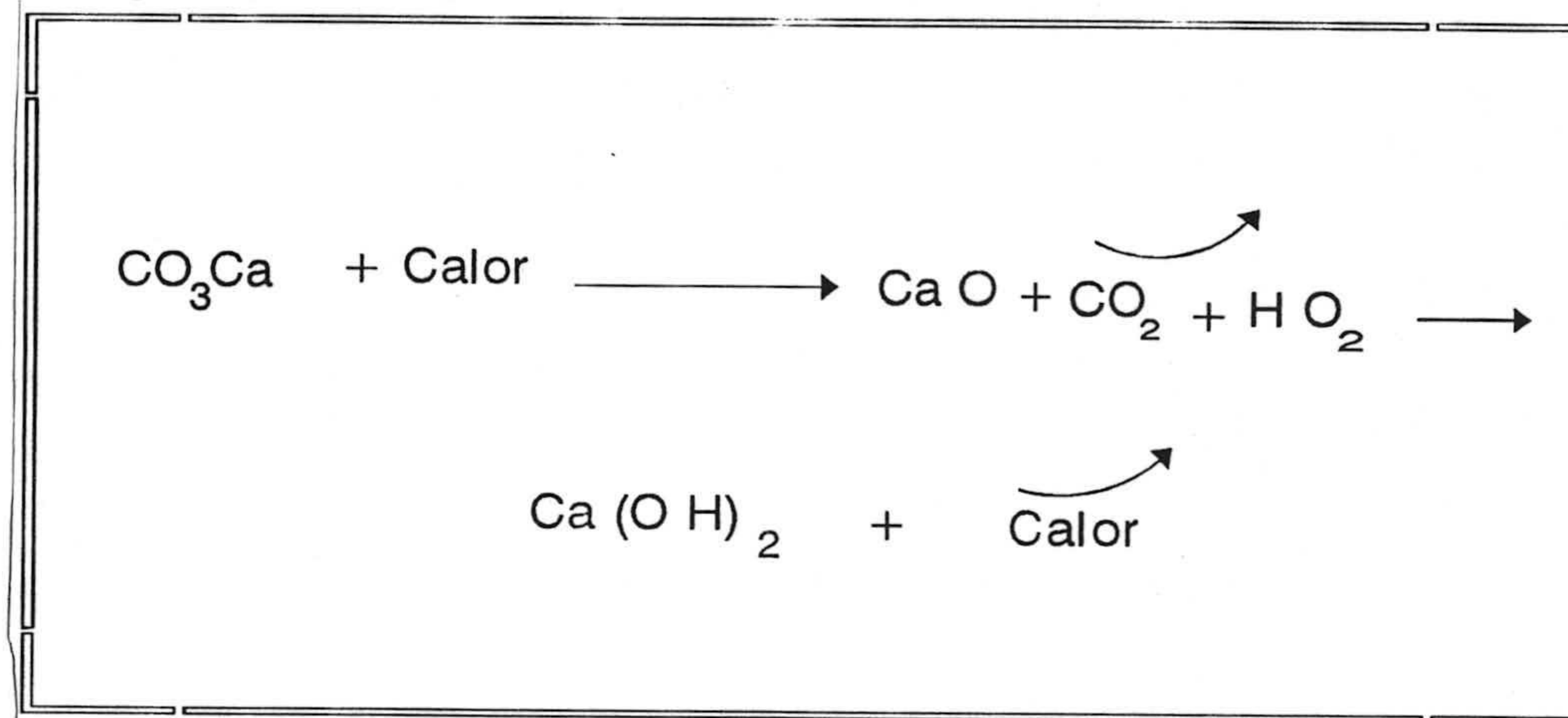


Fig. 5.19. Proceso de obtención de la cal.

La cal es conocida como material pictórico y de enlucido desde el neolítico, aunque su uso en acabado de las fábricas sea habitual a partir de las civilizaciones micénicas y minoicas; su utilización sistemática como elemento ligante de fábricas no ocurrirá hasta época helénica. Su gran difusión vendrá de mano de los arquitectos e ingenieros romanos al utilizarla en sus grandes creaciones arquitectónicas y estructurales, dando lugar a que uso se extendiera por toda el área mediterránea, constituyéndose la base de la arquitectura Occidental. En la actualidad en EEUU, ha sido el aglomerante más utilizado para la estabilización de suelos,

La cal viva es un producto blanco, sólido, con un elevado punto de fusión. Tiene avidez por el agua, transformándose en hidróxido cálcico (cal apagada), con desprendimiento de calor y aumento considerable del volumen.

Se trata de un producto que procede de la calcinación de rocas calizas. Como consecuencia de las variaciones de composición de la roca de partida, pueden obtenerse una serie de cales, que varían desde cales muy puras, altamente cálcicas, hasta las altamente hidráulicas, con contenidos en óxidos de calcio de un 50% y aún menos.

Se pueden diferenciar, por tanto, dos tipos de cales: la cal aérea y la cal hidráulica. La primera está producida a partir de calizas más o menos puras, de las que, mediante la operación de cocción, se obtiene la cal viva, la cual está compuesta, fundamentalmente, por óxido de calcio. Cuando se presenta en forma de terrones, como es lo frecuente, recibe el nombre de cal en terrones. Al añadir a la cal viva agua, se obtiene la cal apagada, compuesta principalmente de hidróxido cálcico. Cuando el agua añadida ha sido la indispensable para formar hidróxido se obtiene un producto pulverulento, el cual recibe el nombre de cal en polvo. Si después de formada la cal en polvo se ha seguido añadiendo agua, se obtiene la cal en pasta.

Cuando la cal aérea tiene, como máximo, un 5% en óxido magnésico, se llama cal grasa. Si contiene más de un 5% de óxido de magnesio, toma el nombre de cal dolomítica, cal gris, cal árida o magra.

Gomá, (1979) al hablarnos de las cales hidráulicas nos dice:

«Entendemos por cal hidráulica, una mezcla calcinada de caliza y arcilla en la que el contenido de arcilla oscila entre un 10 y un 20%. La mezcla puede ser artificial o natural. En este último se puede partir de un material sedimentario o metamórfico que posee una composición de óxidos SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , equivalente a esas proporciones de arcilla y que se presentan en un estado microcristalino homogéneo.

La calcinación debe realizarse a una temperatura comprendida entre 1100 y 1250 °C, es decir, antes de la formación del primer líquido y, por tanto, antes de alcanzar la llamada temperatura de clinkerización para una mezcla de esa composición.

Vicat atribuyó en 1918 la hidraulicidad de las cales a la presencia de arcilla en la cal, ya sea en la propia roca sedimentaria diseminada íntimamente o bien añadida artificialmente, así como que la sílice es el elemento esencial para producir la hidraulicidad. Boreo indica que anteriormente a Vicat, en "Annales des mines de France", en 1913, aparece una comunicación de Descortils en la que atribulle las

propiedades hidráulicas de las cales a la combinación que tiene lugar entre la sílice y la cal en la calcinación y que el producto de esa calcinación es soluble en los ácidos».

Proceso de obtención de la cal.

La forma de fabricar cales puede haber variado en cuanto a los métodos de producción, tipos de hornos etc., pero no ha variado en su fundamento. Seguramente una de las causas que más influye en la calidad de la cal es el proceso de apagado. Es recomendado por los tratadistas, que el proceso de apagado dure al menos varios meses, sin que se sepa bien la razón físico-química de tal exigencia. El apagado bien realizado de la cal garantiza que la totalidad del óxido de calcio pase a porlandita y además si este es lento dará lugar a la formación de cristales más grandes de hidróxido cálcico.

El proceso de obtención de la cal se lleva a cabo en varias etapas:

Calcinación. La obtención de la cal se realiza por calcinación de la piedra caliza pura, que puede ser dura y densa y a veces porosa. Las primeras se utilizan para realizar solo muros y la segunda revocos (Garate, 1993)

Durante el proceso de obtención de la cal, en función de la temperatura, se van a ir formando una serie de productos:

- Entre 900°C - 1000°C el carbonato cálcico se transforma en óxido de calcio con el desprendimiento de CO_2 y agua, ya a 110°C se pierde el agua higroscópica, de 110 a 700°C se descomponen los silicatos (arcillas) y 700-900°C se descomponen los carbonatos. A partir de los 1000°C reaccionan los productos resultantes: CaO , SiO_2 y Al_2O_3 dando lugar a la cal hidráulica.

Hidratación (apagado). Esto supone un aumento considerable de volumen (2 ó 3 veces). Tiene lugar regando la cal viva dentro de un recipiente y batiendo hasta que se deshaga totalmente. La cal esta bien apagada, si al realizar una pasta con la cal y el agua, ésta se agarra a la paleta que usamos para ello, si por el contrario aparecen piedrecitas la cal no estará bien apagada. Si está muy fluida indicaría que le hemos añadido demasiada agua a la pasta. Los recipientes o fosas empleadas para apagar la cal deben ser de gran tamaño, pues en el proceso de apagado se produce un incremento en el volume (Garate, 1992).

La primer reacción del hidrólisis del CaO cuando se mezcla con el agua no conduce a una acción aglomerante, debido a que este óxido tiene demasiada energía libre y da lugar a una reacción demasiado rápida e incluso violenta. El proceso resulta "expansivo" o destructivo, en lugar de aglomerante. El óxido de calcio, cuando permanece en estado "libre" produce espontáneamente esta reacción, la cual es el origen de las "grietas centrífugas" que eventualmente se pueden producir en cualquiera de los aglomerantes cálcicos. Cuando existen nódulos aislados de CaO procedentes de restos de carbonato cálcico, se manifiesta también este fenómeno expansivo, el cual aparece en forma de "desconchamientos", cuando estos nódulos están próximos a la superficie, y en forma de grietas cuando se hayan a mayor profundidad (Goma, 1979)

Existen varias formas de apagado:

Al aire. La cal expuesta al aire absorbe la humedad de éste y llega a apagarse, pulverizándose por efecto del aumento del volumen. Este proceso es lento, y tiene el riesgo de que, a continuación del apagado, se produzca el proceso de recarbonatación por reacción con el CO₂ de la atmósfera. No obstante, a veces se emplea este sistema cuando se trata de conservar por algún tiempo la cal antes de utilizarla; se prepara en montones grandes, y la reacción con el anhídrido carbónico solo tiene lugar en la superficie, actuando como una película fina que protege todo el material de interior.

Por fusión. También se le llama sistema ordinario. El procedimiento consiste en poner la cal viva sobre un recipiente de apagado con el agua conveniente y se agita hasta obtener una pasta. Cuando la cal es hidráulica no debe de apagarse más que la de uso diario.

El fenómeno llamado de cocción, es el que se produce por una adición insuficiente de agua, o más probablemente, por un batido inadecuado, de forma que algunas parte de la cal no se han hidratado, produciéndose una gran elevación de la temperatura. Por contra, la inundación es debida a una excesiva cantidad de agua, que retarda la hidratación por mantener la temperatura demasiado baja. Ambos fenómenos producen perturbaciones debidas a una hidratación parcial no expansiva.

Sistema de aspersión. Se realiza con regadera sobre la cal viva que se ha depositado sobre el terreno en capas de 0.10 a 0.15 m. de espesor o en pequeños cubos de 30 cm. cubiertos de arena y posteriormente se produce el regadío. Se obtiene así una

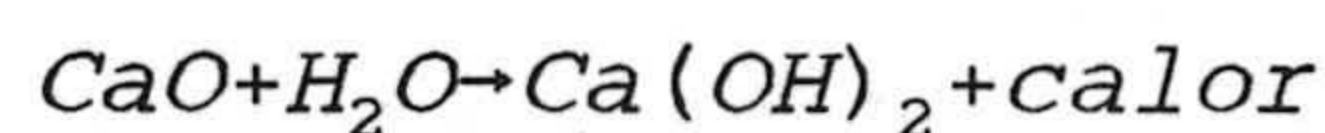
cal muy fina en polvo.

3. *Por inmersión.* Se procura que la cal sea reciente, de la calera se lleva al obradós, bien protegida de la humedad del aire y de la lluvia, se baten con azuela los terrones. Se vierte en un cesto de mimbre, que se sumerge unos segundos en agua hasta que comience a hervir la superficie. Tras sacarla del agua y dejarla escurrir se vierte en suelo limpio o en toneles para conservar mejor el calor.

En el proceso de apagado de la cal según se recoge en el tratado «Cemento y Cales» de Mazzochi, (1946) aconseja que el apagado y formación de la pasta de cal debe hacerse por lo menos con tres meses de antelación, si se quiere impedir que se desarrollen después sopladuras procedentes de partículas imperfectamente apagadas (caliches). Esta es la causa por la que los romanos prescribieran que la pasta se tuviera almacenada durante tres años (Garate, 1993).

El apagado de la cal hidráulica es un fenómeno más complejo debido a los silicatos y aluminatos que contiene. Estas sales, silicatos y aluminatos, son las que proporcionan a la cal su carácter hidráulico. Pero los silicatos se alteran rápidamente con el agua en estado líquido o vapor, por debajo de los 120 °C; y los aluminatos por debajo de los 140°C. Entonces lo que hay que conseguir que la temperatura no baje de este último límite, porque de lo contrario, el producto final perdería sus propiedades hidráulicas.

En este proceso el óxido de calcio se combina con el agua dando lugar al hidróxido de calcio, desprendiendo calor y provocando un aumento de volumen. La reacción viene definida de la siguiente manera:



de lo que se deduce que 56 partes de cal + 18 partes de agua producen 47 partes de cal apagada en peso. Como hemos dicho, en teoría, 56 partes, en peso, de cal viva, requiere para su apagado 18 partes de agua, es decir, un 32.1%. En la práctica esta cantidad se ve reducida debido a las impurezas que contiene la cal. El volumen final es un 250 a 300 % del primitivo. Esto ocurre en las cales puras, pues el contenido en óxido de magnesio hace disminuir este aumento.

La velocidad de hidratación, en general, es muy rápida (unos pocos minutos), si está calcinada a la temperatura conveniente, si se presenta en granos pequeños ($\phi < 2.5$ mm.) y si la materia prima era sólo Ca CO_3 .

La velocidad de hidratación depende de los siguientes factores (Arredondo, 1983):

a) De las condiciones físicas de la cal viva. Esto es natural, puesto que la reacción de hidratación tiene lugar entre un fluido (agua líquida o vapor) y un sólido. Por esta razón solo se realizará en la superficie expuesta, partiendo de la base de que se trata de un material muy poroso y finamente molido, este se hidratará rápidamente.

b) De la composición química de la cal viva. cuanto más pura sea la cal viva, mayor será la velocidad de hidratación. La hidratación de una cal que contenga una importante cantidad en óxido de magnesio, es más lenta.

c) De la temperatura de cocción de la caliza. Lo mismo que los fragmentos poco cocidos que los sobrecocidos, tienen poca capacidad para hidratarse. Desgraciadamente, la cal producida en hornos comerciales, sobre todo los antiguos, es muy irregular.

La cal apagada está constituida por pequeñas láminas hexagonales de hidróxido cálcico (porlandita) de $0.080 \mu\text{m}$. Presentan una alta superficie específica ($20 \text{ m}^2/\text{g}$), retienen gran proporción de agua (50-100%) y es muy plástica.

La rotura de los granos por el aumento de volumen favorece la hidratación en las partes más internas. La velocidad de hidratación se ve disminuida por:

- la calcinación a menor temperatura (no es reactiva);
- elevada temperatura (se produce cierta vitrificación);
- presencia de dolomia (son más lentas hidratándose);

La baja velocidad de hidratación supone grandes inconvenientes para su utilización. Su contenido en CO_2 nos indica la cantidad de caliza que ha podido quedar sin calcinar, y en definitiva, el índice de pureza. Un mal apagado puede producir inestabilidad de volumen, una vez endurecido (rotura), como caliches y cal libre.

Carbonatación. Este proceso es lento (tarda años en producirse en un elemento constructivo) debido a:

- La poca disponibilidad de CO₂ en la atmósfera.
- Porque las capas carbonatadas dificultan la penetración del CO₂ al interior.
- La elevada humedad dificulta el proceso; la máxima velocidad se da en torno al 50% HR.

El proceso de carbonatación lleva consigo procesos de retracción que pueden generar fisuras, y esto abre camino para la carbonatación de las partes más lentas.

Propiedades de la cal.

Fraguado y endurecimiento:

- En la cal apagada se produce un endurecimiento inicial por secado, reversible, siendo bastante soluble en agua (1.7 g/l) y la carbonatación es muy lenta.

- En la cal viva.

a) Inicialmente se forman cristales de porlandita directamente en la hidratación del óxido de calcio, uniéndose entre sí formando con rapidez un germen cristalino resistente. El autocalentamiento favorece la velocidad del proceso, pero hay que evitar un calentamiento excesivo, porque produciría retracciones. La mayor parte de la hidratación tiene que producirse antes de endurecer. La cal debe estar muy finamente molida. Es un proceso muy delicado y con riesgo cuando se utiliza en elementos constructivos.

b) El endurecimiento se debe exclusivamente a carbonatación.

Efecto sobre otros materiales:

- Confieren gran plasticidad a las pastas.
- Gran capacidad de retención de agua.
- Reacciona con sustancias silíceas de baja estabilidad (reacción puzolánica), esta reacción se ve favorecida con la elevación de la temperatura. Cabe destacar su

efecto sobre las arcillas: sustituye los iones alcalinos por Ca (facilita la floculación). En estabilización de suelos puede emplearse cal viva ($< 10\%$), porque incrementa la reactividad, no perjudica el aumento de volumen y contribuye a secar el suelo.

- Protege al acero contra la corrosión. Ataca al Al y al Pb.
- Compatible con el cemento portland.

Influencia de las impurezas. La presencia de impurezas (arcillas) en las calizas permitían obtener cales:

- más rápidas en fraguar y endurecer,
- más durables en presencia de humedad (cales hidráulicas).

La cal grasa apagada por fusión se conserva indefinidamente blanda si está al abrigo del aire y del agua, se sitúan en tanques o foso impermeables y como es recomendación de Orme, si se recubre con arena puede conservarse siglos. Las cales apagadas en polvo pueden conservarse mejor, si son grasas se comprime el polvo y se tapan con latas, esteras y tablas o mejor enbalarlas en bidones bien rejuntados. La cal viva no puede almacenarse durante mucho tiempo por que se apaga fácilmente al aire (Garate, 1993).

Las cales hidráulicas requieren varias precauciones para su conservación. Deben conservarse en almacenes muy secos y sin contacto alguno con el aire.

Normalización de la cal.

Sin embargo hasta tiempos recientes, y de la mano de las investigaciones llevadas a cabo en la mejora de terrenos con distinto aglomerante, no existía reglamento alguno en cuanto al uso de la cal como material de mejora y/o estabilización de suelos.

Todo esto demanda la existencia de documentos de referencia que definan con precisión las características que se exigen a los materiales, así como los procedimientos para determinar el valor de las mismas; documentos que deben estar disponibles para poder ser aplicados en todo el ámbito donde se extienda la actividad constructiva. A estos documentos de referencia se le conocen como normas y, gracias a ellas, pueden unificarse criterios ya que proporcionan un lenguaje común con el que es posible un

adecuado entendimiento entre todas las partes implicadas en la actividad constructiva.

Para el caso de cal como material empleado en construcción las normas UNE exigen para su empleo:

NORMAS UNE 80-502-92: Cales vivas hidratadas utilizadas en la estabilización de suelos.

«1. Objetos y campo de aplicación.

Esta Norma tiene por objeto establecer la definición, clasificación y características de las cales tanto en el alto contenido en calcio como las dolomíticas que se emplean para la estabilización de suelos (Las cales mencionadas actúan sobre los suelos arcillosos, transformándose en suelos útiles y adecuados para la construcción de carreteras y otros pavimentos. En la mayoría de los casos la cal favorece la aglomeración de las partículas finas de arcilla con otras más gruesas con lo que pueden ser utilizados como suelos estables mejorados por la acción de la cal. A más largo plazo el suelo endurece por cementación debido a la reacción puzolánica Suelo-Cal), asimismo de dan recomendaciones para su utilización.

Esta norma no es aplicable a los subproductos de fabricación ni a los fangos procedentes de tratamientos de residuos con cal.

3. Definiciones.

Las cales para estabilización de suelos son conglomerantes cuyos principales constituyentes, dados por el análisis químico, son los óxidos e hidróxidos de calcio, magnesio, silicio, aluminio, hierro. A los efectos de esta norma se aplican las siguientes definiciones y términos.

3.1 Cal: Término general que incluye formas físicas y químicas de diferentes variedades en que pueden presentarse el óxido e hidróxido de calcio y de magnesio.

3.1.1 Cales aéreas: Cales que se componen principalmente de óxidos e hidróxidos de calcio, los cuales endurecen lentamente al aire por la acción del CO₂ atmosférico.

Generalmente no endurecen por el agua ya que no tienen propiedades hidráulicas.

3.1.1.1 *Cales vivas:* Cales que se componen principalmente de óxidos de calcio y óxidos de magnesio, este último en cantidades no superiores al 5%, producidas por calcinación de calizas. Dan reacciones exotérmicas cuando se ponen en contacto con el agua.

Según su granulometría se clasifican:

- cales vivas en terrón;
- cales vivas granulares;
- cales vivas molidas;
- cales vivas molidas finas o micronizadas.

3.1.1.2 *cales apagadas o hidratadas.* Cales aéreas que se componen principalmente de hidróxido de calcio y óxido de magnesio., que resultan de la hidratación controlada de cales vivas.

No dan reacción exotérmica cuando se ponen en contacto con el agua.

Se producen en forma de polvo o pasta.

3.1.1.3 cales dolomíticas: Cales aéreas que se componen principalmente de óxido de calcio y óxido de magnesio. El contenido en óxido de magnesio será superior al 5% de muestra calcinada.

3.1.1.4 cales dolomíticas hidratadas: Cales apagadas que se componen principalmente de hidróxido de calcio y hidróxido de magnesio y óxido de magnesio.

Según su grado de hidratación se clasifican en:

- Cales dolomíticas semihidratadas. Cales dolomíticas hidratadas que se componen principalmente de hidróxido de calcio y óxido de magnesio.

- Cales dolomíticas completamente hidratadas. Cales dolomíticas que se componen principalmente de hidróxido de calcio e hidróxido de magnesio.

4. Clasificación

Las cales empleadas para la estabilización de suelos pueden ser de los dos tipos siguientes, definidos por las características específicas en el capítulo 5.

4.1 Cal tipo I. Para usar preferentemente en premezclar en planta. Cal viva micronizada y cal apagada.

4.2 Cal tipo II. Para usar preferentemente en mezclas in situ. Cal viva granular (<6.3 mm.)

5. Características generales.

5.1 Composición química.

Tabla 1.

Tipo de cal	Contenido en óxidos de calcio y magnesio (CaO+MgO)(1)	Contenido en CO ₂ (2)
cal tipo I	90% mínimo	5% máximo
cal tipo II	90% mínimo	5% máximo

(1) sobre muestra calcinada.

(2) en el punto de fabricación

5.2 Finura de molido.

Al tamizar, los rechazos acumulados máximos, referidos al peso seco, sobre los tamices que se indican, serán los que se señalan en la tabla 2 .

Tabla 2.

Residuos referidos al peso en seco, en los tamices 6.3 mm. y 200 μ m(UNE 7-050/2		
tipo de cal	Tamiz 6.3 mm.	tamiz 200 μ m
Cal tipo I	-	10% máximo
Cal tipo II	0.0% máximo	-

5.3 Reactividad.

se analizará la reactividad en la hidratación de las cales vivas o dolomíticas midiendo el aumento de temperatura que tiene lugar en la reacción con agua, en función del tiempo de reacción (curva de hidratación).

La reactividad al agua será la indicada en la tabla 3».

Tabla 3

Tipo de cal I y II	Temperatura (T.máx.°C)	Tiempo en minutos.
Cal viva(MgO <5%)	60° mínimo	15 min. máx.
Cal dolomítica (Mg >5%)	50° mínimo	15 min. máx.

Dentro de la normativa española, contamos con los Pliegos de Recepción, que se han emitido con el objeto de definir las prescripciones técnicas generales que deben satisfacer algunos materiales para su recepción en obras de construcción y, a su vez, indicar los métodos de ensayo para comprobarlas. Son como normas UNE de prescripciones, pero con la diferencia de que estos pliegos deben aplicarse con carácter obligatorio.

Mención especial merece el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras y puentes, PG-4/88. Su empleo es esencial en materiales de aportación para carreteras, y es por ello que nos referiremos al PG-4 como documento base y como normativa dentro de las normas UNE.

PG-3/75 200 CAL AEREA

200.1 Definición y clasificación.

Cal aérea es el conglomerante constituido fundamentalmente por óxido cálcico (cal viva) o hidróxido de calcio (cal apagada), obtenido por calcinación de materiales calizos, y que tiene la propiedad de endurecer únicamente al aire, después de amasado con agua, por la acción de anhídrido carbónico.

Cuando su contenido en óxido de magnesio es mayor del cinco por ciento (5%) sobre muestras calcinadas se le denomina cal aérea dolomítica.

Las cales aéreas pueden ser de los dos tipos siguientes:

- **Cal aérea tipo I.** Para utilizar preferentemente en revocos, blanqueo, acabados y para morteros de albañilería.

- **Cal aérea tipo II.** Únicamente para trabajos toscos y morteros para sentar fábricas.

El pliego de Prescripciones Técnicas particulares Técnicas particulares definirá el tipo de cal aérea que deberá utilizarse en cada caso.

200.2 Composición química.

Sobre material calcinado, el contenido de óxidos cálcicos y magnésicos será, como mínimo:

- **Cal aérea tipo I.** Noventa por ciento (90%).

- **Cal aérea tipo II.** Setenta por ciento (70%).

El contenido en anhídrido carbónico será inferior al cinco por ciento (5%) para los dos tipos de cales aéreas.

Los análisis químicos de las cales aéreas se efectuarán de acuerdo con las normas UNE 7095, UNE 7097, UNE 7098 y UNE 7099.

200.3 Finura de molido.

Al tamizar por vía húmeda, después de apagada la cal, los rechazos acumulados máximos referidos al peso seco, sobre los tamices que se indican, serán los que señalan a continuación.

TIPO DE CAL	TAMIZ 0.20 UNE	TAMIZ 0.080 UNE
Cal tipo I		
Cal tipo II		

La finura de molido se determinará de acuerdo con la norma UNE 7187.

200.4 Envasado.

El producto será expedido en envases adecuados para que no sufran alteración. En el envase constará el tipo y peso de la cal contenida.

Deberá rechazarse si, en el momento de abrir el recipiente que lo contenga, aparece en estado grumoso o aglomerado.

200.5 Medición y abono.

La medición y abono de este material se realizará de acuerdo con lo indicado en la unidad de obra de que forma parte».

Estabilización de los suelos con cal.

La cal, como estabilizante, ha sido uno de los materiales más empleados desde la antigüedad. Se sabe que hace más de 5000 años se emplearon mezcla de cal y arcilla en la construcción de las pirámides y, posteriormente, los romanos la emplearon en el subbase de algunas carreteras, concretamente en la famosa vía Apia.

La estabilización con cal lleva consigo cinco mecanismos esenciales, según Houben y Guillaud, (1989):

1. *Absorción de agua:* En presencia de tierra húmeda, la cal viva sufre una reacción de hidratación que acompaña un importante desgaste de calor 300 Kcal/ Kg cal.

2. *Cambio catiónico:* Cuando se añade a la cal tierra humificada, ésta se satura de iones calcio. Aparece entonces un fenómeno de cambio de cationes. Los iones calcio se sustituyen por Mg, Na, K e H dependiendo de la calidad de los cationes presentes en la capacidad de cambio de la tierra.

3. *Floculación y aglomeración:* Debido al cambio de cationes y al aumento de cantidad de electrolitos en el agua intersticial, las partículas de tierra floculan y se aglomeran, hay un aumento de los agregados de tamaño finos. La textura y estructura cambian. Esto es debido al fenómeno de cambio de bases (los iones de cal son absorbidos, hasta un cierto límite, punto de fijación, por la estructura de las arcillas), con otras partículas más gruesas. Esta reacción no suele durar más de dos horas.

El exceso de cal que puede quedar retenida en el suelo después de pasar el punto de fijación, no queda en forma iónica (en el fenómeno físico-químico se cree que la cal se disocia Ca^{++} y $(\text{OH})^-$, los iones hidróxido crean un alto PH que favorece la sustitución de iones calcio por otros existentes en el medio), sino molecular y actúa sobre todo en el proceso de cementación o endurecimiento reaccionando químicamente con la sílice y alúmina libre del suelo, formando silicatos y aluminatos de calcio de forma análoga a los formados en el fraguado del cemento. Esta reacción es más lenta y puede durar un año o más.

Estas reacciones entre la cal y las arcillas, y la formación de los silicatos influyen directamente en la resistencia por cementación.

4. *Carbonatación*: La cal añadida a la tierra reacciona con el CO_2 del aire y forma unos cementos carbonatados mediocres. Esta reacción consume parte de la cal disponible para las reacciones puzolánicas.

El carbonato cálcico, formado en una última fase de carbonatación, al entrar el óxido de calcio en contacto con el dióxido de carbono de la atmósfera; también es cementante pero da resistencias mucho más débiles que los silicatos.

En el proceso de endurecimiento influyen dos factores fundamentalmente:

- *La temperatura de curado*. Tiene gran influencia en las mezclas suelo - cal. Para buenas resistencias se recomienda que la construcción se haga a principio de verano para que el curado goce de alta temperatura. No obstante, la cementación de las partículas de un suelo por cal tienen también lugar a temperaturas por debajo de los 0°C .

- *La naturaleza de la cal*. Las dolomíticas producen, por lo general, mayores resistencias que las calcíticas para bajas temperaturas de curado

5. *Reacciones puzolánicas*: La cal debe ser añadida a la tierra en cantidades suficiente, con el fin de producir y mantener el Ph elevado necesario en la disolución de los minerales de la arcilla, y por un período suficiente que permita una reacción de estabilización efectiva.

La estabilización de suelos con cal se obtiene por mezcla íntima de suelo, cal

aérea (viva o apagada) y agua. Los suelos más apropiados para estabilizar con cal son los de granulometría fina, de plasticidad apreciable.

Por tanto, y teniendo en cuenta lo anteriormente dicho, al mezclar el suelo con la cal se produce una reacción rápida de floculación o intercambio iónico, seguida de otra muy lenta de tipo puzolánico, con formación de nuevos productos químicos. La sílice y la alúmina de las partículas del suelo se combinan con la cal en presencia de agua para formar silicatos y aluminatos cálcicos insolubles.

Uno de los efectos más importantes de la cal en el suelo es el de cambiar apreciablemente su plasticidad. Con suelos de baja plasticidad ($IP < 15$), aumenta tanto el LL como el LP y también, muy ligeramente, su IP. En cambio, en suelos de plasticidad media y elevada ($IP > 15$) disminuye el IP. También aumenta la humedad óptima de compactación, lo que permite densificar suelos de elevada humedad natural.

Otra de las características de las estabilizaciones con cal es que su densidad máxima Proctor es inferior a la del suelo de partida. Sin embargo, esto no tiene ninguna importancia, dado que su resistencia a esfuerzo cortante es muy superior y aumenta con el porcentaje de cal añadida, el tiempo transcurrido, la temperatura de curado y la disgregación conseguida en el suelo durante la ejecución.

Con la adición de cal el suelo se vuelve más friable y granular. El aumento del límite plástico y de la humedad óptima de compactación permiten su puesta en obra con mayor facilidad (Kraemer & del Val, 1990).

Entre las aplicaciones de la cal, dentro de la construcción, podemos destacar su empleo en morteros para la fabricación del tapial. La cal empleadas para estabilizar estas construcciones, se distribuyen en la fábrica del muro de diferentes formas en función de la tipología del tapial empleado. Generalmente entra a formar parte del aglomerante en morteros y hormigones tanto de interior de muro como de exterior. El relleno del encofrado se puede producir de forma diversa, aunque su aspecto exterior parezca semejante (Bazzano, 1993).

VI. METODOLOGIA

VI. METODOLOGÍA.

La investigación llevada a cabo sobre el Patrimonio Histórico construido en tierra, es muy escasa, y pese al impulso que ha experimentado en los últimos tiempos todo lo relacionado con la Restauración, nos encontramos con una falta de metodología preestablecida para acometer su estudio.

Partiendo de la información que se ha podido extraer de fuentes escritas, y las observaciones realizadas sobre el Conjunto Monumental, hemos seguido, para abordar su estudio, una metodología de campo y otra de laboratorio, que ha ido encaminada por una parte, a caracterizar el material desde el punto de vista constructivo y por otra, abordar todos los aspectos relativos a la tecnología de fabricación así como los procesos de degradación que se están produciendo, con la finalidad de poder aportar aspectos y conocimientos que supongan un punto de partida importante en todo lo concerniente a la conservación y restauración de este complejo monumental.

Se han empleado las técnicas geológicas para caracterizar el material y otras técnicas fundamentales de investigación en ciencias de los materiales.

VI.1 METODOLOGIA DE CAMPO.

VI.1.1 DATOS PREVIOS.

La metodología de campo se ha llevado a cabo en dos fases: en una primera instancia se procedió a la localización e identificación de los restos dispersos que aún se conservan, de las Murallas. Una vez situados en un mapa a escala 1:2000 (hojas 1009-16-13 y 1009-169), se dividió el sector en tramos para facilitar su estudio; posteriormente se llevó a cabo el emplazamiento geológico de la zona donde se sitúan las murallas, y la localización o localizaciones de la o las canteras de extracción del material usado en estas construcciones.

VI.1.2 TOMA DE MUESTRAS.

Tras unos estudios y previas observaciones sobre el propio edificio y la zona de emplazamiento, se procedió a la toma de muestras. En el proceso se diferenció entre elementos constructivos y los yacimientos o canteras.

En Murallas:

Para la extracción de muestras fue preciso un permiso de la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía. Esta fase ha estado precedida de tres etapas previas:

- Una observación detallada del monumento, lo que nos permitió decidir lugares de muestreo de fácil acceso, donde el impacto estético fuera mínimo o nulo.
- Recopilación de documentación bibliográfica referente a la historia del monumento, esto ha permitido emplazar los distintos tramos y muestras según su época de construcción.
- Y un estudio previo sobre la forma y las distintas variedades que hemos observado.

Teniendo en cuenta estas premisas hemos diferenciado en las extracciones:

- * muestras de interior de muro,
- * muestras de revestimiento interior,
- * y muestras de revestimiento superficial o pátinas.

Las muestras de revestimientos exteriores son morteros y/u "hormigones" de cal. Su extracción se ha realizado de forma cuidadosa, con el fin de que estuviesen lo menos alterada posible y este cuidado se ha extremado para el caso de los revestimientos superficiales o pátinas. Este revestimiento o pátina superficial se presenta como un enlucido fino que da un aspecto suave a la superficie de las murallas, de todas formas no siempre aparece.

La extracción del material en general ha estado condicionada por una serie de factores: la imposibilidad de poder acceder a determinados puntos, la reparación y restauración en algunos casos con ladrillos y revocos que han escondido la fábrica original del muro, y la inexistencia del mismo por demolición.

Las extracciones se han realizado de acuerdo con la norma NLT-101/72 (norma de ensayo del laboratorio de transporte y mecánica de suelo "J.L Escario"). Se buscaron zonas de las murallas que presentaran desperfectos (pérdida de material y

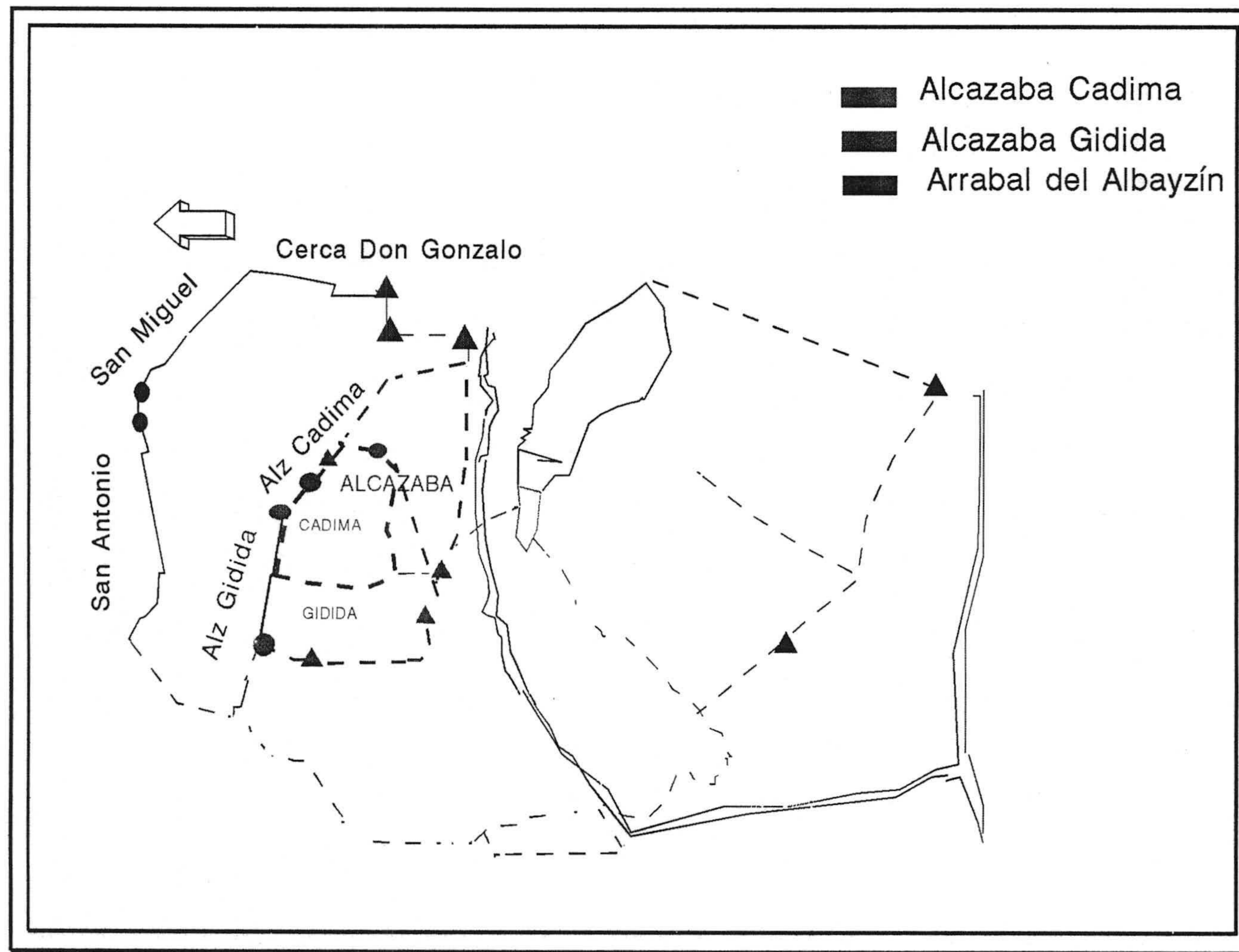


Fig. 6.1. Sectores de las murallas diferenciados para su estudio.

UNIVERSIDAD DE GRANADA
 4 JUL. 1995
 COMISION DE DOCTORADO

desprendimientos), de manera que fuese posible acceder a distintas profundidades y tomar muestras del interior del muro. Las observaciones llevadas a cabo en estas zonas han sido de gran importancia, para poder establecer las tipologías constructiva empleada en los distintos recintos amurallados.

Por último, hemos de indicar que las muestras seleccionadas ha llegado a incumplir en algunos casos, la normativa, en cuanto a disponer de la cantidad de muestra requerida, si bien se extremaron las precauciones para que las muestras fuesen lo más representativas posibles.

En cantera.

El estudio se ha efectuado en el afloramiento de los materiales de la formación Alhambra, donde está emplazado el barrio del Albayzín.

Los puntos de extracción se han localizado en un mapa escala 1:25000, y la extracción de las muestras en cantera no presentaron problemas en cuanto a la cantidad de material requerido. Se efectuó de acuerdo con la normativa de toma de muestras NLT 101/72.

VI.1.3 DENOMINACION DE LAS MUESTRAS.

Para la identificación las muestras tomadas en las Murallas, se han empleado códigos alfanuméricos, atendiendo a los siguientes criterios:

1. Se realizó una división entre los distintos tramos conservados (figura 6.1).

- * Alcazaba Cadima (Alz C).
- * Alcazaba Gidida (Alz G).
- * Arrabal del Albayzín:
 - Tramo San Antonio (MSA).
 - Tramo San Miguel (MSM).
 - Tramo Cerca Don Gonzalo (MDG).

2. Según el orden de extracción, cada sigla iba acompañada de un número que indica el orden de extracción y, entre paréntesis, la identificación de la muestra.

- Interior de Muro (IM)
- Revestimiento exterior (RE)
- Revestimiento exterior superficial (P)

Identificación de las muestras.

Muestras de la Alcazaba Cadima (Alz. C).

En este caso dada el aspecto de estos materiales, con una granulometría muy grosera, donde se incluyen cantos de gran tamaño, se le ha denominado previamente "hormigones", como es terminología previa va entre comillas.

AlzC-1. "Hormigón" gris con tratamiento superficial. Muestra extraída de un resto de muro aislado situado en las excavaciones arqueológicas del Albayzín. Posiblemente material de principios del siglo XI o incluso anterior. Descripción: Muestra no disgregada de interior de muro, de aspecto muy carbonatado.

AlzC-2. "Hormigón" gris sin tratamiento superficial. Muestra extraída del torreón de la calle Guinea. De principios del siglo XI. Descripción: Muestra disgregada de interior de muro de aspecto limoso.

AlzC-3. "Hormigón" rojizo. Muestra extraída del torreón de la calle Guinea, en una zona próxima a la cimentación de la torre. De principios del siglo XI. Descripción: Muestra no disgregada posiblemente de la zona de cimentación de la torre, de interior de muro sin tratamiento exterior, muy cementada.

AlzC-4. "Hormigón" gris. Muestra extraída de un torreón situado en las proximidades del callejón de San Cecilio. Principios del siglo XI, o incluso anterior.

AlzC-5. "Hormigón" gris. Muestra extraída del torreón de San Juan de los Reyes. Principios del siglo XI. Descripción: Muestra disgregada de interior de muro.

Alcazaba Gidida (Alz. G).

En este grupo hemos incluido el Arco Elvira, que aunque no pertenece a este

recinto sino a la cerca de la Medina, como se ha indicado en el capítulo IV, su construcción tuvo lugar también a lo largo del siglo XI.

AlzG-1. Mortero rojizo. Muestra extraída de la coronación de la torre, del lienzo de muralla situada paralela a la cuesta Alacaba. Muestra de mediados del siglo XI. Descripción: Mortero muy carbonatado, sin pátina superficial y de interior de muro.

AlzG-2. "Hormigón" gris. extraído de la coronación de una torre de la muralla paralela a la cuesta de la Alacaba. De mediados del siglo XI. Descripción: Muestra de revestimiento de la torre, de aspecto carbonatado.

AlzG-3. "Hormigón" gris. extraído de Puerta Elvira. Posiblemente de principios del siglo XI. Descripción: Muestra no disgregada de interior de muro importantes proporciones de cal.

AlzG-4. Muestra disgregada de color marrón. Extraída de uno de los torreones que sostienen el Arco Elvira. Principios del XI. Descripción: Muestra disgregada de interior de muro con poco o ningún aporte de cal.

AlzG-5. "Hormigón" gris, sin pátina superficial. Muestra extraída de Puerta Elvira. Principios del XI. Descripción: Muestra no disgregada de revestimiento de la torre.

AlzG-6. Muestra disgregada de color gris. Extraída de la muralla que se encuentra en la cuesta del Perro. De mediados del siglo XI. Descripción: Muestra de interior de muro con poco aporte de cal.

AlzG-7. Muestra disgregada de color rojizo. Localizada en la cuesta del Perro. De mediados del siglo XI. Descripción: Muestra disgregada del interior de muro con poco aporte de cal.

AlzG-8. Muestra disgregada de color rosado. Situado en el torreón derecho del Arco de la Pesas. De final del siglo XI o principios del XII. Descripción: Muestra de interior de muro con poco aporte de cal.

AlzG-9. "Hormigón" gris situado en el Arco Elvira. De principios del siglo XI. Descripción: Muestra de revestimiento exterior con pátina.

AlzG-10. "Hormigón" gris. Situado en el Arco de las Pesas, de finales del siglo XI o principios del XII. Descripción: Muestra de revestimiento exterior con pátina superficial.

AlzG-11. "Hormigón" gris. situado en Puerta Monaita, de finales del siglo XI principios del XII.

Descripción: Muestra de revestimiento exterior con pátina superficial.

Muestras procedentes de la cerca del Arrabal del Albayzín.

* Tramo Cerca Don Gonzalo (MDG).

MDG-1. Muestra disgregada de color rosado. Del siglo XIV. Descripción: Muestra de interior de muro con poco aporte de cal.

MDG-2. Muestra disgregada de color rosado. Del siglo XIV. Descripción: Muestra de interior de muro con poco aporte de cal.

MDG-3. Muestra disgregada de color rosado. Pertenece al siglo XIV. Descripción: Muestra de interior de muro con poco aporte de cal.

MDG-4. "Hormigón" gris perteneciente al siglo XIV. Descripción: Revestimiento exterior con pátina.

MDG-5. "Hormigón" gris perteneciente al siglo XIV. Descripción: Revestimiento exterior con pátina.

* Tramo San Miguel (MSM).

MSM-1. Muestra disgregada, extraída de una zona próxima a la Ermita del siglo XIV. Descripción: Muestra de interior de muro con poco aporte de cal.

MSM-2. "Hormigón" fino gris. Descripción: Muestra del revestimiento exterior de esta Cerca, con desarrollo de pátina superficial.

MSM-3. "Hormigón" rosado. Descripción: Muestra extraída del revestimiento exterior sin pátina superficial.

MSM-4. "Hormigón" rosado. Descripción: Muestra de revestimiento exterior.

MSM-5, MSM-6 Y MSM-7. Muestras de color rosado. Descripción: Muestras de interior de muro con cierta cohesión que puede estar relacionada con su aporte de cal.

MSM-8 y MSM-9. "Hormigón" fino de color gris. Descripción: Revestimiento exterior con pátina.

MSM-10 y MSM-11. "Hormigón" de color gris. Descripción: Revestimiento exterior con pátina.

MSM-12. Material disgregado de color rosado perteneciente a la Puerta de Fajalauza, construida en el siglo XIV.

Descripción: Material de interior de muro con escasa presencia de cal.

MSM-13. Mortero gris perteneciente a la Puerta de Fajalauza. Descripción: Material de revestimiento exterior sin pátina.

MSM-14. Material disgregado de color gris, perteneciente a la parte más inferior de este tramo. Descripción: Muestra de interior de muro con poco aporte de cal.

* Tramo San Antonio (MSA).

MSA-1. "Hormigón" gris del siglo XIV. Descripción: Muestra del revestimiento exterior con pátina de un torreón. Presenta un contenido importante de finos.

MSA-2 Y MSA-3. "Hormigón" fino de color gris, del siglo XIV. Descripción: Revestimiento exterior fino con pátina.

MSA-4. Material disgregado de color rojo intenso. Descripción: Material de interior de muro con poco aporte de cal.

MSA-5. Material disgregado de color rojo rosado. Descripción: Material de interior de muro con poco aporte de cal.

MSA-6 Y MSA-7. "Hormigón" gris, extraído de la parte más roja de este tramo. Descripción: Muestra de revestimiento exterior con pátina.

MSA-8. "Hormigón" gris, muestra extraída del lienzo de muralla próximo a la Puerta San Lorenzo. Descripción: Muestra de revestimiento exterior.

MSA-9 Y MSA-10. "Hormigón" gris extraído del lienzo más rosado, del siglo XIV. Descripción: Muestra de revestimiento exterior superficial con pátina.

En cantera la información obtenida de la recopilación bibliográfica es muy escasa, prácticamente inexistente. Por esto, nos vimos obligados a recoger en campo todos los datos necesarios para este estudio:

- Observación del material.
- Estructuras que presentan estos materiales.
- Levantamiento de una serie para su caracterización geológica.

Este estudio se llevó a cabo en afloramiento de la formación Alhambra, situado en las proximidades de la ciudad de Granada. Este material es de origen sedimentario, asociado a depósitos de debris flow muy heterogéneos. Dadas sus características, para su estudio diferenciamos tres niveles, de acuerdo con sus características granulométricas.

Nivel 1.

Caracterizado por una granulometría grosera y un contenido en finos aproximado del 10%, en la mayoría de los casos. Se observan tramos más cementados correspondiendo con el material con menor contenido en finos.

En este nivel se han extraído un total de 11 muestras, que se identificaron con

códigos alfanuméricos que van desde la «A» hasta la «K», precedidas de un número que indica el nivel al que pertenecen.

Nivel 2.

Se trata de un material sedimentario con mayores contenidos en finos, que pueden superar el 25%. Se sitúa encima del nivel 1 y en su matriz también se encuentran cantos de gran tamaño.

De este nivel se han extraído un total de 5 muestras que se han identificado de igual manera que en el caso anterior, con letras desde la «A» a la «E».

Suelo.

Sobre estos dos niveles se sitúan unos suelos que en algunos casos toman una coloración muy rojiza que justifican el nombre que llevan estos materiales "Formación Alhambra". A estos suelos se les han denominado tercer nivel. Se han extraído un total de 4 muestras que se han identificado como en los casos anteriores con letras que van de la «A» a la «D».

Los puntos de extracción de las distintas muestras vienen reflejados en el mapa de la figura 6.2.

VI.1.4 DETERMINACION DE LA DENSIDAD IN SITU.

El objetivo de este ensayo ha sido conocer el valor de la humedad y la densidad en superficie de los materiales estudiados, para ello, hemos utilizado un equipo Trolex 3411-B. Las medidas de estos parámetros se han realizado tanto en Murallas como en afloramientos de canteras. Debido a las condiciones tan específicas que requería este ensayo solo se ha podido realizar en unos pocos puntos.

El equipo consta de:

Medidor: instrumento que contiene todos los módulos electrónicos, los conjuntos de baterías recargables y la fuente radiactiva.

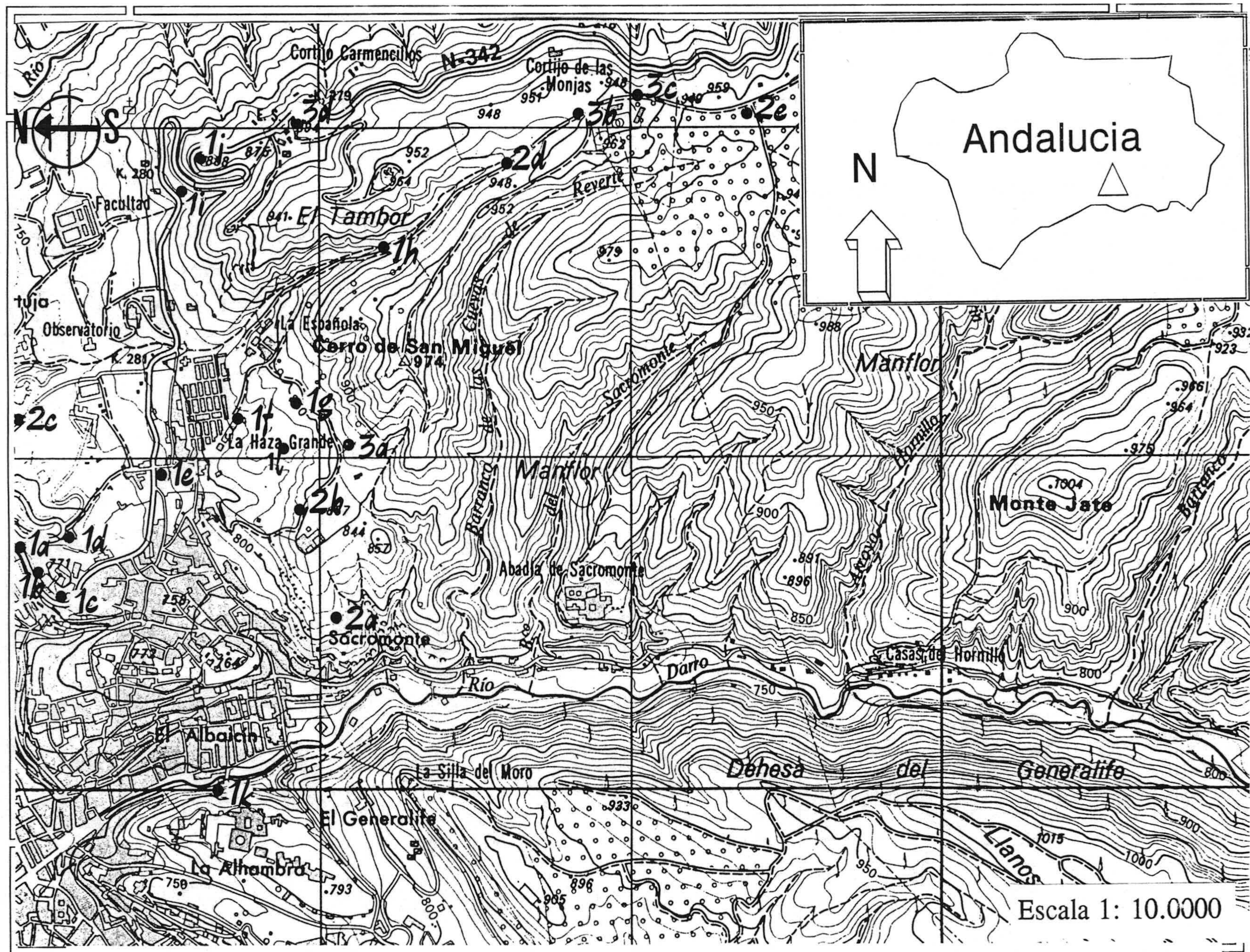


Fig. 6.2. Puntos de extracción de las muestras de cantera estudiadas.

Patrón de referencia: también denominado "Standard". Este bloque tiene dos cometidos. El primero consiste en establecer las cuentas standard a las que referimos todas las medidas. El segundo es constituir una referencia fija para verificar la estabilidad a largo plazo.

Varilla de perforación: empleada conjuntamente con un martillo permite perforar el orificio necesario para efectuar las medidas de transmisión directas. Dispone, además, de una herramienta para retirar la varilla de perforación, una vez efectuada la perforación.

Placa guía-raspador: este componente sirve para guiar la varilla de perforación y para alisar el emplazamiento elegido para ejecutar la medida.

Las medidas de la densidad se realizan por medio de una fuente radioactiva de 8 mCi de Cesio137, con dos detectores de rayos Γ de tipo Geiger Muller, de tal manera que lo que se cuantifica es la proporción de rayos Γ emitidos por la fuente, después de atravesar el material. De esta manera se puede establecer una relación entre las cuentas acumuladas durante un período de tiempo y la densidad.

Las medidas de la humedad se efectuaron utilizando una fuente radioactiva de 8 Mci de Americio 241: Berilio y un detector de neutrones lentos de Helio-3. En este caso, los neutrones rápidos emitidos por la fuente son frenados por los átomos de hidrógeno del suelo. Análogamente a la densidad, se podrá establecer una relación entre la humedad y el número acumulado de cuentas.

VI.2 METODOLOGIA DE LABORATORIO.

VI.2.1. INTRODUCCION.

En este apartado se hace una descripción de la metodología seguida en el laboratorio. Para definir las propiedades de estos materiales (suelos), tanto de cantera como los encontrados en las Murallas, se han realizado diversos ensayos y análisis. Con ellos podemos establecer tanto parámetros intrínsecos del material (curva granulométrica, índice de plasticidad y densidad), como datos sobre el contenido de compuestos o materiales que puedan influir en las características de la tierra y su puesta en obra (mineralogía, compuestos químicos, materia orgánica y contenido en carbonatos).

En general, la adición de material orgánico se realiza para aumentar la cohesión y evitar la retracción cuando el contenido en finos es muy elevado, actuando como armadura de trabazón de la tierra. En las murallas, este fenómeno no se ha observado de manera generalizada, aunque es interesante destacar que en una de las muestras extraídas en las excavaciones arqueológicas del Albayzín, pertenecientes posiblemente a la Alcazaba Cadima, se ha observado restos de paja, aún bien conservada, entre el hormigón de cal.

Es importante conocer el contenido en sulfatos en las muestras de cantera, debido a que un exceso de sales solubles en agua, puede producir la existencia de eflorescencias salinas. Un muro de tapial está sometido a la acción del agua de lluvia, y sobre todo, a la ascensión capilar de las humedades del terreno. Este agua puede disolver las sales de sulfatos contenidos en las tierras del muro y precipitarlas en su cara exterior, una vez evaporada el agua; por otra parte, la presencia de tales sales, puede originar en algunos casos problemas de expansión, y en otros casos ataques a los morteros de cemento gris empleados en las restauraciones, por la formación de ettringita.

La caracterización del material de muralla por medio del análisis mineralógico y petrográfico (microscopía óptica de polarización y DRX), nos ha permitido por una parte diferenciar los carbonatos adicionados en el momento de su fabricación, de los que forman parte del material original. La tinción de las láminas delgadas con alizarina, ha permitido diferenciar claramente los carbonatos cálcicos y magnésicos que forman parte del árido y la naturaleza del aglutinante.

El análisis mineralógico por difracción de rayos X, ha puesto de manifiesto la dificultad que entraña cuantificar el carbonato cálcico agregado a la fábrica, debido a la heterogeneidad de estos materiales.

La microscopía electrónica de barrido (SEM) con microanálisis EDAX incorporado, suministra información sobre la estructura y textura interior tridimensional desarrollada por los morteros estudiados, incluyendo la distribución del tamaño y forma de los poros. Además permite identificar fracturas, rellenos de agregados de granos y los minerales presentes. Con esta técnica hemos podido conocer algunos aspectos de la estructura y composición de los constituyentes de los morteros, la tecnología de su fabricación, así como, esclarecer algunos aspectos sobre los procesos de alteración que se han producido en su seno..

Los espacios vacíos (poros y fisuras), constituyen frecuentemente los componentes más importantes de cualquier material desde el punto de vista de su comportamiento físico. Por tanto, se trata de un parámetro fundamental para conocer el comportamiento físico y químico de los materiales que constituyen los elementos constructivos de las Murallas. Son las características espaciales del sistema poroso, las que condicionan los procesos de alteración de los materiales de construcción. Es por ello que se ha considerado interesante realizar un estudio de la porosidad de estos revestimientos, teniendo en cuenta que son de gran importancia para la conservación de estas edificaciones. La circulación del agua y su ascensión por capilaridad está en función del tamaño y distribución de estos poros, así como el desarrollo de fenómenos de eflorescencias en la superficie exterior, que favorecen el desprendimiento del revoco y su posterior ataque a la fábrica interior del muro.

En la figura 6.3 viene indicado la metodología seguida para el estudio de las muestras de interior de muro tomadas en las Murallas y las muestras de cantera. En este mismo sentido, en la figura 6.4 viene indicado la metodología seguida para las muestras de revestimientos extraídas de las Murallas.

METODOLOGIA DE ESTUDIO

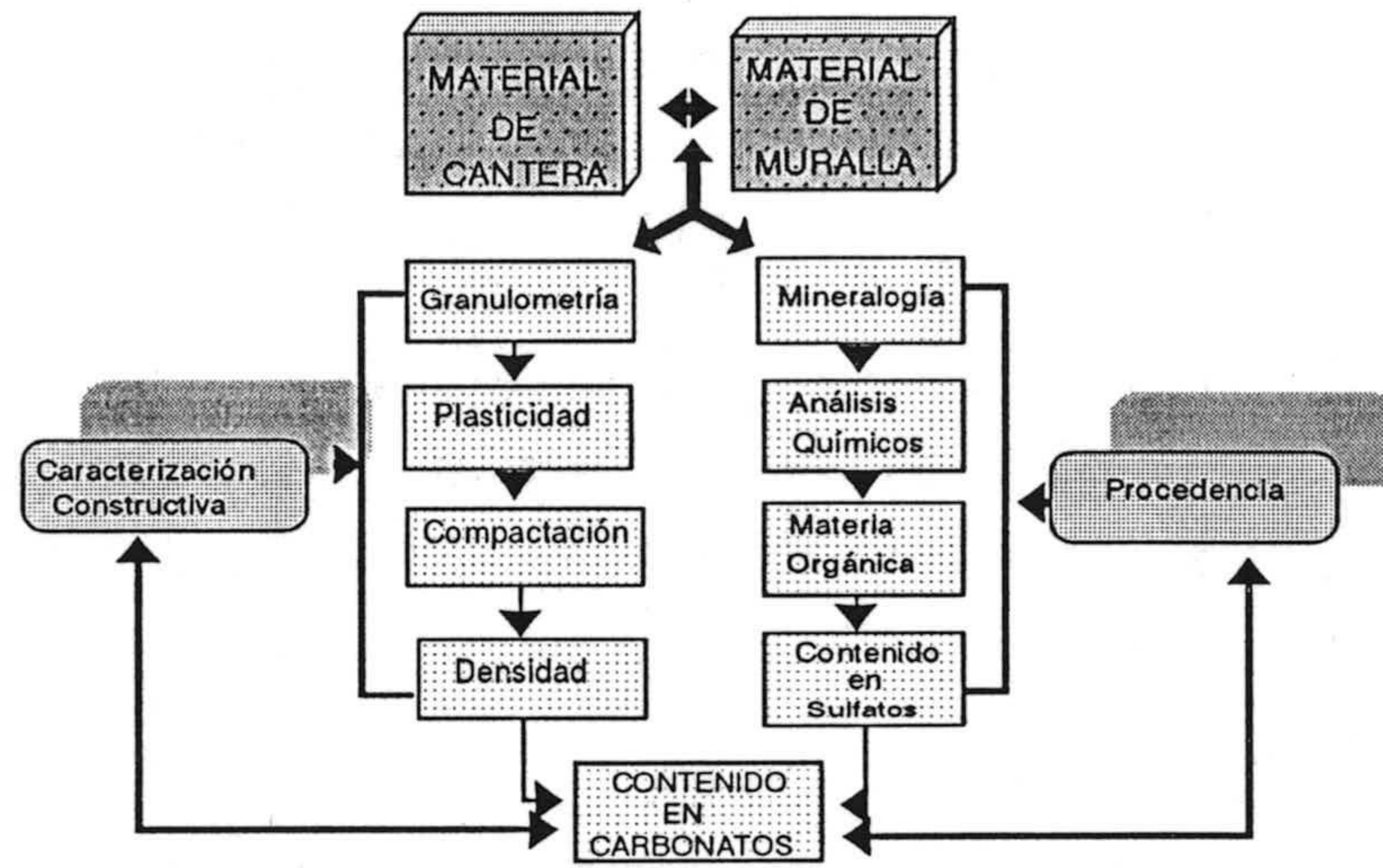


Figura 6.3

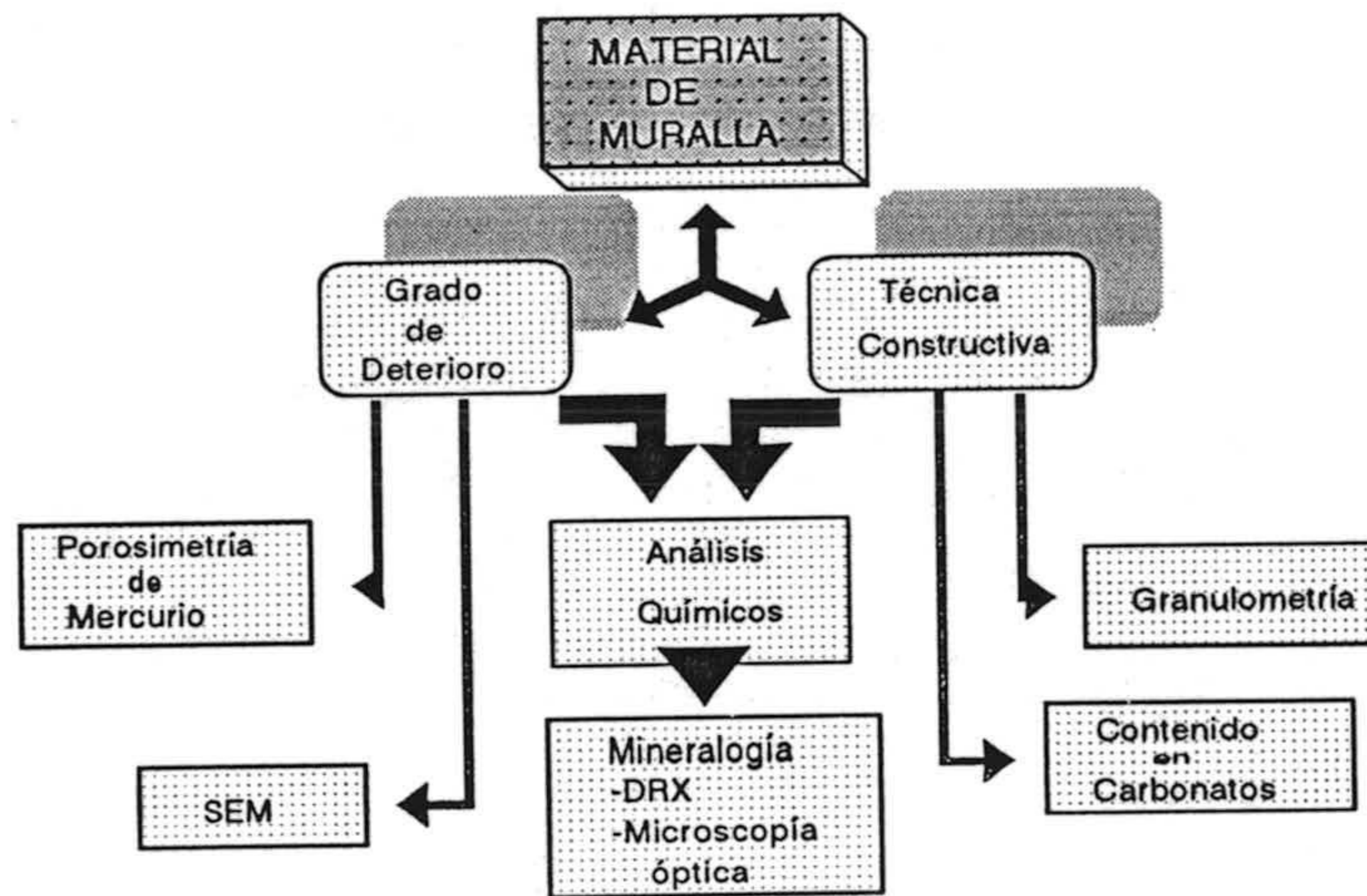


Figura 6.4

Fig. 6.3 Metodología de estudio de las muestras de cantera y de murallas para interiores de muro sin adición de cal. Fig. 6.4 Metodología de estudio empleada en el caso de las muestras de murallas dosificadas con cal.

VI.2.2 GRANULOMETRIAS POR TAMIZADO.

El ensayo granulométrico por tamizado viene especificado en la norma NLT-104/72. Esta norma describe el método para determinar el tanto por ciento de suelo que pasa por los distintos tamices utilizados en el ensayo hasta la abertura 0.074 mm (ASTM. n° 200). La proporción limo y arcilla se han identificado por difracción de rayos X.

El análisis granulométrico se ha llevado a cabo sobre muestras de cantera y de Murallas. En el caso de los morteros ha sido necesario disgregar previamente el material. El procedimiento seguido fue el siguiente: se atacaron con ácido clorhídrico pero se vio que el resultado no era muy efectivo por varias razones:

- No se disgregaba bien el material.
- El ácido disolvía tanto el cemento calcáreo como los posibles áridos carbonatados.

Teniendo esto en cuenta se recurrió a la trituración manual con ayuda de un mazo de goma y en algunos casos de hierro, utensilios que se utilizaron cuidadosamente con el fin de no llegar a fracturar los áridos.

Para la realización del ensayo se han usado los siguientes utensilios: una serie de tamices de malla cuadrada y tejido de alambre, una balanza, una agitadora eléctrica, una estufa de desecación regulable a 105-110 °C, un mortero y mazo de goma, para deshacer los terrones de tierra, un vaso de precipitado, de unos 600 cm³ de capacidad, un cepillo y una brocha para limpiar las mallas de los tamices, agua destilada y solución de hexametáfosfato sódico al 4%.

Proceso Experimental.

De la muestra original se separa la cantidad necesaria de acuerdo con la norma NLT-101/72. Se seca al aire libre y posteriormente se pesa, anotando su valor.

La muestra se pasa por el tamiz n°10 (malla 2 mm) de la serie ASTM. Posteriormente la fracción retenida se lava y se deja secar en la estufa, y por último se pesa.

La muestra ya seca y pesada, se pasa por los siguientes tamices, de la serie ASTM, que vienen indicados en la tabla VI-1.

Tabla VI-1. Serie de tamices(ASTM).

Tamices(ASTM).	Abertura(mm.)
1.1/2	38.1
3/4	19.1
3/8	9.52
n° 4	4.75
n° 8	2.38
n° 10	2.00

- Cálculo de la humedad higroscópica.

Mediante cuarteo se separan 120 g de la fracción de muestra que pase por el tamiz n° 10 ASTM (abertura 2 mm). De esta cantidad se toman 20 g, se secan en una estufa, y posteriormente se pesan.

El cálculo se realiza de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$f = \frac{100}{100+h}$$

$$h = \frac{a}{s \cdot 100}$$

Donde «f» es el factor de corrección por humedad higroscópica, «h» la humedad higroscópica en %, «a» el peso de agua y «s» el peso del suelo.

Se toman los 100 gr restantes de la fracción de muestra que ha pasado el tamiz n°10, y se colocan en un vaso de precipitado. Se añade, al mismo tiempo que se agita, unos 150 cm³ de hexametafósfato sódico al 4%, y se deja en reposo durante 18 horas. Posteriormente se lava la muestra sobre el tamiz 200 de la serie ASTM, hasta que pase el agua limpia. Se seca lo retenido en la estufa a 110 °C y posteriormente se pasan por los siguientes tamices que vienen indicados en la tabla VI-2 de la serie ASTM.

Una vez tomado el peso de lo que se iba reteniendo en cada tamiz se realizan los

cálculo requeridos para la obtención de la curva de acumulados, que vienen indicados en la tabla VI-3. Los datos de la columna 3 (tabla VI-3) se obtienen directamente del ensayo. Los datos de la columna 4, hasta el tamiz n° 10 se obtienen también directamente del ensayo y los restantes tamices se obtienen pasando los datos referidos a 100 gramos de finos, al total existente en la muestra.

Tabla VI-2. Serie de tamices (ASTM).3

Tamices (ASTM).	Abertura (mm.)
n° 16	1.19
n° 30	0.59
n° 50	0.290
n° 80	0.177
n° 100	0.15
n° 200	0.074

El porcentaje de muestra que pasa por los distintos tamices acumuladas se llevan a un gráfico cartesiano, donde se representan en abscisas la abertura de las mallas en mm. a escala semilogarítmica y en ordenadas el tanto por ciento que pasan. Si las abscisas se representaran a escala lineal, las fracciones más finas estarían representadas en un espacio muy pequeño, de ahí que se represente en escala semilogarítmica.

Tabla VI-3. Obtención de la curvas granulométricas.

Tamices ASTM.		Retenido entre tamices.		Pasan en muestra total.	
Designación	Abertura.	Grs. finos.	Grs. Muest.total.	Gramos (pasan)	% (pasan)
1. 1/2	38.1				
3/4	19.1				
3/8	9.52				
n° 4	4.75				
n° 8	2.38				
n° 16	1.19				
n°30	0.59				
n° 50	0.295				
n° 80	0.177				
n° 100	0.15				
.					
.					
.					

VI.2.3 LIMITES DE ATTERBERG.

Por conveniencia, se han establecido cuatro estados de consistencia en los suelo, en función del grado de humedad:

- 1) Líquido.
- 2) Plástico.
- 3) Semisólido.
- 4) Sólido.

Límite líquido.

Se define Límite Líquido como la humedad correspondiente al límite arbitrario entre los estados líquidos y plásticos de consistencia de un suelo. El líquido de un suelo es la humedad a la que un surco sobre una masa de suelo, hecho con un acanalador de

dimensiones normalizadas, se cerrará hasta una distancia de 12 pulgada bajo el impacto de 25 golpes suministrados por un aparato normalizado para este ensayo (cuchara de Casagrande).

Para la realización del ensayo se han seguido la norma NLT-105/72). Se toman 100 g. de muestra que pasan por el tamiz n° 40 (0.42 mm) y se mezclan con agua destilada en su punto justo, llenamos la cuchara manteniéndola en la palma de la mano, comprobamos con un acanalador si la profundidad es correcta. Se coloca la cuchara en el aparato a una altura sobre el suelo de un cm aproximadamente, y se golpea hasta que las paredes del surco se hayan unido por el fondo en una longitud de 13 mm., contando el número de golpes necesarios. Posteriormente se toma una rebanada de material próximo al surco y se pesa sobre un cristal tarado para conocer su humedad. Siguiendo el método normalizado a tal efecto, correspondiendo este valor al límite líquido en caso de que el golpeo haya sido de 25 golpes; de lo contrario, se realizan dos puntos, determinándose el citado límite de forma gráfica.

Límite Plástico.

El límite plástico de un suelo es el contenido en agua correspondiente a un límite convencional entre plástico y semisólido de la consistencia de un suelo. Y es la humedad a la que el suelo empezará a desmoronarse cuando se ruedan cilindros de material de 1/8 pulgadas de diámetro (aproximadamente 3 mm.).

En este ensayo se ha seguido la norma (NLT-106/72). Se toma la muestra del ensayo del límite Líquido sobrante, la mezclamos hasta que la masa esté lo bastante plástica como para formar con ella una bola. Rodamos esta masa entre los dedos para formar un cilindro, hasta que tenga 3 mm de diámetro. Para que el ensayo esté bien hecho, el cilindro debe comenzar a desmoronarse. Tomamos un trozo de cilindro y lo llevamos a secar. Así determinamos su humedad y por tanto su límite Plástico. El ensayo se realiza por duplicado para obtener un resultado más fiable.

Para conocer la plasticidad del suelo es necesario además conocer el índice de Plasticidad, que se obtiene por diferencia entre el Límite Líquido y el Límite Plástico. Para suelos arenosos, donde no se pueden calcular los Límites Líquido y Plástico, el índice de Plasticidad se indica como no Plástico.

Los valores obtenidos anteriormente se representan en el Abaco de Plasticidad de Casagrande (fig. 5.10) Este ábaco esta separado en sectores, cada uno de los cuales está identificados por unas siglas:

- C: arcilla
- M: limos
- O: materia orgánica
- HC: arcillas de alta Plasticidad
- MH,O limos de alta Compresibilidad
- CL: arcillas de baja Plasticidad
- ML,O: limos de baja Compresibilidad.

VI.2.4 CLASIFICACION DEL SUELO.

En este apartado se ha seguido un sistema de clasificación de suelo minerales y organominerales para fines ingenieriles basado en las determinaciones de laboratorio de las curvas granulométricas, límite Líquido e índice de Plasticidad.

Esta clasificación utiliza la siguiente terminología:

Bloques: Partículas de roca retenidas en el tamiz n° 3 (abertura 75 mm)

Gravas: Partículas de roca que pasan por el tamiz n° 3 y quedan retenidas en el tamiz n° 4 (abertura 4.75 mm.).

Arenas: Partículas de roca que pasan por el tamiz n° 4 y quedan retenidas en el tamiz n°200 (abertura 0.074 mm.)

Limo y arcilla: Son las partículas que pasan el tamiz n° 200 para su separación hay que recurrir al ensayo de sedimentación, aplicando la ley de Stokes.

Además se define *coeficiente de curvatura*, «Cc» como la relación:

$$C_c = \frac{D_{30}}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

donde D60, D30 y D10 son los diámetros de las partículas correspondientes al 60, 30 y 10 % sobre la curva granulométrica. Y el *coeficiente de uniformidad*, «Cu» como la relación:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

donde D60 y D10 tienen el significado antes indicado.

De acuerdo con esto los suelos se clasifican como finos, si el 50% o más del peso del suelo pasa por el tamiz n° 200, y suelos gruesos si más del 50% del suelo seco es retenido en el tamiz n° 200.

Clasificación de suelo finos.

Para suelos finos la clasificación seguida es la establecida por su valor de índice de Plasticidad y límite Líquido que viene indicado en el Abaco de Casagrande. Así los suelos se clasifican en:

- **Arcilla inorgánica**, si la representación del índice de plasticidad frente al Límite Líquido se sitúa sobre o por encima de la línea "A", el índice de Plasticidad es mayor a 4, y la presencia de materia orgánica no influye en el límite Líquido.

* *Arcillas de baja Plasticidad*, si el límite Líquido es menor a 50.

* *Arcillas de alta Plasticidad CH*, si el límite Líquido es 50 o mayor

* *Arcilla limosa CL-ML*, si la posición del índice de Plasticidad frente al límite líquido cae sobre o por encima de la línea "A" y el índice de Plasticidad cae en el rango de 4 a 7.

- **Limo inorgánico**, si la representación del índice de Plasticidad frente al límite Líquido se acomoda sobre o por encima de la línea "A" o el índice de Plasticidad es

menor de 4, y la presencia de materia orgánica no influye en el Límite Líquido.

* *Limo de baja Plasticidad* ML, si el Límite Líquido es menor de 50.

* *Limo de alta Plasticidad* MH, si el Límite Líquido es 50 o más.

- *Limo o arcilla orgánica*, si la presencia de materia orgánica es suficiente para influenciar el Límite Líquido obtenido sobre la muestra seca al horno.

Si sobre el tamiz n° 200 se retiene menos del 30%, pero más del 15%, a esta terminología se le añade "con arena" o "con grava" según cual sea el predominante. Pero si se retiene sobre el tamiz n° 200, el 30% o más de la muestra, se añadirá al nombre del grupo las palabras "arenosas" o "gravosas", según predomine la arena o la grava.

Clasificación de suelo gruesos.

- Se clasifica el suelo como «grava» si más del 50% de la fracción gruesa (retenida en el tamiz n° 200), se retiene en el tamiz n° 4 (abertura 7.75 mm.).

- Se clasifica el suelo como «arena» si más del 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz n° 4.

- Si cantidades inferiores al 12% pasa por el tamiz n° 200, se representa la curva granulométrica y se calculan los coeficientes de Uniformidad y Curvatura, según las ecuaciones ya indicadas con anterioridad

* Si menos del 5% de la muestra pasan por el tamiz n° 200, el suelo se clasifica como bien clasificada si la arena o grava cumplen lo siguiente:

- Para grava, «Cu» mayor a 4
- Para arena, «Cu» mayor a 6

y el «Cc» esta comprendido entre 1 y 3. Y si no lo cumple se dice que el suelo está pobremente clasificado.

- Si más del 12% de la muestra pasa por el tamiz n° 200, el suelo se considera suelo grueso con finos. En este caso se determina la plasticidad de estos finos y se van a clasificar como gravas o arenas, seguidas de la terminología empleada por el Abaco de Casagrande indicado en la figura 5.8.

- Si la parte de la muestra que pasa por el tamiz n° 200, está comprendida entre 5 y 12% se le adjudica al suelo una clasificación dual con dos símbolos del grupo.

El primer símbolo correspondería al de grava o arena con menos del 5% en finos (bien o mal clasificada Gw, Gf, Sw, Sf), y el segundo símbolo correspondería a grava o arena con más del 12% de finos (grava arcillosa GC, grava limosa GM, arena arcillosa SC, arena limosa SM).

- Si el suelo predominante es arena o grava, pero contiene el 15% o más de otro constituyente de grano grueso, se añade al nombre del grupo la expresión «con grava» o «con arena».

- Si la muestra contiene bloques se añade el término «con Bloques».

VI.2.5 ENSAYO PROCTOR.

el ensayo Proctor viene especificado en la norma NLT-108/76 del laboratorio de mecánica del suelo «José Luis Escario».

Este ensayo tiene como objetivo determinar en un suelo la relación entre la humedad y la densidad seca obtenida cuando es compactado en las condiciones establecidas por esta Norma.

Aparatos y material necesarios.

- Un molde de metal de 1000 ± 9 cm³ de capacidad (102 ± 0.4 mm. de diámetro interior y 122.4 ± 0.1 mm. de altura), con su base y collar.

- Una maza mecánica de base circular de 2.50 ± 0.01 Kg. adaptada al interior de una guía tabular adecuada para que su altura de caída libre sea de 305 ± 2 mm.. La

base de la maza tendrá un diámetro de 50 ± 0.2 mm. La guía debe tener, a dos centímetros de cada extremo, 4 orificios de 1 cm de diámetro, espaciados 90° , para facilitar la entrada y salida del aire.

- Una balanza de unos 20 Kg. y otra de 1000 grs. de capacidad, cuyo error en la pesada sea inferior a 1 gr. y 0.1 gr. respectivamente.

- Recipientes adecuados para la determinación de humedad, como se indica en el apartado 2.3 de la Norma NLT-102/72.

Preparación de la muestra.

Se obtiene la fracción de muestra que pasa por el tamiz UNE 20, operando como se indica en la NLT-101/72, particularmente en su apartado 3.4.4. Se pesa el material retenido en dicho tamiz y se determina el tanto por ciento que representa respecto al peso total de la muestra.

Se cuartea la muestra obtenida en porciones aproximadamente iguales (de 2.5 Kg.), para aplicar el procedimiento que a continuación se detalla.

Procedimiento.

Se tara el molde y el collar superior. Se toma una de las porciones del suelo obtenidas según 3.2, y se mezcla con el agua que se estime necesaria hasta que esté uniformemente repartida. El suelo así preparado se compacta en el molde con el collar colocado y en tres capas aproximadamente iguales. Para ello se aplicarán 26 golpes a cada capa, distribuidos uniformemente sobre la superficie. La última capa compactada deberá sobrepasar el borde del molde, pero no más de 1 cm.

Terminada la compactación, se quita el collar y se enrasa cuidadosamente el suelo con el borde del molde. Se pesa el conjunto molde y suelo compactado. Se abre el molde y se extrae una muestra representativa para determinar la humedad según la NLT-102.

Se repite esta operación con nuevas proporciones de material con diferentes cantidades de agua, hasta obtener los puntos necesarios para determinar la curva que relaciona la densidad seca con la humedad.

Resultados.

Los datos de densidad y humedad se representan en un gráfico que tenga en abscisas los tantos por ciento de humedad y en ordenadas las densidades secas. Estos puntos definen una curva de pendiente suave, las coordenadas del máximo de esta curva definen la «densidad máxima» y la «humedad óptima» del ensayo Proctor.

VI.2.6 ANALISIS MINERALOGICO.

Una vez conocida la textura del suelo, es necesario conocer la mineralogía de la fracción gruesa, y sobre todo de la fracción fina, porque es importante de cara a la estabilidad de la tierra y su cohesión. El estudio mineralógico se ha llevado a cabo por medio de difracción de rayos X, microscopía óptica y electrónica de barrido. Estas técnicas se han aplicado a muestras pertenecientes a la fábrica interior de estos muros y en los morteros de cal que revisten las murallas.

VI.2.6.1 Difracción de rayos X.

Preparación de la muestra.

Las muestras utilizadas en los ensayos granulométricos, se han empleado posteriormente para los análisis mineralógicos, excepto los contenidos de la fracción menor de 0.074 mm que se perdió en el lavado.

En el estudio mineralógico de las distintas muestras, se han analizado tres fracciones:

- Partículas retenidas en el tamiz 1/4 (mayores de 31.7 mm, ASTM).
- Partículas que pasan el tamiz 1/4 y quedan retenidos en el tamiz n° 200 (entre 31.7 y 0.074 mm, ASTM).
- Partículas que pasan el tamiz n° 200 (menores de 0.074 mm, ASTM).

Separadas en fracciones, se trituraron con una machacadora de mandíbulas, y después se pasaron por un mortero de agata hasta conseguir un polvo muy fino que se tamizó hasta un tamaño inferior a 0.074 mm.

Por último, las distintas fracciones de las muestras, ya en polvo por separado, se mezclaron bien, y posteriormente se cuartearon, con el fin de obtener unos datos cuantitativos lo más representativos dentro del lógico error que ya tiene de antemano este método analítico.

- Extracción de la fracción arcilla.

Se tomó una cantidad suficiente de muestra con la que no se había realizado ensayos granulométricos. Se pasó en un primer momento por el tamiz 10 (2.00 mm.) ASTM. La fracción que paso se volvió a tamizar con el tamiz nº 200 (0.074 mm.) ASTM, y esta última fue la que se empleo para la realización del ensayo.

A continuación se procedió a la extracción de la fracción arcilla que se realizó en varias etapas:

1ª Etapa. Eliminación de los carbonatos. La eliminación de carbonatos se realizó, agregando a la muestra 1 litro de ácido clorhídrico a una concentración de 0.2 N. la adición se realizó agitando constantemente. Cuando se comprobaba que la reacción entre el ácido clorhídrico y los carbonatos habían cesado, se añadía otro litro de ClH 0.2 N, previamente se elimina por decantación el exceso de liquido del recipiente que contenía la muestra (Ray et al 1957; Ostrn,1961).

2 Etapa. Lavado. Una vez eliminados los carbonatos, se realizan sucesivos lavados, con la finalidad de eliminar los cloruros y exceso de ácido que hubiera permanecido sin reaccionar.

3 Etapa. Centrifugación. Una vez lavada la muestra, se agitó con una batidora eléctrica durante 5 minutos y se añadió hexametafósforo sódico, para favorecer la dispersión de las arcillas; y se procedió a la extracción de la fracción arcilla en una centrifugadora marca Kubota Ks-8000.

Mediante la ley de Stokes pueden calcularse la velocidad de caída de los diferentes granos en suspensión. Las partículas mayores de $2\mu\text{m}$ tardan 8 horas en descender 10 cm en la columna de agua en la que se encuentran en suspensión; por encima de estos 10 cm quedarían las partículas menores de $2\mu\text{m}$. La centrifugación disminuye el tiempo de caída de las partículas por aumento de la aceleración por gravedad. Tan solo se necesitan

condiciones de velocidad angular y tiempo mediante los que se igualen las condiciones de decantación. Estas han sido de 100 sg. a 1000 r.p.m, parada rápida y extracción de los 4 cm superiores de disolución, obteniendo resultados muy similares a los de decantación en 8 horas.

- Extracción de la fracción limo.

Una vez extraída toda la fracción arcilla, se procede a la extracción de la fracción limo. La muestra se vierte en unos vasos de precipitados se le añade agua y se agita con una batidora durante 5 minutos, se deja en reposo durante 4 minutos y se extraen los 10 primeros centímetros de la suspensión. El procedimiento se repite hasta que toda la fracción limo ha sido retirada de la muestra.

Proceso Experimental.

Se ha empleado el Difractómetro Phillips PW 1710 del Departamento de Mineralogía de la Universidad de Granada, equipado con una rendija automática. El registro de los difractogramas se ha realizado mediante programas informáticos (Martín Ramos, 1990).

- Análisis Cualitativo.

- *Método de Polvo, para muestra total.* La mineralogía íntegra de cada una de las fracciones de las distintas muestras se ha obtenido mediante el método de polvo cristalino en las siguientes condiciones instrumentales.

- Radiación (Cu K α).
- Filtro (Ni).
- Voltaje (40 Kw).
- Intensidad (40 Ma).
- Sensibilidad (5.10³).
- Cte Tiempo (0.2 a 0.3)
- V. de Exploración (6° 2 θ /mint).
- " del Papel (1cm/2 θ).
- " del Contador (0.1).
- Zona Explorada (2°-60°(2 θ)).

- *Método del agregado orientado en la fracción arcilla y limo.* La mineralogía de esta fracción se ha estudiado mediante difractograma en AO (agregados orientados), preparado a partir de una suspensión de la misma muestra depositada en portamuestras de vidrio y secada a T° ambiente.

- Agregado orientado sin tratamiento (AO)
- Agregado orientado solvatado con Etilénglicol (AO+EG) durante 48 horas a T° 60 °C (Bruton, 1955), para caracterizar los minerales hinchables.
- Agregado orientado solvatado con Dimetilsulfóxido (AO+DMSO) durante 48 horas a T° ligeramente inferior a 80°C (González García & Sánchez Camazano, 1968), para comprobar la existencia de caolinita en presencia de clorita.
- Agregado orientado calentando a 550°C (A.O+550°) durante 90 minutos (Martín Vivaldi y Rodríguez Gallego, 1961), para estudiar el comportamiento de la clorita y los minerales hinchables, así como para asegurar la presencia de caolinita.

Las condiciones instrumentales han sido las indicadas anteriormente para el estudio de la muestra total, a excepción de las siguientes:

- Sensibilidad (2.10 (3)).
- Cte de tiempo (0.2).
- Velocidad de Exploración (1°-6° 2θ/ minut.).
- Velocidad del papel (1-4 cm/ 2θ).
- Zona Explorada (2°-64 y 3-23 /2θ).

- Análisis Semicuantitativo.

El análisis mineralógico cuantitativo, a partir de la difracción de rayos X, presenta una serie de condicionantes importantes como son: tamaño de grano, cristalinidad, estructura y composición química, sustitución isomórfica, homogeneidad de la muestra, condiciones instrumentales etc.

Este problema ha sido ampliamente tratado por Millinger y Grin; 1961, Gibbs

1967; Rodríguez Gallego et al; 1964, Carrol 1970 etc.

Con todas las reservas se ha abordado el estudio semicuantitativo, por lo que los datos han de considerarse solamente como indicadores relativos de la concentración de cada mineral.

- *Para la muestra total.* En los difractogramas de la muestra total se han medido las áreas de las reflexiones más importantes de cada uno de los minerales, utilizando en la cuantificación los siguientes poderes reflectantes, calculados para el difractómetro Phillips PW 1710 equipado con una rendija automática, en las condiciones instrumentales indicadas anteriormente son:

- Filosilicatos: 0.009 (reflexión a 4.45 Å);
- calcita: 1.05 (reflexión a 3.03 Å);
- dolomita: 1.08 (reflexión a 2.9 Å);
- cuarzo: 1.43 (reflexión a 4.45 Å);
- feldespatos: 1.03 (reflexión a 3.18 Å).

- *Para los minerales de la arcilla.* La mayoría de las medidas se han hecho en difractogramas AO+EG que presentan mejor resolución. La determinación de la clorita y caolinita se han realizado:

a) Teniendo en cuenta la diferencia de áreas existentes entre la reflexión a 7.1 Å en A.O (caolinita + clorita) y en A.O + 550°C clorita.

b) Cuantificando la caolinita en la reflexión a 11.18 Å en el difractograma A.O + DMSO, sobre la base de que toda la caolinita ha reaccionado al tratamiento.

Los poderes reflectantes empleados han sido:

- illita: 0.36 (reflexión próxima a 10 Å);
- esmectitas: 0.39 (reflexión próxima a 17 Å);
- clorita, caolinita: 0.98 (reflexión a 7.1 Å).

VI.2.6.2 Microscopía óptica.

Mediante esta técnica se estudian las propiedades ópticas de la materia cristalina. El estudio se ha llevado a cabo con un microscopio Leitz Zeis- Jenna, mod. Jenapol, con dispositivo de luz transmitida y nicoles cruzados o paralelos. Se han preparado láminas delgadas de muestras exclusivamente de murallas, y sólo de aquellas cuya compactación era suficiente.

El corte de las láminas se realizó perpendicular a la superficie de las murallas, con la finalidad de observar las diferencias de los distintos morteros al acercarse a la superficie exterior.

El estudio se ha centrado fundamentalmente en el análisis textural de los morteros empleados en la construcción de las Murallas, en el que se ha incluido:

1. Observación de la porosidad.
2. Composición del árido y la matriz.
3. Delimitación del tamaño del árido y su cuantificación.
4. Fenómenos de corrosión en el árido. Se puede observar en zonas de contacto entre el árido-aglutinante en ambientes muy alcalinos.

Para diferenciar la calcita de la dolomita se tiñeron las láminas con alizarina sustancia orgánica empleada para la identificación de la posible calcita existente en estos materiales. En la preparación de las láminas delgadas se ha seguido el procedimiento normal de elaboración de láminas petrográficas, consolidación y pulido posterior.

VI.2.6.2 Microscopía electrónica de Barrido.

En este estudio se ha empleado Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) con un microscopio Zeiss, modelo DMS 950, equipado con sistema de microanálisis puntual de dispersión de rayos-X (EDX) LinK Analytical QX 2000, del Centro de Instrumentalización Científica de la Universidad de Granada. Las muestras estudiadas, previamente a su visualización, se metalizaron en oro y carbono para hacerlas conductoras.

Para la identificación composicional de las formas cristalinas existentes en el

mortero, se ha empleado el EDX.

Cuando se hace incidir un haz de electrones de elevada energía (10-20 KeV) sobre un sólido ocurren una serie de interacciones que dan lugar a varias radiaciones.

La interacción que aquí nos interesa comentar es la que producen los rayos X. Estos se originan porque, al incidir los electrones altamente energéticos del haz sobre el sólido, son capaces de excitar los electrones desde niveles internos de los átomos hasta sus orbitales externos. Cuando estos electrones excitados regresan a orbitales estables se produce una emisión de radiación electromagnética en la zona espectral de los rayos X. Si en un microscopio de barrido (SEM) se dispone adecuadamente de un espectrógrafo de rayos X, podremos recoger el espectro característico de los átomos presentes en el sólido. De este modo tendremos información sobre la composición atómica de la muestra.

Esta técnica presenta sus ventajas. Por un lado, es extraordinariamente sensible, a la hora de captar componentes minoritarios. Además es suficiente con disponer de una pequeña cantidad de sólido, siendo posible analizar distintas zonas de las muestras, lo que puede ser especialmente útil en el estudio de minerales o rocas naturales, o material sintético de composición variable. Es posible analizar elementos pesados (de peso atómico mayor que el del sodio) y ligeros, según el método de preparación de la muestra que se siga (recubrimiento en oro o carbono, respectivamente).

Además del estudio composicional, mediante visualización y toma de fotografías, se ha llevado a cabo un estudio morfológico de estas formas cristalinas.

VI.2.7 ANALISIS QUIMICOS.

VI.2.7.1 Espectrómetro de Fluorescencia de rayos X.

El análisis de las muestras se realizó con un espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X de la casa Fisons, de la serie 8460 XRF de ARL, de la fábrica de Cemento de HISALBA, S.A. ubicada en Gador (Almería).

Las características del aparato son las siguientes:

Esta unidad contiene un recinto en vacío, hecho en fundición y a temperatura estabilizada. Tiene montados once monocromadores fijos. El módulo espectrométrico, contiene dos bombas de vacío y un sistema controlado por microprocesador, para los componentes mecánicos y un cargador de ocho muestras para proveer un cambio automático, incluyendo ocho casetes codificados.

La excitación de R-X, se produce mediante un tubo de ventana final y ánodo de Rh de 60 Kv. y 100 ma, en combinación con una potencia máxima de 3 Kw.

El análisis de la muestra se efectuó con los siguientes parámetros:

- Tensión de excitación: 45 Kv.
- Corriente máxima: 40 mA.
- Tiempo de ensayo: 40 s.
- Temperatura: 20° C.

Se incluye en el mismo módulo, un circuito de refrigeración con agua desionizada, que contiene un cambiador de calor conectado a un sistema exterior de agua de refrigeración al tubo.

Comporta también, sistemas de seguridad para temperatura, presión, flujo y conductividad para evitar daños en el tubo de Rayos X, en el caso de que haya problemas en el sistema de refrigeración.

Todos los sistemas de seguridad se monitorizan por medio de un microprocesador cada 1-2 s. Se puede controlar hasta 265 puntos de «Status» y hasta tres grados de nivel de importancia cada uno de ellos.

La configuración está formada por 11 monocromadores fijos con 10 detectores sellados para el análisis de Si, Fe, Ca, Mg, S, K, Cl, Ti, y P, y un detector de flujo proporcional para el análisis de Na. Control de temperatura individual por microprocesador, para el análisis de los once elementos.

Preparación de la muestra para análisis.

Todas las muestras para análisis han sido refinadas para que pase toda por el tamiz de 90 μ .

Previa homogeneización se secaron en estufa, sobre vidrio de reloj a 105-110 °C durante dos horas. Se enfriaron en desecador durante 20 minutos.

En un crisol platino-oro (95/5), ya tarado se pesaron 5 gr de fundente seco (Tretaborato de Litio de la casa Merck, comercializado como Spectromel A 10) 0.02 gr. de despegante (Bromuro de Litio) y 1 g de la muestra.

Una vez homogeneizada la muestra, fundir en mufla a 1.050 °C durante 20 minutos, homogeneizado cada 5 minutos. Cuando falten 2 minutos para la fusión total de la muestra, introducir un molde de platino-oro.

Una vez enfriada la masa fundida, esperar que despegue el molde, con lo cual tenemos preparada la perla para su análisis por Rayos X.

VI.2.7.2. Análisis químico por Espectrometría de emisión por Plasma acoplado.

Se llevo a cabo en un equipo Leeman Labs serie PS de la Universidad de Granada.

Preparación de la muestra.

De 100 gr. de muestra debidamente cuarteada se extrajo la fracción más fina que paso el tamiz 200 de la serie ASTM. La muestra se metió durante una noche en una estufa con la finalidad de eliminar la humedad.

Eliminación de silicatos.

De la muestra se toman 100 mg. pesados en una cápsula abierta de Teflón. A esta cantidad se le agrega aproximadamente 5 ml. de agua regia (ClH/NO₃H) en relación 3/1, y FH hasta la mitad de la cápsula. Posteriormente se calienta al baño de arena hasta sequedad, se agrega 10 ml de CLH 1:1 y se calienta hasta redisolución. Finalizado este proceso el contenido se traspasa a un matraz de 100 ml. de volumen procurando que no quede nada en el recipiente. Se han empleado filtros para eliminar posibles restos insolubles.

Con este procedimiento se han identificado elementos químicos mayoritarios y

minoritarios.

VI.2.8 DETERMINACION DEL CONTENIDO EN MATERIA ORGANICA.

Método Cuantitativo.

Aunque este ensayo no es usual en suelo, ni se contempla en la normativa NLT, se ha considerado interesante el correlacionarlo con la Norma 7082 (reflejado en la EH-91), para arenas utilizadas en morteros y hormigones.

Este ensayo se basa en la comparación del color entre el líquido sobrenadante de las muestras de suelo y el de la muestra patrón.

La muestra patrón se prepara a partir de un ácido orgánico (ácido tánico) y una disolución de hidróxido sódico, de la siguiente manera: en una probeta se mezclan 97,5 cm³ de disolución de hidróxido sódico al 4% con 2.5 cm³ de disolución de ácido tánico al 2% en 10% de alcohol. Agitamos vigorosamente y dejamos reposar.

Por otra parte, se toman 100 gr de muestra que pase por el tamiz n° 10, se introduce en una botella transparente más una disolución de hidróxido sódico al 4% hasta 2 cm por encima del material, mezclándolas con la barilla de vidrio. se deja reposar, y se observa el color que ha tomado el líquido comparándola con la muestra patrón. La mayor o menor coloración en comparación con la muestra patrón indicaría que muestras presenta materia orgánica y que muestras no.

Método Cuantitativo.

Debido a que el método del agua oxigenada contemplado en la norma NLT-117/72, es muy lento se consideró oportuno utilizar el método del permanganato potásico, mucho más rápido, preciso y que requiere menor cantidad de muestra.

Se toman 20 gr de muestra que halla pasado el tamiz n° 40. Posteriormente se cuartean 5 gr de esta muestra que halla pasado el tamiz 100. Se desecan en una estufa y posteriormente se pesan.

A continuación se procede a determinar los factores de corrección «f» y «F».

Factor «f» de la solución de permanganato potásico 0.1 N.

Factor «F» de la solución del ácido oxálico 0.1 N.

Ambos sirven para saber los cm^3 efectivos en que se convierten los 20 cm^3 teóricos de las fórmulas:

cm^3 efectivos del permanganato es igual a $20 \text{ cm}^3 / \llcorner f \llcorner$

cm^3 efectivos de ácido oxálico igual a $20 \text{ cm}^3 / \llcorner F \llcorner$

Pasamos a describir la preparación de las soluciones y determinación de los factores.

Solución de permanganato potásico 0.1 N: se disuelven aproximadamente 3.2 grs. de permanganato potásico en un litro de agua destilada en un matraz aforado. Se calienta hasta ebullición, manteniendo ésta durante 10 minutos. Se deja enfriar, filtrando a través de un filtro de vidrio frisado, y recogiendo en frasco de vidrio limpio color topacio para evitar que le incida la luz.

- Determinación del factor de corrección «f»: de unos gramos de oxalato sódico secados en estufa a 110°C durante 2 horas, y enfriados en desecador, se pesan en balanza de precisión de 0.2 a 0.3 grs y se disuelven en 200 cm^3 de agua destilada. Se mezclan 20 cm^3 de disolución de ácido sulfúrico con agua en proporción 1 a 4. Se calienta hasta 70°C para proceder a la valoración. Esta valoración consiste en añadir permanganato potásico gota a gota hasta conseguir una coloración permanente, es decir, que la solución no pierda el color adquirido por leve que este sea. Durante este proceso la solución estará en constante agitación (resulta muy práctico el agitador magnético en esta fase). Se realizaron dos o tres valoraciones, obteniendo la media aritmética de ellas.

La base de cálculo es que a 6.7 grs de oxalato le corresponden 1000 cm^3 de permanganato potásico 0.1 N.

Factor del permanganato:

$$\langle f \rangle = \frac{1000}{6.7} \cdot \frac{\text{gr. oxalatosódico}}{\text{cc. permanganatopotásico. gastados}}$$

Solución ácido de oxalato 0.1 N: se pesan en balanza de precisión 6.3024 grs. de ácido oxálico puro. Se disuelve este ácido oxálico, en un matraz aforado de 1 litro de capacidad, con agua destilada hasta la mitad aproximadamente y 50 cm³ de ácido sulfúrico puro. Completar con agua destilada hasta el enrase del matraz. Esperar que enfrié a temperatura ambiente y guardar en un frasco con cierre hermético.

- Determinación del factor de corrección «F»: en un erlenmeyer de unos 300 cm³ de capacidad se vierten unos 175 cm³ de ácido oxálico 0.1 N. Calentar hasta 70° C y proceder a valorar con permanganato potásico 0.1N, cuyo factor «f» sea conocido. La valoración se realizará de igual forma que en la determinación del factor de corrección del permanganato potásico.

El factor del ácido oxálico «F» = «f». cm³ de permanganato gastados en esa valoración dividido por 25 cm³. de ácido oxálico.

Descripción del ensayo.

La muestra pesada y seca (de 0.2 a 0.3 gr) se colocan en un erlenmeyer de 500 cm³, y se le añade 25 cm³ de ácido sulfúrico al 9%, calentando hasta ebullición y manteniendo esta durante 3 minutos; transcurrido este tiempo, y manteniendo la ebullición, se añade 1.5 cm³ de ácido nítrico concentrado y se continua la ebullición unos minutos más. Se retira el matraz del fuego y se añaden 125 cm³ de agua destilada hervida. A continuación se agregan desde una bureta los cm³ efectivos del permanganato potásico 0.1 N, obtenidos al dividir los 20 cm³ teóricos por el factor de corrección del permanganato «f». La solución tomará el color del permanganato. Se calienta hasta ebullición manteniendo ésta durante 4 o 5 minutos. Si en este proceso la solución hubiera perdido la coloración, se añadiría nuevamente la misma cantidad de permanganato, repitiendo cuantas veces fuera necesario hasta que la solución no descolore durante la ebullición.

Hay que tener en cuenta para el cálculo, que los cm³ de permanganato que se añaden por segunda y sucesivas veces, han de sumarse a los de la valoración final.

Se retira el matraz del fuego y se añade desde una bureta los cm³ efectivos del ácido oxálico 0.1 N. El líquido perderá el color del permanganato en este proceso.

Se enfría la solución hasta 70 grados y se procede a valorar el exceso de ácido oxálico con permanganato gastados en la valoración.

$$\% \text{demateria orgánica} = \frac{0.1032 \text{ cc. permanganato } 0.1 \text{ N} \ll f \gg}{\text{gr. muestra ensayada}}$$

VI.2.10 DETERMINACION DE LA POROMETRIA.

La porosidad de una roca se define como el tanto por ciento de volumen de espacios huecos respecto al volumen total de las mismas. Esta característica condiciona fuertemente la durabilidad de los materiales naturales y artificiales (Pellerín, 1990).

En los morteros de cal, la mayor parte de los poros se originan en el proceso de fraguado, rellenándose en parte durante la carbonatación. El origen de estos poros es mayoritariamente de tipo fisural, el resto se debe al acoplamiento de los áridos en la pasta del mortero.

Entre las características que definen al sistema poroso, podemos destacar:

a) Porosidad total del material.

b) *Espectómetro de porosidad*. Pevosteau et al, (1970) reflejan la distribución del parámetro en función del tamaño de sus poros, y es de gran importancia para explicar el comportamiento del material.

c) *Tamaño de los poros*. Existen innumerables divisiones, Russell (1927), estableció un límite entre microporos y macroporos basándose en estudios de rocas en lámina delgada, estimando que las rocas que tenían preferentemente poros de tamaño mayor a 5 μm eran en general rocas de mayor durabilidad respecto a las que tenían un tamaño menor a 5 μm. Ordaz y Esbert (1985), basándose en datos de porosimetría de mercurio establecen los límites entre macroporos y microporos en 7.5 μm.

d) *Las formas y tipos de poros.* En este sentido la porosidad puede ser de tipo intergranular, intragranular, intercrystalina, fisural etc. La porosidad del material controlada por la distribución del tamaño de acceso poro, tipo de conductividad entre poros es una de las propiedades físicas fundamentales que controlan la durabilidad del materiales (Fitzner, 1988) entre otros.

Para la determinación de la porosidad se han empleado las siguientes técnicas.

VI.2.10.1 Determinación de la porosidad por medio de la pesada hidrostática.

La pesada hidrostática permite determinar experimentalmente la porosidad de un material, cuando se realiza sobre muestras previamente saturadas en agua mediante vacío.

D_s es la densidad seca.

$$D_s = \frac{A}{B-C} \cdot \rho_{\text{agua}}$$

n° es la porosidad abierta.

$$n^\circ = \frac{B-A}{B-C} \cdot 100$$

S es el contenido en agua en saturación.

$$S = \frac{B-A}{A} \cdot 100$$

donde:

- A. peso de la roca seca.
- B. peso de la roca saturada.
- C. peso de la roca sumergida.

La saturación de las muestras se ha realizado en vacío, de acuerdo con el siguiente procedimiento: Vacío previo durante 14 horas, sin romper el vacío se introduce lentamente agua hasta cubrirlos, manteniendo la muestra 10 horas bajo vacío, después se realiza la pesada saturada e hidrostática.

VI.2.10.2 Porometría de mercurio.

Con la técnica de inyección de mercurio se determina el % de volumen poroso accesible al mercurio. Dicha técnica nos suministra una imagen del sistema poroso, en relación con la distribución del tamaño de los poros, y más en rigor, con el tamaño de sus acceso (Alonso, 1986).

El principio físico de esta técnica de medida de la distribución del tamaño de poro de un sólido, se basa en que el Hg es un líquido que no moja, es decir, presenta un ángulo de contacto $>90^\circ$ y además en función de la presión de confinamiento, éste se introduce en poros de mayor o menor tamaño.

Esta técnica se viene utilizando para:

- Cuantificar la porosidad efectiva.
- Determinar la relación entre macroporos y microporos.
- Determinar el tamaño de poro dominante.
- Establecer la distribución de poros por tamaño.

Dado el pequeño tamaño de las probetas de las muestras que requiere la técnica (Bousquie & al, 1980), se seleccionaron fragmentos donde el elemento predominante fuese el aglutinante y el árido incluido de pequeño tamaño. Las muestras se lavaron y secaron en una estufa antes se las introdujeron en el aparato.

El proceso consiste en inyectar a presión mercurio (líquido que no moja). La presión es traducida en tamaño de radio equivalente gracias a la ley de Jurin.

$$R_{equivalente} = \frac{2\delta \cos\sigma}{P_c}$$

donde:

- P_c = Presión capilar,
- δ = Tensión en la interfase,
- σ = ángulo de contacto.

El medio poroso puede presentar formas muy diversas, entre ellas, globulares, de rendija, cilíndricos, de cuello en botella etc. (Pellerin, 1980). La limitación de este

método está en suponer que los poros son cilíndricos y abiertos en los extremos (Purini, 1980), (Fitzner, 1990).

La ecuación de Washburn describe la penetración de mercurio en sustancias porosas.

$$P = \frac{2\delta \log \cos \sigma}{r}$$

Si consideramos como constante la presión superficial del mercurio y los ángulos de contacto, la relación entre presión aplicada y el radio de poro en que penetra es constante. La tensión superficial del mercurio es de 485 erg/cm² y su coeficiente de T° 0.21 erg/cm². El ángulo de contacto tiene valores conocidos, por tanto, para 480 erg/cm² y 140 r es igual a 75000/P; donde «r» = radio en Å y «P» en Kg/m².

De acuerdo con esta ecuación se obtiene un modelo de poros cilíndricos en (fig. 6.5). Al final se obtiene una secuencia de datos de V = F(r) (fig.6.6).

Los resultados representados bajo la forma de espectro de porosidad se representan en coordenadas semilogarítmicas, en ordenadas el tanto por ciento de porosidad y en abscisas el diámetro de entrada de poro (Peter et al, 1970).

En la determinación se utilizó un equipo Quanta-etron Autoescan-60, con cámara para baja presión, pertenecientes a la Universidad de Granada. Los datos se procesaron mediante el programa Poro.

Es muy abundante la bibliografía sobre este tema y numerosos los autores que la han empleado para la caracterización de los materiales rocosos (Waralaw y Taylor, 1976; Pellerin, 1980; Esbert & al, 1982, Rodríguez Navarro y Sebastián, 1994) entre otros.

Los datos obtenidos por esta técnica se registran según diferentes tipos de representaciones gráficas y matemáticas (Rodríguez Navarro, 1994):

- Porosidad total.

- Curvas acumulativas de volumen de mercurio instruido respecto al radio de

poro.

- Curvas e histogramas de frecuencia de distribución de tamaño de poro.

Este último se obtiene diferenciando el volumen instruido para cada valor del radio respecto al radio de acceso.

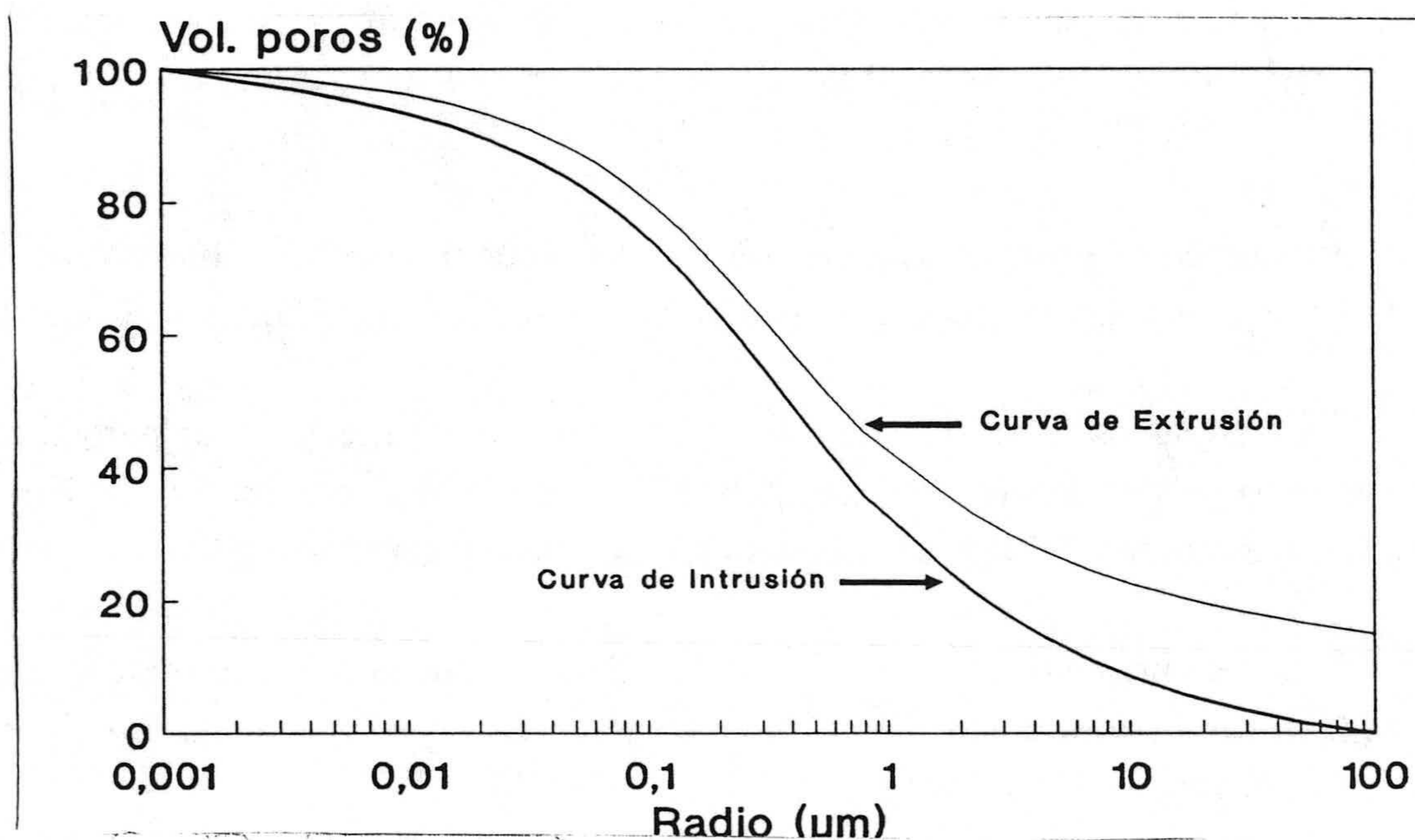


Fig. 6.5. Registro-tipo de intrusión/extrusión obtenido por porosimetría de Hg.

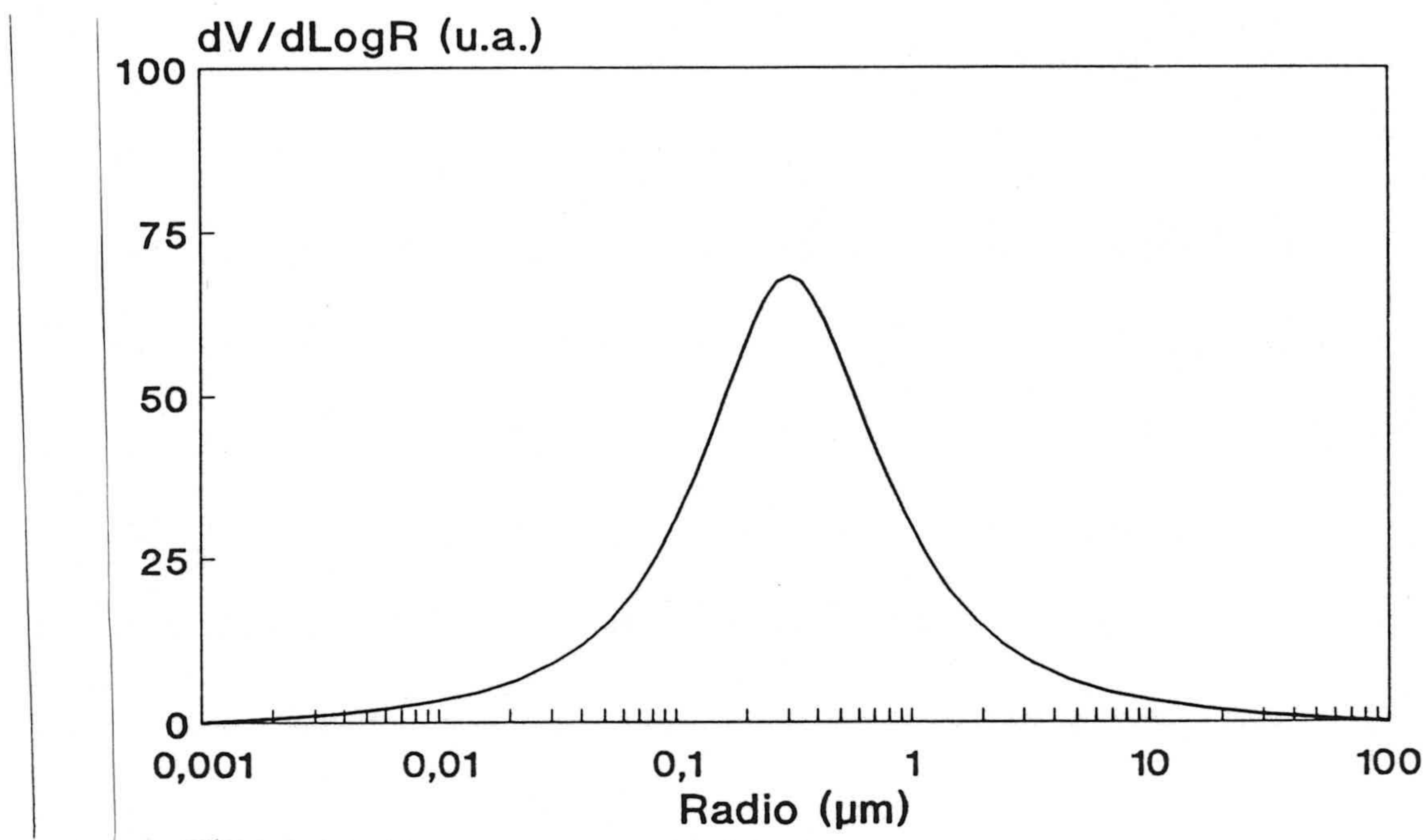


Fig.6.6. Curva de distribución de tamaño de acceso de poro obtenida a partir de la curva de intrusión de Hg de la figura 6.5.

Este tipo de diagramas nos permiten evaluar de una forma rápida cual es la porosidad total y los máximos de distribución de tamaño de acceso de poro. Ver si corresponden a microporos ($\phi < 2.5\mu$) o macroporos ($\phi > 2.5\mu$).

La aplicación de este método tiene sus dificultades:

1. La ecuación para la determinación del radio de poros sólo es válida para poros de sección circular y cuantifica fiablemente sólo poros de tamaño $< 7.5 \mu$.
2. Para poros de 100 \AA se necesita utilizar presiones del orden de 700 atm., lo cual es peligroso pues se puede modificar la textura porosa de la muestra.

Los buenos resultados de esta técnica se deben a la confrontación de los datos obtenidos, con la observación directa llevada a cabo con microscopía óptica y/o electrónica (Rodríguez Navarro & Sebastián Pardo, 1995).

VII. ENTORNO MEDIO-AMBIENTAL.

VII. ENTORNO MEDIO-AMBIENTAL.

VII.1 MICROCLIMA.

La influencia del ambiente es decisiva para el deterioro del material de construcción en general, condicionando sus formas de alteración. En este mismo sentido, el estudio de los factores intrínsecos ambientales, determinados por las características climatológicas, es de suma importancia en el deterioro de cualquier material de construcción (Esbert, 1983).

Las temperaturas máximas extremas y la oscilación térmica juegan un papel importante en la meteorización física de los materiales, provocando tensiones como consecuencia de las variaciones en el coeficiente de dilatación térmica que experimenta todo material al ser sometido a oscilaciones de temperatura importantes.

Otro factor decisivo es la humedad ambiental, que indica la cantidad de agua que contiene la atmósfera. Este factor climático es importante por el efecto que la variación en el grado de saturación puede ocasionar en los materiales de construcción (Calatayud, 1994).

Cabe destacar como últimos factores el viento y la insolación.

En este estudio se han utilizado datos recogidos en el observatorio de Cartuja, dependiente de la Universidad de Granada, situado muy próximo a la ubicación de las murallas, a la misma altura y con idénticas características climáticas.

La información nos proporciona datos desde 1902 hasta la actualidad, han sido recopiladas y ofrecidas amablemente por M. Merlo Vallejo (1935-1995).

VII.1.1- PARÁMETROS CLIMÁTICOS.

Cada constituyente de los morteros presenta un coeficiente de dilatación propio, por eso las oscilaciones térmicas de temperatura, este es el principal condicionante de los ciclos hielo-deshielo, que influyen en la meteorización de las rocas, según su mayor o menor intensidad.

En la tabla VII-1 se muestran los valores medios de los parámetros climáticos

entre 1902 Y 1950, y en la tabla VII-2 vienen reflejados datos recogidos entre 1977 y 1994.

Además se aportan datos sobre las precipitaciones, humedad ambiental, velocidad del viento, etc.

En la figura 7.1 se representa las temperaturas extremas registradas en el observatorio de Cartuja hasta 1967. De igual manera en la figura 7.2 se representa la cantidad de lluvia por metro cuadrado y en la figura 7.3 el número de días despejados a lo largo de este mismo período.

En el entorno estudiado podemos indicar que las precipitaciones son escasas, 475.1 mm. por metro cuadrado, según los datos indicados. La escasez de lluvia viene agravada por las fuertes fluctuaciones del régimen pluviométrico; en Marzo se recogen las máximas cantidades, 65.7 mm por metro cuadrado, mientras que en Julio y Agosto presentan un mínimo de 3.7 a 4.0 por m₂.

Las temperaturas por contra no presentan características del clima mediterráneo, estas presentan rasgos de acusada continentalidad que podrían parecer extrañas, dada la latitud de Granada y su proximidad al mar; pero que son usuales si se tiene en cuenta su altitud y situación fisiográfica.

En todo caso la ciudad constituye un anormal núcleo térmico, tanto por sus temperaturas medias como por régimen anual de 14.8°. El régimen térmico alterna inviernos fríos y prolongados con -9.7 ° de mínima absoluta en Febrero, primaveras templadas con heladas frecuentes y veranos muy calurosos y largos con máximas absolutas de incluso 45°.

Tabla VII-1 Parámetros climáticos desde 1902 hasta 1950.

Paramet.	Ene.	Febr	Marzo	Abril	Mayo	Juni	Julio	Agos	Septi	Octub	Novie	Dicie
T°med.	6.4	7.8	10.2	12.8	16.3	21.0	24.8	25.0	20.6	15.2	10.1	7.2
Lím.Ext	10.4- 3.5	12.2- 4.4	14.6- 6.2	17.7- 9.1	21.0- 12.9	27.6- 21.0	28.3- 22.1	28.3- 22.1	25.5- 17.6	18.7- 11.5	14.6- 6.6	10.3- 4.7
" " Nor	7.6- 5.2	8.9- 6.2	11.6- 8.4	14.6- 10.9	18.0- 14.4	23.1- 19.0	25.9- 23.6	25.9- 24.1	22.4- 19.3	16.8- 13.9	11.3- 8.9	8.7- 5.9
MaxAbs	25.0	25.8	29.7	32.7	35.5	41.5	42.8	45.0	38.6	35.6	27.6	24.1
MinAbs	-7.6	-9.7	-4.5	-2.9	0.6	5.0	7.2	9.2	4.0	0.2	-5	-6.4
Osc.med. días.	10.4	11.6	12.3	13.1	14.6	16.8	17.8	18.0	15.7	13.4	11.2	9.8
Osc.med. extrao.	13.8- 5.6	15.0- 6.7	17.4- 6.9	16.4- 8.2	18.1- 9.8	20.1- 13.4	20.6- 14.7	20.7- 15.1	18.0- 12.2	17.2- 9.3	15.5- 9.8	13.4- 5.7
Osc.med normls.	12.0- 8.9	13.5- 9.7	13.8- 10.8	14.6- 11.3	16.4- 13.2	17.8- 15.2	19.1- 16.7	19.4- 16.7	17.0- 14.3	15.5- 11.7	12.8- 9.6	11.4- 8.0
Lluy med	43.4	52.9	65.7	55.0	42.2	18.4	3.7	4.0	30.0	50.2	58.2	58.2
" ".Extr	154.0	174.4	175.8	164.1	117.5	69.5	52.8	32.8	139.0	155.4	138.9	183.3
" "norm.	82.4- 4.6	95.0- 11.7	105.1- 26.5	88.5- 23.3	97.9- 14.1	36.9- 0	11.8- 0	9.0-0	57.1- 0	85.0- 12.8	92.1- 23.1	96.5- 18.3
"max24h	46.6- 48	50.2- 47	39.1- 17	37.9- 32	40.0- 35	27.9- 21	42.0- 26	32.8- 49	66.5- 21	38.2- 13	53.0- 49	43.0- 37
N° días lluv.	8	9	11	10	9	5	1	2	5	8	10	10
Humed%	73	69	68	66	63	57	51	50	60	66	73	75
Pres.mm	699.6	698.4	696.9	696.2	696.2	697.8	698.5	698.7	698.8	696.0	697.2	698.7

T° med= Temperaturas medias, Lím.Ext.= Límites extremos de temperatura, Lím.Nor= Límites normales de temperatura, Máx.Abs.= Temperatura máximas absolutas, Min.Abs= Temperaturas mínimas absolutas, Osc.Med días= Oscilaciones de temperatura medias diarias, Osc.med extrao= Oscilaciones de temperatura media extraordinarias, Osc.med normls= Oscilaciones de temperatura media normales, Lluy med= precipitaciones medias, Lluy.Extr= Precipitaciones extraordinarias, Lluy.norm.= Precipitaciones normales, Lluy.max 24h=Precipitaciones máximas en 24 horas, N° días lluy= número de días de lluvia por mes, Humed= Humedad ambiental en tanto por ciento, Pres. mm= Presión atmosférica en mm.

Tabla VII-2. Parámetros climáticos entre 1977-1994.

Paráme	Enero	Febre	Marzo	Abri	May	Juni	Julio	Agos	Septe	Octub	Novie	Dicie
T°med.	6.8	8.7	12.2	12.9	16.1	20.6	25.6	24.9	22.3	15.7	11.3	7.2
T°max.	20.8	24.6	28.6	29	37.6	40.2	41.6	43	38.0	30.8	24.4	21.8
T°min.	-6.8	-6.0	-4.0	-1.6	1.8	5.5	9.6	8.5	8.4	2.9	-2.6	-6.6
Osc.Tr												
Max	12.8	15.9	16.4	17.0	16.5	18.4	18.1	18.1	16.8	14.8	13.9	13.8
Osc.Tr												
min.	4.2	4.0	4.7	4.4	5.6	7.2	9.2	9.4	8.6	4.7	3.0	3.8
Lluv												
med.	47.2	45.3	13.8	43.7	29.5	16.6	3.6	1.8	24.4	43.4	56.9	43.6
Humed												
relat%	62.0	59.0	51.0	50.3	45.0	38.3	32.9	41.7	36.4	55.7	61.8	55.1
Pres.												
max	712.0	707.0	705.0	702.0	699.9	697.0	701.0	701.0	702.0	703.5	705.1	704.5
Pres.												
min	688.5	686.3	686.5	689.0	689.0	686.0	695.5	692.0	694.0	690.0	689.0	691.0
Osc.												
Pres.	16.2	19.5	19.7	14.7	11.5	8.6	8.1	9.3	12.5	14.5	17.5	13.2

T° med= Temperaturas medias, T° Máx. = Temperatura máximas, T° Min. = Temperaturas mínimas, Osc.T Máx= Oscilaciones de temperatura máximas, Osc. T min = Oscilaciones de temperatura mínimas, Lluv med= precipitaciones medias en mm, Humed relat %= Humedad relativa en tanto por ciento, Pres.máx= Presión atmosférica máxima en mm., Pres min= Presión atmosférica mínima, Osc. Pres=Oscilaciones de presión.

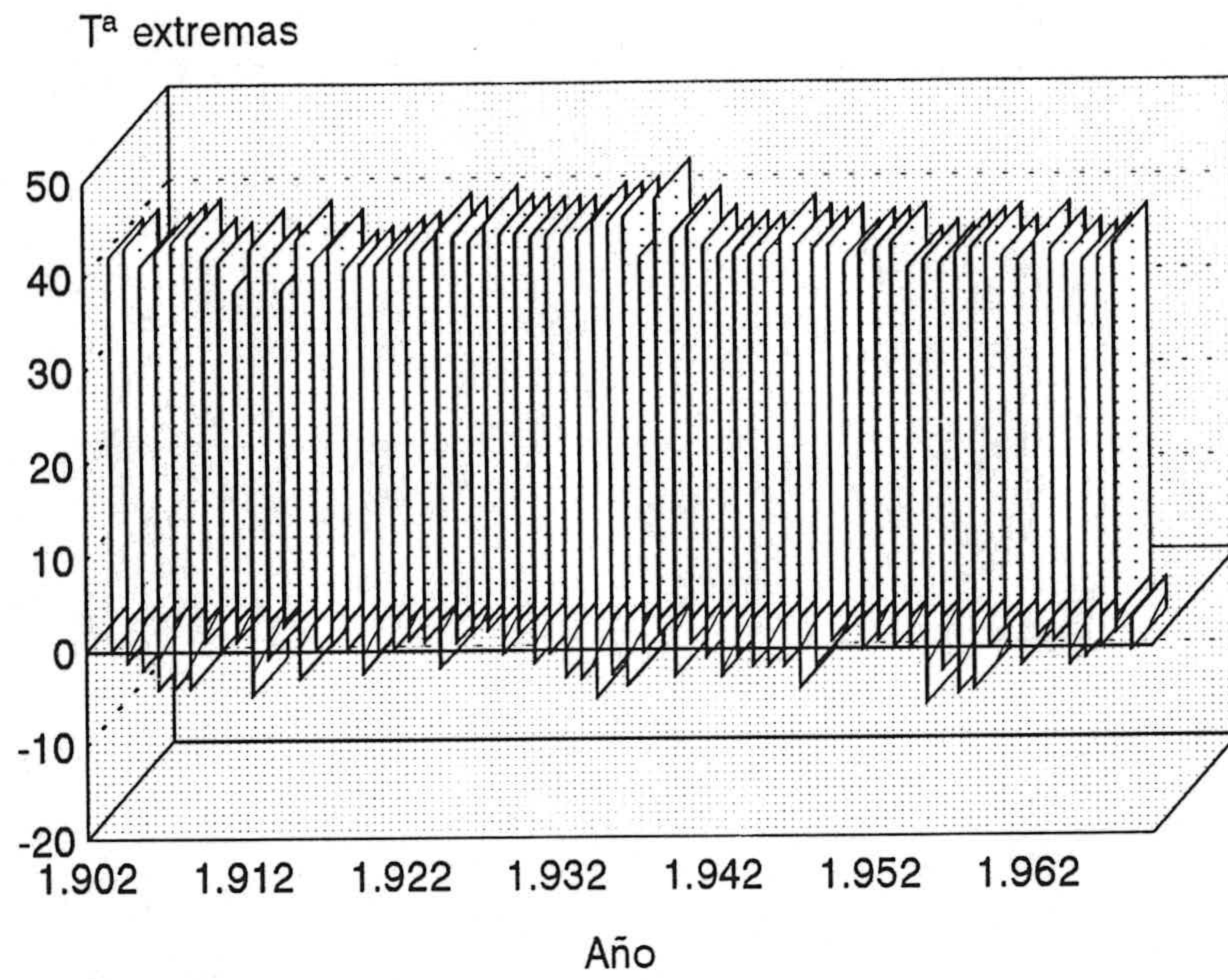
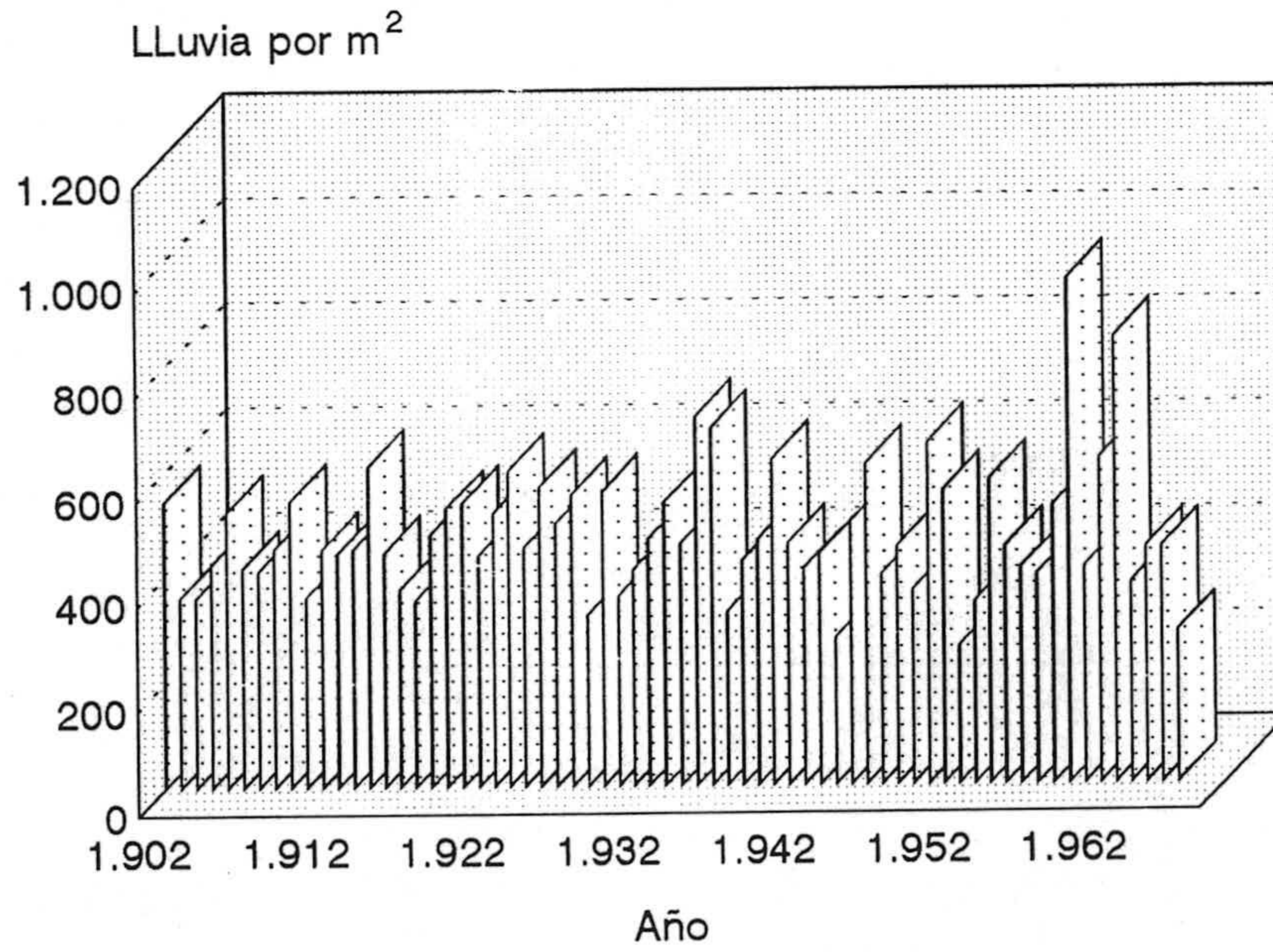


Fig. 7.1. Temperaturas extremas registradas en el observatorio de Cartuja entre 1902 y 1970.



■ Cantidad de lluvia m²

Fig.7.2. Cantidad de lluvia por m² registradas en el observatorio de Cartuja entre 1902 y 1970.

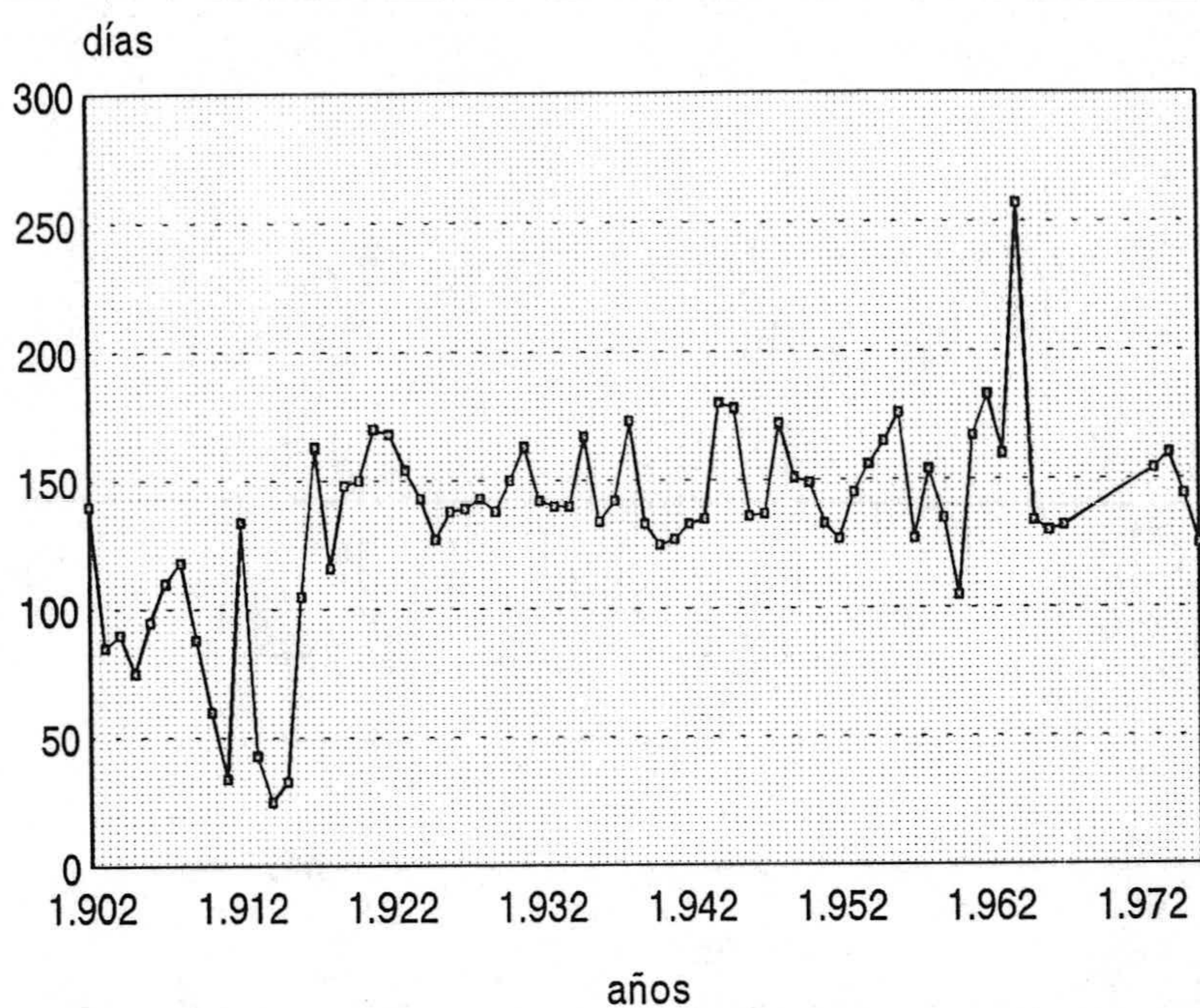


Fig.7.3. número de días despejados en Granada entre 1902 y 1970.

VII.2 CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.

La gran aglomeración existente en los núcleos urbanos, supone un uso excesivamente intenso del aire por numerosas actividades. La máxima emisión de contaminantes tienden a concentrarse en los centros representativos de las ciudades, que corresponden normalmente con los cascos antiguos, donde se agrupan la mayor parte del Patrimonio Histórico. Esto ha hecho que en los últimos años estos edificios se degraden de una manera alarmante, motivada fundamentalmente por las emisiones de contaminantes a la atmósfera, responsabilizando a los automóviles, calefacciones y pequeñas industrias.

La lluvia ácida provocada por la emisión a la atmósfera de determinadas sustancias de carácter gaseoso o sólido (partículas carbonaceas, metálicas etc.) El contacto de estas sustancias con el agua originan distintos tipos de ácidos (SO_4H_2 , NO_3H etc.). Por otra parte las partículas metálicas catalizan la formación de estos ácidos a partir de SO_2 , CO_2 y SO_2 procedentes de la contaminación.

Las combustiones utilizadas son, en su inmensa mayoría derivados del petróleo, tales como gasolina, gasóleo, principalmente, y en menor cuantía gas natural, gas butano, carbón y leña.

Los contaminantes emitidos en estos procesos dependen en gran medida, del combustible en cuestión, pero algunos son comunes a todos ellos: CO_2 , CO , NO_x y partículas. Entre los más frecuentes están el dióxido de azufre, hidrocarburos sin quemar, metales pesados etc.

Estudios realizados a este respecto, indican que las emisiones procedentes de los motores de los vehículos suponen el 99% de la emisión total de CO , el 89% de los hidrocarburos, el 76% de los N_xO , el 82% de las partículas en suspensión y el 14% del SO_2 . Estos datos nos dan una idea de la gran importancia que tiene el tráfico para el aire que respiramos. A esto hay que añadir que mientras que las otras emisiones procedentes de las instalaciones de calefacción, sólo tienen una contribución importante en la época invernal y únicamente en ciudades donde el clima es especialmente frío, estas emisiones se producen a una altura considerable, a diferencia de la contaminación en vehículos, las cuales tienen lugar a lo largo de todo el año a nivel del suelo, afectando de forma esencial al aire que inhalamos.

Entre los contaminantes más importantes podemos destacar: aerosoles, dióxido de carbono, monóxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, ozono, hidrocarburos, metales pesados (P, Hg, Z, Cd, Al, Mn etc), amoníaco y derivados, ácido sulfúrico, ácido nítrico, halógenos, compuestos orgánicos volátiles y sustancias radioactivas.

El anhídrido sulfuroso y sulfúrico se origina en el proceso de combustión de los combustibles de origen fósil (carbón y petróleo):

El SO_3 es capaz de captar humedad del ambiente y formar aerosoles de ácido sulfúrico. Las sustancias que mejor catalizan esta reacción son las sales de magnesio e hierro. El destino final es su transformación en sulfatos.

El monóxido de carbono se origina como consecuencia de la no combustión del combustible fósil. El dióxido de carbono se origina directamente de la quema del combustible fósil y por la respiración de animales durante la fotosíntesis de las plantas.

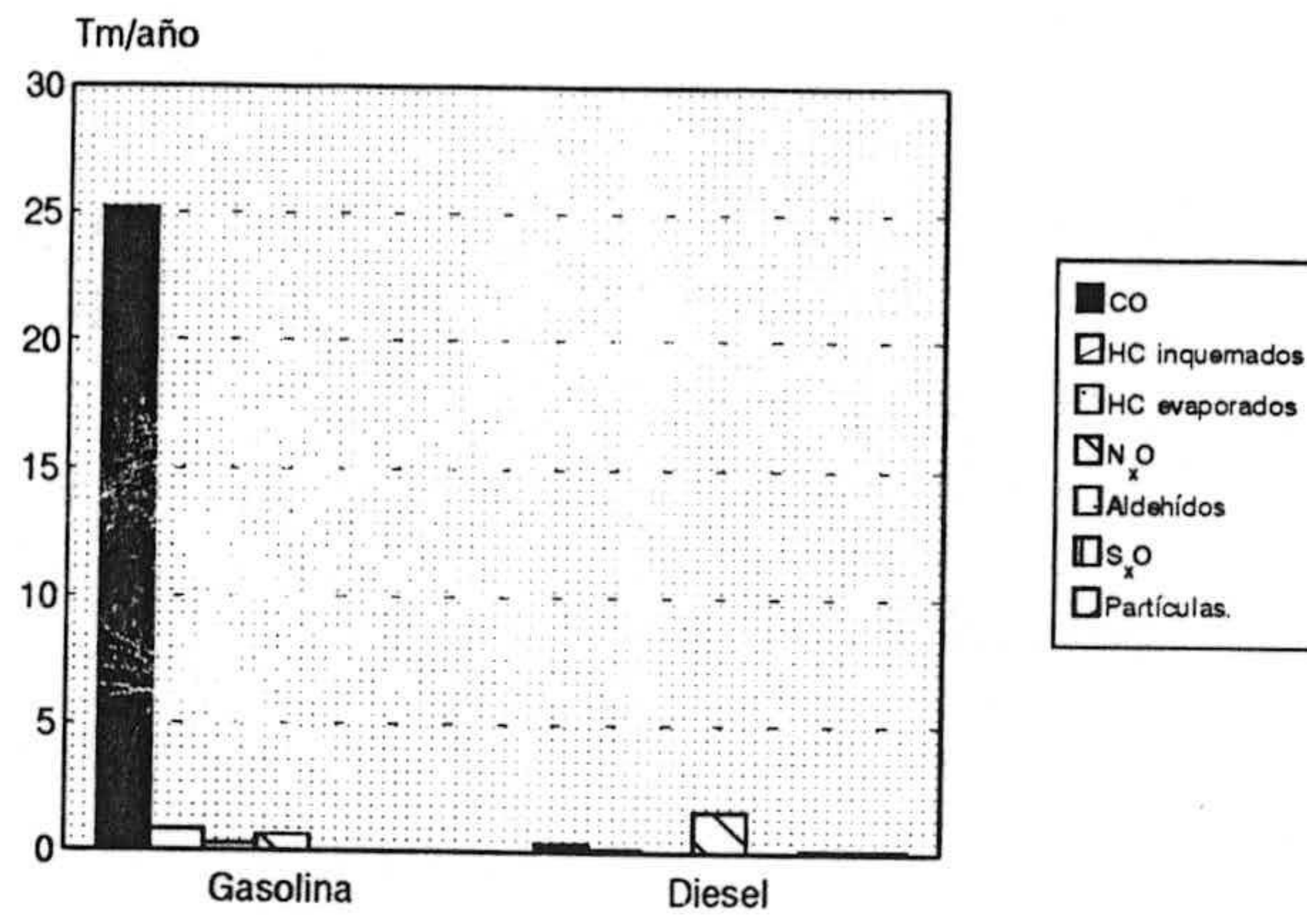
Los hidrocarburos son gases a temperatura ambiente, aunque presentan en su composición elementos diferentes del carbono y del hidrógeno.

Los metales pesados pueden presentar una alta toxicidad, entre los más perjudiciales podemos destacar el P, Cd, Hg; y como menos tóxicos el Fe, Al, Mg, Cu,.

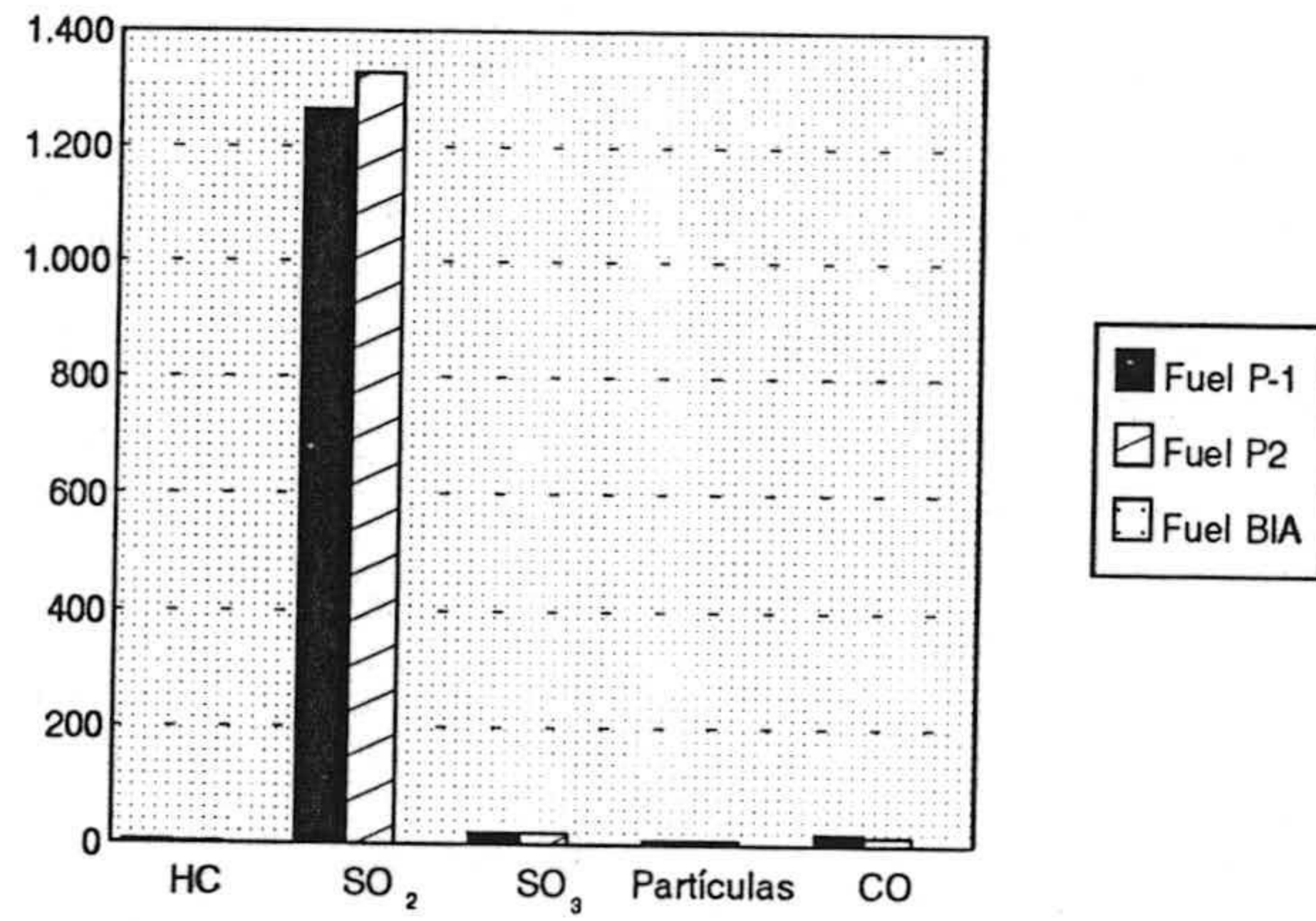
La contaminación también se ve afectada por una serie de condiciones meteorológicas como son: T^a del aire, gradiente vertical de la temperatura, velocidad del viento (varia con la T^a), radiación solar, humedad relativa, nubosidad y precipitaciones.

Son escasos los datos de los que disponemos sobre contaminación en la ciudad de Granada, y estos datos son referidos al centro de la ciudad, y no exactamente en el lugar donde están ubicadas las murallas, situados a mayor altitud y separados de centro de la ciudad, pero no exentos del tráfico rodado.

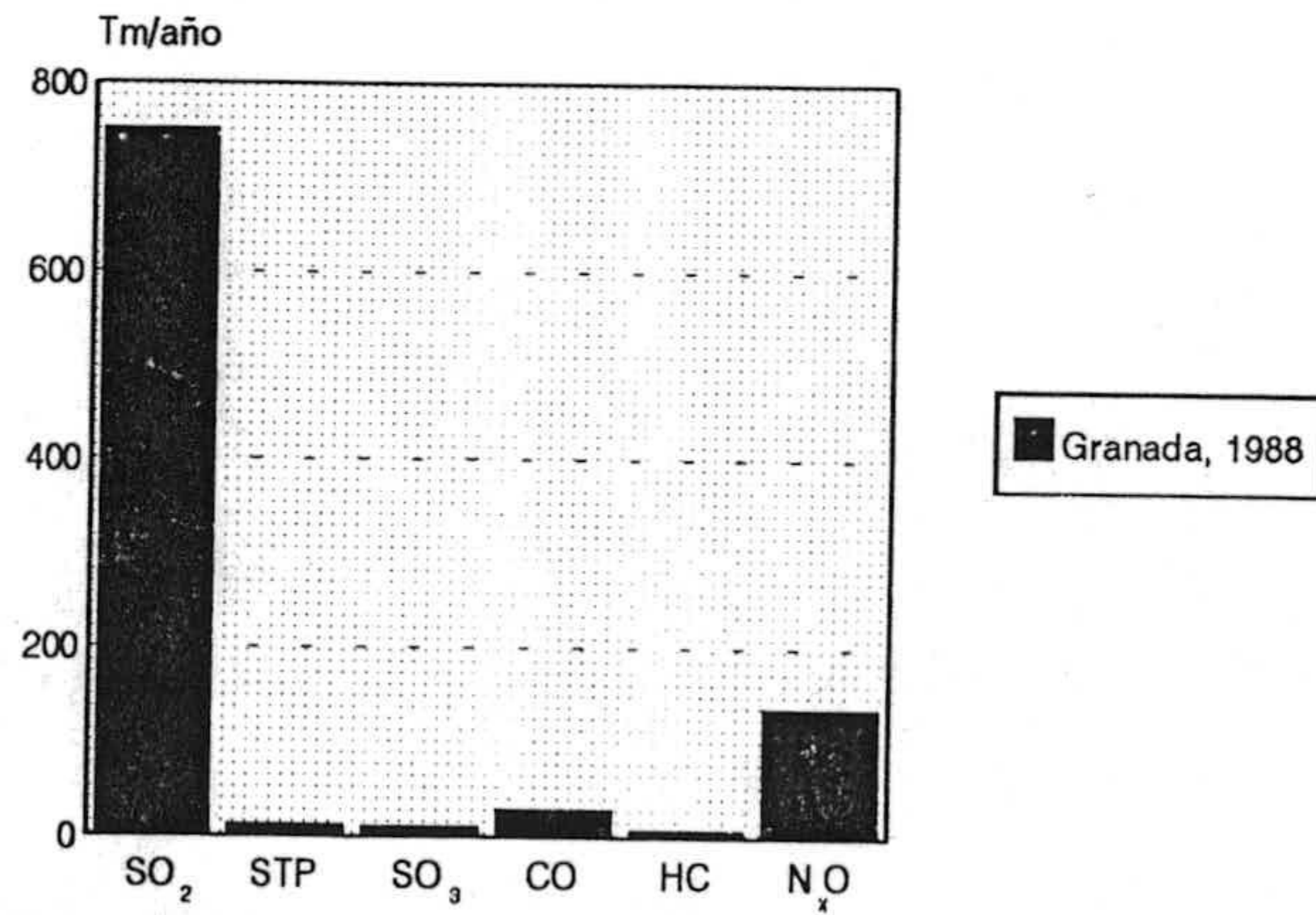
En la fig.7.4 vienen indicados los contaminantes atmosféricos emitidos por los distintos combustibles en la ciudad de Granada durante el año 1988 según las ventas de combustible, y en figura 7.5. vienen expresados la variación en la emisión de estos contaminantes a lo largo del día, correspondiendo este a un día de gran actividad urbana.



Contaminación por vehículos a motor Gasolina-Diesel (provincia de Granada).

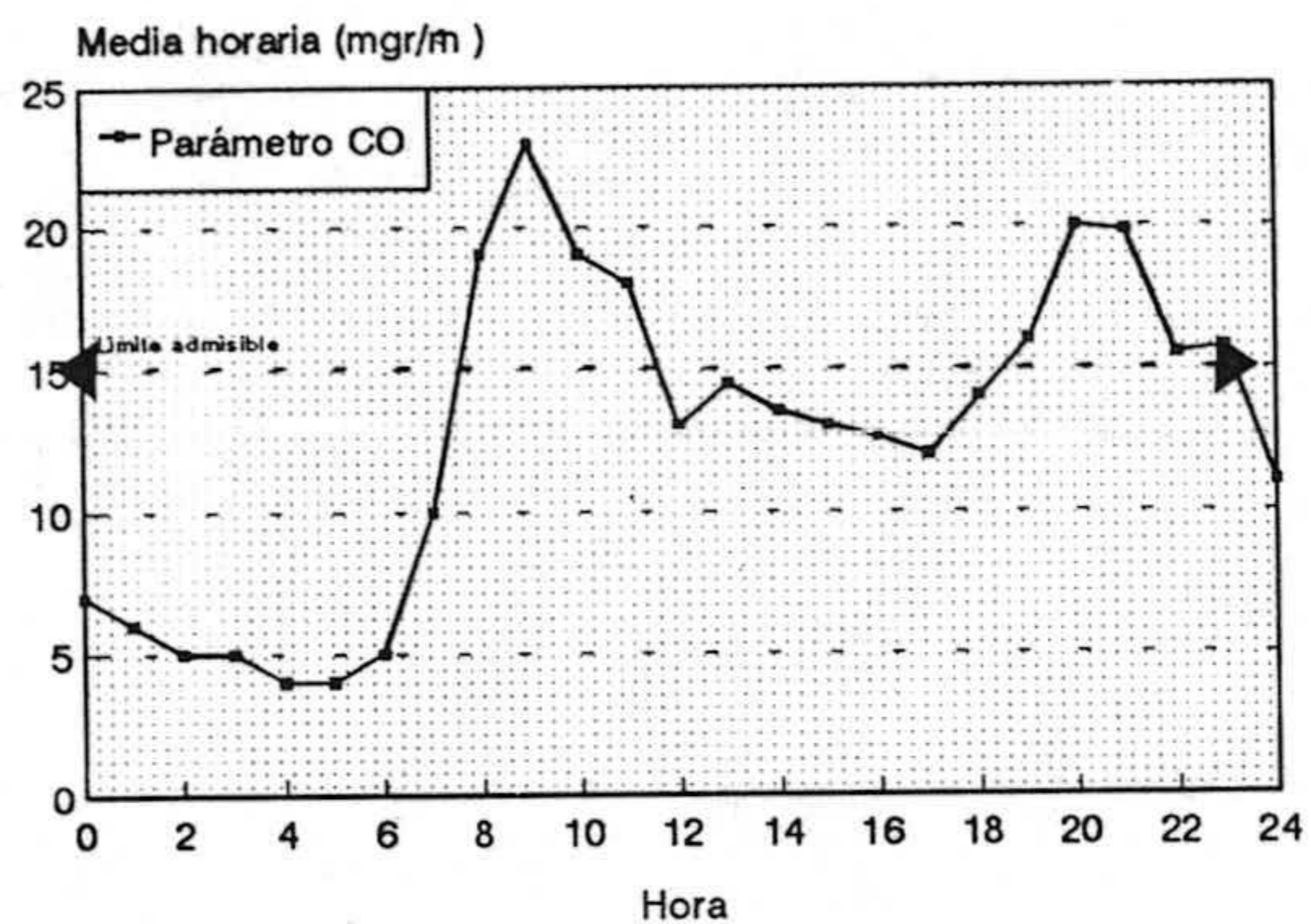


Contaminación procedente de combustibles fósiles (Fuel Oils)

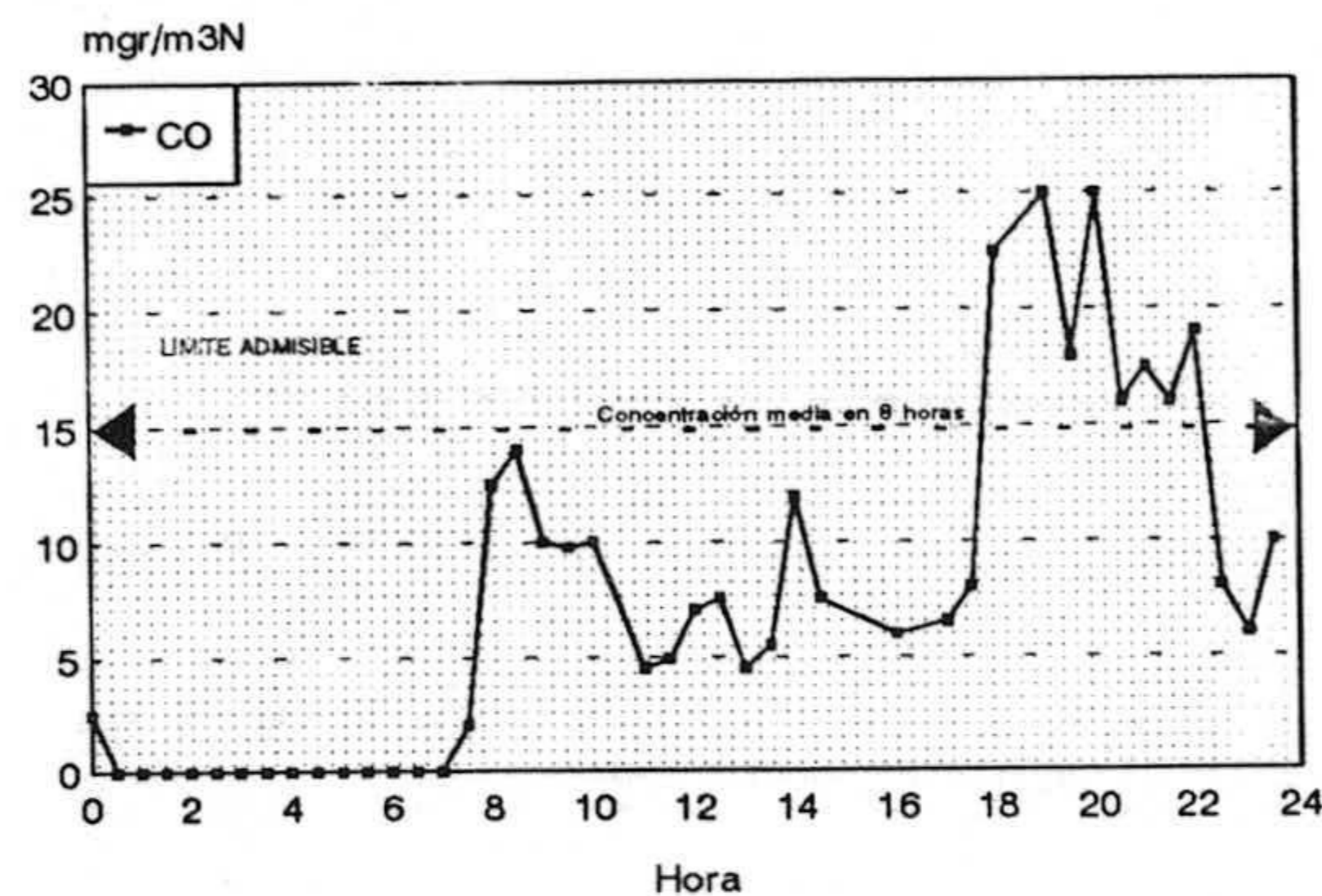


Contaminantes procedentes del gasóleo C (calefacciones)

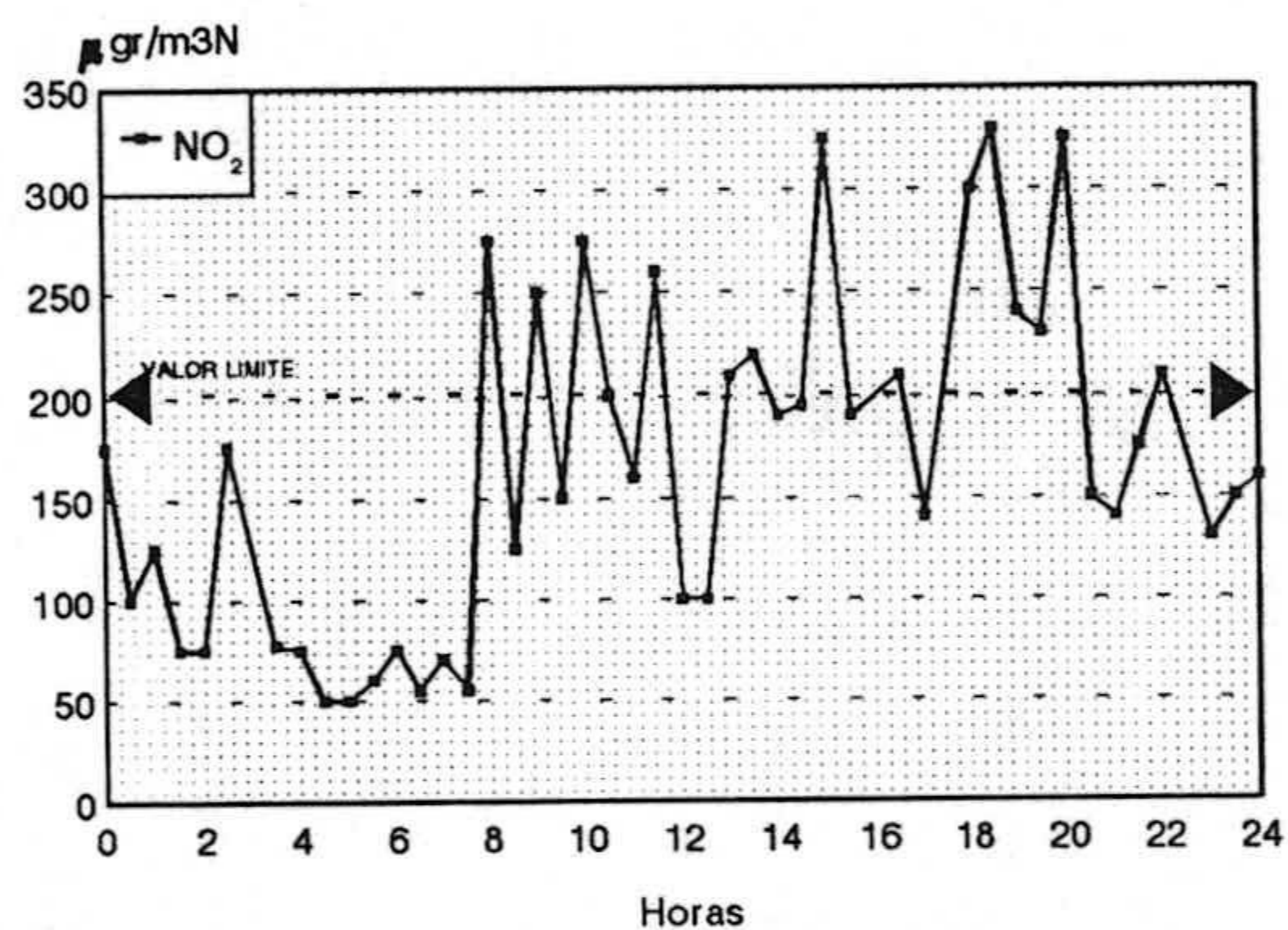
Fig. 7.4. Emisión de contaminantes a la atmofera (Granada, 1988).



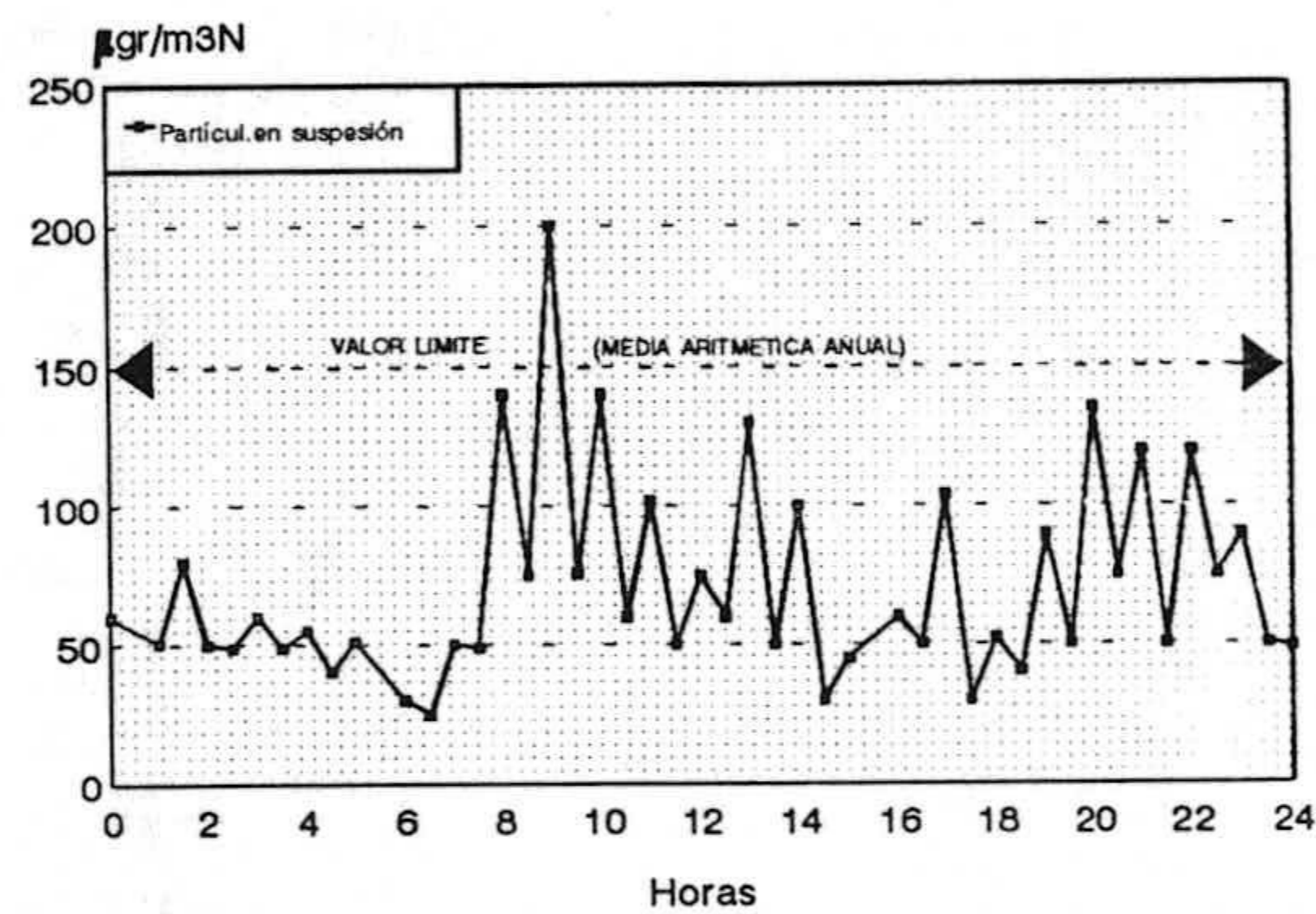
Granada 24-Enero-90.



19 de Febrero de 1993



19 Febrero del 1993



19 de Febrero de 1993

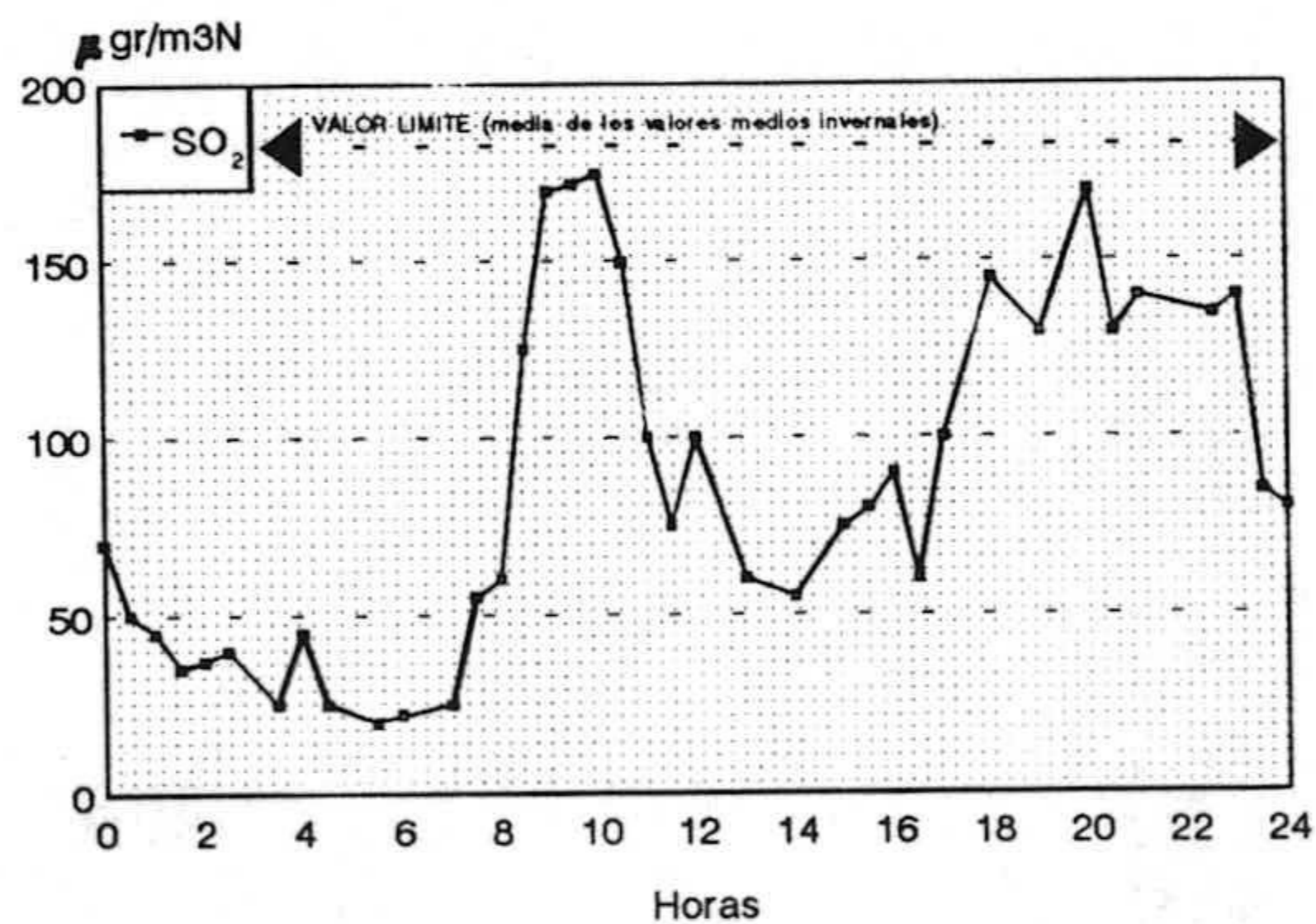


Fig.7.5 Evolución diaria de los contaminantes en la ciudad de Granada (Febrero de 1993).

**VIII. MATERIAL CONSTITUYENTE DE LAS MURALLAS DE
GRANADA.**

VIII. MATERIAL CONSTITUYENTE DE LAS MURALLAS DE GRANADA.

VIII.1 INTRODUCCION.

No existe ningún documento histórico que haga referencia sobre la posible localización de la cantera de extracción del material utilizado en estas construcciones.

Según datos recogidos por Torres Balbas (1982): «la fábrica de las cercas era función del material existente al pie de obra, y de los recursos económicos de las gentes que las levantaban, cuando éstos eran amplios, existía la posibilidad de transporte desde lugares algo alejados. En casi todos los lugares de la Península, se podía levantar este tipo de construcciones: sillería, tapial, piedra en mampostería con mortero de cal y el ladrillo empleada para las fortalezas desde el siglo X. La grandeza del califa permitió emplear el primer material en muchas. Desde el siglo XI, a consecuencia de la caída del califato y en los reinos de taifas triunfó el económico tapial y la sillería tan sólo volvió a aparecer de este lado del estrecho en frentadas de puertas, desde el siglo XI al XV».

Apoyándonos en el criterio base de cualquier construcción en tierra: ésta consiste en utilizar un material que no precise costes elevado en su extracción, elaboración y transporte; debemos suponer que la tierra empleada en estas construcciones procedía siempre de lugares cercanos a la propia construcción. El material fue extraído de la denominada geológicamente Formación Alhambra, en el afloramiento situado en el barrio granadino del Albayzín y sus proximidades. El estudio se ha llevado a cabo sobre un total de 18 muestras recogidas en distintos puntos del afloramiento.

En este apartado se pretende caracterizar tanto del material utilizado en estas construcciones como conocer algunos datos geotécnicos de subsuelo sobre el que se asientan. Conocer estos aspectos resulta importante, porque estos factores pueden influir de forma directas en patologías geomecánicas, y por otra parte abordar la temática de los riesgos naturales en esta zona nos puede aportar una información adicional interesante a este respecto.

VIII.2 ENCUADRE GEOGRAFICO.

Las posibles canteras se localizan en el sector Este de la depresión de Granada, se alzan en una zona montañosa de altura media donde existe un importante afloramiento de material detrítico llamado Formación Alhambra (Von Drasche, 1879) (figura 8.1).

La parte baja de la ciudad aparece levantada sobre dos plataformas distintas, separadas en líneas generales por la línea de nivel 680 m., a pesar de su escaso desnivel 20 m. en 20 Km., sirvió para que a su favor se trazasen las murallas de la Granada musulmana; y es en este mismo nivel donde se separan entre sí las dos terrazas fluviales más elevadas de la cuenca del Genil, que en la actualidad se encuentran colmatadas por relleno (Bosquel Maurel, 1985).

De dichos relieves bajan suaves pendientes hacia la parte llana parcialmente erosionados, donde se ha desarrollado una importante red fluvial que atraviesa toda la depresión y que ha penetrado profundamente en todos los materiales que la constituyen.

El sector de estudio se incluye dentro de la hoja 1009 del mapa geográfico Nacional, escala 1:50000, y queda incluido bajo las siguientes coordenadas UTM:

Latitud: 37° 10' 40" - 37° 11' 20"

Longitud: 0° 5' 10" - 0° 6' 20"A

VIII.3 ENCUADRE GEOLOGICO.

VIII.3.1 INTRODUCCION.

La depresión de Granada se sitúa en el corazón de las cordilleras Béticas, se trata de una de las depresiones internas desarrolladas entre los distintos niveles montañosos con posterioridad al plegamiento Alpinino. Los materiales que constituyen dicha depresión, descansan sobre un paleorelieve escavado de material bético y subbético.

En esta depresión se sitúa el contacto entre las zonas internas y externas de las Cordilleras Béticas, estando representadas las primeras por material de las zonas Béticas (Alpujarride y Maláguide), Circumbética (complejo Dorsalino) y las zonas externas representadas por el dominio Subbético Interno y Medio (Figura 8.2).

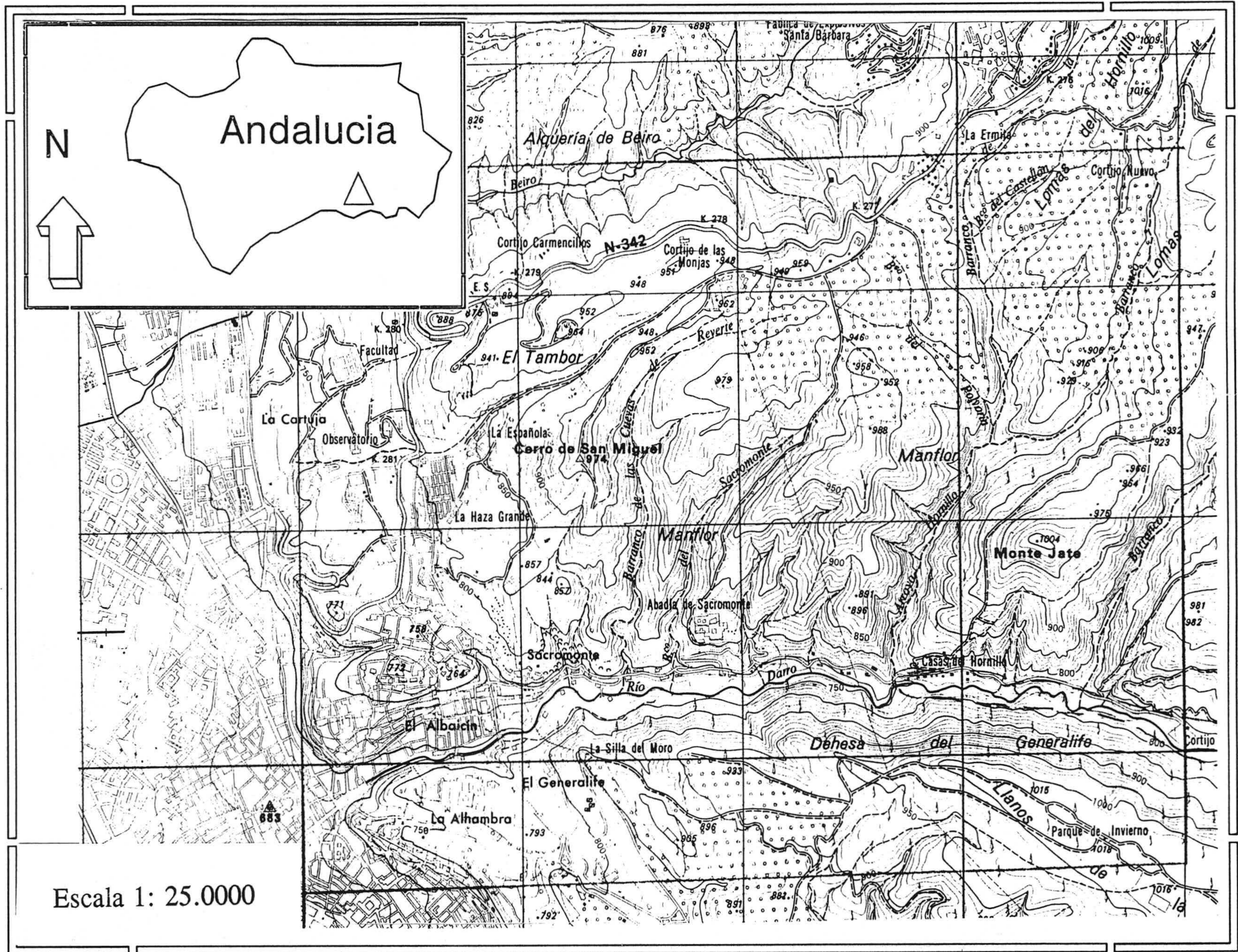


Figura 8.1

Las cordilleras Béticas representan el extremo occidental del conjunto de cadenas Alpinas europeas. Se trata de una zona conjuntamente con la zona Norteafricana, inestable afectada durante el Mesozoico y gran parte del Terciario por fenómenos tectónicos.

El subbético situado al norte, presenta facies pelágicas profundas a partir del Domerense y facies turbidíticas hasta el Jurásico terminal. Los materiales neógenos que descansan directamente sobre este paleorelieve, corresponden a un ciclo transgresivo que comienza con facies de playa y posteriormente un desarrollo de plataforma carbonatada con arrecifes de trabellastrea, el máximo de transgresión se alcanza con depósito de margas y lutitas marinas con Deltáium. Después, sobre la cuenca, se asienta una sedimentación evaporítica de génesis y ambiente deposicional no bien conocido, y localmente, depósito de turbiditas asociado a estas evaporitas, la Malá (Dabrio et al 1972).

Por esta época y en otros puntos de la depresión (borde NE) el levantamiento de las sierras circundantes se refleja por la formación de abanicos aluviales constituidos esencialmente por sedimentos conglomeráticos que penetran en el medio marino. Tras el depósito de las masas principales de conglomerados, el medio evoluciona hasta continental y se instala en la región una red fluvial que va a desembocar en zonas lacustres y pantanosas (Alfacar y Jun). La serie comienza desde la Block-Formación pasando lateralmente a molasa de margas del centro de la depresión, encima margas yesíferas y calizas del Vindoboniense y Potienses.

La cubeta de subsidencia que compone la depresión de Granada, está en íntima relación con el borde suboriental de Sierra Nevada y es el resultado de, al menos en su parte noroeste, de cuatro tectónicas de diferente edad. La erosión arrasó el relieve originado en la colisión Alpina, apareciendo en el Potiense, una llanura de material grosero al pie de Sierra Nevada, que se ha denominado Blok-Formación. Esta penillanura fue modificada después del Mioceno, aunque pudo iniciarse antes, como consecuencia de ello, el relieve se rejuveneció, comenzando a iniciarse un importante ciclo erosivo Plioceno-Pleistoceno. En una primera etapa de este ciclo se produjo abundantes derrubios en discordancia sobre este Mioceno, originándose la formación de Jun y Alfacar. La tectónica Cuaternaria elevó a grandes alturas el Plioceno, y esto unido al ciclo erosivo que tuvo lugar generó una serie de conglomerados por desmantelación

de las Block-Formación llamados conglomerados Alhambra.

Todo este conjunto surgido de estas condiciones sufrió los efectos de un ciclo glacial; naciendo a la vez la red hidrográfica actual del Genil y sus afluentes Beiro, Darro, Monachil y Dilar. Esta red ha escavado diversos niveles de erosión en función de las pulsaciones Pliocénicas. El nivel neogeno más elevado corresponde al que viene definido por una altura entre los 800 y 1100 mts. situado al pie de las sierras circundantes. Por debajo de los 600 mts. aparecen las terrazas cuaternarias escalonadas. La más elevada de estas terrazas esta encajada en el cinturón de conglomerados pleistocénicos de la Alhambra.

VIII.3.2. ANTECEDENTES.

La recopilación de antecedentes de estudios realizados sobre estos materiales, ha sido fundamental para poder entender las características geológicas de los materiales que constituyen la Formación Alhambra. Sin embargo los datos previos de contenido en mineralógico y petrográfico de estos materiales han sido escasos.

Para conocer la génesis de los conglomerados Alhambra es fundamental estudiarlos en relación a la Depresión de Granada, con la cual está íntimamente ligada. Los conglomerados que constituyen el cerro de S. Miguel, el Sacromonte, la Alhambra y la Alcazaba Cadima fueron designadas por Von Drasche (1879) como " Alhambra Conglomerat". De las observaciones realizadas llegó a decir que en esta zona había una discordancia entre un paquete de conglomerados que el denominó Block-Formation, y un conglomerado horizontal de origen no marino al que llamó Formación Alhambra.

Para Beltran y Killian (Misión de Andalucía 1889), la Depresión de Granada está constituida de una Molasa de edad Helveniense (borde Meridional y Oriental) al que se superpone en discordancia angular un Tortoniense marino (margas azules con Deltalium) y un complejo de cantos de roca (Block- Formación) que en su parte superior sería Sarmatiense. Para estos autores todo el material es Tortoniense formando unidad con todas las capas hasta el Darro, el complejo yesífero estaba superpuesto a los conglomerados de edad Tortoniense-Sarmatiense, siendo por tanto Potiense, y no existe Plioceno. Royo Gómez (1922) basándose en el trabajo de estos autores da una edad Sarmatiense a la formación yesífera y un Potiense a las margas y calizas lacustres superpuestas.

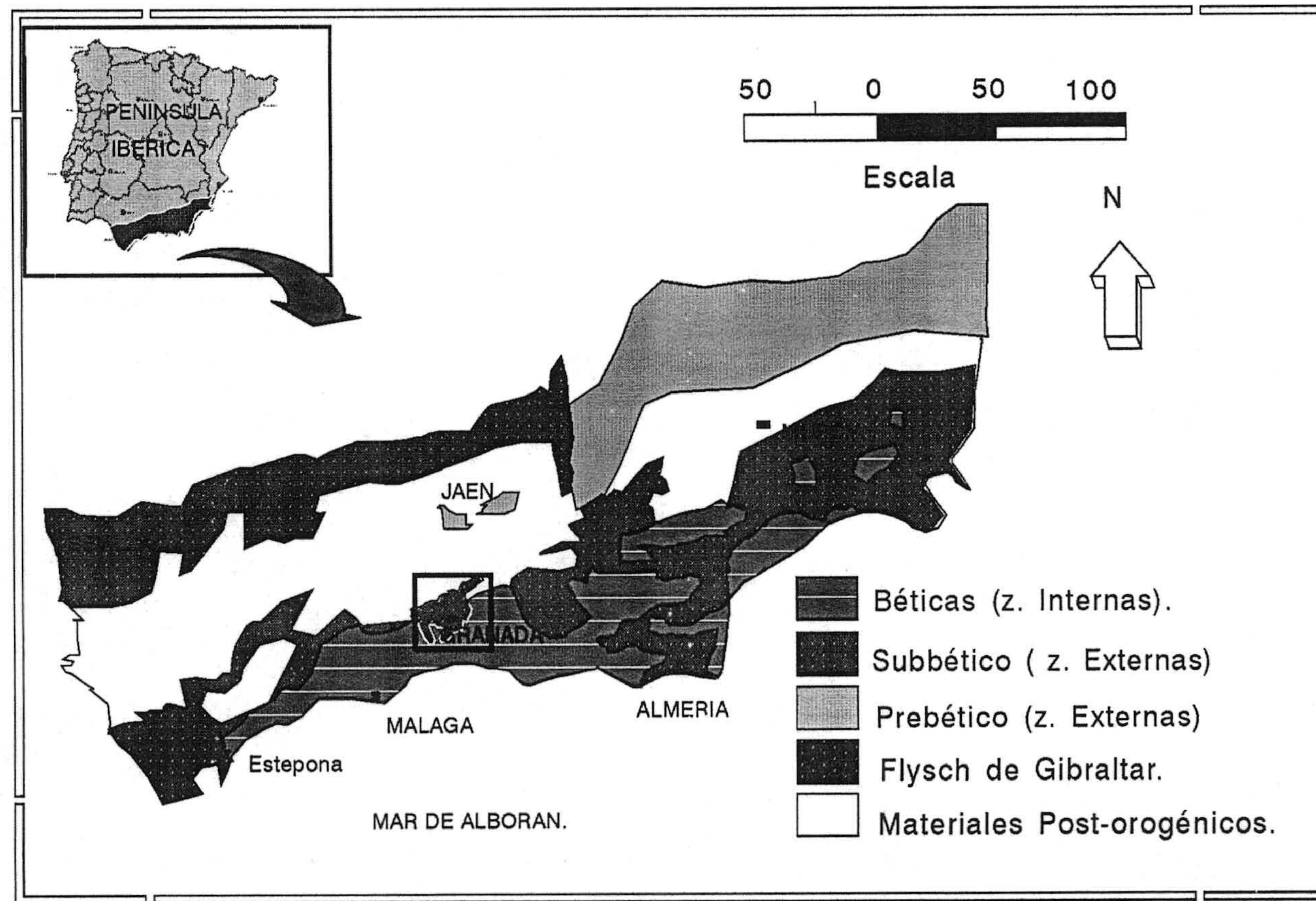


Fig. 8.2. Emplazamiento geológico.

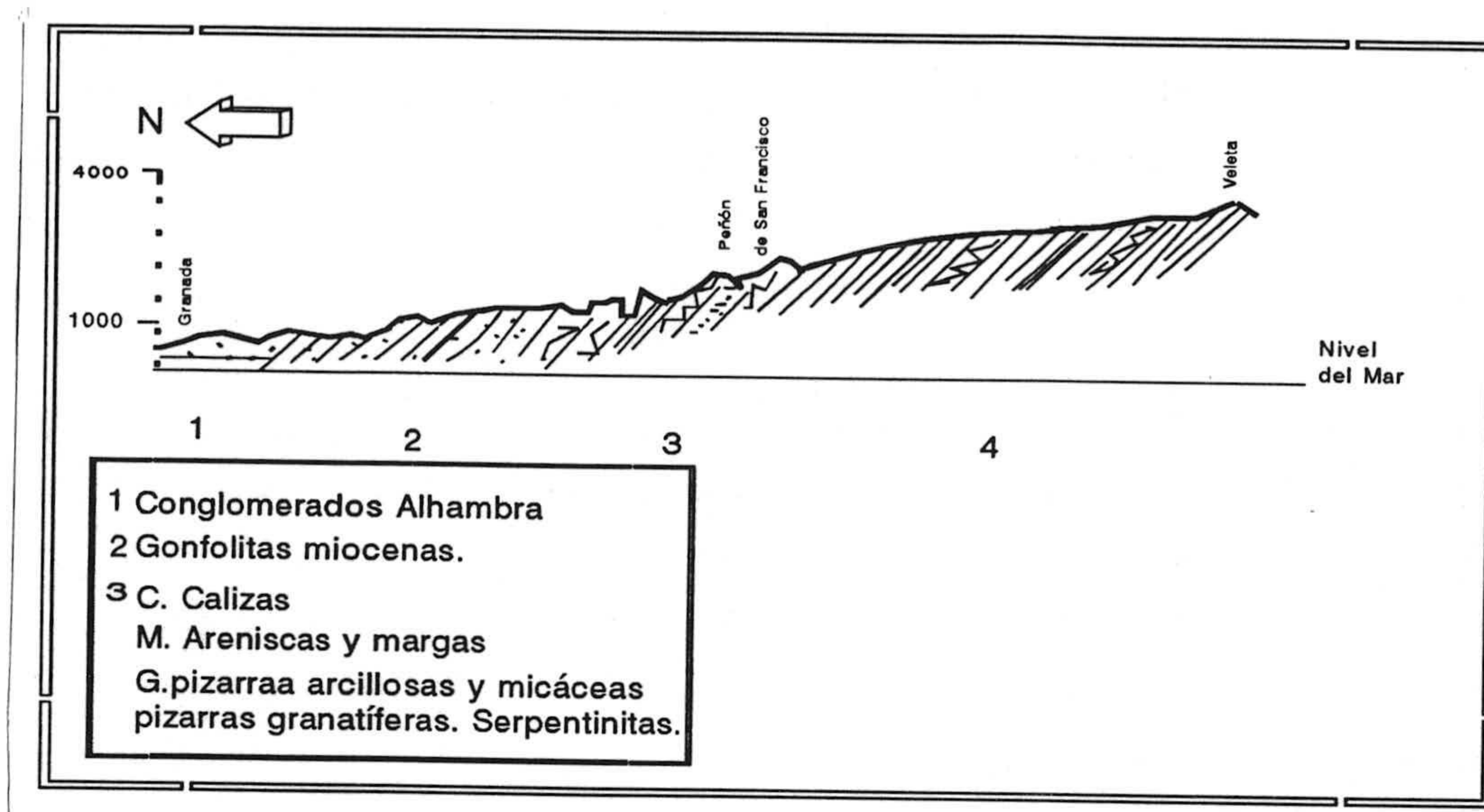


Fig. 8.3 Corte geológico de Von Drasche (1879).

Hoennes (1905), no admite la discordancia señalada por los autores de la Misión de Andalucía, ni tampoco la señalada por Von Drasche.

Viennot (1930), al hacer referencia en sus estudios sobre la depresión de Granada a esta formación, le atribuyó una edad Plioceno y estudiándola conjuntamente con la serie de Alfacar a esta le dio una edad Vindoboniense marino.

Según este autor, la depresión de Granada después de un largo período de emersión, fue invadida por el mar del Mioceno inferior y se hundió dando lugar a una cubeta sinclinal. Esta cubeta se va colmatando de material cada vez más moderno que representa variaciones en el deposito dependiendo de la profundidad y lugar. Para el no existe ninguna discordancia importante, las facies de yesos son una equivalente lateral de facies marinas Vindoboniense y al SE de la cuenca existe una formación aluvial, aparentemente Pliocénica que reposa discordantemente sobre la Miocénica, a la que Von Drache denominó Formmación Alhambra (figura 8.4).

Viennot realiza un corte geológico en el valle alto del Genil, y en él establece que las margas amarillas y grises con pequeñas concreciones de calizas sin fósiles pasan hacia arriba a margas azules con *Deltalium*. Estas margas se van alternando con cantos de

rocas Béticas constituyendo la Block-Formación. Este complejo buza 20°N y esta cubierto por unos conglomerados y margas rojas del Plioceno (conglomerados Alhambra). Linares y Colom (1957), en su estudio realizado sobre la microfauna de la cuenca alta del Genil, establecen un máximo de transgresión en esta zona de 200-300 mts. dándole una edad a la Block-Formación de helvenciense-Tortonense.

Aguirre tras unos hallazgos paleontológicos encontrados en los conglomerados Alhambra, en 1956, situó esta formación en un pliocuaternario. Las observaciones que realizó en estos materiales le llevó a decir que es poco lo que se sabe sobre esta formación y la necesidad de tratarla detenidamente. Realizó una cartografía de la zona de estudio que viene indicada en la fig. 8.5. Este autor realiza un resumen sobre las correlaciones propuestas en esta zona hasta el momento y vienen resumidas en la siguiente tabla VIII-1.

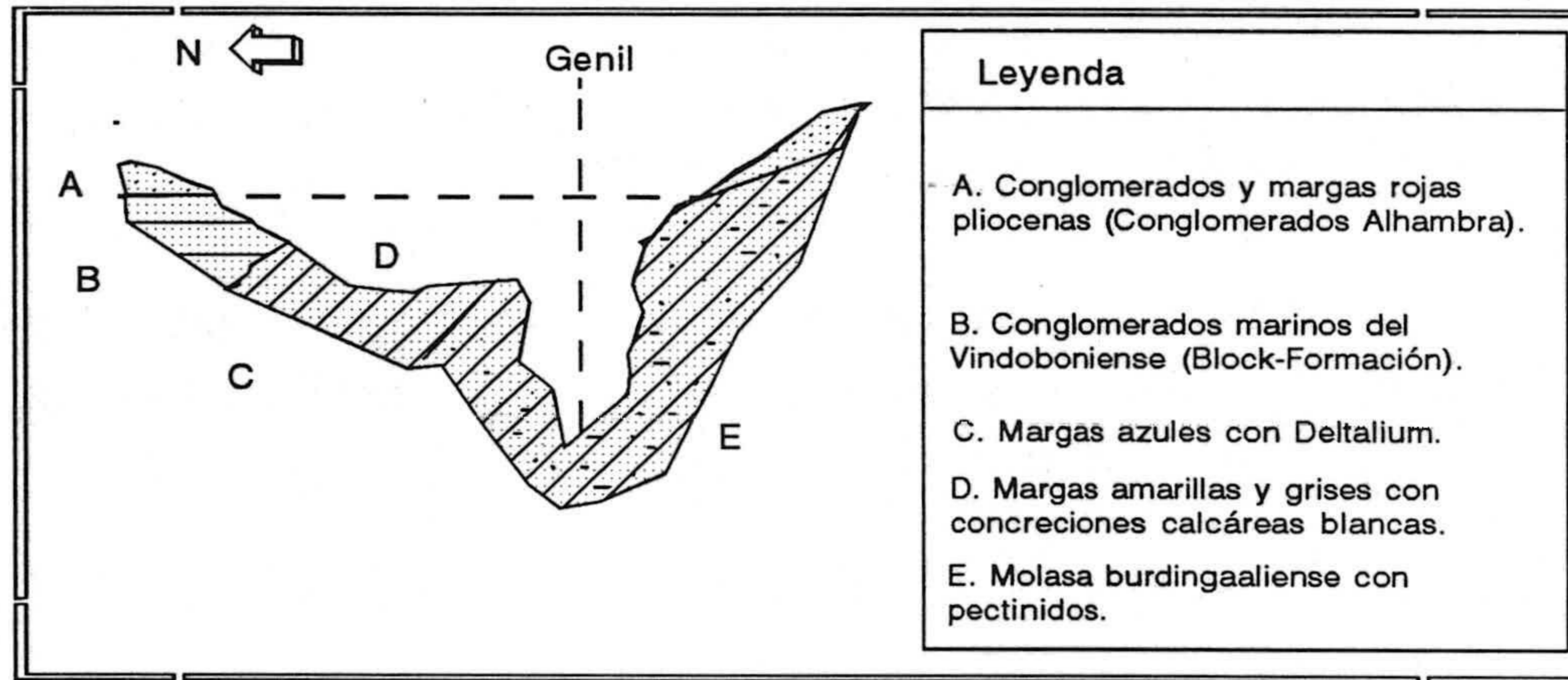


Fig. 8.5. Corte geológico de Viennot, 1930, en el alto valle del Genil.

Tabla. VIII-1. Correlaciones resumidas por Aguirre (1958).

	Beltran & Kilian Vega	Viennot Vega	Van Bemmelen Vega
Aluvial.....			
Diluvial.....	Brecha travertinos	Brechas y travertinos	Conglomerados Alhambra.
Plioceno.....		Alhambra	
Potiense.....	Alhama	Alhama/Alfacar Sup.	Alhama
Mesinense.....	La Malá/ Alfacar Sup. e Inf.		La Malá/Alfacar
Sarmatiense..... tortoniense.....	Jayena. Quentar/Alhama Sur Cuenca	Alfacar Inf./La Malá/ block- formación	Block-formación
Helveniense.....	Alhama/Alfacar/etc.		Alhama/Alfacar/etc.
Burdingaliens.....		Pectinidos del SW	

Aguirre (1961) en su estudio, se centra en un sector de la Cuenca de Granada al NE (Alfacar) y al SW (Arenas del Rey), para él estas zonas son de gran interés para poder dar una explicación sobre la geología de la Depresión de Granada. Establece las correlaciones recogidas en la tabla VIII-2

En su trabajo considera la formación lacustre de Alfacar y los conglomerados que aparecen en pequeños afloramientos entre Jun y el Fargue discordantes con lo anterior y esto a la vez discordante con los conglomerados Alhambra situados encima. Estos paquetes de conglomerados casi horizontales de colores más pardos, han enrasado las dos formaciones anteriores incluso las marinas.

En el esquema siguiente figura 8.5 Aguirre compara su interpretación geológica con la de autores anteriores y realiza una cartografía de la zona (figura 8.6).

Lhenaff (1965), de sus observaciones realizadas en el borde Occidental de Sierra Nevada (Durcal), le lleva a definir una formación que él llamó Torrente a la que atribuyó una edad cuaternaria. Para González Donoso y Ortega Huertas estos materiales son Block-formación, LLenaff la incluye en la formación Alhambra quizás porque en esta zona dicha formación adquiere tonalidades rojas debido al desarrollo de un suelo.

Tabla VIII-2. Correlaciones realizadas por Aguirre.

	Alfacar (hipotesis 1).	Arenas del Rey.	Alfacar (hipotesis 2)
Aluvial.....	Vega.	Vega.	Vega.
Pleistoceno.....	Brechas y travertinos. Conglomerados Alhambra.	Brechas y travertinos. -----	Brechas travertinos. Conglomerados Alhambra.
Plioceno.....	Conglomerados Jun.	Conglomerado.	Conglomerado Jun.? Alfacar (margas/caliz/limos/ arcillas).
Potiense.....	Alfacar: Margas/caliz/limos. Arcillas(mamíf.) Conglomerados	(Sup.) Caliza lacustre. (Inf.) Lignito (mamíf.)	Alfacar. Conglomerado.
Vindoboniense Sup..	(Lagunar.)? (Marino) Escafópodos y block- formación de Qentar	Yesos La Malá. Block-Formación	-----
Helveniense.....	Almenjar/Pto Lobo.	Bermejales.	El Almenjar/ Pto Lobo.

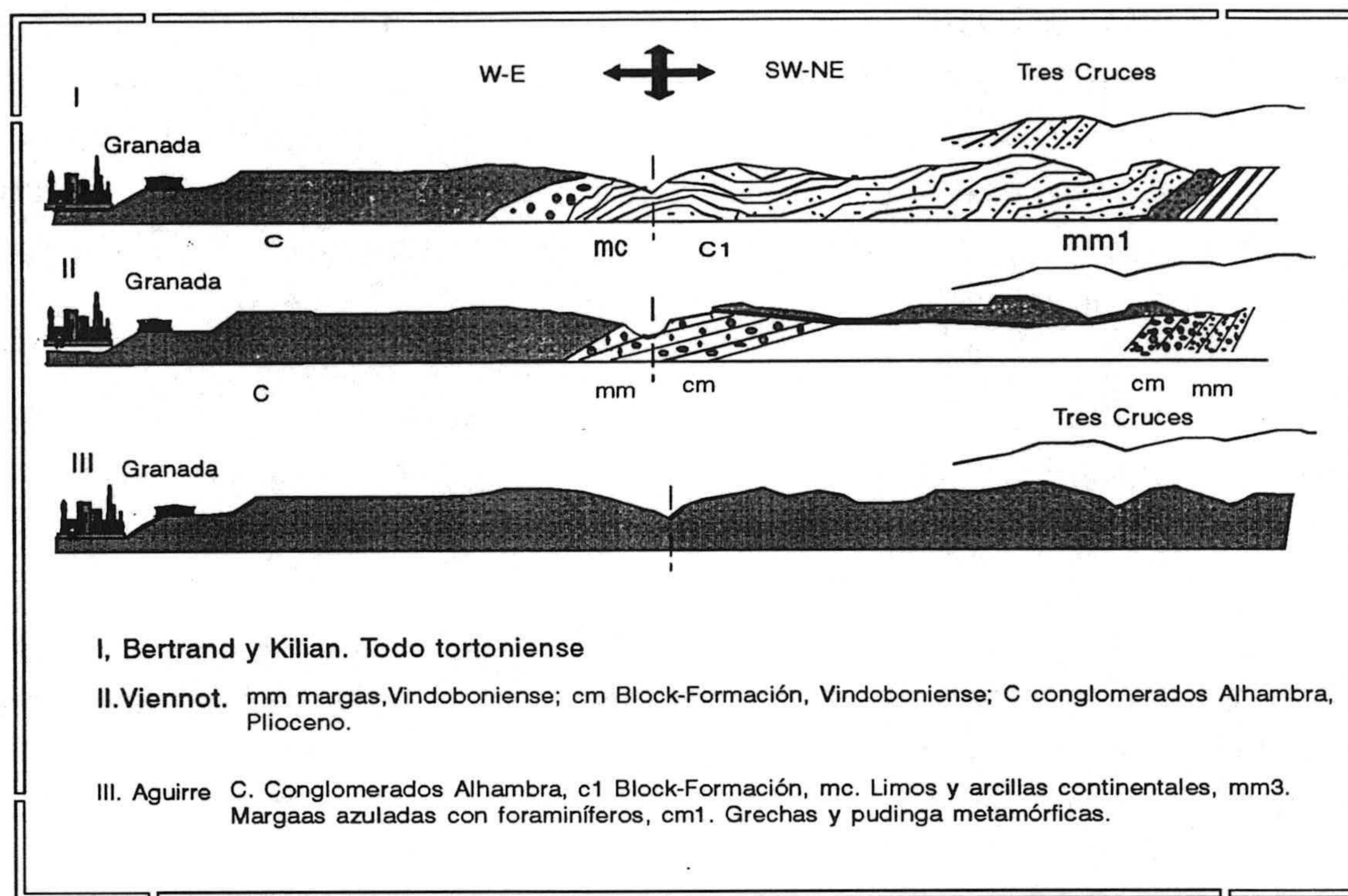


Fig. 8.5 Corte esquemático del valle del Genil (Aguirre, 1958).

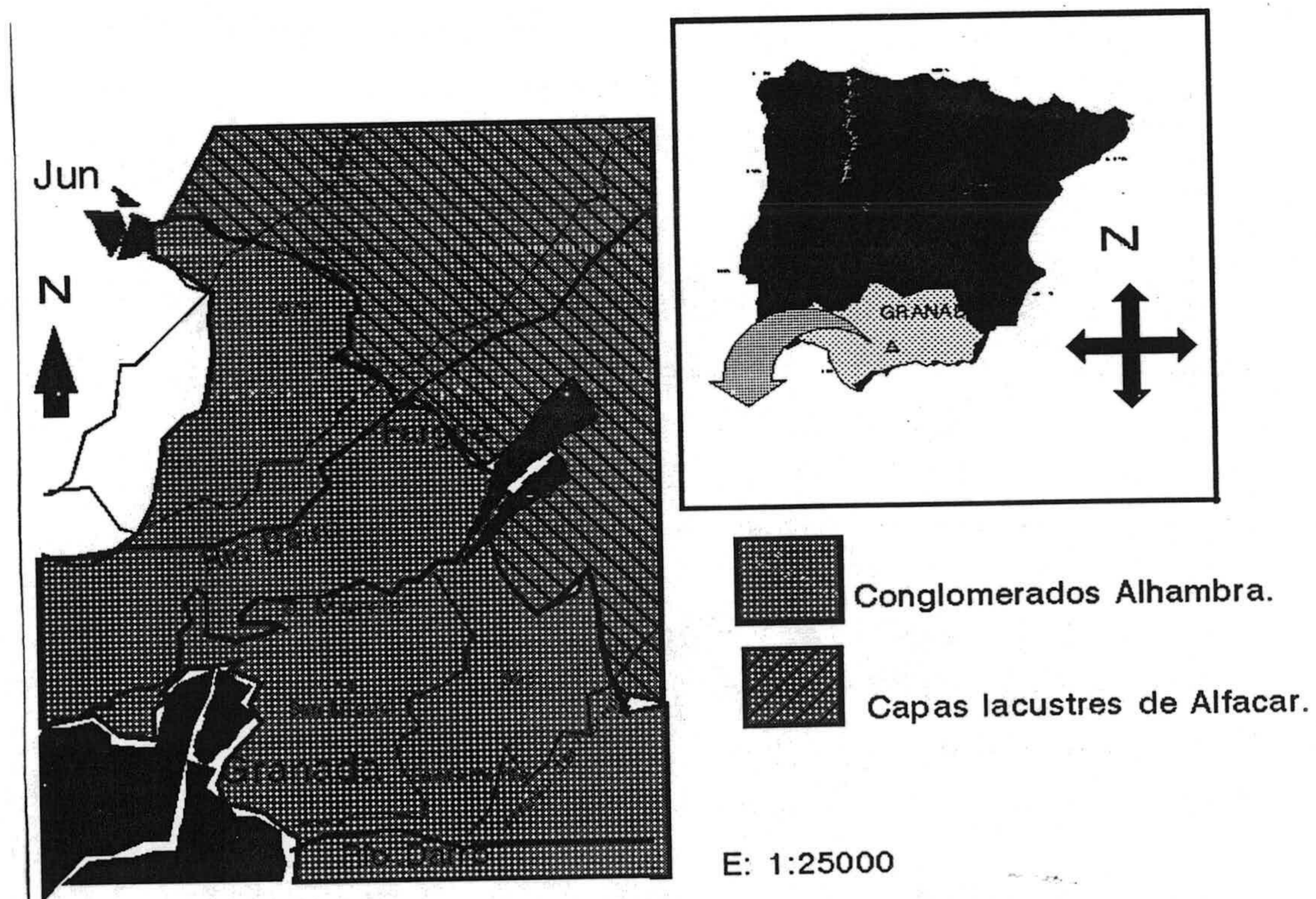


Fig. 8.6. Cartografía realizada por Aguirre sobre la Formación Alhambra.

González Donoso (1967-68), en su trabajo propuso un análisis de la cuenca en relación a los materiales miocénicos, teniendo en cuenta las limitaciones que supone hacer un estudio exhaustivo de la totalidad de la cuenca. En su trabajo el autor divide la Depresión granadina en sectores, cada uno diferenciado por su variación sedimentaria. Dentro de cada sector establece diferenciaciones verticales en tramos, y cada tramo lo divide a la vez en subtramos.

Los sectores que establece son los siguientes (Norte, Noreste, Suroeste y Central. Estos sectores vienen determinados por variaciones en el medio de sedimentación, que viene reflejado por cambios litológicos importantes.

Los terrenos más antiguos se localizan en el sector Suroeste de edad oligoceno superior-Burdigaliense. Los terrenos que le siguen son de edad Tortoniense, entre ambas tiene lugar una fase erosiva importante. A partir de este momento la sedimentación es continua hasta el Cuaternario.

Durante el Tortoniense-Messiniense el medio sedimentario evolucionó de continental a marino, y nuevamente a continental.

Se pueden diferenciar dentro de los terrenos miocénicos dos tramos, separados por discordancia angular de edad intratortoniense en toda la cuenca. Ambos tramos se pueden dividir en subtramos en función de discordancias locales o variaciones litológicas importantes.

En función de los cambios litológicos y/o discordancia, diferencia una serie de términos.

- *Tramo 1.* (Murchas). Edad Oligoceno-Mioceno localizado solo en el sector SE y NE, se trata de limos marinos de colores variados.

- *Tramo Inferior-Miocenico.* Aparecen en el sector NE, W y Central, se trata de un paquete de limos con yeso y localmente calizas lacustres a las que se superponen un paquete de limos, arena y maciños de edad Mioceno Medio (probablemente Tortoniense).

- *Tramo Superior Miocenico.* Separado del anterior por una discordancia angular,

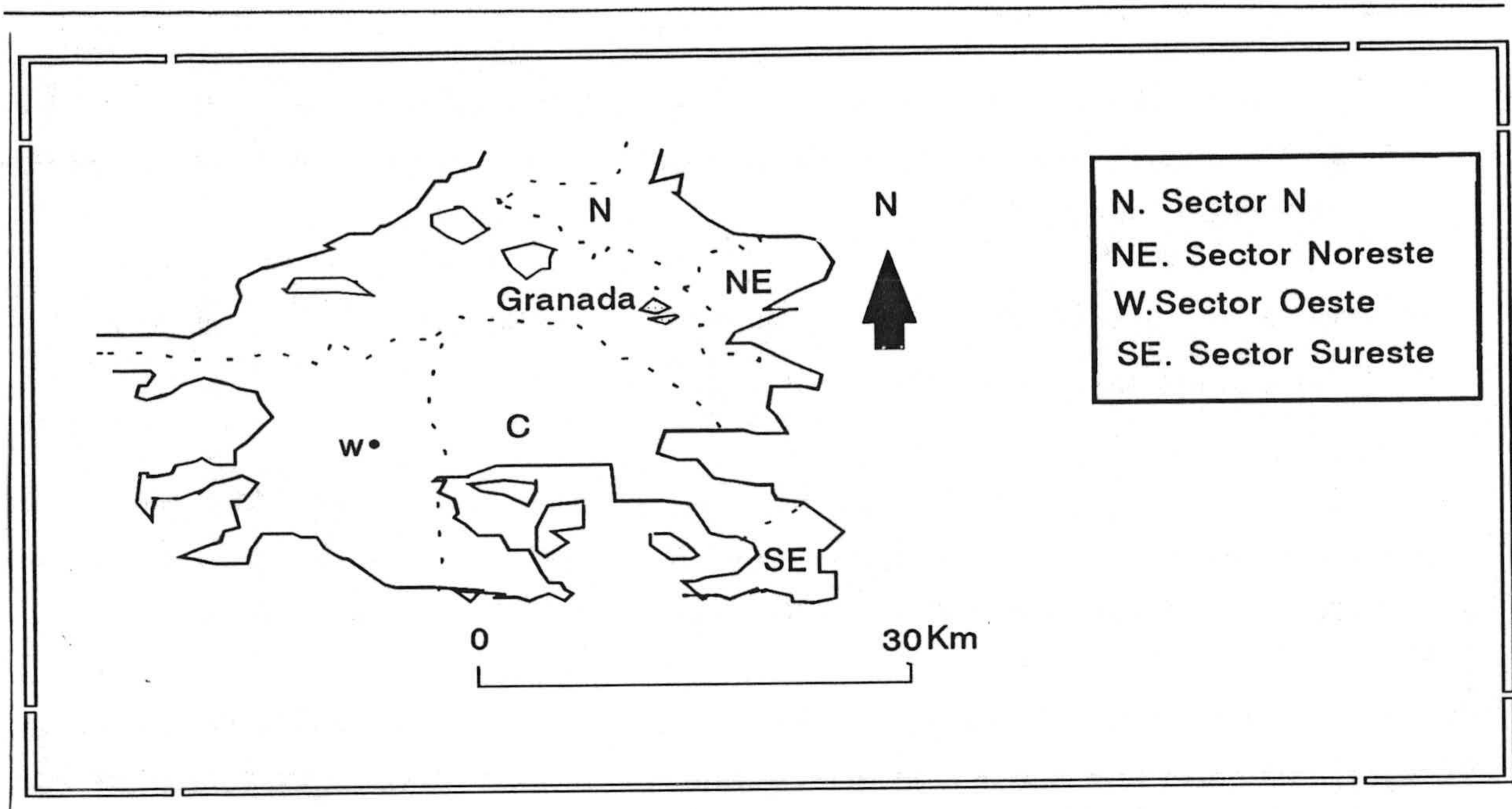


Fig. 8.7 Sectores diferenciados por Donoso (1967).

se trata de un término marino de edad Tortoniense, a la que le sigue otro de edad tortoniense o Mioceno Superior.

* 1º Subtramo. Esta constituido por:

- a) Maciños
- b) Limos rojos de Albuñuelas, solo aparecen en el sector SE.

* 2º Subtramo. Alternancia de limos y maciños.

* 3º Subtramo. Viene representado en toda la Depresión por un importante paquete de limos yesíferos hacia la base y continentales hacia el techo sin cambios litológicos importantes.

* 4º Subtramo. Formación Pinos Genil (Block-Formación). Se localiza en el borde NE y SE de Sierra Nevada, puede que en algunos puntos sea cambio lateral de facies del 4º subtramo. Su litología está constituida por conglomerados de cantos muy heterogéneos con bloques de gran tamaño de edad Mioceno Sur, sin desechar que la parte superior sea Plioceno.

* 5º Subtramo. Conglomerados de Moraleda de Zafayona. Aflora en el sector N sobre material del 4º subtramo en discordancia, la edad puede asignarse a un Plioceno-Cuaternario.

* 6º Subtramo. Conglomerados de Fornes. Se extienden en el sector Sur correlacionados con los de la Moraleda de Zafayona.

* 7º Conglomerados Alhambra. Aflora en los alrededores de Granada Capital, Litologicamente no es muy diferente de la formación Pinos Genil. Su color rojo y heterometría menor son los distintivos más característicos.

* 8º Conglomerados de la Zubia. Se localizan en el borde de Sierra Nevada, y están constituidos por niveles conglomeraticos, provienen según este autor de una serie de conos de Deyección antiguos. Su relación con la Formación Alhambra ya que en algunos puntos se superpone a este.

* 9º Conos de deyección recientes. Se localizan en la zona de Padul-Durcal.

* 10º Toba y travertinos. Se desarrolla masivamente en la zona de Loja, río Cubillas y zona de Alfacar.

* 11º Terrenos Aluviales. Constituyen la mayor parte de la Vega granadina a lo largo del rio Genil.

Tabla. VIII-3.

Tramo Sup. Miocénico		
Tramo Inf. Miocénico	Sub. Tramo Marino. Sub. Tramo Continental Tramo de Murchas.	Burdingaliens

Según este autor en el tránsito 3º subtramo 4º subtramo los depósitos ya son continentales. El termino Formación Pinos Genil lo restringe a la parte superior del tercer subtramo. El origen marino de esta formación parece improbable. Sitúa a la Formación Alhambra encima y discordante y señala el parecido litológico entre estas dos formaciones.

Sanz de Galdeano (1977) vuelve a estudiar este sector, centrándose en la etapa de formación que va del Tortonense al Cuaternario. Llega a la conclusión de que la Blocformación se ha originado condicionada por un transporte fluvial de alta energía a partir de varias corrientes. Este material se depositó en unas condiciones de alta inestabilidad tectónica, dando lugar a relieves aptos para ser atacados por la erosión. Los depósitos de la Formación Alhambra, en el Cuaternario, marcan otra etapa de gran actividad tectónica donde se produjo una elevación de algunos sectores marginales de S. Nevada de al menos 700 mt.

Dabrio et al (1977), estos autores han reconocido que durante el depósito de lutitas con *Deltalium* (tercer subtramo marino) el levantamiento de Sierra de Arana condicionó la existencia de un relieve elevado que se convirtió en el área fuente de un sistema de abánicos aluviales que descendía hacia las partes más deprimidas ocupadas por el mar y situadas al N y NW de los relieves y que hoy forman parte de la Depresión de Granada.

Estos autores han reconocido dos abánicos cuyos ápices apuntan hacia el sur, uno de ellos Pinos Genil, que penetran hacia un medio marino. Con posterioridad se estableció una orla de abánicos aluviales de modo que los depósitos cubrieron todo el sector, estos autores señalaban que esta fase corresponde al depósito del nivel conglomerático principal. En este período se dejó sentir el levantamiento de Sierra Arana, produciéndose un efecto doble en la sedimentación:

- a) Introducción de material de distinta naturaleza, material maláguide, subbético y alpujarride.
- b) La existencia de discordancia interna dentro del paquete principal de conglomerados.

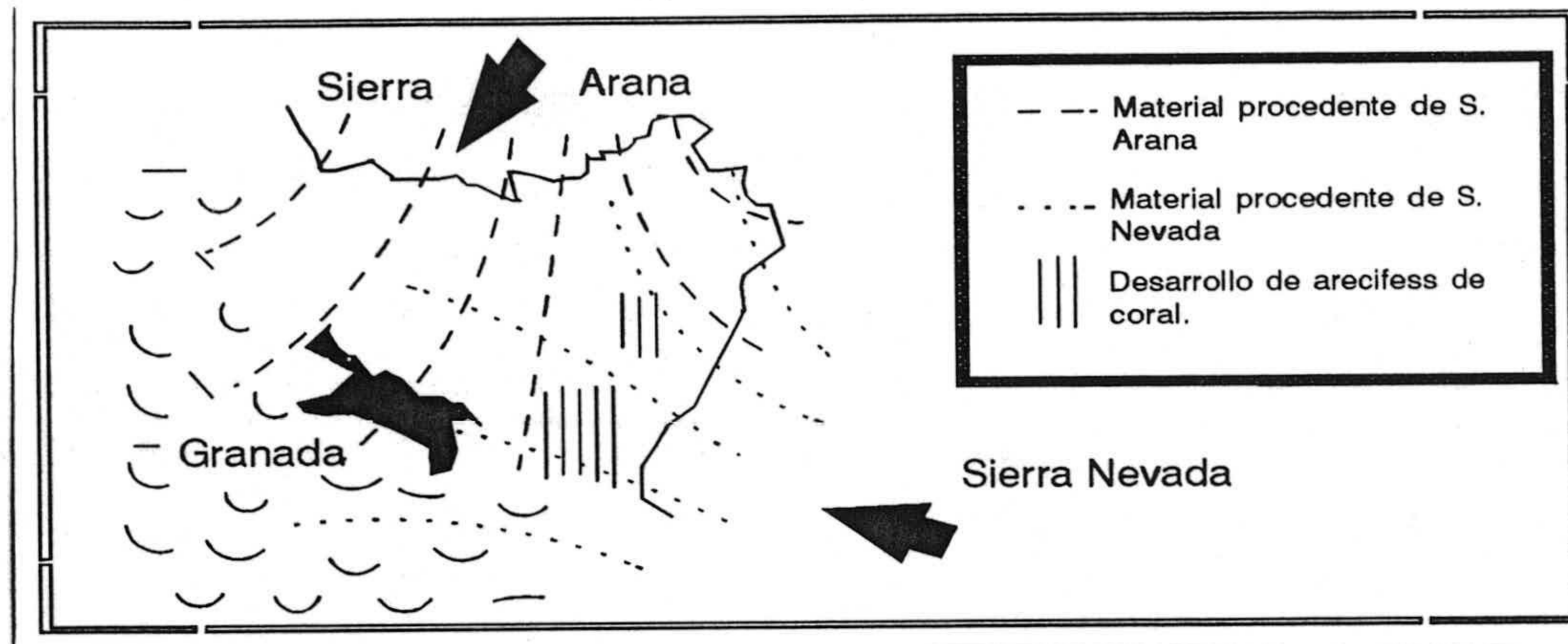


Fig.8.8. Reconstrucción paleogeográfica (Dabrio et al, 1977).

VIII.3.3 CARACTERÍSTICAS GEOLOGICAS DE LA FORMACION ALHAMBRA.

VIII.3.3.1 Características litológicas y sedimentológicas.

El área de estudio está formada por terrones sedimentarios, poco cementados en general, constituido por un paquete de capas subhorizontales de conglomerados, arenas, limos, arcillas de color gris o rojo, de un espesor de 300 mt, sobre este substrato hay recubrimientos superficiales formados a partir de estos materiales, tanto por erosión como por procesos edáficos. Como describe Aguirre (1957): «la Formación Alhambra presenta una alternancia de conglomerados con material más fino, detrítico arenoso con fracción más o menos moderada de arcilla. La distribución de los materiales cambia con facilidad lateralmente, pero puede decirse en general que la formación culmina con tierras detríticas que contienen moluscos lacustres y bajo ella, niveles arcillosos que a veces faltan y a veces llegan a 3 y 4 m. de espesor. Por debajo aparecen los conglomerados, que alcanzan un espesor de varias decenas de mt. Por debajo de la masa de guijarros aparece la característica alternancia, se trata de material más grueso, y arrastre más violento que escava las capas más altas del ciclo anterior, y va reduciendo la fuerza de arrastre y el tamaño de los cantos hasta terminar en un detritus fino. Su génesis parece responder a depósitos de Debris Flows, compuestos por conglomerados de cantos y bloques soportados por la matriz, que es de tamaño arena y grava fina. La trama es desordenada en la mayoría de los casos, afecta solo a los cantos y bloques mayores».

La composición de sus cantos, si suponemos que este material procede de la desmantelación de la Block-Formación (Cu= 7-50, material poco uniforme) podemos

decir que proceden mayoritariamente del núcleo de Sierra Nevada donde la fracción carbonatada es mínima (Sanz de Galdeano, 1977). Ortega Huertas (1979) añade, en relación a la Block-Formación, que abundan los cantos pertenecientes a las unidades de Caldera y Sabina (Puga, 1971) o manto del Mulhacen (Puga, 1974). Según Barahona, (1974) entre los cantos predominan los materiales del núcleo de Sierra Nevada, hay algunos de la Sierra Filábride y son minoritarios los de la Alpujárride. Teniendo en cuenta la reconstrucción paleogeográfica realizada por Dabrio et al (1977), figura.6.7, se observa también la influencia de aportes llegados de Sierra Arana y otras próximas a esta zona (Alfacar y Viznar).

VIII.3.3.2 Tectónica.

La tectónica de la Formación Alhambra está íntimamente ligada a la tectónica que se ha podido constatar en la geología granadina, donde se han observado un levantamiento como un amplio anticlinal de tipo bóveda en el núcleo de Sierra Nevada, y un hundimiento tipo sinclinal en la Depresión. Este amplio movimiento está aún vivo en nuestros días, como puede constatarse por la sismicidad actual de la zona. La base de la Formación Alhambra no se ve, parece que esta formación rellena una cubeta de tipo sinclinal causada por los sedimentos neogenos, en discordancia sobre los materiales anteriores. Esta discordancia representaría un escalón anterior al cuaternario. Esta formación ha sufrido fenómenos tectónicos de edad cuaternaria parece evidente, hecho que se puede explicar teniendo en cuenta el encajamiento de los ríos y su descenso del nivel de más de 200 m., en una distancia sobre el mapa de 425 m. Por tanto la modificación del nivel de base es posterior al depósito de estos sedimentos. La disposición que presenta este material en la actualidad es fruto de movimientos tectónicos de fallas con una dirección promedio de N 35W, a las cuales van ligadas gran parte de la sismicidad de la región. Los escarpes de este conjunto de mesetas ha ido condicionada por movimientos profundos del terreno a favor de fallas cuya situación ha sido aprovechada por el río Darro para excavar su cauce.

VIII.3.3.3 Características Edafológicas.

Este material se caracteriza por un gran desarrollo de suelos de gran potencia, de color rojo sobre un suelo que en general muestra cierta uniformidad hacia abajo, donde a veces es imposible localizar el nivel C. Sin embargo, el desarrollo de estos suelos no

es uniforme en toda la formación y en otras zonas se desarrollan paleosuelos, sobre material detrítico fino, cuya morfología es semejante al desarrollado en la zona de la Vega, enterrados sobre un paquete de conglomerados, sobre el que se desarrolla un suelo rojo de características semejantes a las anteriores. En la génesis de estos suelos han intervenido tres procesos fundamentalmente, la descarbonatación, meteorización y rubefacción, aunque con intensidades diferentes y un proceso de iluviación observado en los suelos desarrollados en el llano de la Perdiz.

VIII.3.3.4 Hidrogeología.

Hidrología superficial. Corre por los ríos Darro, Genil y Beiro que rodean el área de estudio. En el río Darro existen antiguas terrazas aluviales colgadas de material más permeable que la formación Alhambra, si bien en el caso de constituir acuíferos debe pensarse en una alimentación por infiltración del agua de escorrentía más que por alimentación del cauce del río. La escorrentía de la formación en general es buena aunque pueden observarse algunos puntos con cierta tendencia a encharcarse. A la red natural hay que añadir una red artificial de origen árabe, cuyo mal estado puede ser la causa de problemas de infiltración del agua.

Hidrología subterránea. Se hace a través de las capas de arena y de conglomerados poco cementados, los cuales están separados entre sí por niveles impermeables con arcilla. La formación de estos suelos se extiende desde el Mioceno superior hasta el Pleistoceno. En este período se debieron de dar las condiciones de temperatura más elevadas, donde se desarrollaran los suelos más evolucionados. En el tránsito Plioceno Pleistoceno las condiciones climáticas favorecieron el desarrollo del proceso de iluviación en el horizonte B. en los últimos períodos, las condiciones climáticas parecen limitar el desarrollo de este proceso y la disminución del proceso de meteorización y rubefacción.

VIII.3.3.5 Sismicidad.

En el Mapa de Zonas Sísmicas Generalizadas de la Región Sur de la península Ibérica, la zona de Granada aparece con una intensidad macrosísmica de intensidad VI, que puede ocasionar en caso de que se produzcan sismos, fenómenos de deslizamiento, licuefacciones y rotura de las cimentaciones.



ESCALA
1:6.000.000

FECHA
1-NOVIEMBRE-1755

7

IX. RESULTADOS.

IX. RESULTADOS.

IX.1 RESULTADOS DE CANTERA.

Procedentes de cantera se han extraído un total de 21 muestra pertenecientes al afloramiento de materiales de la «Formación Alhambra», estudiado. Doce muestras corresponden al nivel 1, el de carácter más heterogéneo, y cinco y cuatro muestras a los niveles 2 y 3 respectivamente. En las lámina V y VI se puede observar el aspecto que presenta el material en algunos puntos de extracción.

IX.1.1 GRANULOMETRIA POR TAMIZADO.

Resultados.

En el ensayo granulométrico se ha despreciado las partículas de tamaño superior a 50.8 mm (retenidos en el tamiz n° 2 ASTM), dentro de esta fracción se incluyen, incluso, bloques de gran tamaño.

La figura 9.1 muestra la distribución de las curvas granulométricas de las muestras estudiadas, y en la figura 9.2 los husos que definen estos según los niveles.

En las tablas IX-1, IX-2 y IX-3 vienen indicados los módulos granulométricos obtenidos para las muestras de los niveles 1, 2 y 3 respectivamente.

Discusión de los Resultados y conclusiones.

El nivel 1 desde el punto de vista granulométrico se caracteriza por tratarse de un material grosero, y con un contenido en finos bajo, que oscila entre 4 y 13%. Este material presenta un valor de C_u por encima de 10, lo que indica que se trata de un material de granulometría muy extendida.

En el nivel 2, las curvas presentan una pendiente más suave. El valor de su módulo granulométrico es inferior al del nivel 1 superando en poco el valor 3.

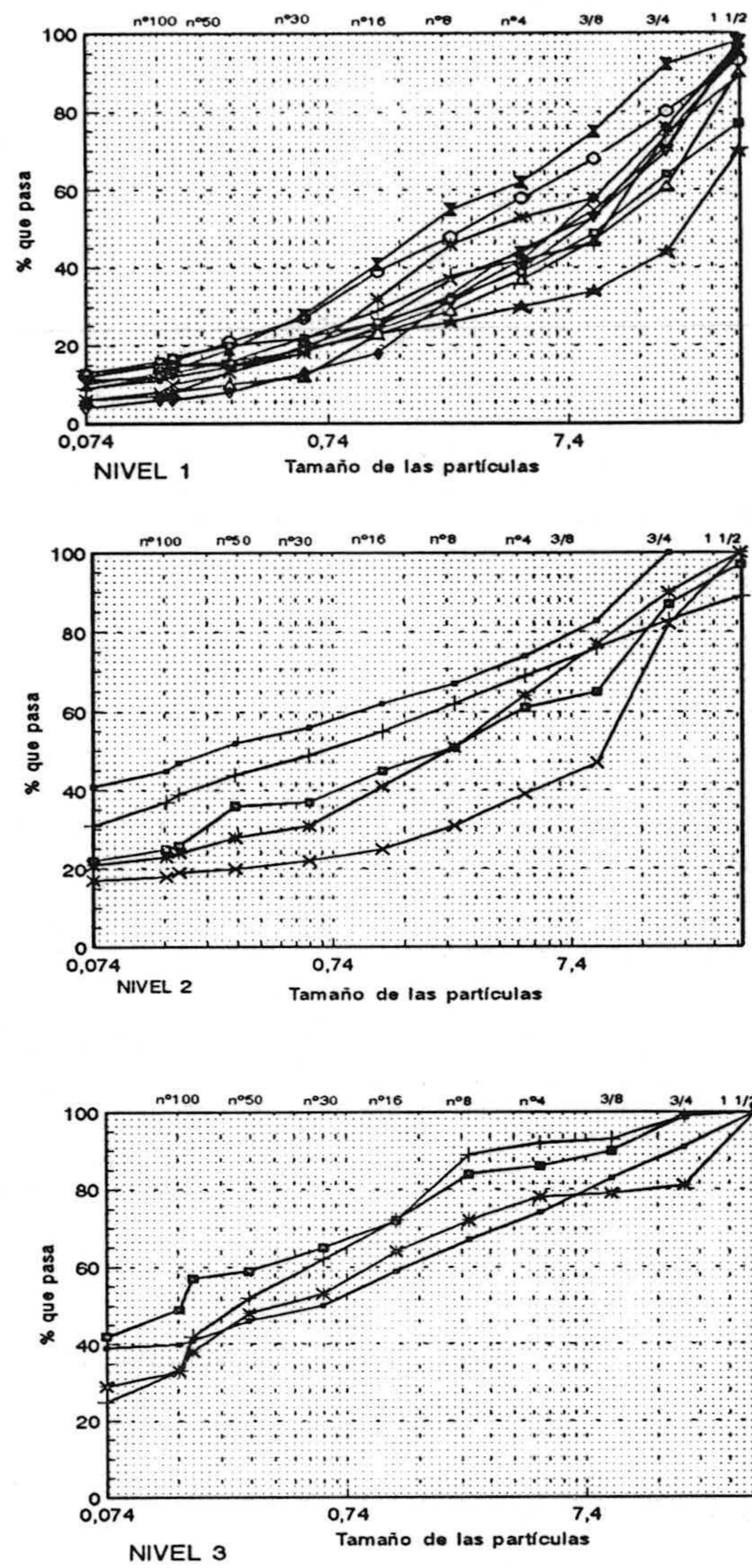


Fig. 9.1 Granulometrías de las distintas muestras extraídas en cantera agrupadas según los distintos niveles diferenciados.

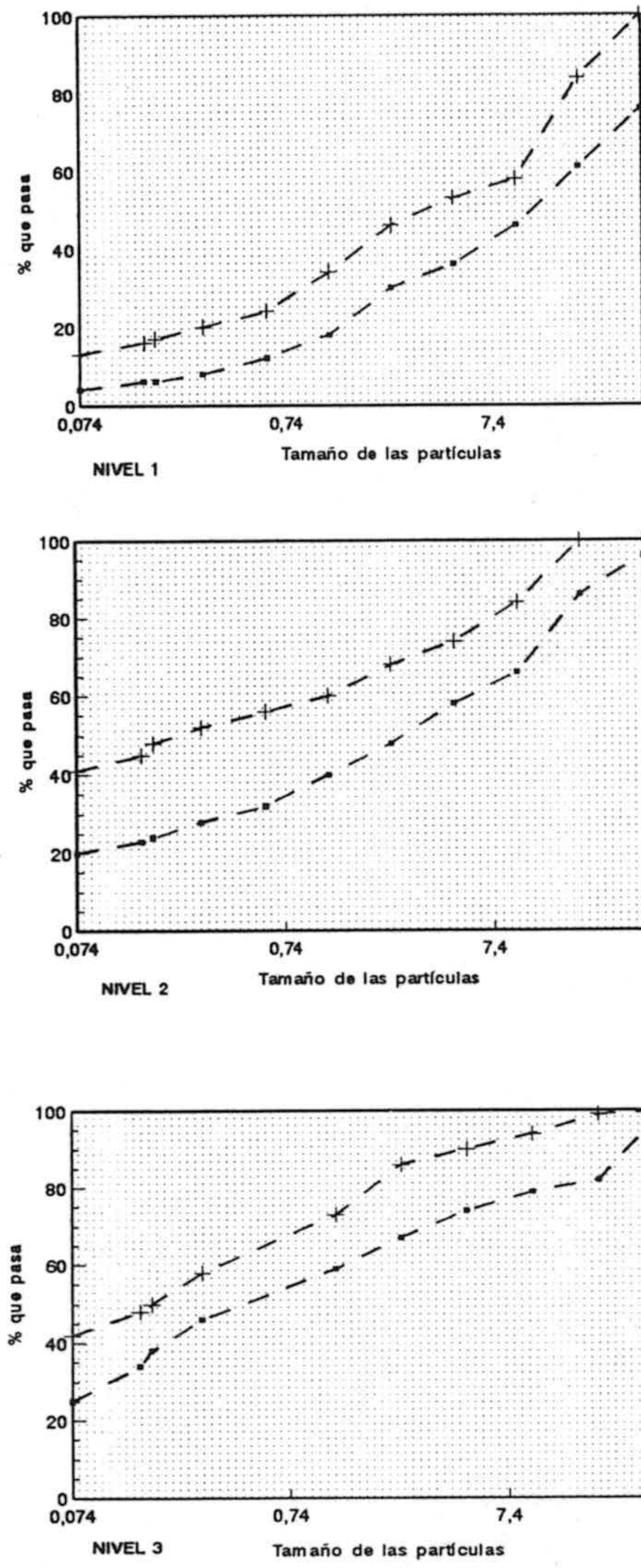


Fig. 9.2. Husos granulométricos definidos por los distintos niveles de cantera

Tabla IX-1 Módulos granulométricos del nivel 1.

Muestras	1A	1B	1C	1D	1E	1F	1G	1H	1I	1J	1K
Módulo Granulom	5.2	5.2	5.0	5.4	5.3	7.3	4.7	4.1	4.5	4.7	6.2

Tabla IX-2 Módulos granulométricos del nivel 2.

Muestras	2A	2B	2C	2D	2E
Módulo Granulom	3.1	3.3	3.4	4.3	5.3

Tabla IX-3. Módulos granulométricos nivel 3

Muestras	3A	3B	3C	3D
Módulo Granulom	2.8	1.9	2.8	1.9

Las curvas del nivel 3 se caracterizan por tener más del 30% en finos. El valor del C_u continua siendo elevado. Como se deduce de la figura 9.3 el nivel que presenta mayor valor en su módulo granulométrico es el nivel 1, le siguen los niveles 2 y 3.

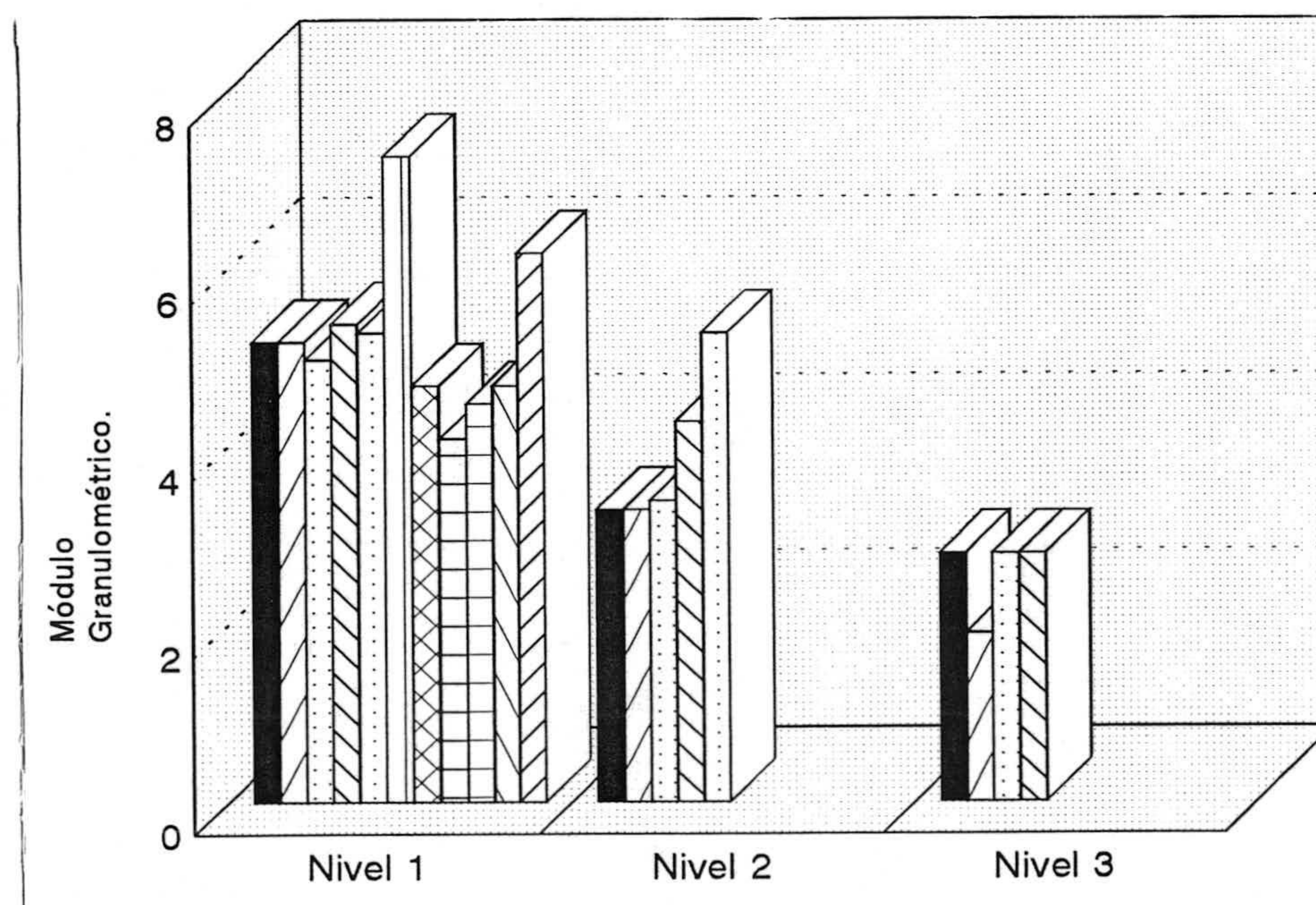


Fig. 9.3. Módulos granulométricos obtenidos en cantera.

Resultados.

Características de la fracción fina.

Las muestras estudiadas presentan en general un contenido en finos que varia entre el 9% al 40% aproximadamente y está constituida fundamentalmente por arena fina y limo. Para estas muestras se observa que sus contenidos en arcilla son insignificantes si los comparamos con el resto de los componentes. No obstante, se observa un incremento de esta fracción en los niveles 2 y 3, respecto al nivel 1.

IX.1.2 PLASTICIDAD.

Resultados.

En laboratorio se ha determinado los límites de Atterberg sobre las partículas finas (pasan el tamiz n° 40 ASTM, 0.42 mm). Los valores del LI, Lp y Ip obtenidos para la totalidad de las muestras tomadas en cantera vienen indicados en las tablas IX-4, IX-5 y IX-6 así como la plasticidad obtenida al llevar los valores de Ip y LI al ábaco de Casagrande. El aspecto que presenta el material analizado viene reflejado en la lámina VII (fotos 22, 23, 24 y 25).

Tabla IX-4. Plasticidad del nivel 1.

Muestras	LI	LP	IP	Clasificación
1A	-	-	-	ML
1B	-	-	-	ML
1C	-	-	-	ML
1D	-	-	-	ML
1E	-	-	-	ML
1F	-	-	-	ML
1G	-	-	-	ML
1H	-	-	-	ML
1I	24.0	20.9	3.1	ML
1J	-	-	-	ML
1K	-	-	-	ML

Tabla IX-5. Plasticidad Nivel 2.

Muestra	LL	LP	IP	Clasificación
2A	26.2	18.6	11.0	CL-ML
2B	22.0	16.2	5.8	CL-ML
2C	23.5	15.5	8.0	CL-ML
2D	21.5	17.0	4.5	CL-ML
2E	20.0	19.0	1.0	CL-ML

Tabla IX-6. Plasticidad del Nivel 3.

Muestras	LL	LP	IP	Clasificación
3A(rojizo)	-	-	-	CL
3B(rojo)	-	-	-	CL
3C(pardo)	-	-	-	CL-ML
3D(pardo)	-	-	-	CL-ML

Discusión de los Resultados y conclusiones.

De los datos se deduce que el nivel 1 es un material con bajo contenido en finos, y que estos son de naturaleza limosa. El nivel 2 es un material más rico en finos, constituido por limos y arcillas de baja plasticidad. En el nivel 3, se observa que los suelos más rojizos se comportan como un material no plástico, el resto presenta las mismas características de plasticidad que el nivel 2.

IX.1.3 CLASIFICACION DEL SUELO.

Resultados.

Se han clasificado estos suelos atendiendo a sus características granulométricas y de plasticidad, de acuerdo con la clasificación de suelos con fines ingenieriles. En las tablas IX-7, IX-8 y IX-9 vienen indicados los resultados obtenidos.

Resultados.

Tabla IX-7. Tipo de suelo nivel 1.

Muestras	Reten. T. n°4	Pasan T. n°200	C _u	C _c	Tipo de Suelo
1A	55	9	>4	1.3	GW-M
1B	58	9	>4	0.9	GW-M
1C	47	6	>4	1.0	GW-M
1D	41	7	>4	1.5	GW-M
1E	59	6	>4	1.5	GW-M
1F	58	4	>4	1.0	GW-M
1G	63	6	>4	0.4	GW-M
1H	38	10	>4	0.78	GW-M
1I	42	12	>4	1.6	GW-M
1J	60	11	>4	5.6	GW-M
1K	70	13	>4	-	GW-GC,GM

Tabla IX-8. Tipo de suelo Nivel 2.

Muestras	Reten.T.n°4	Pasan T. n°200	C _u	C _c	Tipo de suelo
2A	26	41	-	-	SC-SM
2B	31	31	-	-	SC-SM
2C	36	21	-	-	SC-SM
2D	39	22	-	-	S-C
2E	61	17	-	-	S-C

Tabla IX-9. Tipo de suelo Nivel 3.

Muestras	Reten.T. n° 4	Pasan T. n°200	C _u	C _c	Tipo de suelo
3A	26	39	-	-	SM
3B	8	25	-	-	SM
3C	22	29	-	-	SC-SM
3D	14	42	-	-	SC-SM

Discusión de los Resultados y conclusiones.

El nivel 1 es un suelo gravoso, bien clasificado (gradado) y con una baja cantidad de material fino, que es de naturaleza limosa.

El nivel 2 es un material arenoso con una proporción más alta en finos que el nivel 1, y de naturaleza limosa-arcillosa.

Los suelos rojizos son arenosos con una fracción fina de naturaleza limosa, los suelos de color pardo son también arenosos pero la fracción fina es de naturaleza limosa-arcillosa.

IX.1.4 DENSIDAD Y COMPACTACION.

Resultados.

Los resultados de densidad natural que presentan estos materiales, in situ, en el afloramiento de la Formación Alhambra estudiado, han sido obtenidos por medio del Trolex (registro por radio-isótopos).

Los datos obtenidos en los distintos puntos estudiados vienen indicados en la tabla IX-10, y los distintos puntos donde se ha llevado a cabo la toma de datos viene indicados en la figura 9.4.

Comparativamente se ha determinado la densidad Proctor normal. Este ensayo se ha llevado a cabo en muestras de los distintos niveles diferenciados y se han obtenido tres curvas proctor, (figura 9.5), donde se refleja la densidad máxima para un contenido en agua óptima.

Tabla IX-10. Densidades obtenidas mediante el Trolex.

Muestras	D_H (g/cm ²).	H(%)	D_S (g/cm ²)
a(3)	1.8	4	1.5
b(3)	1.77	10	1.60
c(2)	1.76	4.4	1.68
d(2)	1.75	5	1.66
e(2)	1.82	10	1.65
f(2)	1.75	4.2	1.67
g(1)	1.81	5	1.72
h(1)	1.79	3.9	1.72
i(1)	1.79	3.9	1.72
j(2)	1.82	5.3	1.72
k(2)	1.75	4.5	1.67
l(1)	1.76	5.5	1.66
m(1)	1.82	5.1	1.73
n(2)	1.83	3.9	1.76
ñ(2)	1.83	8.0	1.69
o(2)	1.78	5.5	1.68
p(2)	1.79	5.4	1.69
q(2)	1.75	4.5	1.67
r(2)	1.76	5.0	1.67
s(1)	1.77	5.2	1.68
t(1)	1.83	3.9	1.76
u(1)	1.82	3.95	1.75
v(1)	1.83	3.85	1.76
w(1)	1.82	3.8	1.75
y(1)	1.83	3.9	1.76
x(1)	1.81	3.7	1.74
z(1)	1.83	3.8	1.76

* Entre paréntesis viene indicado el nivel asociado al punto sobre el que se ha realizados las tomas de datos.

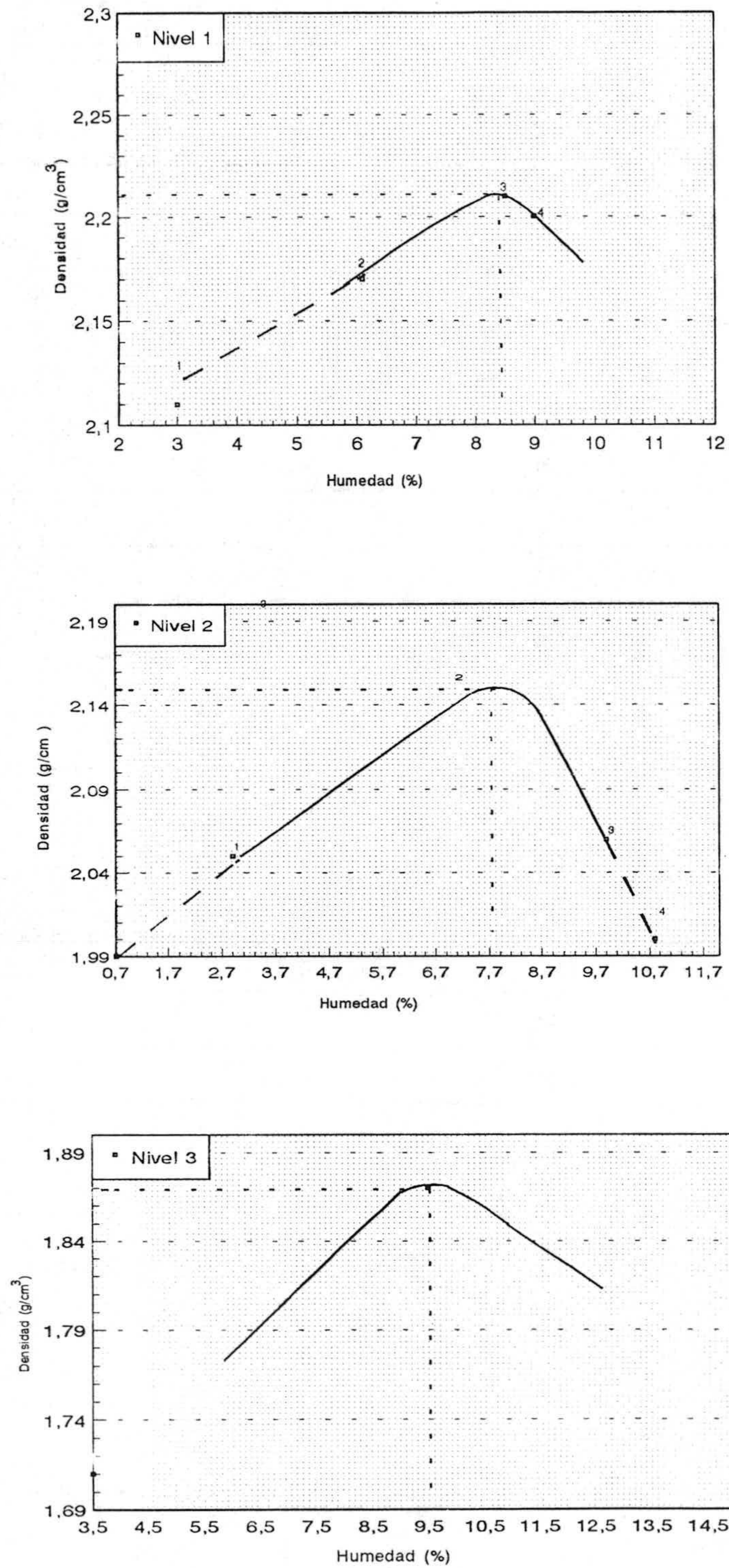


Fig. 9.5 Curvas de compactación óptima.

Discusión de los Resultados y conclusiones.

Las densidades obtenidas por medio del Trolex como se refleja en la tabla IX.10 están en torno a 1.75 g/cm^2 para el nivel 1, 1.69 g/cm^2 para el nivel 2 y 1.55 g/cm^2 para el nivel 3. Sin embargo, las densidades máximas obtenidas por medio del ensayo Proctor son diferentes, en el nivel 1, se han obtenido densidades máximas del orden de 2.21 g/cm^3 para un tanto por ciento de humedad óptima del 8.4 %, en el nivel 2 la densidad máxima está en 2.16 g/cm^3 para una humedad aproximada del 7.7%.

En la figura 9.6 nos muestra una gráfica comparativa entre la densidad obtenida in situ y la conseguida mediante el proctor. Como se puede deducir de la gráfica las densidades proctor son superiores a las que presenta el material in situ en cantera.

En el caso del nivel 3, es importante indicar que se han observado diferencias entre distinto puntos de extracción del material. Como hemos indicado anteriormente, se distinguen básicamente 2 tipos de suelo, los de color pardo y los de color rojizo. Pero en general se puede decir que se trata de un material con menos capacidad de densificación, estando ésta entorno a 1.87 g/cm^3 para una humedad óptima de 9.5%.

Finalmente decir que el nivel 1 es el que presenta una compactación proctor más alta, le siguen el nivel 2 y por último el nivel 3.

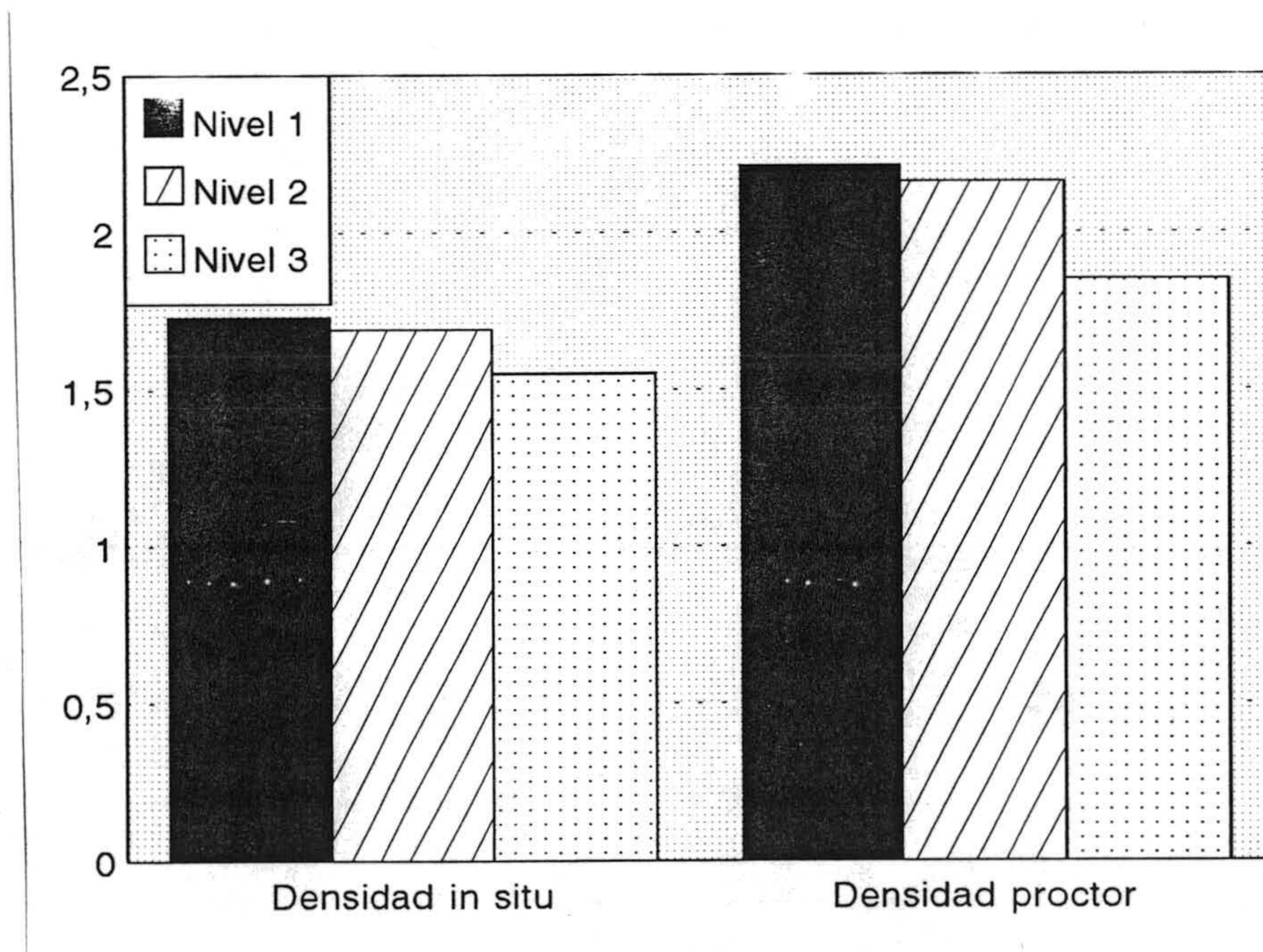


Fig.9.6. Diagrama comparativo entre las densidades que presenta el material in situ y las obtenidas mediante el proctor.

IX.1.5 MINERALOGIA.

Resultados.

Los datos mineralógicos que se disponen, han sido obtenidos por difracción de rayos X, para la muestra total y para la fracción arcilla. La composición mineralógica global de las distintas muestras analizadas viene indicada en la tabla IX-11.

De los datos de la tabla IX-11, se deduce que existe un amplio rango de variación en la composición según el lugar de muestreo en cantera. Estos datos se han llevado a un diagrama donde se representan gráficamente la media en tanto por ciento de cada uno de los componentes mineralógicos de estos materiales agrupados por niveles (figura 9.7).

Tabla IX-11. Composición mineralógica media para la totalidad de las muestra.

Muestras	Mineralogía Total.				
	Q	Cc	DI	Fd	Fil
1A	20	25	45	<5	<5
1B	21	24	44	<5	<5
1C	31	25	40	<5	<5
1D	45	40	12	<5	<5
1E	52	18	20	<5	<5
1F	23	16	51	<5	<5
1G	41	33	19	<5	<5
1H	36	30	30	<5	<5
1I	8	<5	<5	<5	<5
1J	30	26	42	<5	<5
1K	85	4	<5	<5	<5
2A	17	54	15	<5	7
2B	20	28	30	<5	17
2C	18	36	35	<5	9
2D	20	27	35	<5	9
2E	32	25	41	<5	<5
3A	60	10	20	<5	<5
3B	33	24	32	<5	7
3C	52	10	33	<5	10
3D	64	14	<5	14	<5

Q= Cuarzo, Cc= Calcita, Dol= Dolomita, Fd= feldespatos y Fil= Filosilicatos.

Conclusiones

De las observación de la figura 9.7 se deduce que la composición cuantitativa de los distintos niveles, es la misma; sin embargo se aprecia ciertas variaciones desde el punto de vista cuantitativo:

- En el nivel 1 se observa un mayor contenido en dolomita y una reducción importante en filosilicatos.

- En el nivel 2 el contenido en cuarzo se reduce, mientras que el contenido en filosilicatos aumenta.

- El nivel 3 se caracteriza por un contenido elevado en cuarzo y una reducción importante en calcita respecto a los otros dos niveles.

En general, se puede decir que existe un amplio rango de variación composicional entre todas las muestras estudiadas, independientemente del nivel considerado; hecho lógico si tenemos en cuenta que se trata de un conglomerado compuesto por rocas de muy diversa naturaleza y procedencia.

Dada la heterogeneidad del material se creyó conveniente realizar una identificación mineralógica más detallada, de las distintas muestras, en función del tamaño de grano, con el fin de poder conseguir un estudio más pormenorizado de estos materiales y, por otra parte, ver si existía alguna relación entre tamaño y composición.

El material se ha separado en fracción gruesa y fracción fina. Los gruesos se han dividido a la vez en dos tamaños:

- Partículas cuyo diámetro es mayor de 6.35 mm. (tamiz 1/4 ASTM)

- Partículas de tamaño comprendido entre 6.35 y 0.074 mm. (entre el tamiz 1/4 y n° 200 ASTM).

Los finos incluyen partículas de tamaño inferior a 0.074 mm (pasan el tamiz n° 200 ASTM).

En el caso de la fracción fina se han obtenido valores de la composición total y la composición de la fracción arcillosa.

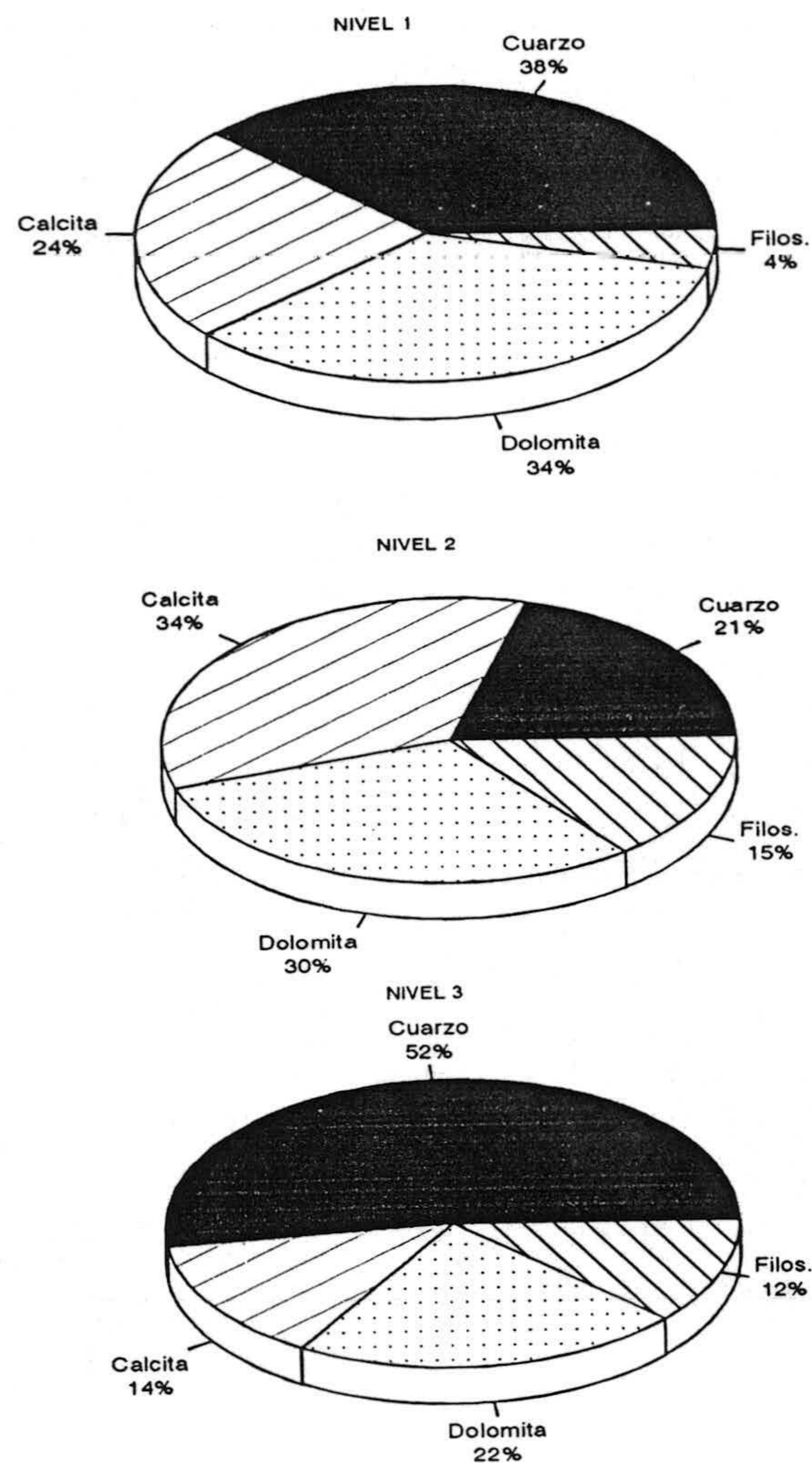


Fig.9.7. Composición mineralógica media total de los distintos niveles diferenciados en cantera.

Se ha elegido esta división dado que la mayor parte de los partículas que forman parte de los morteros empleados en los revestimientos de las murallas están comprendidas entre 6.35 mm (1/4 ASTM) y 0.074 mm (nº 200 ASTM), con el objeto de poder hacer posteriormente un análisis comparativo.

Cada una de estas fracciones corresponde a un porcentaje medio del total de la muestras estudiadas, agrupadas en niveles que vienen indicados en la tabla VIII-12.

Tabla IX-12. Retenido por fracciones (valores medios por niveles).

Nivel	$\phi > 6.35$ mm	ϕ 6.35-0.074mm	$\phi < 0.074$ mm.
1	48	43	8
2	34	39	26
3	14	54	30

- Composición de la fracción gruesa.

a) Composición mineralógica de las partículas mayores de 6.35 mm para las muestras extraídas en cantera vienen indicadas en las tablas X-13, X-14 y X-15 agrupados por niveles.

En la figura 9.8 vienen representadas las composición media de las fracciones gruesas de los distintos niveles diferenciados.

Tabla IX-13. Composición mineralógica para el nivel 1

Muestras	Mineralogía($\phi > 3.36$ mm)			
	Q	Cc	DI	Fd/Fil
1A(54%)*	26	38	35	<5
1B(48%)	17	38	46	<5
1C(42%)	17	37	45	<5
1D(38%)	15	25	59	<5
1E(52%)	50	28	10	<5
1F(52%)	16	19	64	<5
1G(60%)	37	51	14	<5
1H(34%)	39	39	22	<5
1I(38%)	87	<5	<5	12
1J(55%)	31	46	<5	<5
1K(32%)	97	<5	<5	<5

Tabla IX-14. Composición mineralógica para el nivel 2

Muestras	Mineralogía($\phi > 6.36$ mm).			
	Q	Cc	DI	Fd/Fil
2A(22%)*	25	35	40	<5
2B(28%)	20	30	40	<5
2C(30%)	27	27	47	<5
2D(34%)	11	62	20	0
2E(57%)	30	25	46	<5

Tabla IX-15. Composición mineralógica para el nivel 3.

Muestras	Mineralogía($\phi > 6.36$ mm.)			
	Q	Cc	DI	Fd/Fil
3A(7%)*	16	55	29	<5
3B(23%)	21	26	53	<5
3C(21%)	31	51	16	<5
3D(10%)	71	23	6	<5

* Entre paréntesis viene señalada el tanto por ciento de la muestra total al que va referido la composición mineralógica indicada (referida al 100% de esa fracción).

Conclusiones.

De los valores obtenidos se puede deducir que se trata de un material muy heterogéneo en su composición, con valores extremos significativos que lo evidencian. Sin embargo, la composición global de los cantos de este afloramiento de la «Formación Alhambra» no varía de forma significativa, con lo que se puede concluir señalando que:

- La composición de los cantos gruesos es muy semejante en los tres niveles diferenciados.
- Los componentes mayoritarios son los cantos carbonatados (calcita y/o dolomita).
- Los feldespatos y los filosilicatos se encuentran en muy baja proporción, y estos no son de naturaleza arcillosa sino fundamentalmente micas.
- Esta fracción se encuentra en cantidades importantes que superan en la mayoría de los casos el 30% en los niveles 1 y 2, y en algunos casos al 60% para algunas muestras del nivel 1.

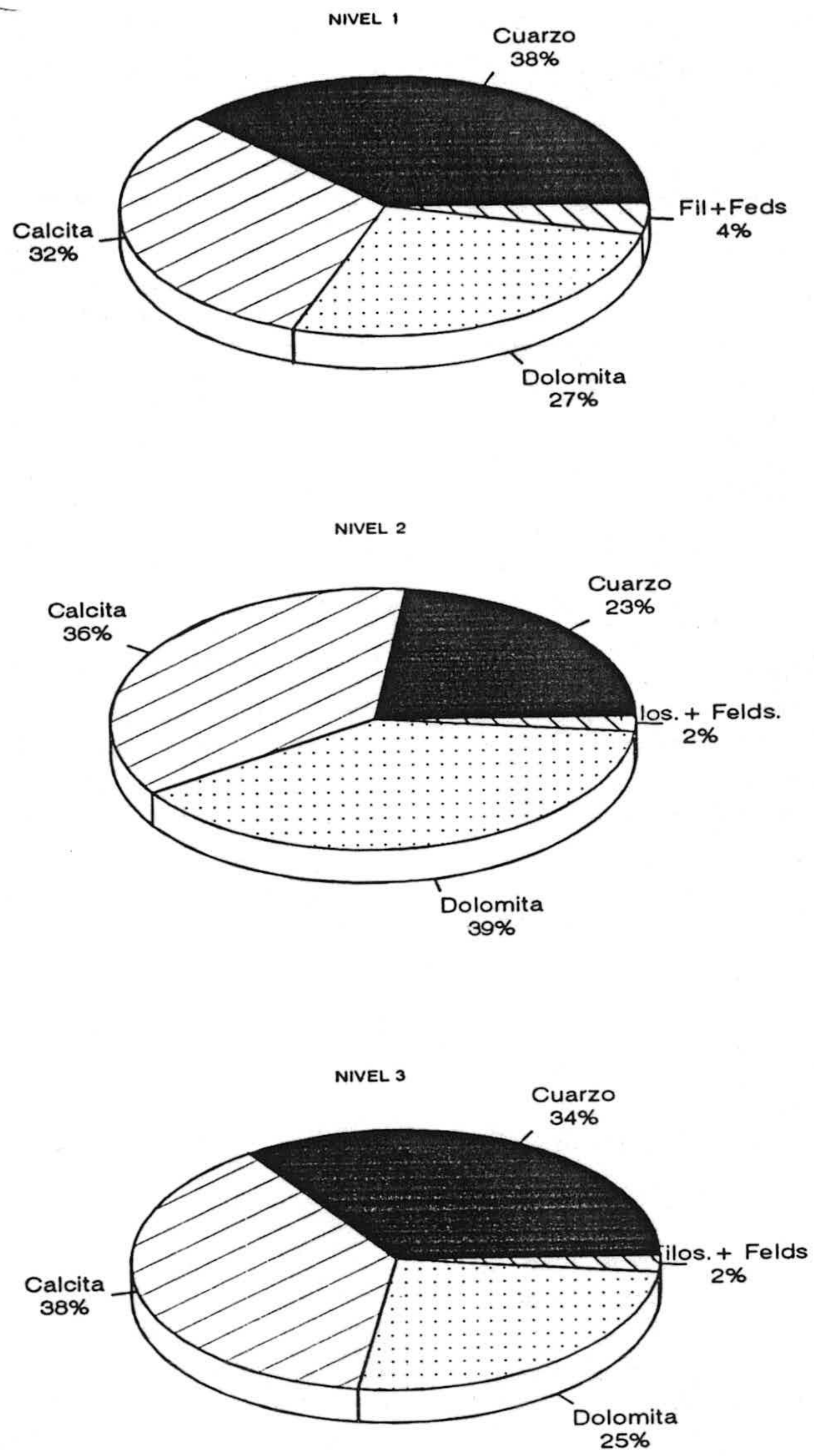


Fig. 9.8. Composición mineralógica media en cantera de las partículas >6.35 mm, para los distintos niveles diferenciados.

b) La composición mineralógica de las partículas comprendidas entre 6.35 y 0.074mm. viene indicada en las tablas IX-16,IX-17 y IX-18.

Tabla IX-16 Composición mineralógica nivel 1

Muestras	Mineralogía ϕ 6.36-0.074 mm			
	Q	Cc	DI	Fd/Fil
1A(36%)*	18	10	72	0
1B(43%)	39	18	43	<5
1C(52%)	39	15	43	<5
1D(55%)	38	15	49	<5
1E(42)	56	11	32	<5
1F(44)	27	9	43	<5
1G(34)	57	6	32	5
1H(56%)	39	25	35	<5
1I(50%)	90	<5	<5	<5
1J(34%)	34	21	46	<5
1K(55%)	99	0	0	<5

Tabla IX-17. Composición mineralógica nivel 2

Muestras	Mineralogía(ϕ 6.36-0.074 mm.			
	Q	Cc	DI	Fd/Fil
2A(40%)*	30	19	47	<5
2B(38%)	21	15	60	<5
2C(48%)	16	8	76	0
2D(44%)	24	20	60	<5
2E(26%)	35	18	49	<5

Tabla IX-18. Composición mineralógica nivel 3

Muestras	Mineralogía(ϕ 6.36- 0.074 mm)			
	Q	Cc	DI	Fd/Fil
3A(68%)*	57	28	15	<5
3B(38%)	29	0	70	<5
3C(50%)	67	16	16	<5
3D(48%)	83	5	10	<5

* Entre paréntesis viene reflejado el tanto por ciento de la muestra total a la que va referida la composición mineralógica aquí indicada.

Conclusiones

De los datos indicados en las tablas anteriores se observan variaciones importantes entre las distintas muestras estudiadas. En la figura 9.9 se han incorporado los valores medios de esta fracción para las distintas muestras estudiadas, agrupadas según los

niveles diferenciados.

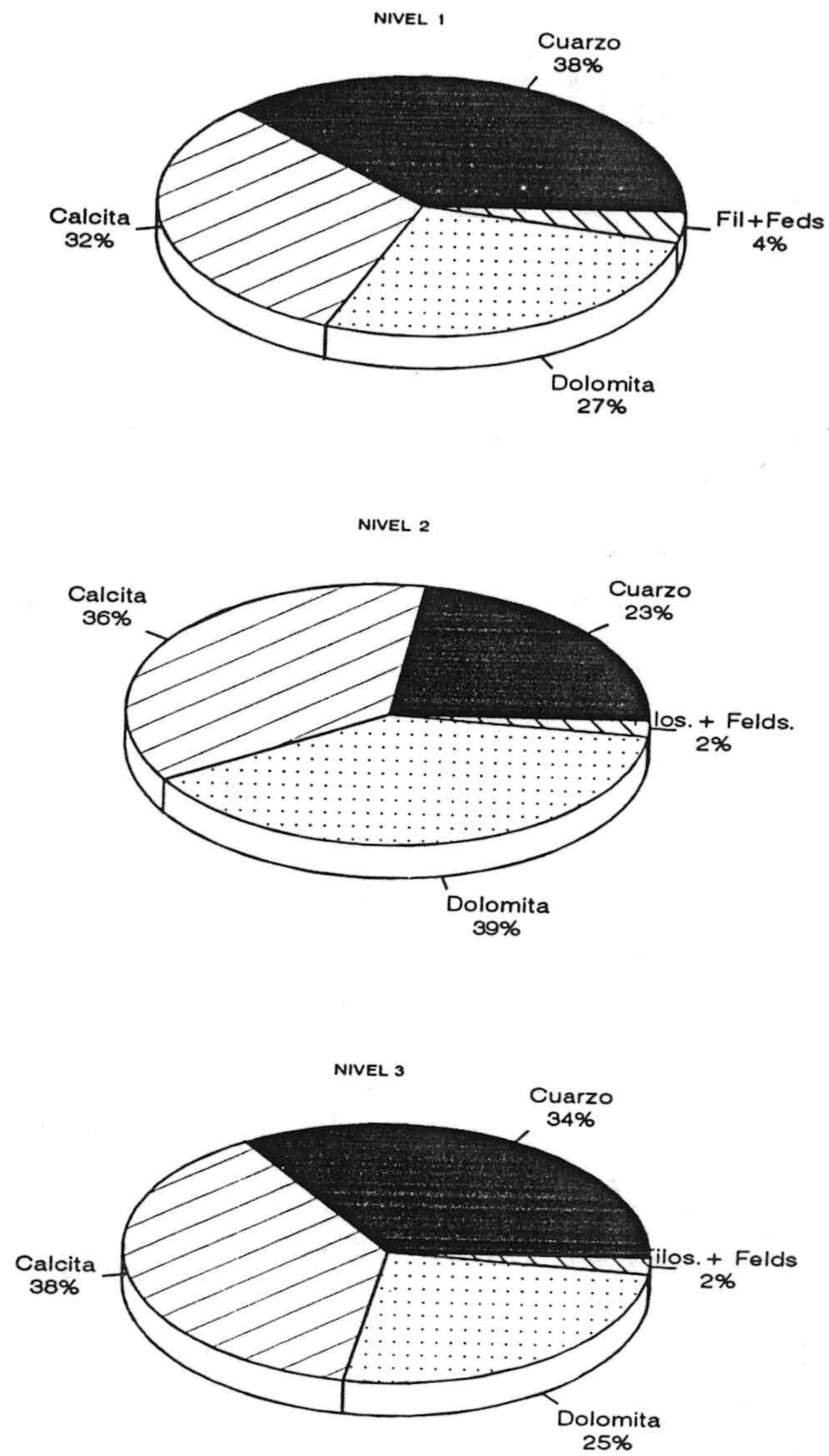


Fig.9.9. Composición mineralógica media de las partículas de tamaño comprendido entre 6.35 y 0.074 mm. en muestras de cantera agrupadas por niveles.

De los resultados se deduce:

- La composición de los cantos de menor tamaño presentan la misma características definidas para los cantos gruesos.

- Es de destacar, una importante reducción en el contenido en carbonatos, que puede llegar a la mitad de sus contenidos.

- Esta fracción se encuentra en proporciones importantes en las muestras estudiadas llegando a ser en casi todas superiores al 40%.

- Los cantos en general, presentan un contenido en filosilicatos inferior al 5%, siendo mayoritariamente micas.

d) Composición de la fracción fina (<0.074 mm). La composición de esta fracción, viene indicada en las tablas IX-19, IX-20 y IX-21. Estos resultados muestran la misma variedad mineralógica que en la fracción gruesa, con un incremento importante de minerales de la arcilla.

Tabla IX-19 Composición mineralógica nivel 1

Muestras	Mineralogía($\phi < 0.074$ mm)				
	Q	Cc	DI	Fd	Fil
1A(9%)*	24	36	24	<5	12
1B(9%)	24	36	24	<5	12
1C(9%)	54	18	5	<5	22
1D(7%)	57	18	5	5	22
1E(6%)	55	20	5	<5	22
1F(4%)	13	27	59	0	0
1G(6%)	22	35	9	<5	30
1H(10%)	13	27	59	<5	0
1I(12%)	90	<5	<5	8	0
1J(11%)	22	35	9	<5	32
1K(13%)	28	<5	25	6	37

Tabla IX-20 Composición mineralógica nivel 2

Muestras	Mineralogía($\phi < 0.074$ mm)				
	Q	Cc	DI	Fd	Fil
2A(7%)*	19	32	14	<5	33
2B(38%)	11	41	22	<5	24
2C(34%)	10	30	16	<5	43
2D(21%)	21	27	11	<5	40
2E(17%)	34	27	13	<5	30

Tabla IX-21. Composición mineralógica nivel 3.

Muestras	Mineralogía($\phi < 0.0074$ mm)				
	Q	Cc	DI	Fd	Fil
3A(25%)*	87	<5	<5	<5	7
3B(39%)	48	10	8	5	28
3C(29%)	42	16	7	<5	34
3D(42%)	40	8	20	<5	34

* Entre paréntesis viene indicado el tanto por ciento de la muestra total a la que va referida la composición mineralógica indicada.

En la figura 9.10 se han representado los valores medios de las distintas muestras estudiadas como en casos anteriores.

Conclusiones

De los resultados se deduce:

- Un incremento importante en filosilicatos en los niveles 2 y 3, sin embargo el nivel 1 presenta las mismas características composicionales en esta fracción que en las anteriores.

- Es de destacar el contenido en calcita en los nivel 1 y 2 (24% y 34%), bajando de forma importante en el nivel 3 (14%).

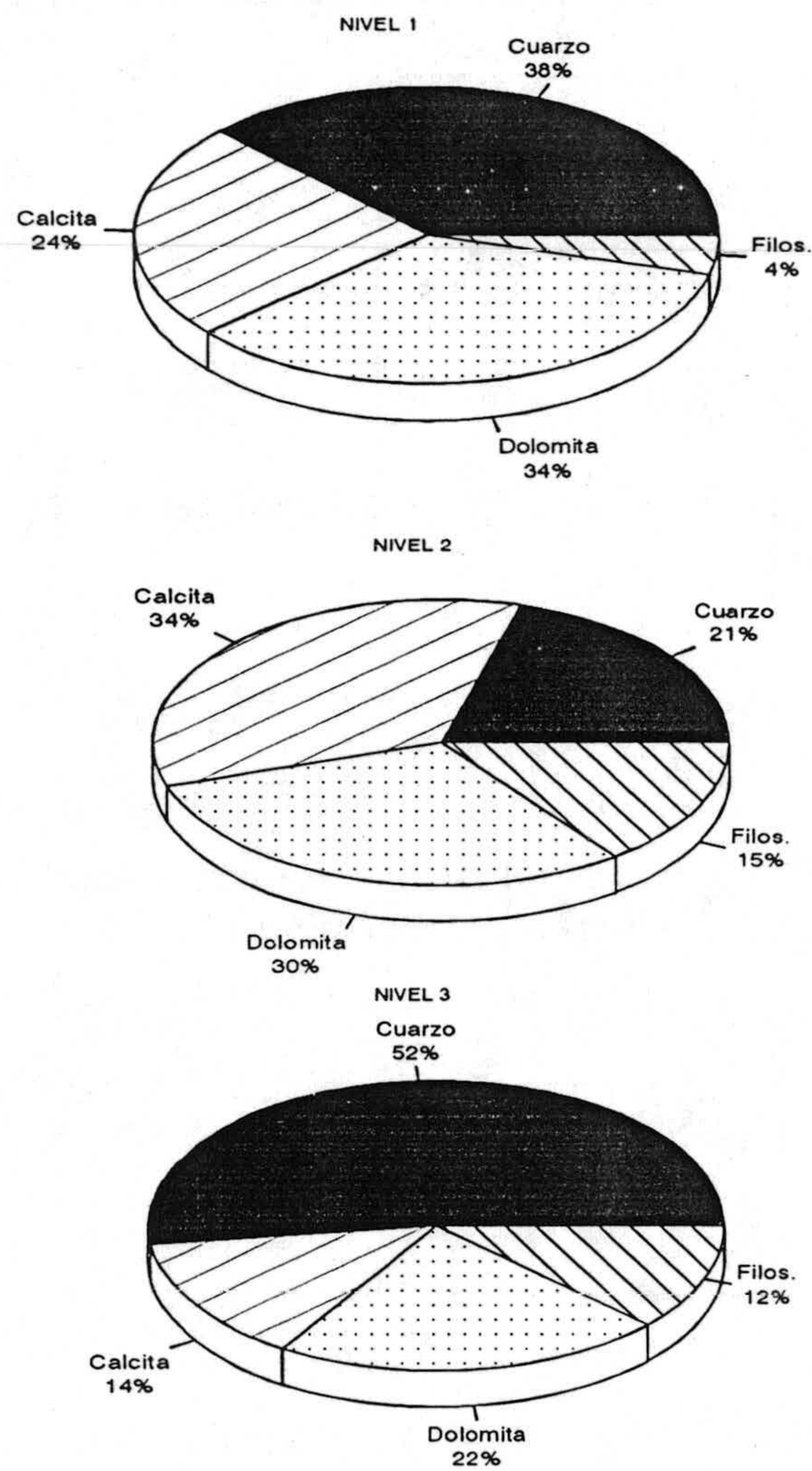


Fig. 9.10. Composición mineralógica media de las partículas < 0.074mm extraídas de las distintas muestras de cantera agrupadas por niveles.

La Fracción arcillosa analizada presenta una composición que viene indicada en la tabla IX-22.

Tabla IX-22 Mineralogía de la fracción arcilla.

Nivel	Esmectitas	Ilitas/paragonitas	Clorita+ Caolinita
1	52	42	5
2	44	42	14
3	45	42	13

De los datos se deduce que se trata de suelos con un contenido bajo en arcillas, donde las esmectitas e illita son la mineralogía dominante. Cabe destacar el suelo rojo (dentro del nivel 3), el cual presenta valores mas bajos en su contenido en esmectitas.

La composición de la fracción fina supone en la mayoría de las muestras aproximadamente el 10% de la muestra, incluso en el nivel 1 está en menor proporción. En el nivel 3, sin embargo, se hace mayor llegando a superar el 30%.

Por último, podemos decir que esta fracción incluye minerales de la arcilla en su composición, pero que también encontramos contenidos importantes de otros minerales (los mismos que aparecen en la fracción gruesa), en las proporciones que indicamos a continuación:

Nivel 1 - Fracc. Fina (8%).....Contenido en arcilla 4%.
 Nivel 2 - Fracc. Fina (26%).....Contenido en arcilla 15%
 Nivel 3 - Fracc. Fina (30)..... Contenido en arcilla 12%

Conclusión.

Como conclusión final podemos decir:

- El contenido en calcita es mayor en las fracciones >6.35 mm y <0.074 mm, que en la de tamaño comprendido entre dichos valores que suele estar entorno al 15%. Por otra parte el nivel que contiene en su conjunto menor cantidad de carbonatos es el nivel 3, esto parece lógico si consideramos que se trata de suelos sometidos continuamente a procesos de lavado.

Además, se podría indicar que el área fuente de estos materiales no es sólo Sierra Nevada, dada la proporción de carbonatos que encontramos, sino que también procederían del subbético (S^a Arana, S^a de Yedra etc.).

IX.1.6 ANALISIS QUIMICOS

Teniendo en cuenta que los datos mineralógicos nos indican una composición cualitativa semejante para las distintas fracciones estudiadas y dada la heterogeneidad de este material, el análisis químico se ha llevado a cabo sólo sobre las partículas menores de 0.074 mm. La composición química de los cantos se conoce, ya que estos cantos

proceden en su mayoría del complejo de S^a Nevada.

Los resultados se han obtenido mediante ICP y FRX. Por ICP se han identificado elementos mayoritarios (Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, P y Ti) y elementos traza (Co, Cu, Cr, Ni, Sr, V, Y, Zn, Pb, Zr, Nb y Li); por espectrometría de rayos X: Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, P, Ti, S, Cl, y Si.

Resultados.

Elementos mayoritarios

En las tablas IX-23, IX-24 y IX-25, vienen indicados los porcentajes de las distintas muestras estudiadas.

Tabla IX-23 Componentes químicos del nivel 1 (en %).

Muestras	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂
1A	5.5	2.9	5.0	0.05	19.2	0.4	2.1	1.6	0.3
1B	6.6	2.9	3.7	0.03	10.9	2.7	2.4	1.4	0.2
1C	6.6	2.6	4.5	0.05	18.5	3.5	2.4	1.6	2.6
1D	7.1	3.4	4.3	0.06	22.4	1.01	0.04	0.3	0.5
1E	4.2	2.6	4.3	0.09	19.1	3.6	1.7	1.8	0.3
1F	7.0	3.5	5.8	0.07	18.0	4.4	1.6	1.9	0.3
1G	7.8	5.3	2.4	0.08	10.0	5.1	2.7	1.9	0.5
1H	5.0	1.6	6.7	0.04	19.9	3.2	2.4	1.4	0.1
1I	10.0	6.0	3.6	0.06	14.1	3.7	2.2	1.4	4.7
1J	7.4	3.0	7.2	0.06	18.0	4.0	2.4	3.3	0.3
1K	4.0	2.0	2.7	0.02	17.4	1.5	0.3	3.7	0.2

Tabla IX-24 Componentes químicos del nivel 2 (en %)

Muestras	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂
2A	3.9	1.5	3.3	0.05	42	0.68	0.06	0.24	0.18
2B	4.8	2.2	2.7	0.04	36.5	0.73	0.03	0.25	0.32
2C	5.4	4.0	6.7	0.05	20.0	3.3	1.6	0.1	0.3
2D	10.7	4.5	8.0	0.06	21.0	3.9	3.1	1.9	0.4
2E	10.7	2.6	5.4	0.05	19.4	4.1	1.5	1.8	0.5

Tabla IX-25 Componentes químicos del nivel 3 (en %).

Muestras	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂
3A	9.5	5.5	5.3	0.06	13.6	4.6	2.7	1.9	0.4
3B	8.8	5.5	3.0	0.07	5.8	3.7	1.8	1.5	0.5
3C	7.2	4.0	3.6	0.05	10.9	3.3	1.6	1.7	0.4
3D	7.2	5.2	3.6	0.07	8.6	4.3	1.7	1.4	0.5

Con la finalidad de contrastar los datos obtenidos en el ICP, unas cuantas

Resultados.

muestras se analizaron por fluorescencia de rayos X. Los resultados obtenidos vienen indicados en la tabla IX-26.

Tabla IX-26. Componentes químicos (en %).

Muestras	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	CL	SiO ₂
1G	7.7	3.4	4.3	22	1.9	0.7	0.04	0.5	0.2	0.1	39
2A	4.8	2.2	2.7	36	0.7	0.2	0.03	0.3	0.0	0.0	23
2B	2.9	1.5	3.3	42	0.7	0.2	0.06	0.2	0.0	0.0	14
3B	14.4	5.9	1.9	5	2.0	0.7	0.04	1.1	0.0	0.0	64

Elementos minoritarios.

Dentro de los elementos minoritarios se han analizado el Co, Cu, Cr, Li, Ni, Sr, V, Y, Pb, Zr, Nb, Zn. Los datos vienen indicados en la tablas IX-27, IX-28 y IX-29 expresados en ppm. Para el caso del Co, Cu y Ni, aunque se han analizado se encuentra en cantidades tan pequeñas que esta técnica no puede registrarlas.

Los resultados obtenidos presentan también variaciones importantes según las muestras. De forma general podríamos decir que el nivel 2 es el que presenta mayor concentración de determinados elementos traza.

El elemento más abundante es el Zr y le siguen el Sr el Pb y el Zn.

Tabla IX-27. Elementos minoritarios Nivel 1 (ppm)

Muestras	Co	Cu	Cr	Ni	Sr	V	Y	Zn	Pb	Zr	Nb	Li
1A	-	-	-	-	221.0	51.0	16.0	258.0	110	359	13.5	8.5
1B	-	-	-	-	220.4	56.7	15.1	264.0	111.0	638.8	38.8	29.1
1C	-	-	-	-	262.7	64.6	12.0	64.6	225.8	337.2	29.3	19.0
1D	-	-	-	-	152.2	65.2	23.1	7.5	259.7	460.01	58.8	9.0
1E	-	-	9.2	-	286.5	138.5	11.9	216.3	-	392	110.9	117
1F	-	-	-	-	129.6	65.6	19.8	-	312.6	654.9	50.2	-
1G	-	-	-	-	142.1	87.1	24.2	-	323.3	1414	31.7	91.0
1H	-	-	-	-	113.2	45.5	8.8	-	67.0	606.8	20.9	48.9
1I	-	-	10.9	-	101.6	126.6	19.9	140.2	126.9	646.4	59.7	37.0
1J	-	-	-	-	157.5	50.7	21.9	138.6	109.8	706.8	21.3	63.1
1K	-	-	-	41.1	598.3	36.7	7.5	74.2	4.1	33.2	10.4	11.4

Tabla IX-28 Elementos minoritarios Nivel 2 (ppm).

Muestras	Co	Cu	Cr	Ni	Sr	V	Y	Zn	Pb	Zr	Nb	Li
2A	-	-	-	-	779.1	116.5	36.2	23.0	168.2	1562	97.6	125.4
2B	-	-	-	-	221.5	78.7	4.1	98.1	-	719.6	24.1	125.4
2C	14.1	-	49.0	-	243.8	368.3	27.7	82.5	453.4	1939	28.8	26.3
3D	-	-	8.9	-	172.0	86.0	125.0	127.5	20.7	737.6	58.1	156.41
2E	-	-	2.0	-	238.7	132.6	3.2	-	-	1072	92.4	80.1

Tabla IX-29. Elementos minoritarios Nivel 3 (ppm).

Muestras	Co	Cu	Cr	Ni	Sr	V	Y	Zn	Pb	Zr	Nb	Li
3A	-	-	23.8	-	161.3	114.0	12.2	25.6	66.0	834.7	24.1	107.3
3B	-	-	-	-	174.5	77.1	0.15	-	-	590.4	-	105.8
3C	-	-	146.3	-	254.1	87.13	9.5	-	-	785.1	52.3	103.4
3D	-	-	16.7	-	117.0	179.5	13.1	51.2	-	1214.	136.5	135.7

Conclusiones

Se observa en muestras de cantera un contenido tan escaso en sulfatos y cloruros, que no han podido ser detectadas mediante estas técnicas.

IX.1.7 MATERIA ORGANICA.

Resultados.

En las tabla IX-30, IX-31 y IX-32 se recogen los contenidos de materia orgánica de las muestras estudiadas.

El contenido en materia orgánica en cantera es muy reducido, no superando en la mayoría de los casos el 0.40%. Salvo en las muestras de suelos (nivel 3) cuyo contenido alcanza valores que superan el 1%.

Tabla IX-30. Contenido en materia orgánica Nivel 1.

Muestras	1A	1B	1C	1D	1E	1F	1G	1H	1I	1J	1K
% mat. organic	0.25	0.26	0.25	0.28	0.26	0.25	0.28	0.25	0.23	0.26	0.25

Tabla. IX-31. Contenido en materia orgánica Nivel 2.

Muestras	2A	2B	2C	2D	2E
% mat. organic	0.30	0.38	0.35	0.32	0.36

Tabla IX-32. Contenido en materia orgánica Nivel 3

Muestras	1A	2B	2C	2D
% mat. organic	1.3	1.1	1.0	1.5

Conclusiones.

De los resultados obtenidos se deduce, que en general se trata de materiales con bajo contenido en materia orgánica, el máximo contenido lo presenta el nivel 3 localizado

en la zona más superior tapizando los niveles anteriores. estos suelos en general están poco evolucionados. Cabe destacar el desarrollo de paleosuelos, que en algunas zonas aparecen enterrados, y que en la actualidad no presentan ninguna actividad.

IX.2 RESULTADOS EN MURALLAS.

De acuerdo con la metodología empleada en este estudio, se han obtenido una serie de resultados que vienen indicados a continuación.

Dadas las características del material con el que hemos trabajado, ha sido necesario establecer una diferenciación previa en su estudio, según las características que presentara el material extraído de las Murallas. La cohesión del material con adición de cal, ha hecho dificultosa su disgregación tanto para el estudio granulométrico como para su correcta identificación mineralógica (cal que ha quedado adherida a los áridos), hecho que se ha tenido en cuenta a la hora de su interpretación.

Antes de indicar los datos obtenidos, es interesante hacer ciertas apreciaciones sobre el aspecto de estas fábricas.

En la lámina VIII, la foto 26 corresponde a un corte perpendicular a la muralla del Albayzín, concretamente en el tramo de San Miguel. En este corte se insinúa cierto bandeo que representa la disposición en tongadas del material; y en la foto 27 más en detalle, puede verse la disposición preferente que presentan los cantos, reflejando el aplastamiento en sentido vertical, sufrido durante el proceso de apisonamiento. En este mismo sentido se observa una cierta alternancia entre niveles más ricos en finos y otros donde la fracción dominante es la gruesa, con cantos de gran tamaño como puede observarse en las fotos mencionadas.

La foto 28, en esta misma lámina, nos muestra el aspecto que presenta el revestimiento exterior, cuando la superficie más externa se ha desprendido. Corresponde al tramo de San Miguel.

La foto 29 nos señala el aspecto que presenta el interior de muro del tramo superior de San Antonio, como puede verse se trata de un material de aspecto distinto al empleado en la totalidad del recinto (arrabal del Albayzín) con una coloración más

rojiza y granulometría más fina.

La foto 30, corresponde a un trozo del muro del tramo cerca de Don Gonzalo, donde se observa parcialmente el revestimiento exterior, sin desarrollo de pátina. La observación en detalle nos permite decir que la granulometría del revestimiento exterior, y el de su parte exterior más continua, no presenta diferencias significativas, salvo en los cantos de mayor tamaño, que en esta zona están totalmente ausentes, así como las partículas de naturaleza arcillosa y limosa.

En la foto 32, se muestra un ejemplo del aspecto que presenta la Alcazaba Gidida, en su parte exterior, y en la foto 33 un torreón perteneciente a la Alcazaba Cadima (torreón de la Charca).

IX.2.1 GRANULOMETRIAS POR TAMIZADO.

En este estudio granulométrico por tamizado, se ha diferenciado entre muestras de interior de muro y de revestimientos.

IX.2.1.1 Resultados.

Murallas Ziries

Alcazaba Cadima.

Como se puede observar en la foto 33, la fábrica de estos muros presenta claramente el aspecto de un «hormigón de tierra-cal», donde la tierra se amasa con cal y es vertida directamente en los cajones del tapial y apisonada. Durante el proceso de apisonamiento el material sufre un aplastamiento, que viene reflejado por la imbricación de los cantos. En las caras externas de estas construcciones, se observan unos revestimientos exteriores de material de granulometría más fina, que no se han podido separar del resto del muro. Sobre esta fina capa a veces se observan pátinas de color anaranjado, sobre todo en las zonas más protegidas.

Por las razones indicadas anteriormente, en el estudio granulométrico de la Alcazaba Cadima no se ha diferenciados entre interior de muro y revestimiento, por lo que las granulometrías obtenidas van referidas al interior de muro exclusivamente.

Los datos que hemos podido aportar sobre estos lienzos, son muy escasos al no poder acceder a ellos por las razones indicadas en capítulos anteriores.

En la figura 9.11 se muestran las granulometrías obtenidas para estos materiales. Y en la tabla IX-33, vienen indicados el valor de los módulos granulométricos obtenidos de las distintas muestras estudiadas.

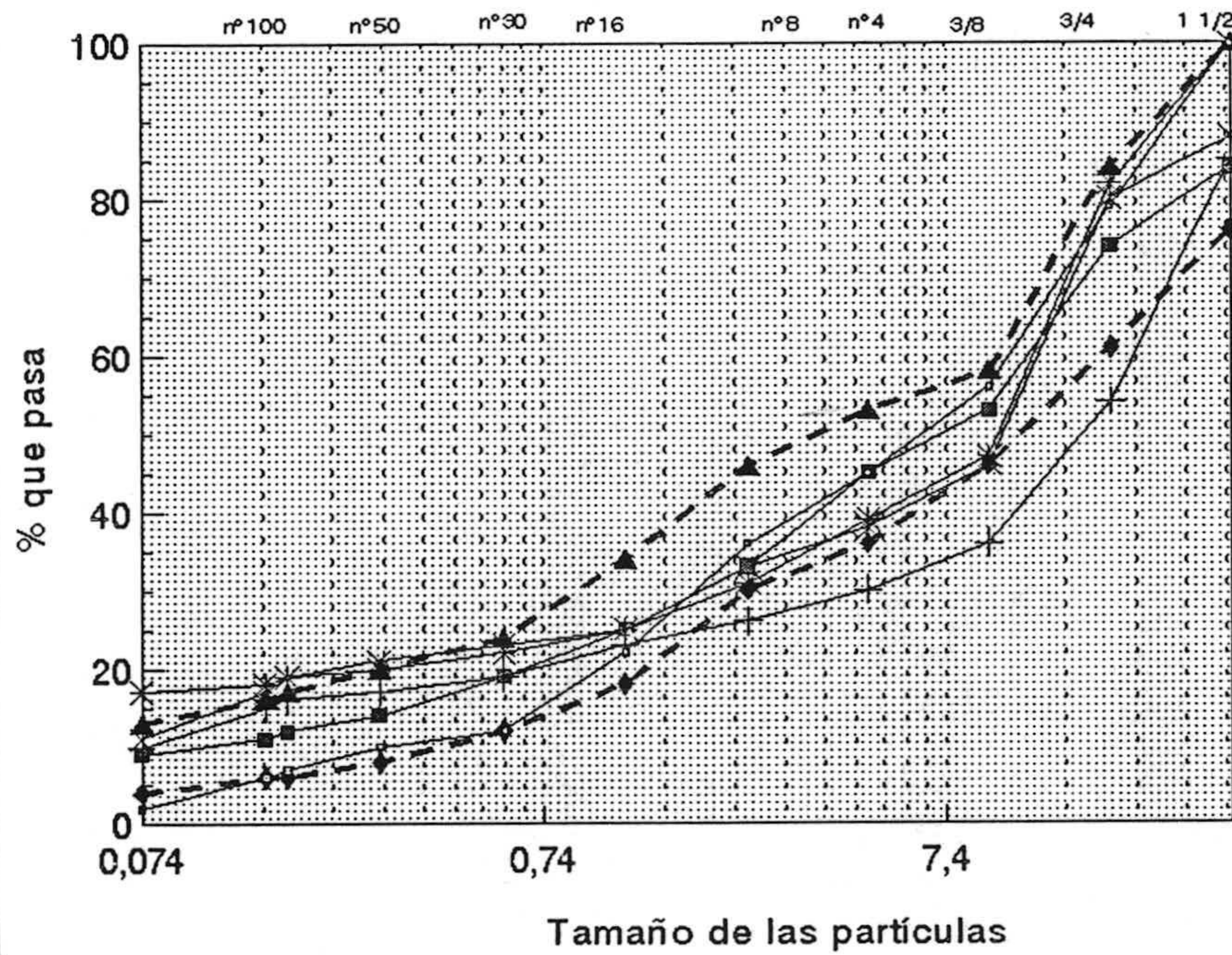


Fig. 9.11. Granulometrías obtenidas en muestras de la Alcazaba Cadima para interior de muro. Obsérvense como se adaptan al huso definido para el nivel 1 de cantera.

Tabla IX-33. Módulos granulométricos obtenidos en la Alcazaba cadima.

Muestras	ALZC-1	ALZC-2	ALZC-3	ALZC-4	ALZC-5
Módulo granulométrico	5.3	5.9	5.1	5.3	5.2

Conclusiones

Los resultados granulométricos ponen de manifiesto que se trata de un material grosero con un bajo contenido en finos. Se asemeja por el aspecto de las curvas granulométricas al nivel 1 de cantera. Los resultados granulométricos (fig. 9.12) también nos lo confirma.

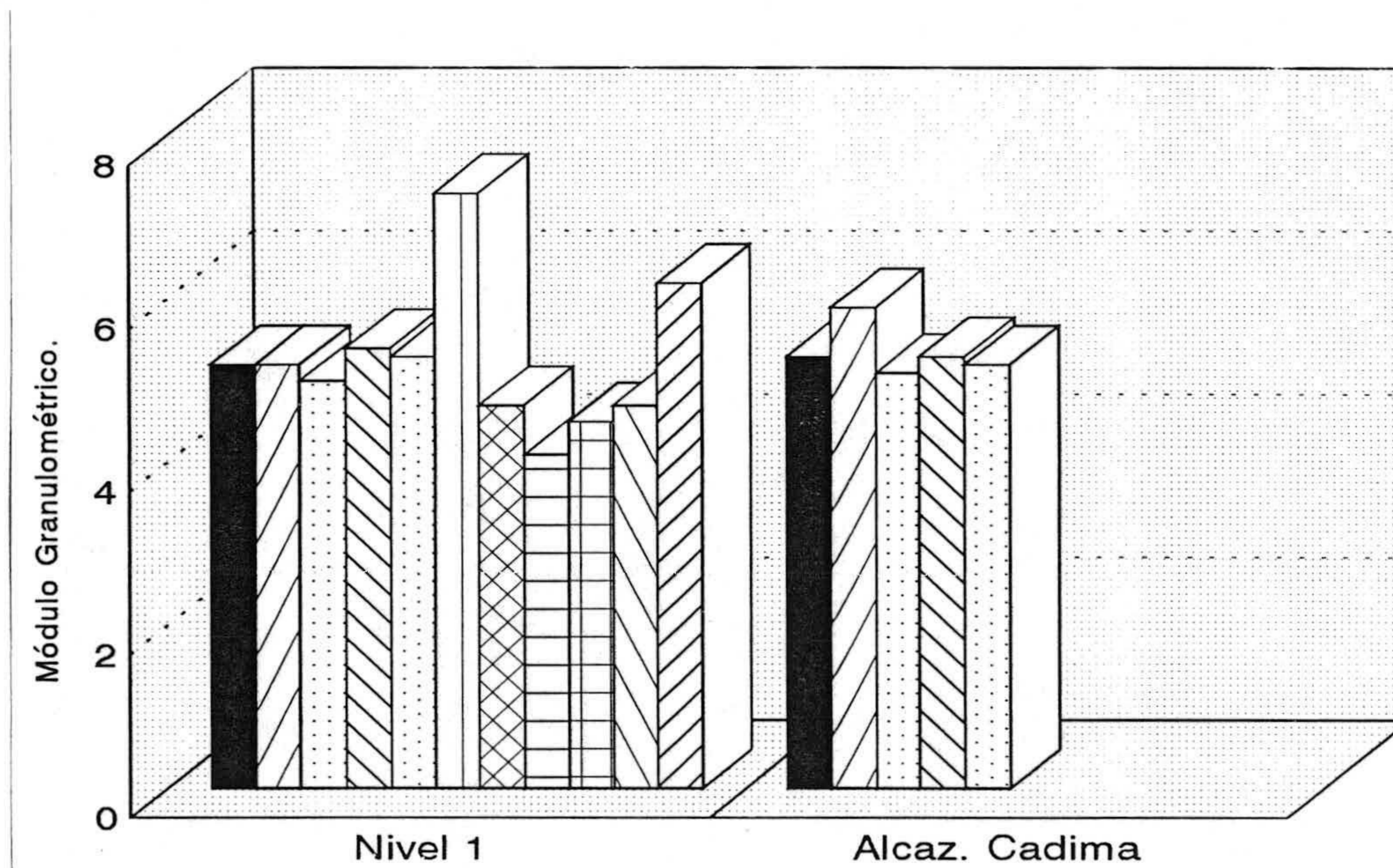


Fig.9.12 Comparación entre los módulos granulométricos obtenidos en la Alcazaba Cadima con relación al nivel 1 de cantera.

Alcazaba Gidida.

En este caso, se ha podido diferenciar de manera clara las muestras de interior de muro y las de revestimientos. La foto 34 nos muestra el interior de muro de este tipo de fábricas; como se advierte, se observa una alternancia de bandas de tierra y de "hormigón" de cal, partes que se pueden distinguir a simple vista. En muchas zonas de

los lienzos de muralla conservados, el material presenta un lavado importante de la cal añadida al interior de muro, al perder el recubrimiento exterior que las protegía. En la Foto 35 se observa parte del recubrimiento exterior, donde se puede ver claramente su enriquecimiento en cal.

En la figura 9.13. vienen representadas la distribución de las curvas para muestras de interior de muro estabilizadas y no estabilizadas con cal y las de revestimientos. Se observan claras diferencias entre las distintas muestras analizadas.

En las muestras de revestimientos se aprecia una bajada importante del contenido en finos y cierta irregularidad en el tanto por ciento de las partículas de mayor tamaño, que en general, es menor.

En la muestras de interior de muro se aprecian diferencias, entre el material empleado en la construcción de éste recinto y el Arco Elvira.

En éste último como puede verse en la Foto 36, para el caso de las muestras de interior de muro «sin adición o con poca adición» de cal, las granulometría presentan un contenido mayor en finos, por sus características granulométricas podemos afirmar dada su posición que se trata de material coluvial de la vega, al no adaptarse a las características del resto del recinto.

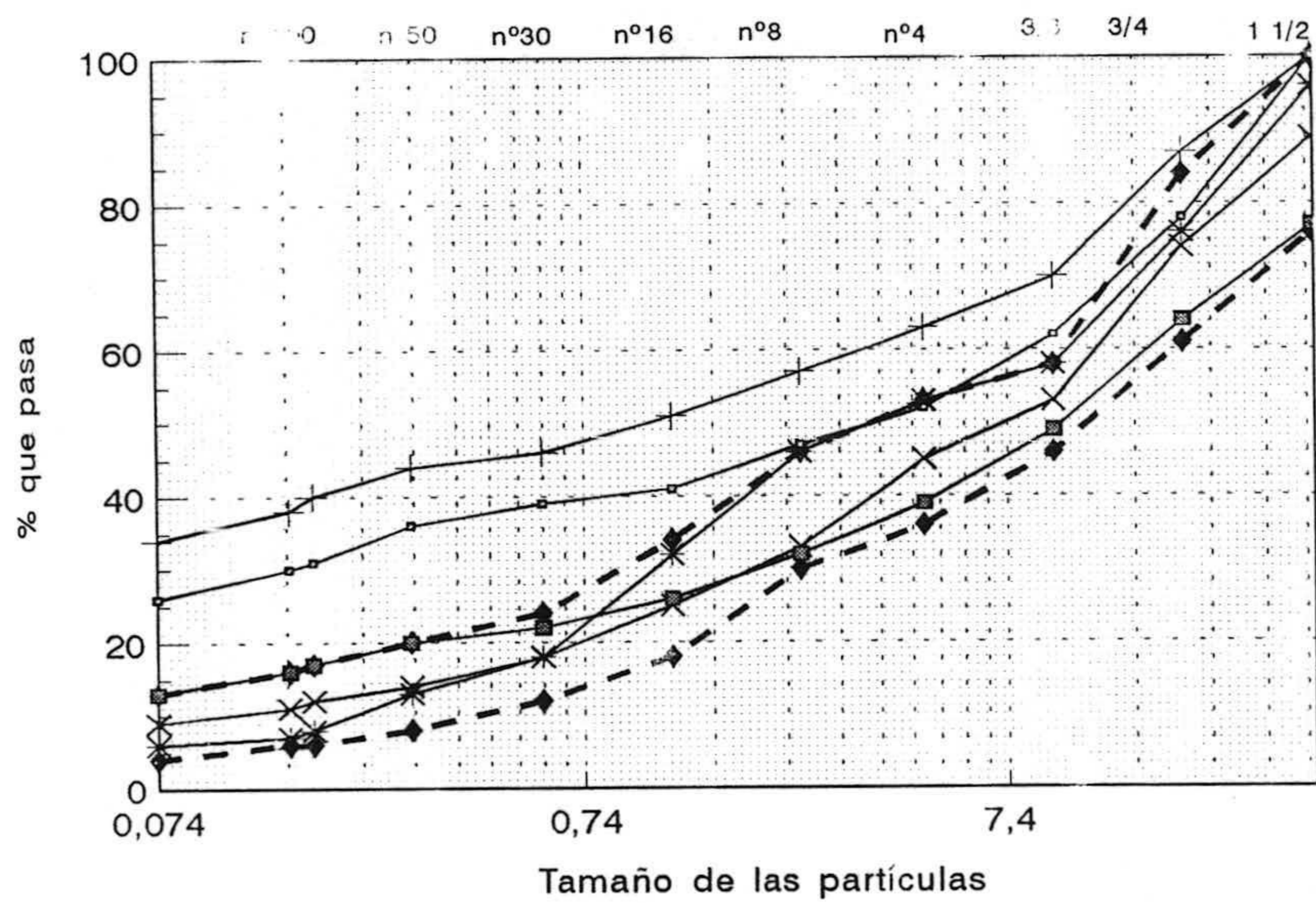
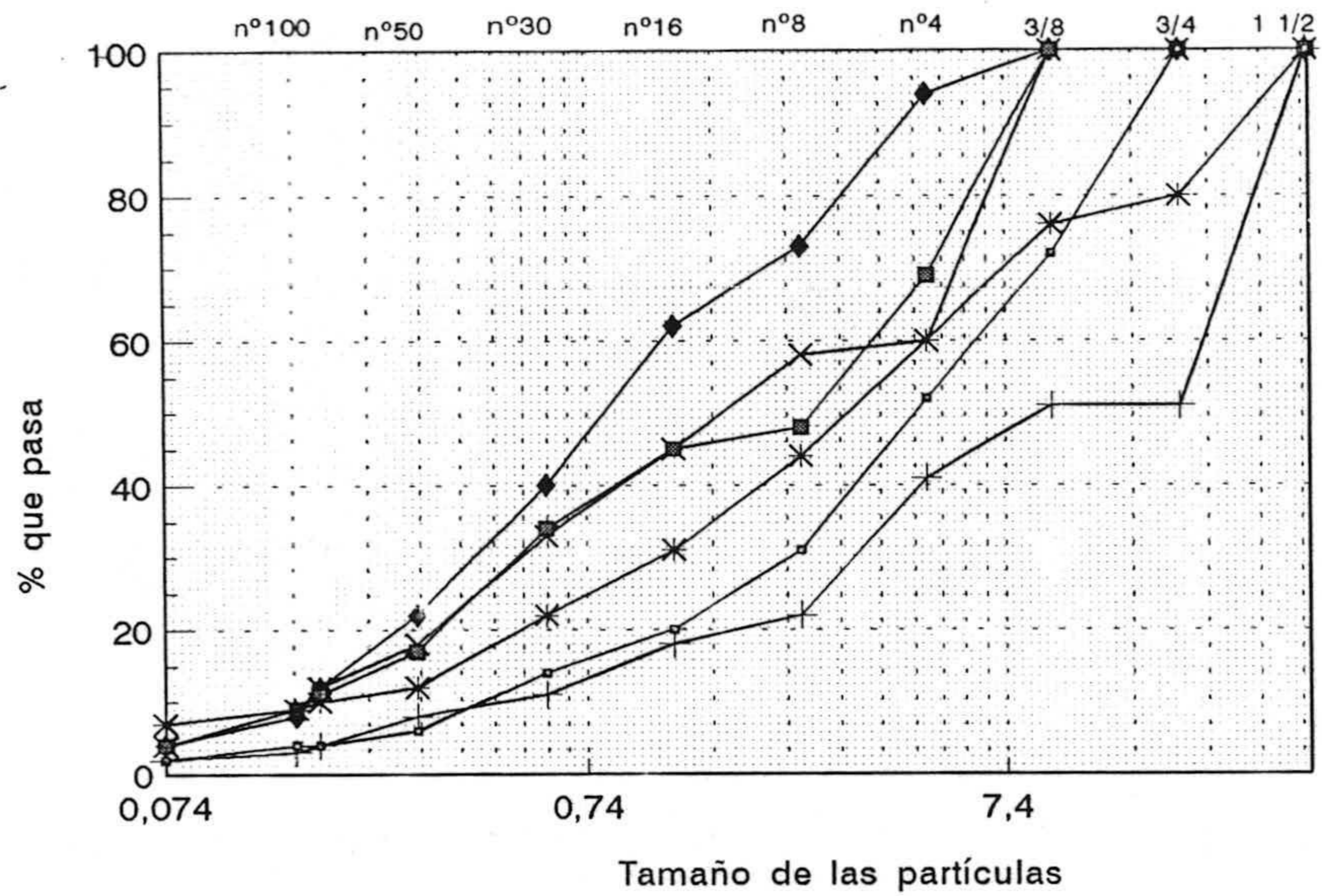


Fig. 9.13 Granulometrías obtenidas para muestras analizadas de la Alcazaba Gidida, para interior de muro y revestimientos. obsérvense como hay una serie de curvas que se adaptan al nivel 1.

Para el caso de los revestimientos exteriores y «hormigones de interior de muro», se aprecia un menor contenido en granos gruesos y finos, de la misma manera que para el caso de los revestimientos analizados en el resto del recinto, evidenciando cierta selección en cantera o tratamiento del material.

En la extracción de las muestras de interior de muro del resto de la Alcazaba Gidida ha sido casi imposible diferenciar entre material «tratado con cal y no tratado o poco tratado», como consecuencia de la delgadez de estas capas, a excepción del Arco de las pesas. En el Arco Elvira esta diferenciación se ha podido realizar ya que la alternancia, entre capas ricas y pobres en cal, no se produce por tongadas, sino entre cajón y cajón (ver foto 36). Esta forma constructiva es posible que pueda aparecer en otras zonas (recinto amurallado de la Alhambra), pero concretamente en los lienzos estudiados no lo hemos encontrado, salvo en la zona indicada. Cabe destacar el material extraído en el Arco de las Pesas de color más rosada y con un mayor contenido en finos, cuya textura se asemeja al nivel 2 de cantera, de la misma manera que para las muestras extraídas del Arco Elvira.

Conclusiones.

De las curvas granulométricas se deduce que éstas son claramente diferentes. No se aprecia selección de material, sin embargo el contenido en finos baja con relación al material del arco Elvira. Por sus características granulométricas podemos afirmar que pertenece al nivel 1, de carácter más grosero y con bajo contenido en finos.

El valor de los módulos granulométricos vienen indicados en la tabla IX-34.

Tabla IX-34. Módulos granulométricos (Alcazaba Gidida).

Muestras	Módulos Granulométricos
ALG-1(IM)	4.8
ALG-2(IM)	5.8
ALG-3(IM)	4.6
ALG-4(IM)	3.4
ALG-5(IM)	5.0
ALG-6(IM)	5.5
ALG-7(IM)	5.3
ALG-8(IM)	3.2
ALG-9(RE)	2.9
ALG-10(IM)	3.2
ALG11(RE)	3.0

En este caso los valores más altos corresponden a muestras de interior de muro a excepción de la muestra tomada en el arco Elvira (ALG-10), por otra parte cabe destacar los valores que toman los revestimientos exteriores que en estos casos son más finos que los morteros empleados en el interior de muro (figura 9.14)

Muralla del Albayzín.

Este recinto amurallado presenta diferencias claras respecto a los anteriormente estudiados. En la foto 26 se muestra el aspecto del interior de muro de este tipo de construcciones, donde se advierte el material sin previo aporte de cal. o al menos en cantidades no perceptibles a simple vista. En la foto 28 observa el aspecto del revestimiento, donde se observa claramente una aporte de cal en cantidades importantes. A estos revestimiento se les ha denominado calicastrados, dadas sus características constructivas.

Teniendo en cuenta estas distinciones previas, pasamos a exponer los resultados granulométricos obtenidos en este recinto, según los tramos diferenciados.

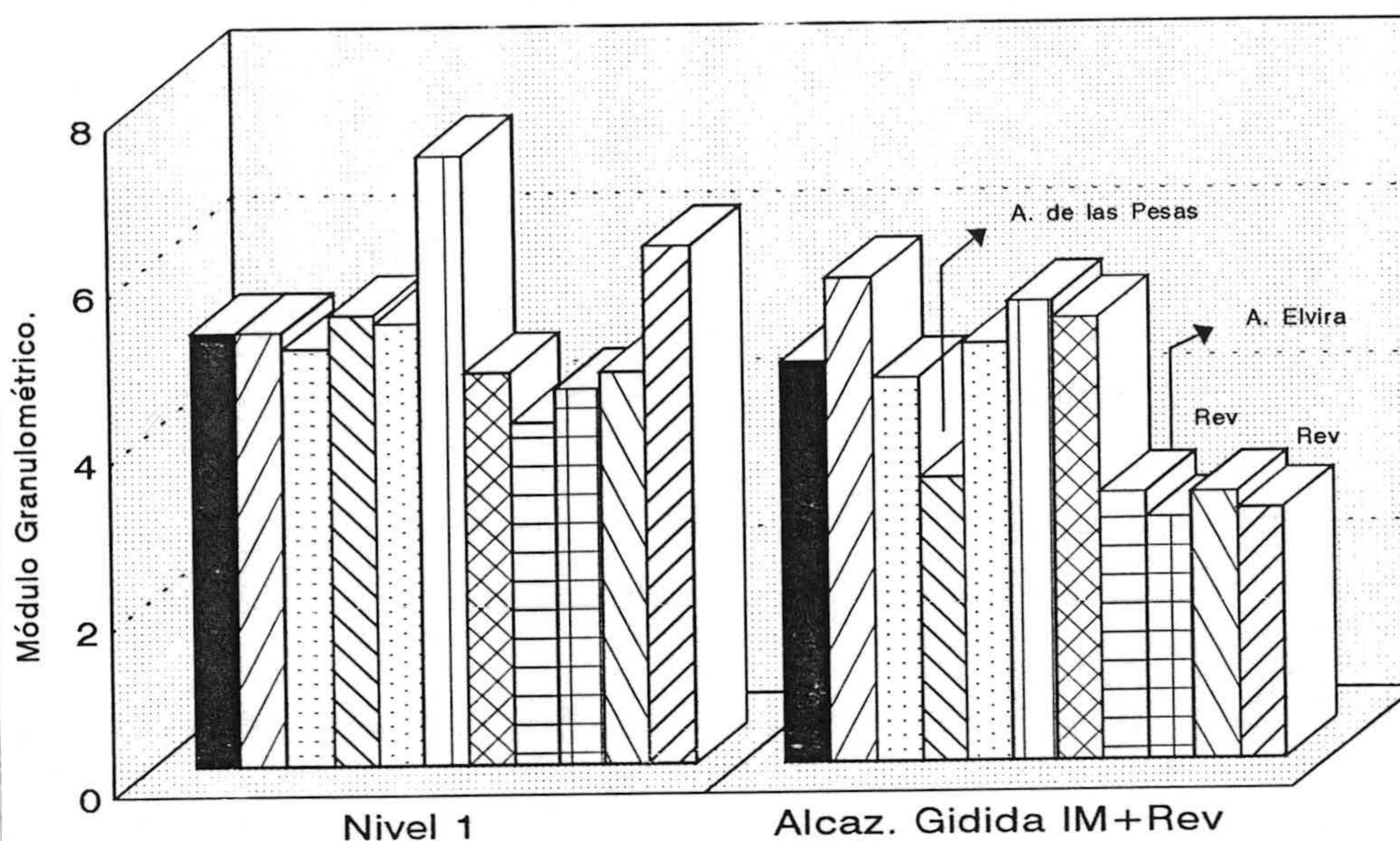


Fig. 9.14. Módulos granulométricos obtenidos en la Alcazaba Gidida en comparación con los niveles 1 y 2 de cantera.

Tramo Cerca D. Gonzalo.

El aspecto que presenta el material estudiado viene indicado en la foto 37. La distribución de las curvas granulométricas realizadas sobre material extraído de este lienzo de muralla, viene expuesto en la figura 9.15.

Como puede observarse se advierten diferencias entre las curvas de interior de muro y las de calicestrados o revestimientos.

De las curvas granulométricas obtenidas para interior de muro, se deduce que se trata de un material bien gradado con un contenido en finos por encima de 17%. Por sus características podría asociarse al nivel 2 de cantera.

En las curvas de revestimientos, entre el tamiz 1.1/2 y 3/4, las curvas se hacen muy pendientes lo que nos está indicando poca gradación en el tamaño de grano para

estas fracciones. A continuación y hasta llegar al tamiz n° 100 (ASTM), la curva vuelve a sufrir una fuerte inflexión, que se traduce en una reducción en el tamaño de finos.

Conclusión.

Como conclusión podríamos decir que las muestras de interior de muro coinciden con las muestras del nivel 2 de cantera y que existe cierta selección en el material utilizado para los calicestrados, ya que se observa una eliminación de cantos de mayor tamaño y de partículas finas.

En la tabla IX-35. aparecen los valores de los módulos granulométricos para las distintas muestras estudiadas.

tabla IX-35 Módulos granulométricos (Cerca Don Gonzalo).

Muestras	Módulo Granulométrico
MDG1.IM	3.5
MDG-2.IM	3.8
MDG-3.IM	4.1
MDG-4.C	5.4
MDG-5.C	5.8
MDG-6.C	3.7

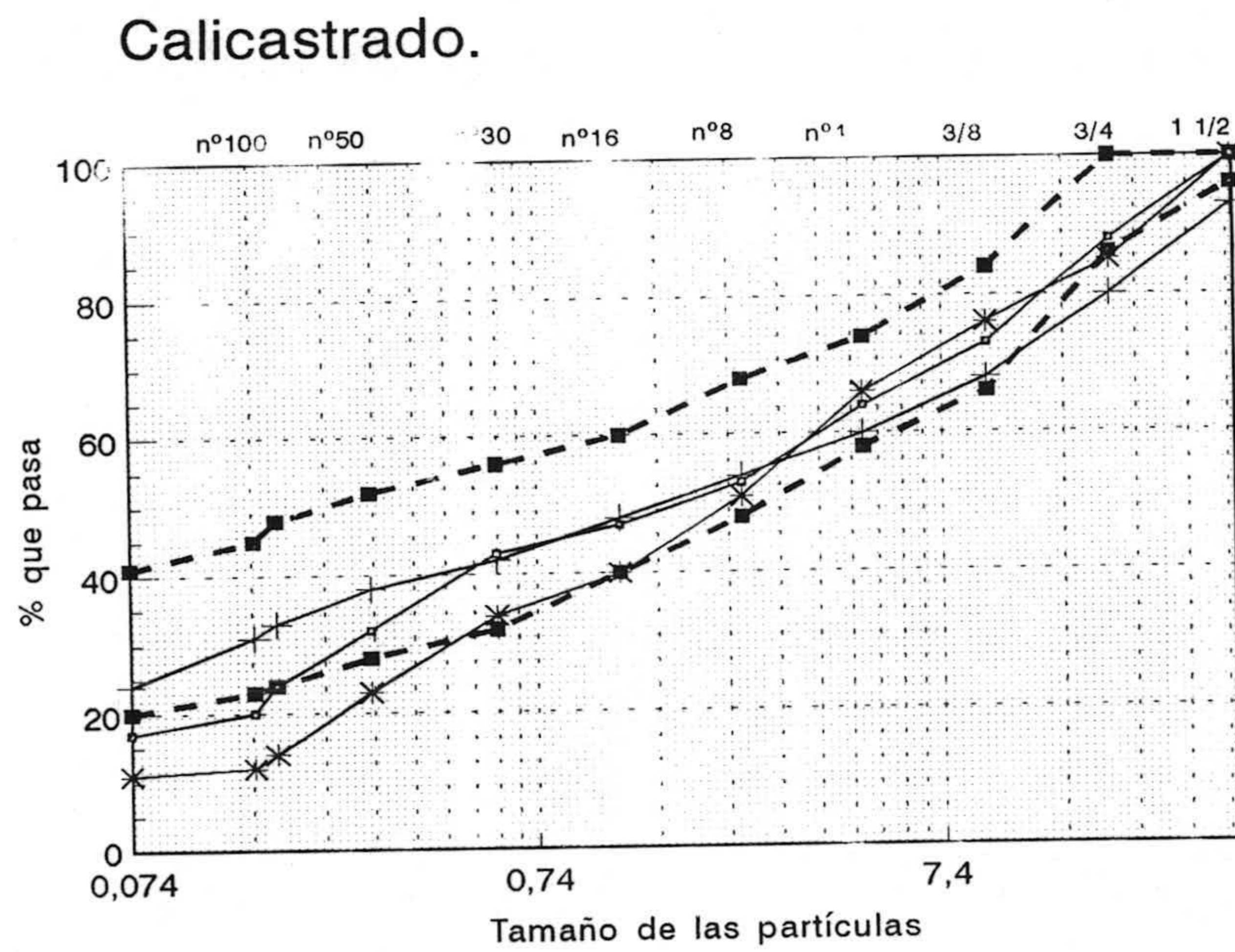
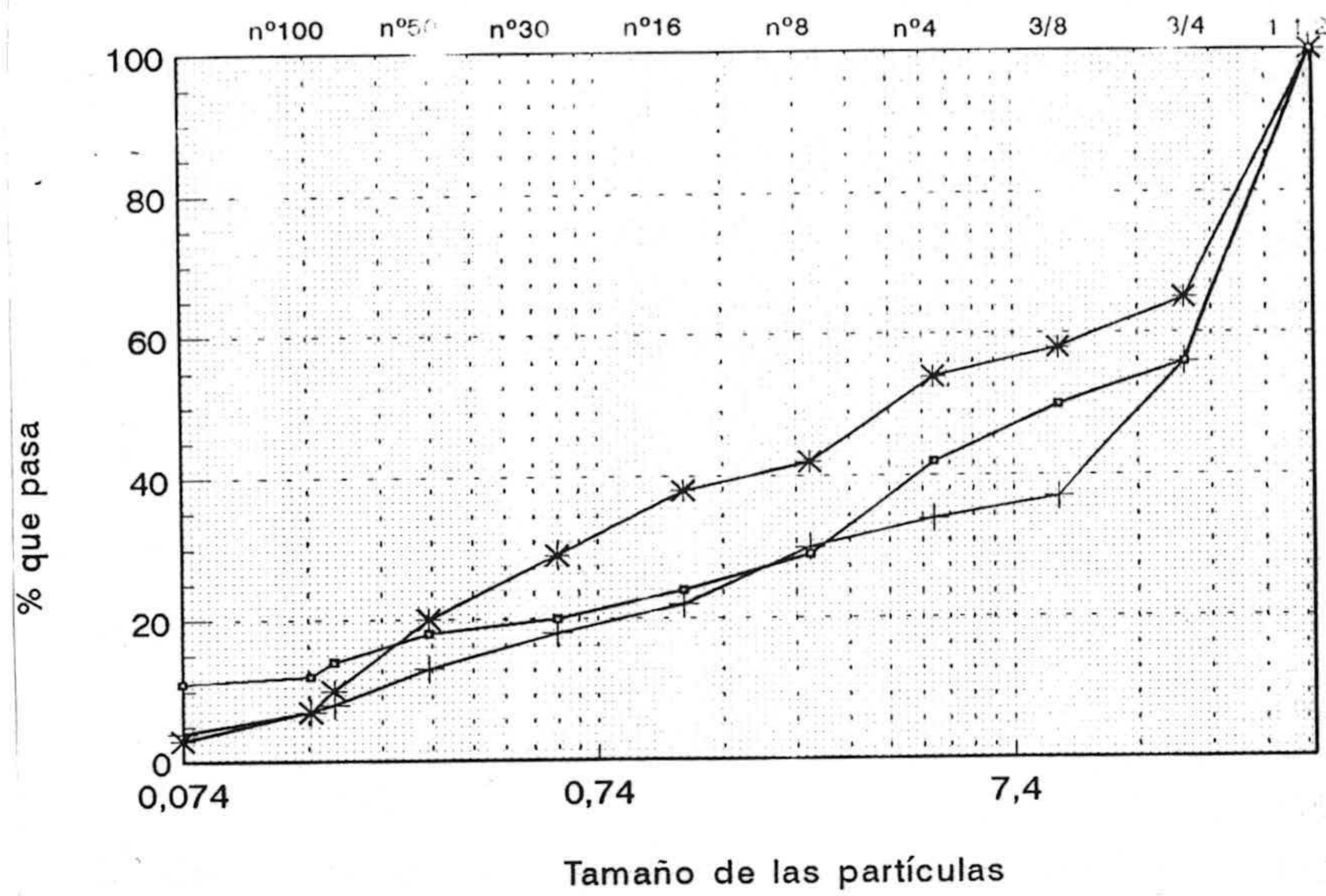


Fig. 9.15. Granulometrías obtenidas para la cerca Don Gonzalo.

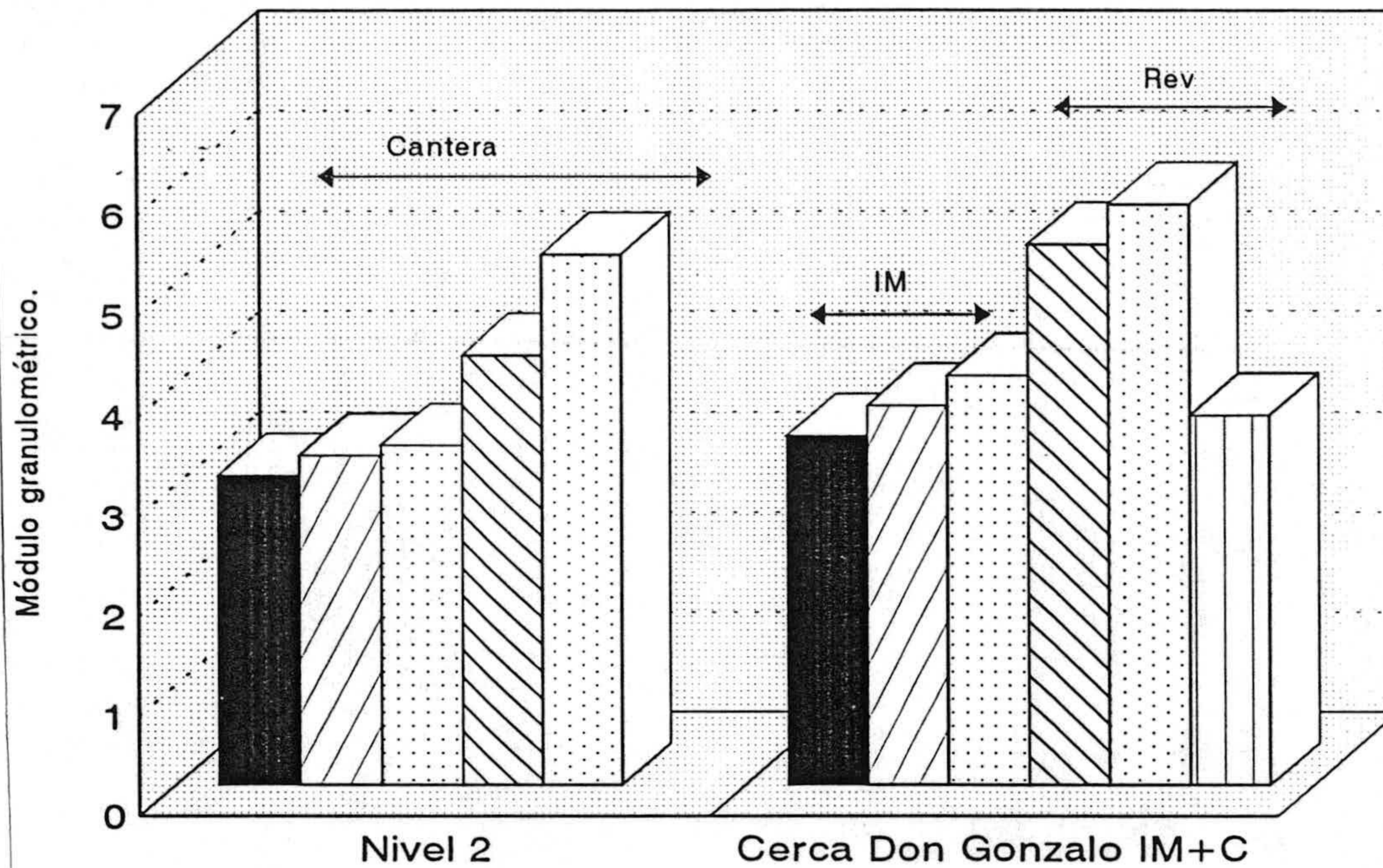


Fig.9.16. Módulos granulométricos obtenidos en la cerca Don Gonzalo comparados con los obtenidos con el nivel 2 de cantera.

El valor de los módulos granulométricos, en este caso, son más altos para las muestras de calicastro que para las muestras de interior de muro, hecho que es normal si se tiene en cuenta que el módulo granulométrico se hace menor cuanto mayor es el número de partículas finas. Para el caso de los calicastros queda claro que el contenido en partículas que pasan el tamiz nº 200 se reduce ampliamente. Por otra parte la igualdad de módulo no garantiza la equivalencia de la gradación de tamaños.

Tramo San Miguel

La distribución de las curvas realizadas sobre material de interior y de revestimientos vienen reflejadas en la figura 9.17.

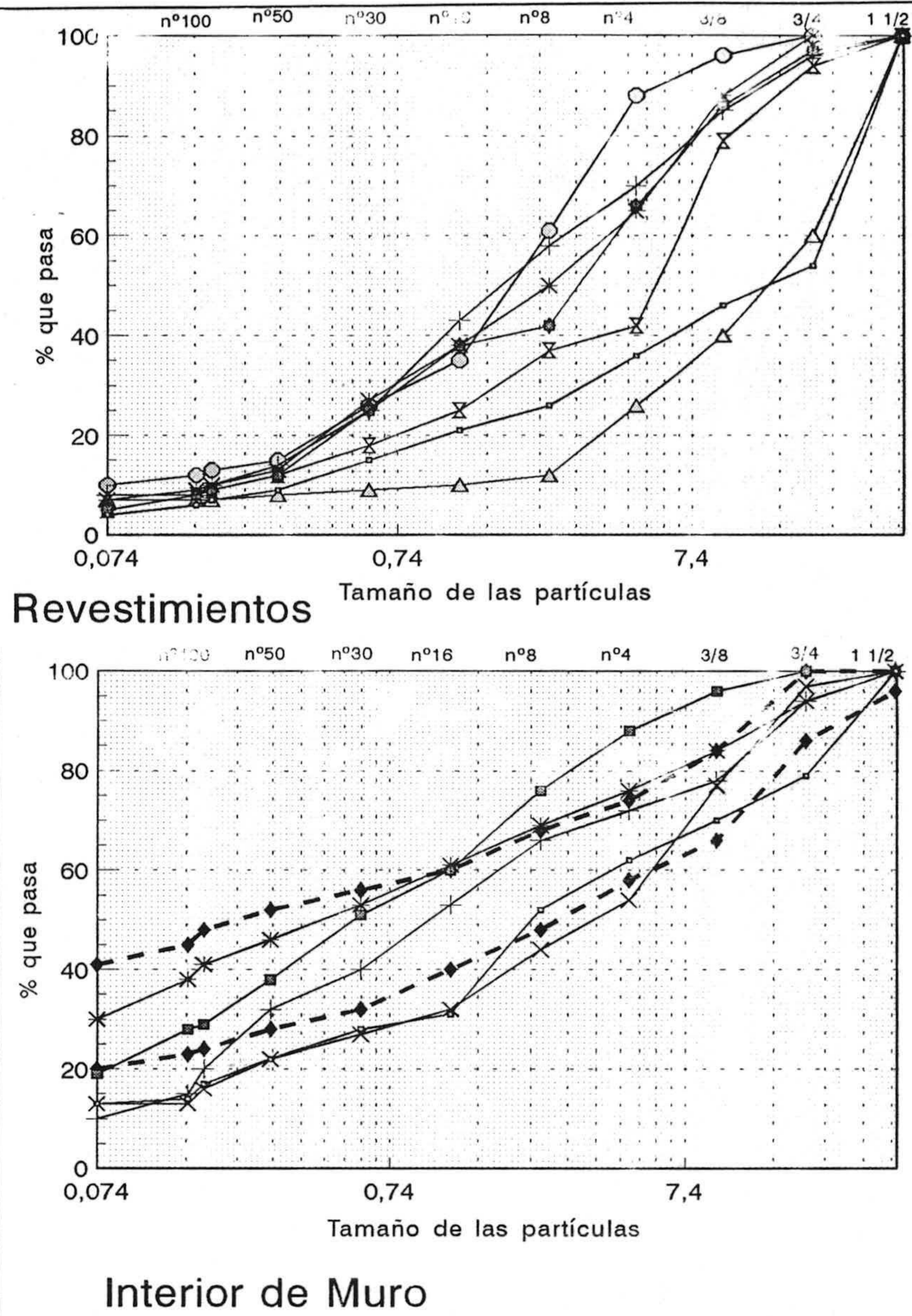


Fig. 9.17. Granulometrías obtenidas en la Muralla San Miguel.

Conclusiones

Como en el caso anterior, puede observarse claras diferencias entre las granulometrías de interior de muro y de revestimientos, sobre todo en lo que respecta a la fracción fina.

El huso que definen las granulometrías de revestimientos, presenta una clara inflexión y fuerte pendiente por encima del tamiz n° 4. Existen algunas excepciones para

las granulometrías realizadas en torreones, donde las curvas parecen presentar un tamaño de grano mayor.

En la muestras de interior de muro se aprecia una granulometría más extendida con un contenido importante en finos. Dadas sus características este material podría asociarse, como en el caso anterior, al nivel 2 de cantera.

En este sentido podemos afirmar que las curvas de las muestras de interior de muro presentan las mismas características que las de la Cerca D. Gonzalo, al igual que la de los revestimientos, lo que nos está indicando, de igual manera que en el caso anterior, cierta selección del material empleado en esta construcción.

En la tabla IX-36 vienen indicados los módulos granulométricos obtenidos para las distintas muestras ensayadas tanto para interior de muro como para revestimientos.

Tabla IX-36 Módulos granulométricos (San Miguel).

Muestras	Módulo Granulométrico
MSM-12.IM	4.4
MSM-1.IM	3.4
MSM-19.IM	2.7
MSM-7.IM	2.6
MSM-5.IM	4.3
MSM-2.C	5.8
MSM-8.C	4.0
MSM-13.C	4.0
MSM-10.C	4.2
MSM-14.C	6.2
MSM-4.C	4.5
MSM-3.C	3.6

Como puede observarse los valores de los módulos granulométricos son semejantes, con un ligero incremento para el caso de los revestimientos. Esto indica como en el caso anterior, que se trata de un material de la misma granulometría con un contenido menor en finos en el caso de los revestimientos.

De la observación llevada a cabo sobre la figura 9.18 podemos deducir como el

valor de los módulos granulométricos, para las muestras de interior de muro, coincide con el nivel 2 de cantera.

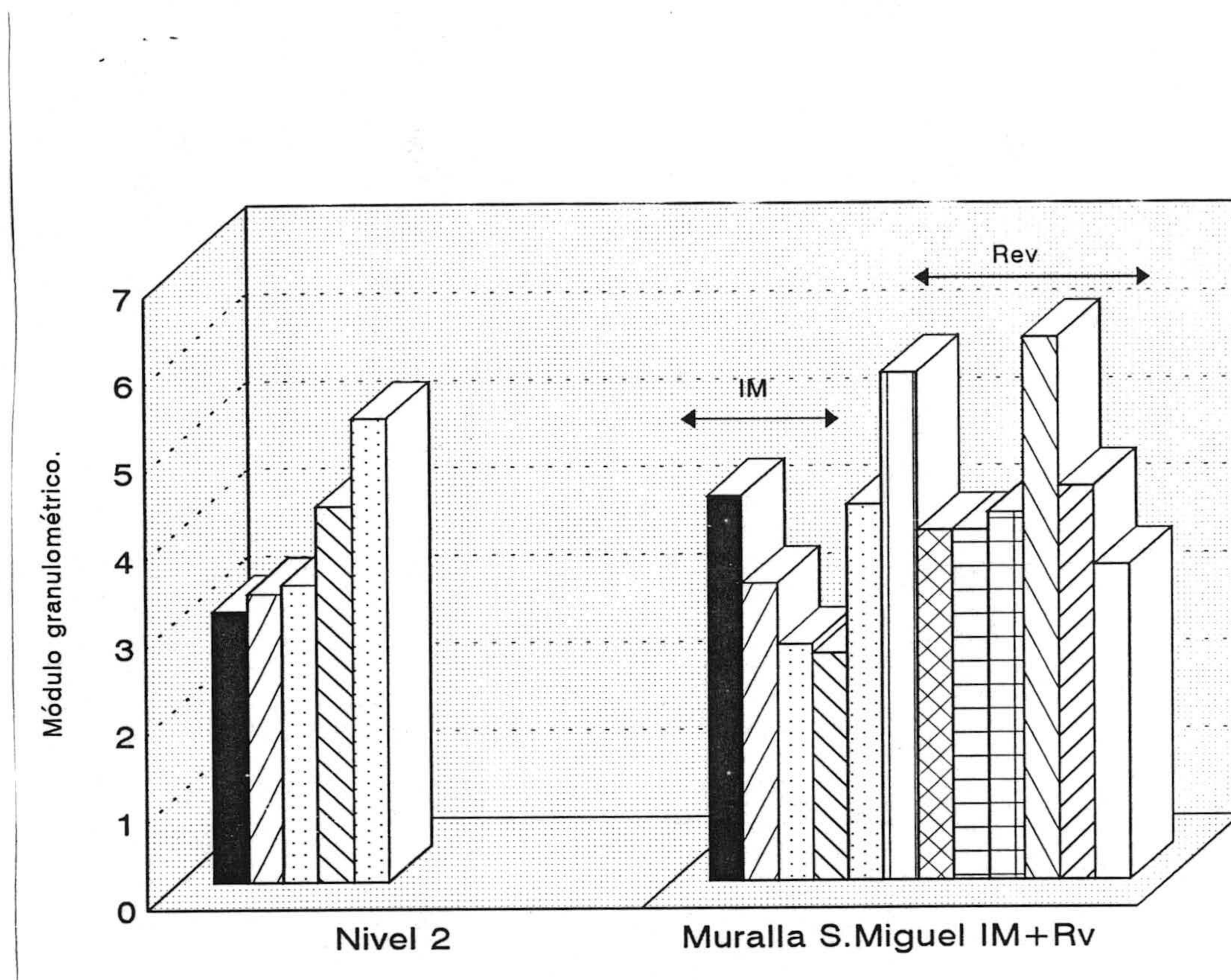
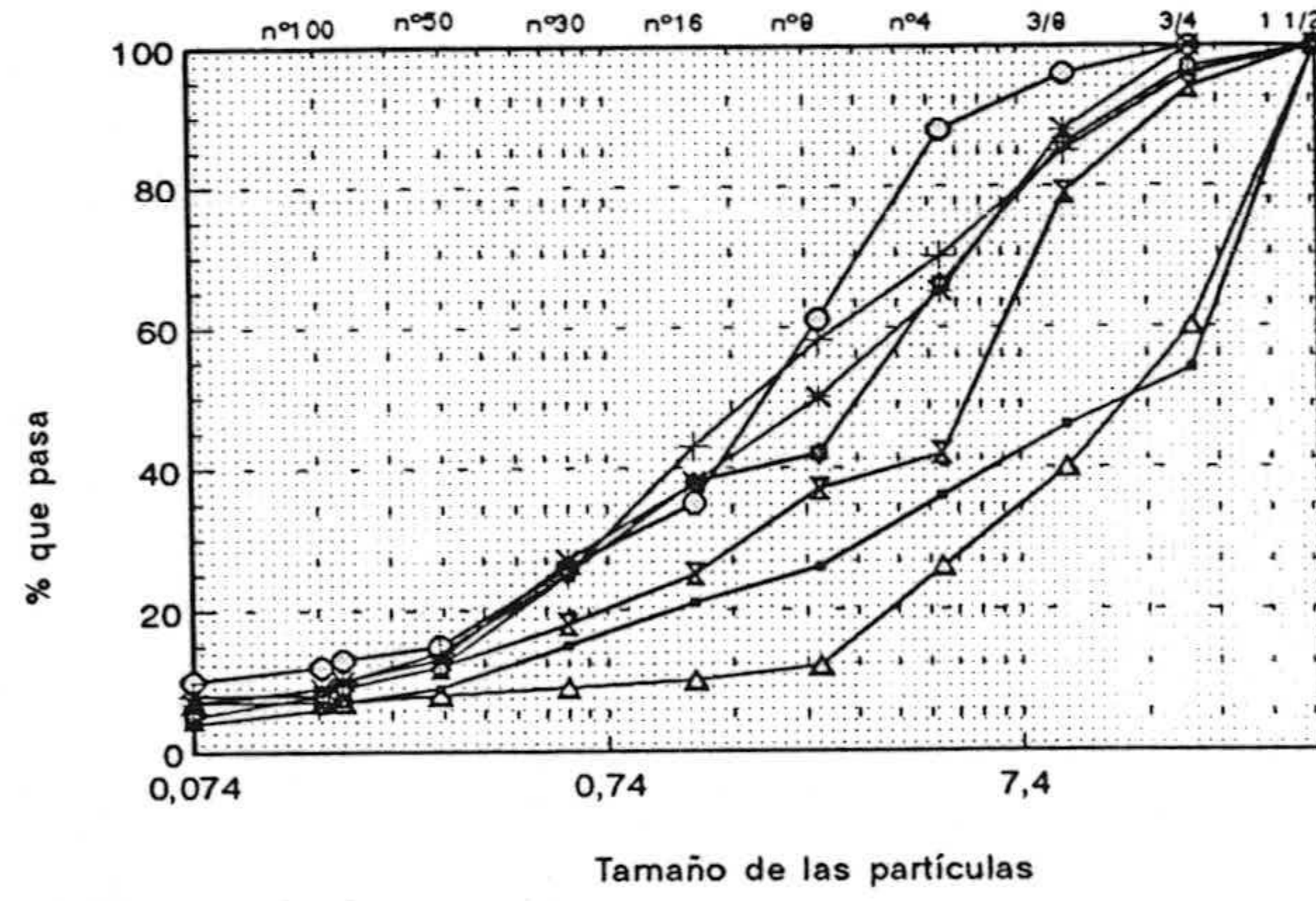


Fig. 9.18. Módulos granulométricos obtenidos en la muralla San Miguel con relación al nivel 2 de cantera.

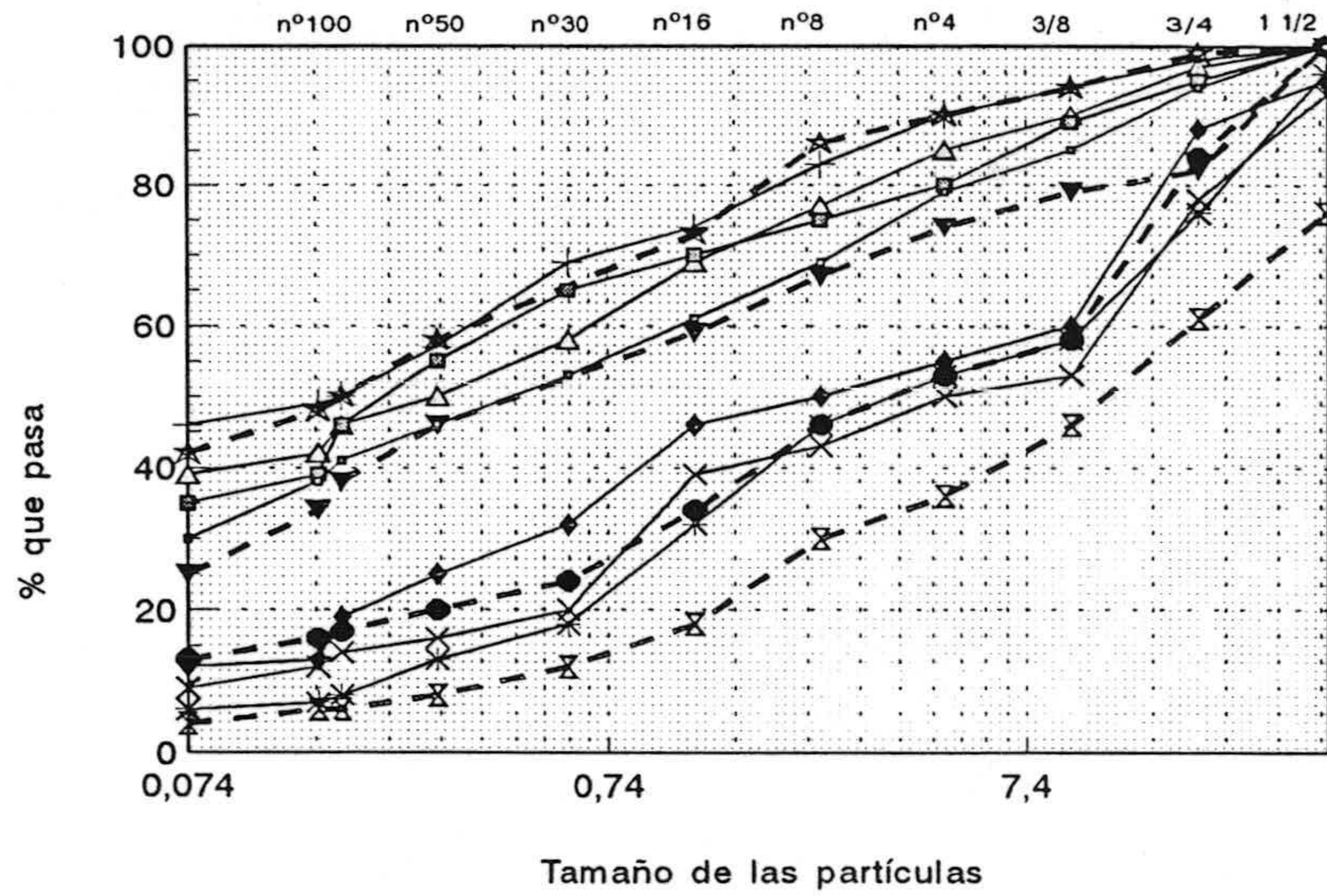
Tramo San Antonio.

En el tramo San Antonio hemos observado diferencias en el material empleado en su construcción; desplazandose desde San Miguel hacia Fajalauza se observa que la muralla toma un color más rojizo (Foto 38), asociado por su aspecto a la muestra 3B (suelo rojo), y el resto un tono más rosado (foto 39), con un contenido en finos menor.

Las distintas curvas granulométricas vienen reflejadas en el figura 9.19.



Revestimientos



Interior de Muro

Fig. 9.19. Granulometrías obtenidas en la muralla San Antonio.

Conclusiones.

Las curvas de interior de muro se agrupan en dos husos claramente diferentes, uno de ellos coinciden con el nivel 3 de cantera y el otro grupo de curvas coincide con el nivel 1 de granulometría más gruesa, hecho que ya se ponía de manifiesto con la simple observación visual. Por su parte el revestimiento presentan las mismas características que para los casos anteriores.

Los valores del módulo granulométrico vienen indicados en la tabla IX-37.

Tabla IX-37. Módulos granulométricos (muralla tramo San Antonio).

Muestras	Módulos granulométricos
MSA-5.IM	2.7
MSA-4.IM	1.8
MSA-2.IM	5.0
MSA-11.IM	5.0
MSA-13.IM	2.3
MSA-3.IM	3.1
MSA-8.C	4.1
MSA-10.C	5.4
MSA-9.C	2.8
MSA-7.C	3.8
MSA-1.C	4.1
MSA-14.C	3.9
MSA-6.C	3.4

De la observación de la figura 9.20 se deduce que estos coinciden con los del nivel 3 y 1 de cantera, para el tramo superior e inferior respectivamente.

Características de la fracción fina.

Existen claras diferencias en el contenido de esta fracción, para las muestras de revestimientos e interior de muro. Para el caso de los revestimientos el contenido en finos no supera el 10% (la mayoría están en el 5%), y esto se repite para la totalidad de los recintos amurallados.

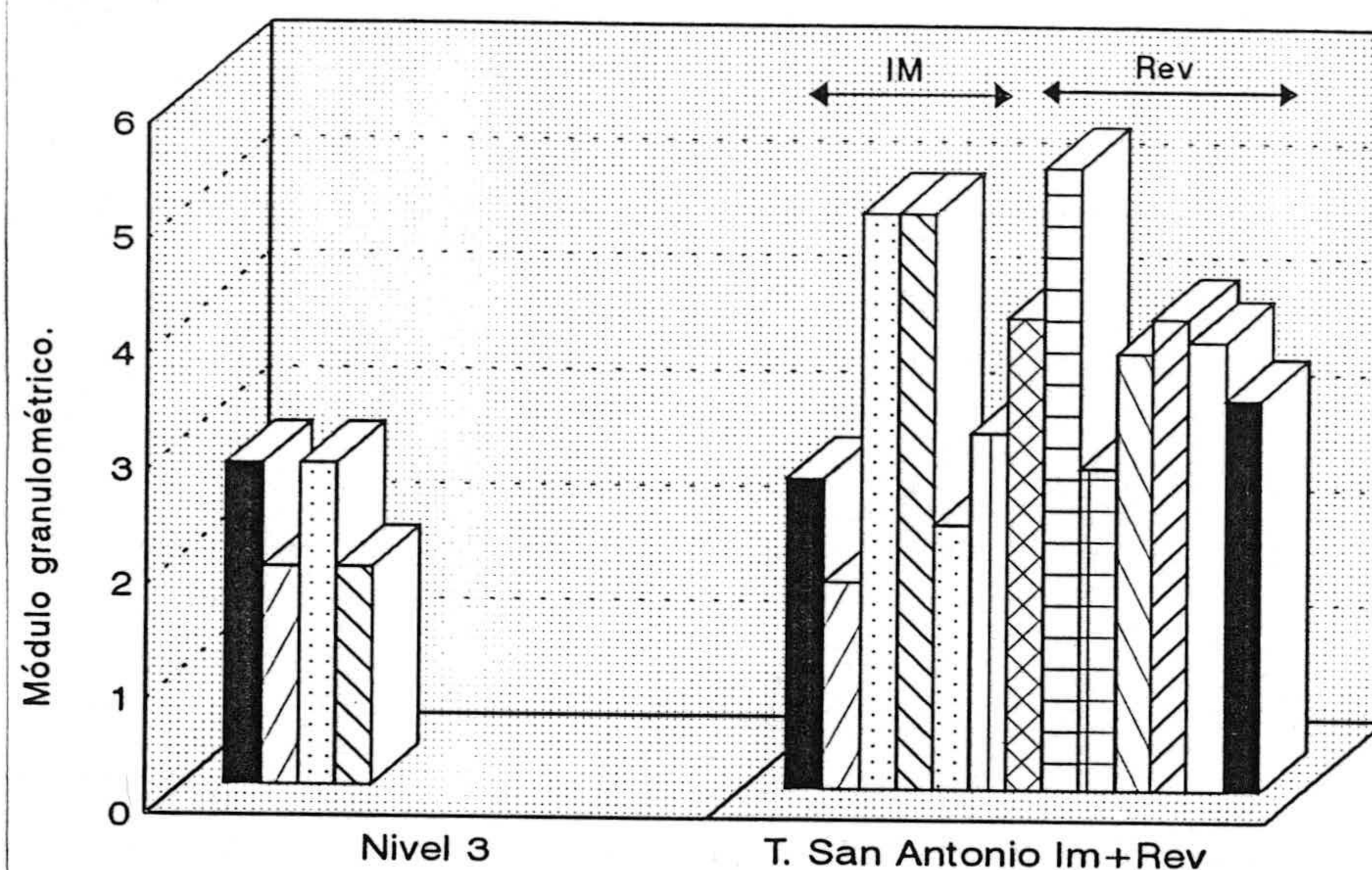


Fig. 9.20. Módulos granulométricos obtenidos en la muralla San Antonio en comparación con los obtenidos en el nivel 3 y 1 de cantera.

IX.2.2 PLASTICIDAD.

El cálculo de los límites de Atterberg, se ha realizado en las mismas condiciones que para las muestras de cantera. Se ha llevado a cabo sobre muestras de interior sin incluir dentro de estas las de hormigones de cal (muestras de la Alcazaba Cadima, muestras de la Alcazaba Gidida tratadas con cal y revestimientos).

El aspecto que presentan algunas muestras que ha sido ensayado para la obtención de la plasticidad, viene reflejado en las fotos (40, 41, y 42).

Murallas Ziries.

Alcazaba Gidida.

El estudio de plasticidad se ha llevado a cabo en muestras de interior de muro que no presentaran consistencia. Dada la forma constructiva de este recinto amurallado

extraer las cantidades necesarias para realizar el ensayo ha sido en la mayoría de los casos casi imposible, de ahí que se halla trabajado con tan pocas muestras. Los datos de plasticidad obtenidos vienen indicados en la tabla. IX-38.

A la hora de hacer la diferenciación previa entre material con y sin adición de cal, esta se ha establecido de acuerdo con su facilidad para extraerlo disgregado, dada la delgadez de estas capas.

Tabla.IX-38 Datos de Plasticidad (Alcazaba Gidida).

Muestras	Li	Lp	Ip	Clasificación
ALZG-4	28.7	16.7	12	CL
ALZG-6	23.5	17.2	6.3	ML
ALZG-7	24.3	18.9	5.4	ML
ALZG-5	-	-	-	ML
ALZG-8	24.3	18.5	5.8	CL-ML

Los resultados obtenidos nos indican que se trata en general de un material poco plástico y la naturaleza de la fracción < 0.42 mm es limosa fundamentalmente, salvo el material extraído del arco Elvira y el arco de las Pesas que son arcillas de baja plasticidad y limos arcillosos de baja plasticidad respectivamente.

Conclusiones.

De los resultados se deduce, que esta muralla está construida con un material más heterogéneo, las muestras pertenecientes al arco Elvira no se acopla a ningún nivel, porque es posible dada su situación, que se trate de material coluvial de la vega granadina. Para el resto se trata de material extraído en función de su situación topográfica, bien del nivel 1 o del nivel 2.

Arrabal del Albayzín.

Dadas las características constructivas de este recinto amurallado, el estudio de plasticidad se ha podido realizar en la totalidad de las muestras extraídas. Los datos por tramos vienen indicados a continuación.



Cerca Don Gonzalo.

Los datos obtenidos vienen indicados en la tabla IX-39.

Tabla. IX-39 Datos de Plasticidad (Cerca Don Gonzalo).

Muestras	Li	Lp	Ip	Clasificación
CDG-1	23.8	19.8	4.0	CL-ML
CDG-2	24.5	19.2	5.3	CL-ML
CDG-3	25.0	18.6	6.4	CL-ML

Como se deduce de los datos, en general se trata de suelos limoso arcillosos de baja plasticidad con un Ip entre 4 y 7.

Cerca San Miguel.

Los datos obtenidos vienen indicados en la tabla. IX-40. Como se deduce de los datos, los resultados coinciden con los del caso anterior.

Tabla IX-40. Datos de Plasticidad (Muralla San Miguel).

Muestras	Li	Lp	Ip	Clasificación
MSM-1	22.9	17.6	5.3	CL-ML
MSM-2	24.1	19.3	4.8	CL-ML
MSM-3	23.8	18.9	4.9	CL-ML
MSM-5	24.6	18.6	6	CL-ML
MSM-6	22.8	16.5	6.3	CL-ML
MSM-7	21.9	15.6	6.3	CL-ML
MSM-14	-	-	-	CL

Cerca San Antonio.

Los datos obtenidos vienen indicados en la tabla. X-41.

Tabla IX-41. Datos de Plasticidad (tramo San Antonio).

Muestras	Li	Lp	Ip	Clasificación
MSA-4	-	-	-	ML
MSA-5	-	-	-	ML
MSA-11	-	-	-	ML

Conclusiones

De los datos obtenidos se deduce que el tramo San Miguel y la cerca Don Gonzalo, presentan las mismas características de plasticidad, coincidiendo a su vez con el nivel 2 de cantera. El tramo San Antonio presenta una plasticidad claramente diferente. Aunque los resultados de plasticidad sean semejantes a lo largo de todo el tramo, basándonos en los parámetros anteriormente estudiados podemos afirmar que el tramo superior, dado su textura (granulometría) y color, coincide con el suelo rojo (3B Nivel 3) y el tramo inferior con el nivel 1 de cantera.

IX.2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Murallas Ziries.

Alcazaba Cadima.

Los datos obtenidos vienen indicados en la tabla. IX-42. Estos suelos se clasifican como gravas pobremente gradadas.

Tabla IX-42. Clasificación de suelos(Alcazaba Cadima) interior de muro.

Muestras	Pas.nº200	Ret.nº4	CC	CU	Clasificación
ALZ-C1	2	55	<1	>4	GP
ALZ-C2	10	70	>>3	>4	GP
ALZ-C3	17	61	>3	>4	GP
ALC-C4	9	55	2.6	>4	GW
ALZ-C5	11	62	>3	>4	GP
ALZ-C6	2	65	<1	>4	GP

Conclusiones.

De los datos obtenidos se deduce:

Los materiales de la Alcazaba Cadima se clasifican como GP, gravas poco gradadas, lo que nos confirma que este recinto ha sido construido con material del nivel 1, con variaciones debidas; por una parte, a una manipulación previa del material, antes de su puesta en obra, y por otra, las modificaciones que se hallan producido durante la separación previa de este material para su análisis. Este hecho inevitable si partimos de que este material ha sido tratado previamente con cal, antes de introducirlo en el encofrado.

Alcazaba Gidida.

Muestras sin cal.

En la tabla. IX-43 vienen indicados los resultados obtenidos.

Tabla. IX-43 Clasificación de suelos (Alcazaba Gidida) interior de muro sin cal.

Muestras	Pas.nº200	Ret.nº4	CU	CC	Clasificación
ALZ-G4	34	37	-	-	GC
ALZ-G6	16	61	2.5	>4	GCL-ML
ALZ-7	9	55	2.2	>4	GCL-ML
ALZ-G8	4	31	<1	>6	SP

Muestras con cal.

Los datos obtenidos vienen indicados en la tabla. IX-44.

Tabla IX-44 Clasificación de suelos (Alcazaba Gidida) revestimientos e interior de muro con cal.

Muestras	Pas. n°200	Ret.n°4	CU	CC	Clasificación
ALZ-G1	2	48	1.5	>6	SW (con grava)
ALZ-G2	2	59	1.5	>4	GW
ALZ-G3	7	40	1.6	>4	SPM (con grava)
ALZ-G5	6	47	>1	>4	GPM (con arena)
ALZ-G9R	4	6	2.4	>6	SW
ALZ-G10	4	31	<1	>6	SP
ALZ-G11R	4	6	2.5	>6	SW

Conclusiones.

Los resultados obtenidos para muestras de interior de muro, vienen a confirmar lo anteriormente indicado en apartados anteriores. Este recinto está construido con material perteneciente al nivel 1 y 2 de cantera, a excepción del Arco Elvira.

En los revestimientos y muestras tratadas con cal, se observa una mayor heterogeneidad, pero están constituidas con el mismo material tras una previa selección, de ahí que la mayoría sean predominantemente arena.

Arrabal del Albayzín.

Los datos obtenidos vienen indicados a continuación.

Cerca Don Gonzalo.

Tabla IX-45. Clasificación de suelos (Cerca Don Gonzalo) interior de muro.

Muestras	Pas.n°200	Ret. n°4	CU	CC	Clasificación
CDG-1	17	36	-	-	SCL-ML
CDG-2	24	40	-	-	GCL-ML
CDG-3	11	34	-	-	SCL-ML

Tabla IX-46. Clasificación de suelos (Cerca Don Gonzalo) calicastrado.

Muestras	Pas. nº200	Ret.nº4	CU	CC	Clasificación
CDG-4	11	58	6.2	>4	GP-M
CDG-5	4	34	1.4	>4	SW
CDG-6	3	22	13	>6	SP

San Miguel.

Tabla IX-47 Clasificación de suelos (Muralla San Miguel) interior de muro.

Muestras	Pas. nº200	Ret.nº4	CC	CU	Clasificación
MSM-12	13	38	-	-	SCL-ML
MSM-1	10	28	-	-	SCL-ML
MSM-19	30	31	-	-	SCL-ML
MSM-7	19	12	-	-	SCL-ML
MSM-5	13	40	-	-	SCL-ML

Tabla IX-48. Clasificación de suelos(muralla San Miguel) calicastrados.

Muestras	Pas.nº200	Ret. nº4	CU	CC	Clasificación
MSM-2	40	64	>4	>3	GP
MSM-8	8	30	>6	<1	SPM
MSM-13	7	35	>6	<1	SPM
MSM-10	5	34	>6	<1	SPM
MSM-14	7	74	>4	<1	GPM
MSM-4	5	58	>4	>3	GPM
MSM-3	10	12	>6	2.2	SWM

San Antonio.

Tabla. IX-48. Clasificación de suelos (Tramo San Antonio) interior de muro.

Muestras	Pas. n°200	Ret. n°4	CU	CC	Clasificación
MSA-5	30	21	-	-	SM
MSA-4	46	10	-	-	SM
MSA-11	9	50	-	-	GM
MSA-13	39	15	-	-	SM
MSA-3	35	20	-	-	SM

Tabla. IX-49 Clasificación de suelos (Tramo San Antonio) calicestrado.

Muestras	Pas. n° 200	Ret. n°4	CU	CC	Clasificación
MSA-8	10	26	>3	>6	SP-M
MSA-10	5	60	2.57	>4	GW
MSA-9	4	8	1.3	>6	SW
MSA-7	4	26	<1	>6	SP
MSA-1	10	26	>3	>6	SP-M
MSA-6	7	20	<1	>6	SP
MSA-14	2	26	2.64	>6	SW
MSA-2	6	47	<1	>6	SW

Conclusiones.

De los resultados finales obtenidos se denota que la cerca Don Gonzalo y San Miguel han sido construidas con un material semejante, que por sus características coincide con el nivel 2 de cantera. Sin embargo en la construcción del tramo San Antonio se observan variaciones según los sectores diferenciados, en el tramo superior se ha empleado un material rojizo perteneciente al nivel 3 y el tramo superior con el nivel 1 de cantera.

En los muestras de revestimientos se observa una mayor heterogeneidad, pero la mayoría se clasifican como arenas.

IX.2.4. DENSIDAD.

Los valores de densidad se han obtenido por dos procedimientos, por medio de Trolex directamente en campo, y por pesada hidrostática en laboratorio.

Con el Trolex se han obtenido densidades de interior de muro o/y densidades medias entre interior de muro y revestimiento, valores que vienen indicados en la tabla IX-50.

La toma de datos se ha realizado sobre puntos de la murallas que cumplieran las condiciones que requería el aparato, de ahí, que se haya podido trabajar sobre muy pocos puntos. Como puede deducirse de los datos, la densidades están próximas al valor 2, los valores más bajos corresponden a las muestras MSA-a y MSA-b, tomados en dos puntos de material de interior de muro, en la muralla San Antonio.

Cuando la profundidades de la toma de datos se realiza a una profundidad por encima 5 cm, las densidades están próximas a 2, cuando las tomas son más superficiales están en torno al 1.7 g/cm³

Tabla IX-50. Valores de densidad y humedad obtenidos en Murallas mediante el Trolex.

Muestras.	%Humedad.	Densidad.(g/cm ³ .)
MSA-a	7.9	1.7
MSA-b	4.0	1.7
MSA-c	7.0	1.9
MSM-a	5.4	1.9
MSM-b	6.1	1.9
CDG	6.9	1.9
ALG-a	4.5	1.95
ALCG-b	5.3	1.98
ALZC-a	6.3	1.9

El cálculo de la densidad por medio de la pesada hidrostática se ha realizado sobre muestras estabilizadas con cal, con material de revestimiento fundamentalmente. Este procedimiento nos ha permitido conocer la porosidad efectiva de estos materiales que viene indicadas en apartados posteriores. Los valores medios obtenidos se muestran en

la tabla IX-51.

Tabla IX-51 Densidad media de los revestimientos.

Muestras	Densidad (g/cm ³)
ALZ-C	1.97
ALZ-G	1.62
MSA	1.39
MSM	1.45
CDG	1.6

Conclusiones

Durante la fabricación de estos muros el material ha sufrido un proceso de densificación artificial, con unos valores de densidad próximos a 2 g/cm³. Estos valores son superiores en restos de la alcazaba Cadima y Gidida (construidas mayoritariamente con material del nivel 1), el resto presenta valores sensiblemente inferiores.

Como puede observarse de los datos, las densidades en el interior (obtenidas con el trolex) son sensiblemente superiores a la de los revestimientos (Balanza hidrostática), hecho que parece lógico teniendo en cuenta las características del revestimiento constituido por un material más selectivo y por tanto menos gradado. Cabe destacar el dato obtenido para el caso de la alcazaba Cadima cuyo valor está próximo a 2g/cm³, aunque es lógico teniendo en cuenta que esta muralla presenta las mismas características en el interior como en el exterior y constituido por un material más gradado como hemos observados en su granulometría.

En general podemos decir que la compactación obtenida en estos muros están por debajo de las densidades proctor obtenidas en el laboratorio y que además los materiales tratados con cal presentan densidades menores.

IX.2.5 ANÁLISIS MINERALÓGICO.

Resultados obtenidos por Difracción de Rayos X.

El análisis mineralógico, se ha llevado a cabo sobre muestras de interior de muro y revestimientos. Los resultados obtenidos vienen indicados en las tablas IX-52 y IX-53.

Tabla IX-52. Datos mineralógicos para interior de muro.

Muestras Int. Muro.	Mineralogía		
	Q+Fed.	Cc+D	Filosilcatos
ALZ-C	26	40+34	<5
ALZ-G	29	30+29	13
CDG	19	30+40	8
MSM	22	30+39	8
MSA	25	30+40	>5

Tabla IX-53. Datos mineralógicos para revestimientos.

Muestras Revestimientos.	Mineralogía		
	Q+Fed.	Cc+D	Filosilcatos
ALZ-G	24	31+45	0
CDG	45	35+10	10
MSM	25	43+31	<5
MSA	25	31+38	5

Conclusiones.

Estos materiales están compuestos básicamente de material carbonatado (calcita+dolomita) en cantidades que superan ampliamente el 50%. Le siguen en abundancia el cuarzo, con un 25% aproximadamente y por último y los filosilcatos como componentes minoritarios.

En la figura 9.21 se han representado estos valores. A partir de ellos podemos deducir que la composición mineralógica del material empleado en estos recintos amurallados no presenta grandes diferencias, mostrando aparentemente las mismas

características composicionales, tanto para el material empleado en los revestimientos como el que forma parte del interior de muro, excepto en el contenido en filosilicatos, que para las muestras de revestimientos son ligeramente menores. Cabe destacar pequeñas cantidades de feldespatos.

Si comparamos cada material de murallas con los niveles de cantera asociados según los parámetros anteriormente indicados, en muestras de interior de muro podemos indicar, que en la alcazaba Cadima, asociada al nivel 1 presenta un incremento de carbonato cálcico (en su composición global) que va del 24 al 30% en murallas. En la cerca Don Gonzalo y San Miguel no se aprecia un incremento, o en el mejor de los casos no se puede cuantificar dada la heterogeneidad del material. Sin embargo en el tramo San Antonio si se observa un cierto incremento respecto al material de cantera.

Para el caso de los revestimientos, la comparación de los resultados globales obtenidos llevada a cabo sobre partículas comprendidas entre 6.35 y 0.074 mm de cantera, nos indican también cierto incremento de carbonato cálcico en murallas, respecto a cantera.

Lo mismo que para el caso de las muestras de cantera, se llevó a cabo un análisis mineralógico por fracciones, para intentar de alguna manera, correlacionar los distintos datos obtenidos en ambos casos, y poder caracterizar mejor la composición de los materiales empleados en estas construcciones.

1) Interior de Muro.

Murallas Ziries.

Alcazaba Cadima.

La composición mineralógica por fracciones para las distintas muestras estudiadas viene indicada en las tablas IX- 54, IX-55 y IX-56; los datos sólo están referidos a interior de muro.

Tabla IX-54. Composición mineralógica (Fracción > 6.35 mm).

Muestras Inter. Muro	Mineralogía($\phi > 6.35$ mm.)			
	Q	Cc	DI	Filo.
ALZC-1(20%)*	29	29	40	<5
ALZC-2(40%)	30	25	43	<5
ALZC-3(18%)	33	27	35	<5

Tabla IX-55. Composición mineralógica (partículas comprendidas entre 6.35-0.074 mm).

Muestras Inter. Muro	Mineralogía(ϕ 6.36-0.074 mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil
ALZC-1(78%)*	25	48	27	<5
ALZC-2(50%)	19	33	47	<5
ALZC-3(65%)	21	30	45	<5

Tabla IX-56. Composición mineralógica (Fracción <0.074 mm).

Muestras Inter. Muro	Mineralogía($\phi < 0.074$ mm)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil/Yeso.
ALZC-1(2%)*	25	60	14	<5
ALZC-2(10%)*	19	54	29	<5
ALZC-3(17%)*	14	23	23	<5

* Tanto por ciento respecto a la muestra total al que viene referido esta composición mineralógica.

Alcazaba Gidida.

En las tablas IX-57, IX-58 y IX-59 se indica de igual manera los resultados obtenidos para las muestras extraídas de la Alcazaba Gidida; en este caso los datos están referidos a muestras de interior de muro con y sin cal y muestras de revestimientos.

Tablas IX-57. Composición mineralógica (Fracción > 6.35 mm).

Muestras Inter. Muro y Revestimientos	Mineralogía($\phi > 6.36$ mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil.
ALZG4(sin cal)(10%)*	35	45	20	<5
ALZG-6(sin cal)(27%)	20	35	47	<5
ALZG-5(sin cal)(20%)	25	30	33	<5
ALZG-10(con cal)(6%)	30	35	31	<5
ALZ-1(con cal)(0%)	28	40	29	<5
ALZ-2(con cal)(0%)	19	33	45	<5

Tabla IX-58. Composición mineralógica (partículas comprendidas entre 6.35-0.074 mm).

Muestras Inter. Muro	Mineralogía($\phi > 6.36-0.074$ mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil.
ALZG-4(sin cal)(56%)*	30	45	25	<5
ALZG-6(sin cal)(57%)	28	37	35	<5
ALZG-5(sin cal)(69%)	23	32	34	<5
ALZG-10(con cal)(98%)	30	29	35	<5
ALZ-1(con cal)(98%)	28	43	25	<5
ALZ-2(con cal)(69%)	23	30	45	<5

Tabla IX-59. Composición mineralógica (Fracción < 0.074 mm).

Muestras Inter. Muro	Mineralogía($\phi < 0.074$ mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil.
ALZG-4(sin cal)(34%)*	11	21	6	60
ALZG-6(sin cal)(16%)	20	35	47	10
ALZG-5(sin cal)(11%)	20	30	29	21
ALZG-10(con cal)(6%)	23	50	22	<5
ALZ-1(con cal)(2%)	20	54	20	<5
ALZ-2(con cal)(2%)	18	53	26	<5

* Tanto por ciento respecto de la muestra total al que va referida la composición mineralógica.

Arrabal del Albayzín.

Para el caso de la muralla que protegía el arrabal del Albayzín, en el estudio mineralógico se ha diferenciado claramente el interior de muro, donde el contenido en cal añadida es apenas perceptible a simple vista, aunque es de destacar la existencia de pequeños núcleos de cal en el seno de la pasta.

Cerca Don Gonzalo.

En las tablas IX-60, IX-61 y IX-62 nos muestra la composición mineralógica de las distintas muestras estudiadas por fracciones.

Tabla IX-60. Composición mineralógica (Fracción > 6.35 mm).

Muestras Inter. Muro	Mineralogía($\phi > 6.35$ mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil
CDG-1(10%)*	9	78	36	<5
CDG-2(12%)	19	43	36	<5
CDG-3(14%)	16	35	47	<5

Tabla. IX-61. Composición mineralógica (partículas comprendidas entre 6.35-0.074 mm).

Muestras Inter. Muro	Mineralogía(ϕ 6.36-0.074 mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil
CDG-1(73)*	34	40	19	7
CDG-2(64%)	24	37	30	9
CDG-3(75%)	35	38	17	12

Tabla IX-62. Composición mineralógica (Fracción < 0.074 mm).

Muestras Inter. Muro	Mineralogía($\phi < 0.074$ mm)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil.
CDG-1(17%)*	24	30	20	26
CDG-2(24%)	35	32	11	22
CDG-3(11%)	35	36	17	12

* Tanto por ciento respecto a la muestra total a la que va referida la composición mineralógica.

San Miguel.

En las tablas IX-63, IX-64 y IX-65 viene indicada la composición de las distintas muestras estudiadas en fracciones.

Tabla IX-63. Composición mineralógica (Fracción > 6.35 mm).

Muestras Inter. Muro	Mineralogía($\phi > 6.35$ mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil
MSM-1(5%)*	40	45	15	<5
MSM-5(2%)	14	10	76	<5
MSM-7(0%)	4	18	78	<5
MSM-12(10%)	16	80	18	<5

Tabla IX-64. Composición mineralógica (partículas comprendidas entre 6.35-0.074mm).

Muestras Inter. Muro	Mineralogía(ϕ 6.36-0.074 mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil
MSM-1(85%)*	30	35	5	30
MSM-5(85%)	26	47	31	<5
MSM-7(87%)	22	35	44	<5
MSM-12(77%)	26	39	35	<5

Tabla IX-65. Composición mineralógica (Fracción < 0.074 mm).

Muestras Inter. Muro	Mineralogía($\phi < 0.074$ mm)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil.
MSM-1(10%)*	23	31	6	43
MSM-5(13%)	17	49	5	28
MSM-7(19%)	19	46	6	35
MSM-12(13%)	15	45	10	30

* Tanto por ciento respecto a la muestra total a la que va referida la composición mineralógica.

San Antonio.

En la tablas IX-66, IX-67 y IX-68 viene indicada la composición mineralógica de las muestras de interior de muro extraídas en este tramo.

Tabla IX-66. Composición mineralógica (Fracción > 6.35 mm).

Muestras Inter. Muro	Mineralogía($\phi > 6.35$ mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil
MSA-4(4%)*	8	11	81	<5
MSA-5(5%)	5	17	79	<5
MSA-2(20%)	26	38	46	<5

Tabla IX-67 Composición mineralógica (partículas comprendidas entre 6.35-0.074mm).

Muestras Inter. Muro	Mineralogía(ϕ 6.36-0.074 mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil
MSA-4(50%)*	25	48	27	<5
MSA-5(65%)	19	33	47	<5
MSA-2(74%)	18	10	72	<5

Tabla IX-68. Composición mineralógica (Fracción < 0.074 mm).

Muestras Inter. Muro	Mineralogía($\phi < 0.074$ mm)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil.
MSA-4(46%)	20	37	20	24
MSA-5(30%)	20	28	12	40
MSA-2(6%)	24	36	24	12

* Tanto por ciento total respecto a la muestra total a la que va referida la composición mineralógica.

Discusión de los resultados.

Con la finalidad de comparar los datos obtenidos para las distintas murallas estudiadas, se ha representado la composición de las distintas fracciones en gráficos, correlacionando la mineralogía por fracciones.

En la figura 9.22 representa la composición mineralógica de la Fracción >6.35mm. De su observación se deduce que la composición de los cantos no varía cualitativamente, aunque se aprecian pequeñas variaciones cuantitativas, por otra parte lógicas dada la heterogeneidad intrínseca del material.

De la misma manera en la figura 9.23 se han representado la composición mineralógica de la fracción gruesa (cantos finos), donde se observa la misma tendencia que para la fracción anterior.

En la figura 9.24, donde vienen representadas la fracción fina, sin embargo se observan claras diferencias según los recintos diferenciados.

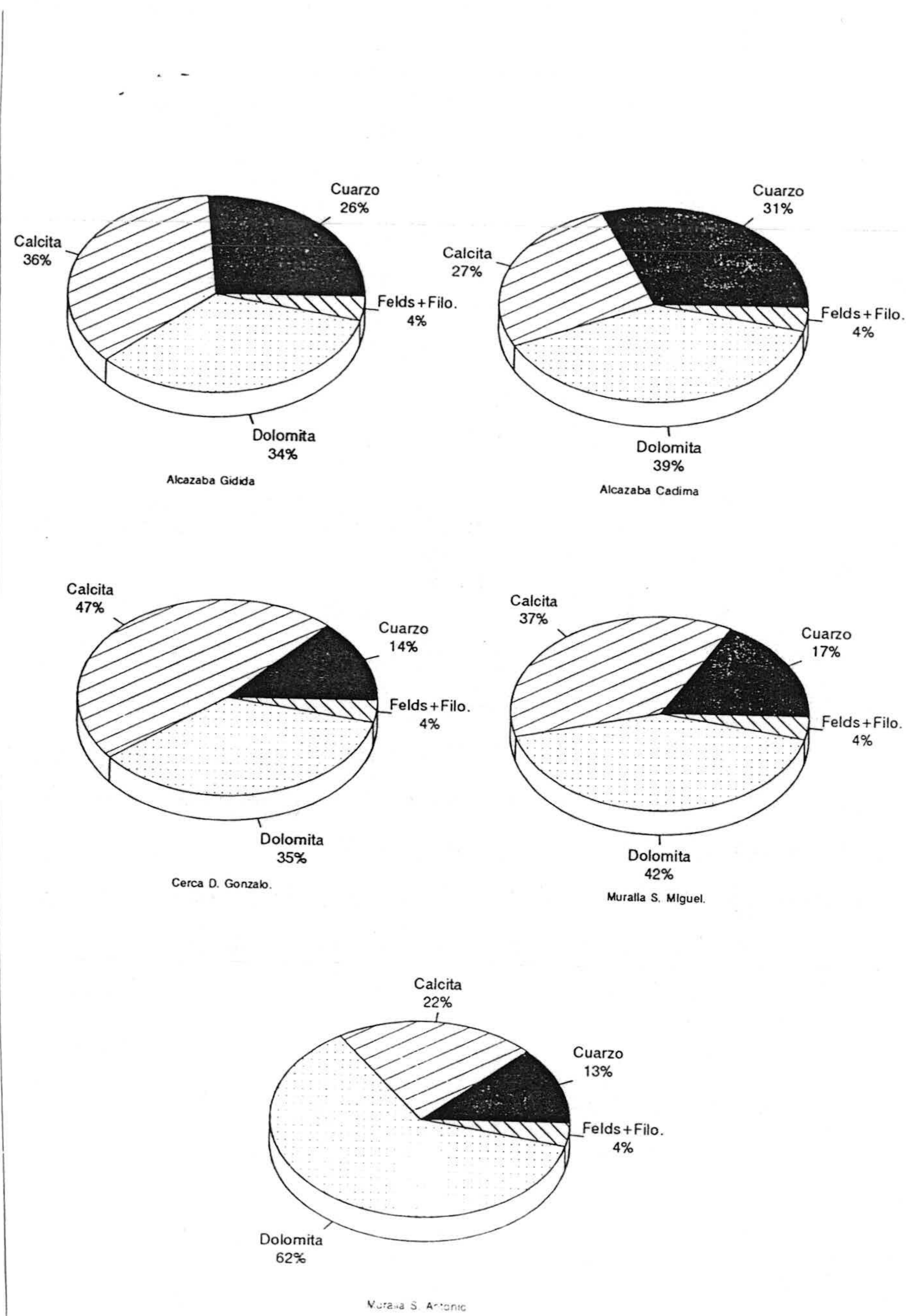


Fig. 9.22. Composición mineralógica de la fracción >6.35 mm.

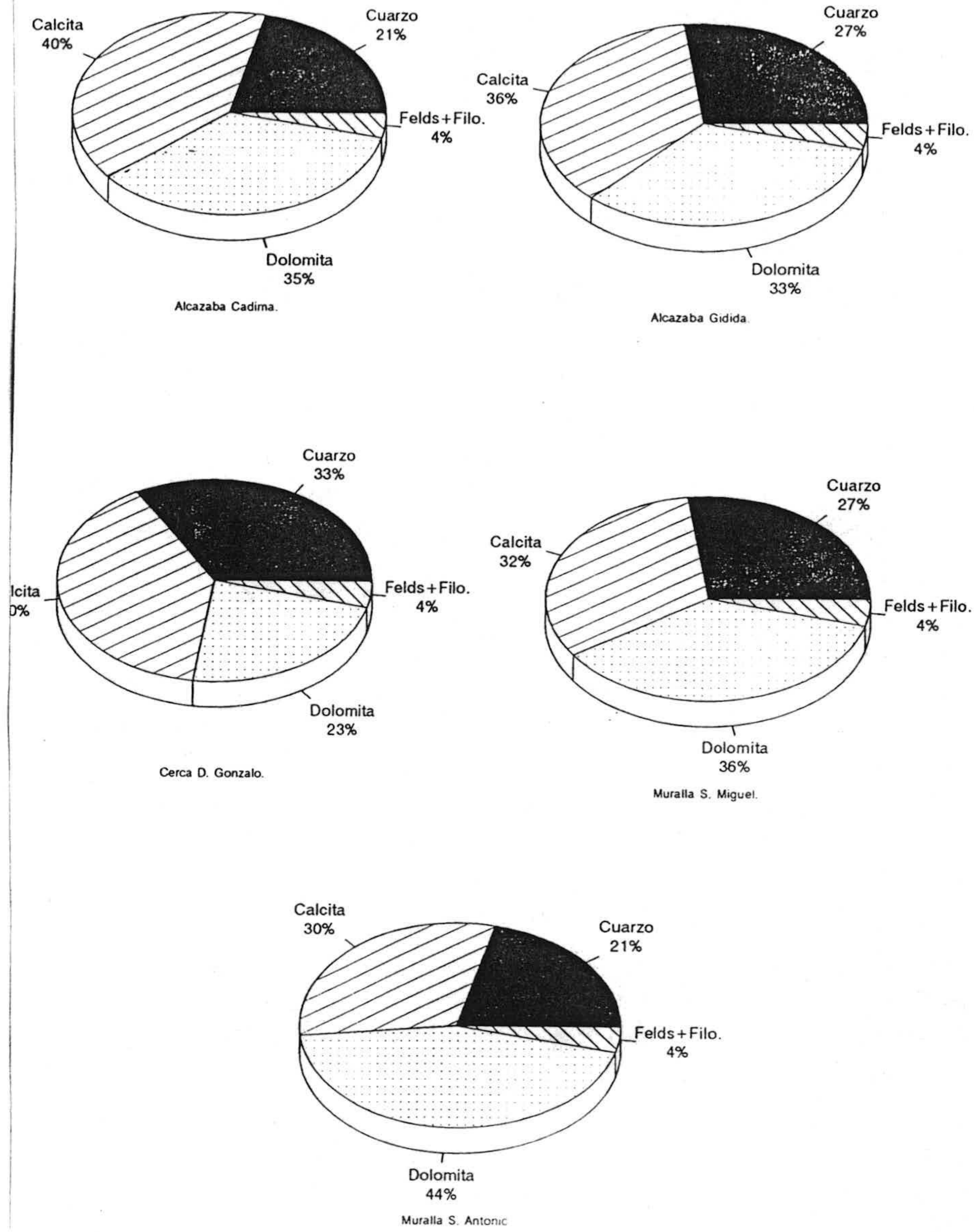


Fig.9.23.Composición mineralógica de las partículas comprendidas entre 6.35-0.074 mm.

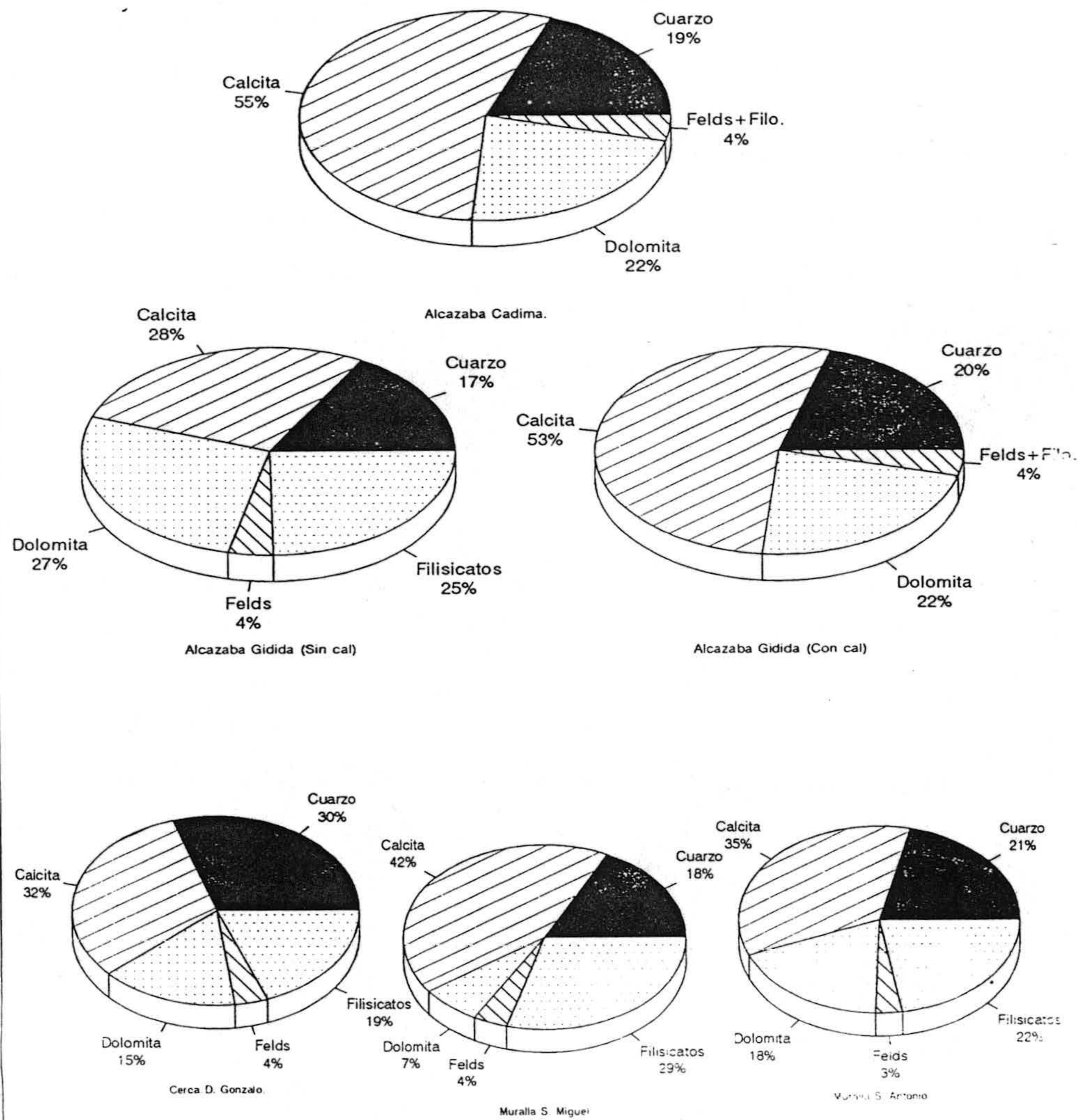


Fig. 9.24. Composición mineralógica de la fracción $<0.074\text{ mm}$.

Conclusiones.

Si comparamos estos datos con los de cantera, para la Fracción $>6.35\text{ mm}$ observamos (ver comparativamente figuras 9.8 y 9.22):

- Cierta incremento de carbonatos en muestras extraídas de la Alcazaba Cadima y Gidida respecto al nivel 1 de cantera, que es el que hemos supuesto como utilizado,

dadas sus características anteriores.

- Para el caso del arrabal del Albayzín, se observa un ligero incremento también respecto a cantera (nivel 2). El tramo San Antonio es el que tiene menor contenido y es lógico porque se ha asociado con el nivel de suelo rojo, que es el que tiene menor contenido en carbonatos.

Las partículas de tamaño comprendido entre 6.35-0.074 mm (ver comparativamente figuras 9.9 y 9.23) presentan más claramente el incremento en carbonatos, que es mucho mayor en construcciones del s. XI, llegando en algunos casos hasta un 30%. En las del s. XIV se observa que el incremento en cal es menor, siendo mayor en el tramos San Antonio (material más rico en finos) con respecto al resto. En el primer caso el aporte está aproximadamente en un 25% y en el resto entre un 5 y 10%.

Por último podemos concluir diciendo, para las:

Fracción > 6.35 mm. No se aprecian incrementos de calcita respecto a cantera, aunque si cierta variación lógica teniendo en cuenta la heterogeneidad del material.

Partículas comprendidas entre 6.35-0.074 mm. En esta fracción se observa un incremento importante de calcita respecto al material de cantera, lo que nos puede indicar cierto aporte de cal en forma de núcleos de este tamaño.

Fracción < 0.074 mm. Salvo en la Alcazaba Cadima y Gidida tratadas con cal, en el resto no se observa aportaciones importantes. El aporte en estas fabricas puede estar alrededor del 20% y entre el 15-20% (ver comparativamente figuras 9.10. y 9.24).

2) Revestimientos.

Murallas Ziries.

Alcazaba Gidida.

Los datos mineralógicos obtenidos para los revestimientos de la Alcazaba Gidida vienen indicados en las tablas IX-69, IX-70 y IX-71.

Tabla IX-69. Composición mineralógica (Fracción > 6.35 mm).

Muestras Revestimientos	Mineralogía($\phi > 6.35$ mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil
ALZG-3(7%)*	25	31	40	<5
ALZG-5(1%)	27	32	39	<5

Tabla. IX-70. Composición mineralógica (partículas comprendidas entre 6.35-0.074mm).

Muestras Revestimientos.	Mineralogía(ϕ 6.36-0.074 mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil
ALZG-3(86%)*	25	48	27	<5
ALZ-5(96%)	19	33	47	<5

Tabla. IX-71. Composición mineralógica (Fracción < 0.074 mm).

Muestras Revestimientos.	Mineralogía($\phi < 0.074$ mm)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil/Yes.
MSA-4(7%)*	27	56	17	<5
MSA-5(4%)	16	52	18	<5

* Tanto por ciento respecto a la muestra total a la que va referida la composición mineralógica.

Arrabal del Albayzín.

Cerca D. Gonzalo.

En las tablas IX-72, IX-73 y IX-74 vienen recogidos los datos mineralógicos obtenidos para las muestras extraídas de la Cerca D. Gonzalo.

Tabla IX-72 Composición mineralógica (Fracción > 6.35 mm).

Muestras Revestimientos	Mineralogía($\phi > 6.36$ mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil.
MDG-4(4%)*	90	5	5	<5
MDG-6(5%)	45	30	20	<5
MDG-5(5%)	30	40	25	<5

Tabla IX-73. Composición mineralógica (partículas comprendidas entre 6.35-0.074 mm).

Muestras Revestimientos	Mineralogía(ϕ 6.36-0.074 mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil.
MDG-4(84%)*	48	31	14	<5
MDG-6(94%)	45	30	25	<5
MDG-5(92%)	38	32	25	<5

Tabla IX-74. Composición mineralógica (Fracción < 0.074 mm).

Muestras Revestimientos.	Mineralogía($\phi < 0.074$ mm)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil/Yeso
MDG-4(11%)*	30	37	7	6
MDG-6(3%)	13	61	6	19
MDG-5(4%)	15	55	18	12

*Tanto por ciento respecto al volumen total de la muestra a la que va referida la composición mineralógica.

Tramo San Miguel.

En las tablas IX-75, IX-76 y XI-77 viene indicada la composición mineralógica, por fracciones de las muestras extraídas de este tramo.

Tabla IX-75 Composición mineralógica (partículas > 6.35 mm).

Muestras Revestimientos	Mineralogía($\phi > 6.36$ mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil.
MSM-13(1%)*	30	27	42	<5
MSM-2(9%)	17	61	10	12
MSM-4(0%)	18	29	53	<5
MSM-10(0%)	31	14	57	<5
MSM-3(0%)	31	56	15	<5
MSM-14(9%)	28	19	53	<5
MSM-8(0%)	13	32	55	<5

Tabla IX-76. Composición mineralógica (partículas comprendidas entre 6.35-0.074 mm).

Muestras Revestimientos	Mineralogía(ϕ 6.36-0.074 mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil.
MSM-13(93%)*	24	38	38	<5
MSM-2(87%)	22	41	35	<5
MSM-4(95%)	19	30	45	<5
MSM-10(95%)	30	15	57	<5
MSM-3(90%)	31	56	15	<5
MSM-14(84%)	31	20	53	<5
MSM-8(92%)	40	38	20	<5

Tabla IX-77. Composición mineralógica (Fracción < 0.074 mm).

Muestras Revestimientos	Mineralogía($\phi < 0.074$ mm)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil/Yeso
MSM-13(7%)*	16	47	7	31
MSM-2(4%)	12	61	10	12
MSM-4(5%)	10	68	22	<5
MSM-10(5%)	24	64	11	<5
MSM-3(10%)	18	71	10	<5
MSM-14(7%)	25	61	12	<5
MSM-8(8%)	15	75	6	<5

* Tanto por ciento respecto al volumen total al que va referida la composición mineralógica.

Tramo San Antonio.

En la tablas IX-78, IX-79 y IX-90 vienen indicadas la composición por fracciones de las distintas muestras analizadas.

Tabla IX-78. Composición mineralógica (Fracción > 6.35 mm).

Muestras Revestimientos.	Mineralogía($\phi > 6.36$ mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil.
MSA-9(1%)*	64	35	5	<5
MSA-1(1%)	11	11	81	<5
MSA-6(1%)	15	10	70	<5
MSA-7(1%)	21	35	38	<5
MSA-8(4%)	19	48	32	<5
MSA-14(2%)	29	65	7	<5
MSA-10(4%)	4	15	81	<5

Tabla IX-79. Composición mineralógica (partículas comprendidas entre 6.35-0.074 mm).

Muestras Revestimientos.	Mineralogía(ϕ 6.36-0.074 mm.)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil.
MSA-9(96%)*	60	24	14	<5
MMSA-1(90%)	48	48	27	<5
MSA-6(93%)	26	48	26	<5
MSA-7(96%)	25	36	35	<5
MSA-8(86%)	27	35	38	<5
MSA-14(98%)	39	34	12	<5
MSA-10(91%)	32	52	20	<5

Tabla IX-80. Composición mineralógica (Fracción <0.074 mm).

Muestras Revestimientos	Mineralogía($\phi < 0.074$ mm)			
	Q	Cc	DI	Fed/Fil/Yeso
MSA-9(4%)*	20	37	20	24
MSA-1(10%)	17	52	17	10
MSA-6(7%)	20	54	13	12
MSA-7(4%)	15	60	21	<5
MSA-8(10%)	8	87	5	<5
MSA-14(2%)	7	58	35	<5
MSA-10(5%)	16	80	6	<5

* Tanto por ciento de la muestra respecto al volumen total a la que va referida la composición mineralógica.

Discusión.

De la misma forma, que para las muestras de interior de muro, estos datos se han llevado a distintas gráficas (figuras 9. 25, 9. 26 y 9. 27 comparando los resultados de las distintas murallas estudiadas, por fracciones.

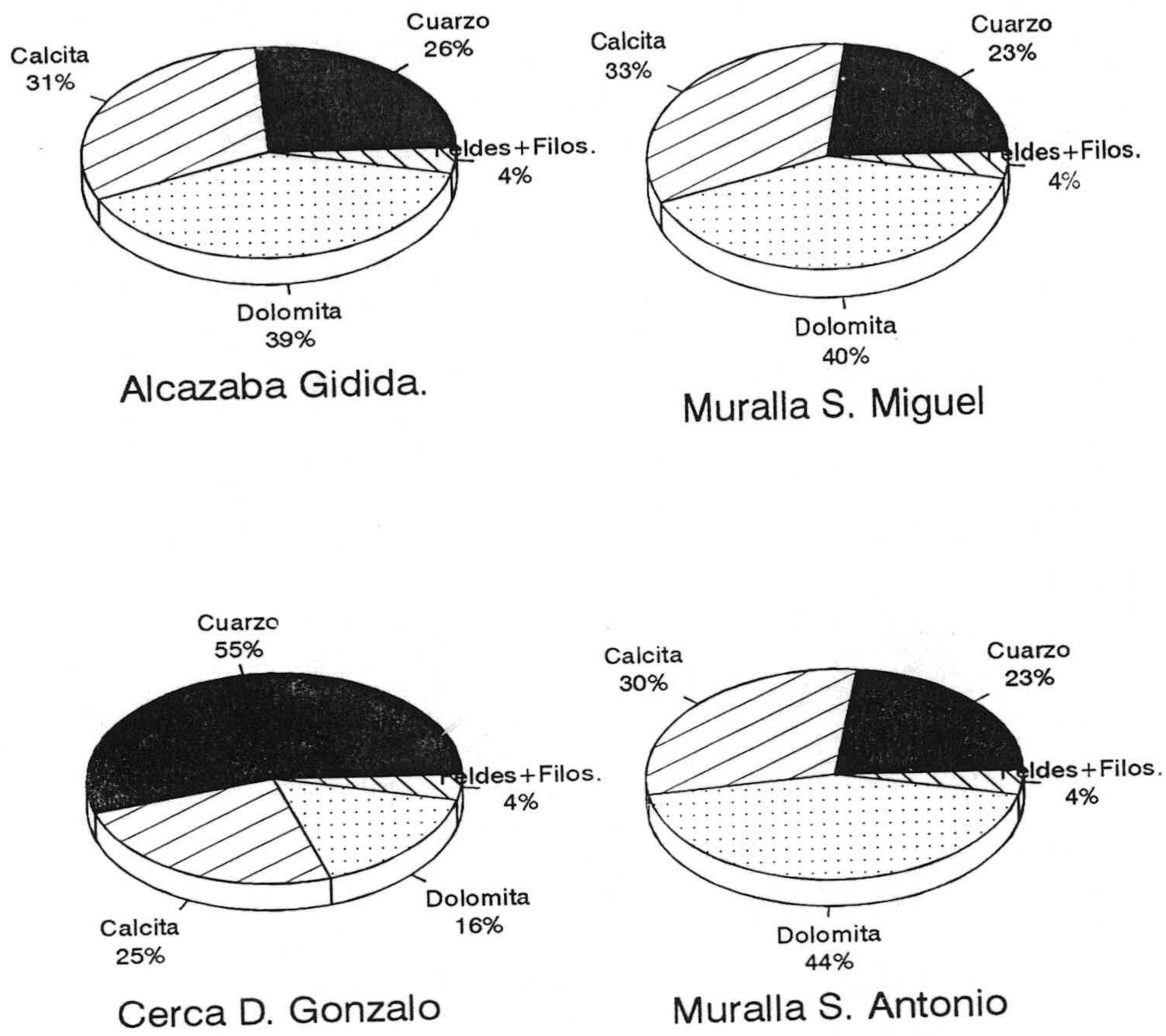


Fig. 9.25 Composición mineralógica de la Fracción >6.35 mm.

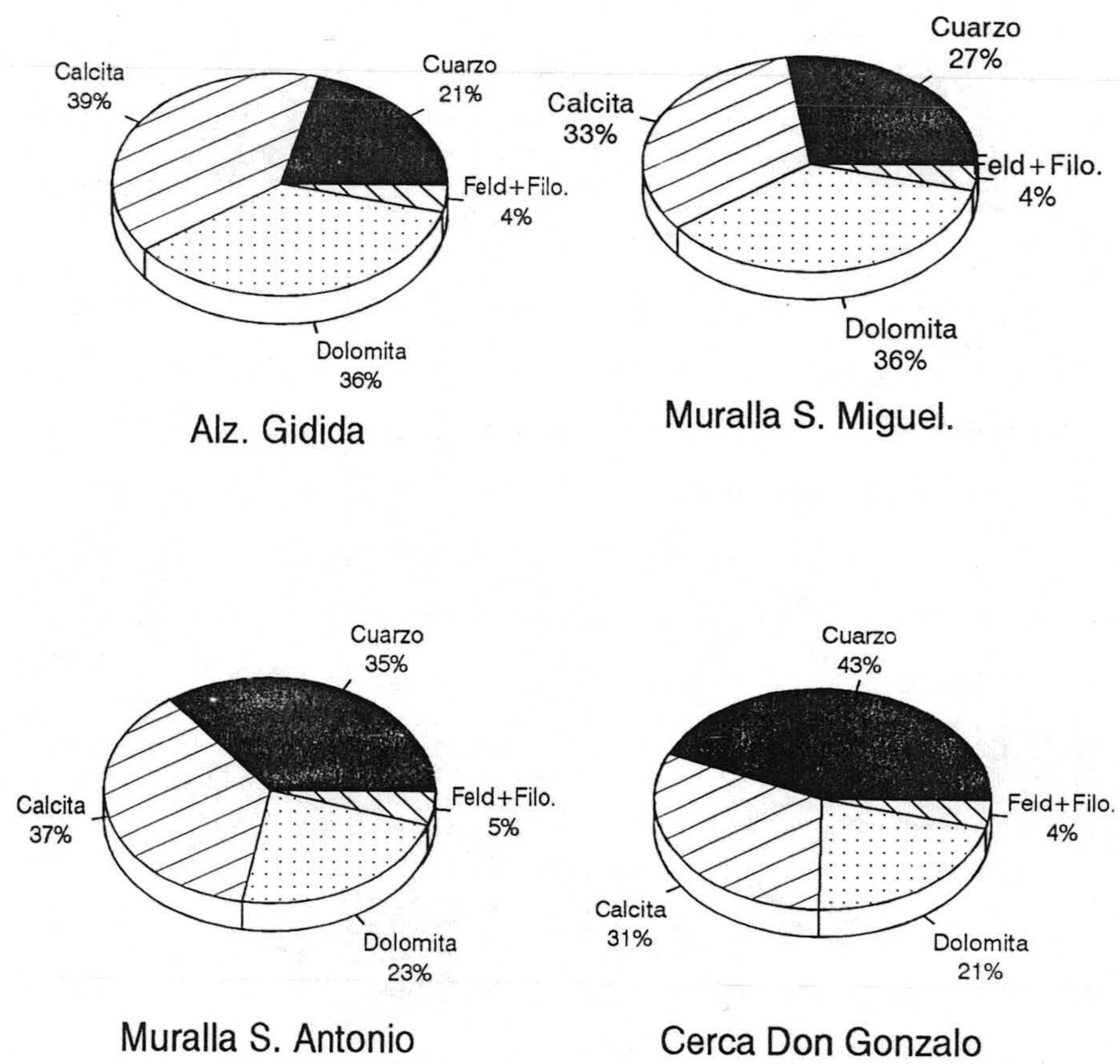


Fig. 9.26. Composición mineralógica de las partículas comprendidas entre 6.35-0.074 mm.

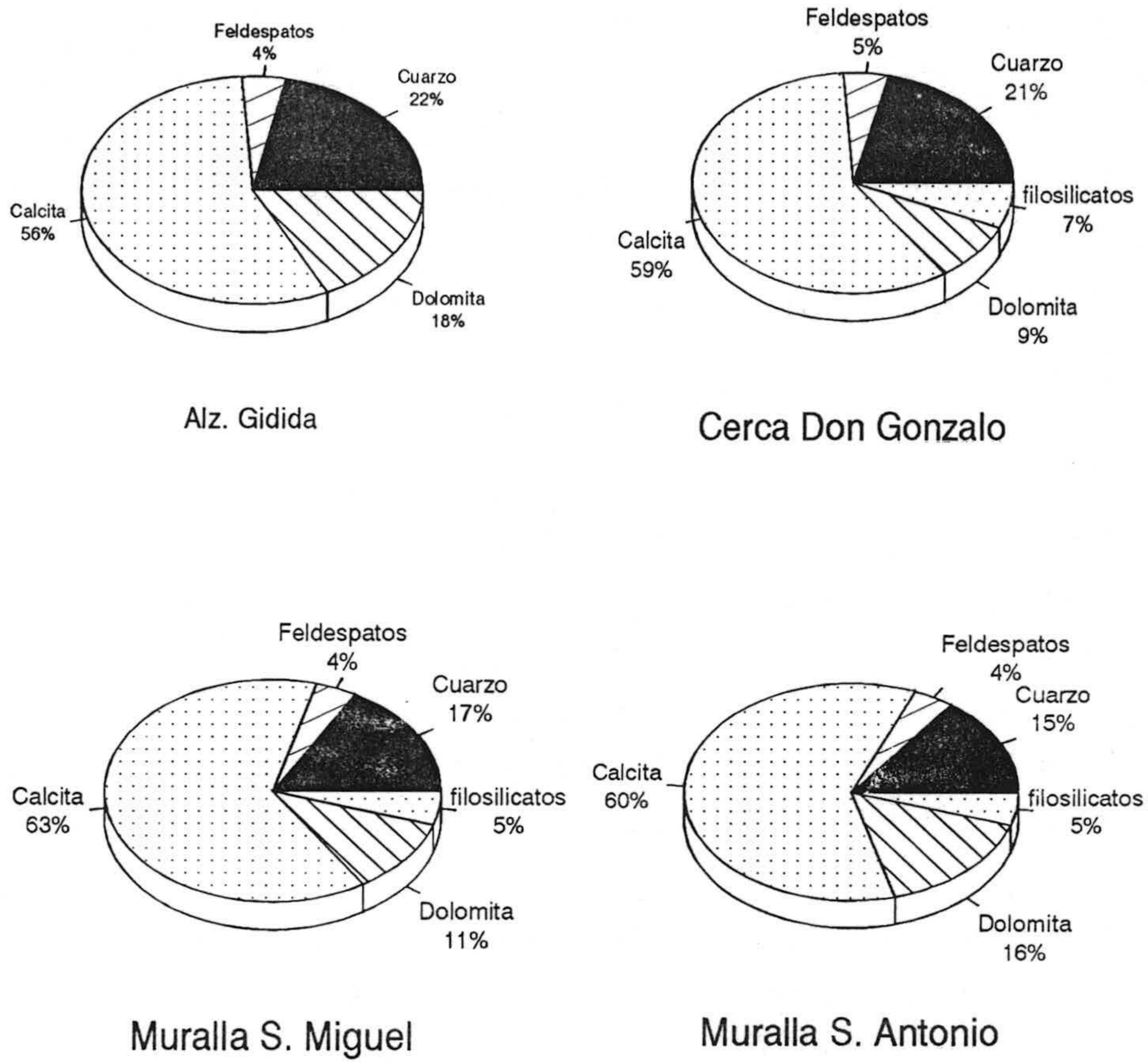


Fig. 9.27.- Composición mineralógica de la Fracción <math><0.074\text{ mm}</math>

Hemos de destacar respecto a la fracción fina, que aunque se supone que ha sido eliminada previamente para la elaboración del mortero, los datos mineralógicos nos indican que mayoritariamente es carbonato cálcico (cal añadida en la elaboración del mortero), pero que existe una cantidad significativa de cuarzo y dolomita. Este hecho se puede explicar por contaminación de la fracción fina por parte del árido durante la fabricación.

Se sabe, según los resultados granulométricos que los revestimientos están constituidos casi el 90% de partículas comprendidas entre 6.35 y 0.074 mm. Es por esa razón por la que los resultados obtenidos de los revestimientos, se han comparado con la fracción comprendida entre 6.35 y 0.074 mm de cantera, como hemos indicado anteriormente.

De los resultados obtenidos en la fracción <0.074 mm se deduce que los contenidos en calcita son más abundantes en la matriz, en cantidades importantes, al igual que yeso, este último en menor proporción.

Podemos concluir diciendo que se aprecia un aporte importante en calcita, que varía desde un 10 ó 15% en cantera, hasta un 48% en murallas.

Los contenidos en calcita en la fracción >6.35 mm son muy semejante a los obtenidos para murallas, en muestras de interior de muro, de la misma manera que para los cantos comprendidos entre 6.35 y 0.074 mm.

El mayor incremento de calcita, para muestras de interior de muro se observa en la fracción fina (partículas <0.074 mm); estando su valor entorno a 60% en construcciones de la Alcazaba Cadima.

3) Pátinas superficiales.

En la foto 43 se muestra el aspecto que presentan estas pátinas superficiales. Se ha podido comprobar que la composición mineralógica de estas pátinas es muy homogénea en los distintos lienzos de murallas estudiados.

La composición mineralógica es básicamente la indicada en la tabla IX-81.

Tabla IX-81. Composición mineralógica de las pátinas superficiales.

Pátinas	Calcita	Dolomita	Cuarzo	Oxalatos
Valores medios	74	5	20	trazas

De los datos se deduce que la composición mayoritaria es el carbonato cálcico, y es de destacar la presencia de oxalatos en mínimas cantidades.

Análisis mineralógico y petrográfico por microscopía óptica.

Con esta técnica se llevó a cabo un estudio mineralógico y textural, de un total de veinte muestras extraídas de los distintos lienzos de Murallas. Se trata de "morteros y/o hormigones de cal" constituidos básicamente de áridos de distinta naturaleza y ligante de carácter calcítico (constatado al teñir las láminas delgadas con alizarina).

Con microscopía óptica se ha pretendido determinar las características de la asociación árido-aglutinante, tanto desde el punto de vista mineralógico como textural.

La composición de estos "morteros u hormigones de cal" es semejante al de las rocas detríticas naturales (de la Torre, 1994), constituidas básicamente de áridos de granos monominerales y/o fragmentos de rocas de distinta naturaleza y cemento calcítico; distribuidos de manera regular a través de la pasta. Son frecuentes los procesos de disolución y precipitación del carbonato cálcico.

El aglutinante se presenta en forma de micrita o esparita (muy desarrollado en los morteros extraídos de Puerta Elvira).

Es frecuente la recristalización de la calcita en drusas, formando cristales aciculares alargados creciendo perpendiculares a la pared de los poros (Foto 44) o fracturas (Foto 45), muy birrefringentes con irisaciones típicas de los carbonatos. En otros casos el cemento esparítico aparece en forma granular, con una orientación óptica desordenada rellenando poros (Foto 46), que en la mayoría de los casos aparecen totalmente colmatados, pero también es frecuente en forma de crecimientos syntaxiales en continuidad óptica (foto 47).

El cemento de naturaleza micrítica aparece en las zonas donde no hay macroporos ni fisuras y en algunos casos aparece cierta cantidad de material arcilloso (San Antonio) (Foto 46).

En la pasta del aglutinante se ha observado, pequeños aglomerados de calcita micrítica con unos límites muy bien definidos, que no presentan las mismas características que un árido normal (Foto 48), a estos núcleos o "inclusiones" se les puede atribuir dos posibles orígenes:

- Restos de carbonato sin calcinar, originario de la cal.
- Restos de portlandita, no carbonatada, o núcleos de óxido de calcio que no se apagaron debidamente.

La segunda hipótesis parece más probable ya que estos glomérulos se comportan como la pasta, estando sometidos a los mismos procesos de fracturación y disolución que el aglutinante.

Los áridos, que forman parte de estos materiales, están compuestos mayoritariamente por dolomias, trozos de esquistos, cuarzo y calcita (Foto 49). El contacto de estos áridos con el aglutinante a veces es regular, pero es frecuente encontrar bordes de crecimiento cristalino y procesos de reactividad (intercambio catiónico), hecho que se manifiesta por un aumento de la fracturación y porosidad en los bordes de estos cristales y/o rocas (Foto 50).

En otros casos, en los bordes del árido se producen halos de recristalización de cemento calcítico en forma de cristales aciculares colocados perpendicularmente a la superficie de contacto de estos, semejante al que se desarrolla en las fisuras y poros (Foto 51). También se pueden encontrar otros halos de reacción de material no calcítico posiblemente ceolitas (Foto 52), consecuencia de la alteración de los silicatos en ambientes alcalinos.

La precipitación de minerales de alteración a lo largo de las fisuras y porosidades es un hecho muy frecuente. La fisuración mayoritaria es de retracción, y se localiza en zonas donde el árido está en menos proporción.

La naturaleza de los minerales de alteración no se puede establecer claramente en microscopía óptica debido a su naturaleza criptocristalina. En la foto 53 se observan los cristales de yeso perpendiculares a la superficie de fractura, pero también es frecuente encontrarlos formando parte de una pasta microcristalina junto a la calcita (constatado porque al teñir con alizarina la pasta de calcita, quedan pequeños núcleos aislados sin teñir).

La porosidad se manifiesta de morfología redondeado y de carácter fisural, originada por retracción. En estos poros y fisuras se observan recristalizaciones de minerales secundarios, que no llegan a colmatarlos totalmente (foto 54). Estos poros se rellenan más cuando las recristalizaciones son de calcita. Los morteros con menor cantidad de árido son los de aspecto más poroso.

El tamaño de estos componentes petrográficos es variable, nos encontramos un porcentaje importante de macroporos y esto varía en función de las características del mortero y su calidad.

La naturaleza de los áridos es muy variable, sus formas varían desde cantos muy angulosos a subredondeados de rocas de origen metamórfico (esquistos y mármoles dolomíticos) hasta rocas sedimentarias (carbonatos micríticos), y su tamaño es voluble desde tamaños decimétricos hasta tamaño limo, en algunos casos encontramos arcilla en cantidades significativas. Sin embargo el tamaño más frecuente está en torno al milímetro.

Las pátinas exteriores vistas al microscopio, presentan el aspecto que aparece en la foto 54. Como se puede observar se aprecia, en primer lugar una fina capa de carbonato cálcico micrítico, de aspecto no continuo, sobre esta capa se advierte una recristalización del carbonato cálcico creciendo perpendicularmente a la superficie exterior y con la misma orientación cristalográfica, esta segunda capa aparece aunque no exista debajo de ella la anterior. Sobre esta capa suele haber otra de exudación de calcita de aspecto microcristalino bajo una pequeña película de un material que debido a su naturaleza criptocristalina no se puede saber exactamente su composición. Esta epidermis, conjunto de microcapas, se adaptan a las irregularidades del contacto de los granos.

La proporción árido-cal, como se aprecia en las fotos, es variable según el la zona y el tipo de recinto amurallado. La concentración de aglutinante se hace mayor a medida que nos acercamos al exterior de los revestimientos. En general se puede decir que la textura de estos morteros es granosostenida, con una proporción de áridos que supera ampliamente el 65%, y la fisuración aparece asociada a zonas del mortero donde el tanto por ciento del árido es bajo.

Conclusiones.

De las observaciones microscópicas llevadas a cabo sobre estos materiales, podemos afirmar que son en general de buena calidad por varias razones:

- En primer lugar, porque el aglutinante en la mayoría de los casos ha carbonatado perfectamente, con un desarrollo importante de cristales de calcita rellenando poros y sellando fisuras, originadas durante el proceso de endurecimiento o carbonatación.

- En segundo lugar, porque los áridos que forman parte de este material se conservan bien, ya que los procesos de reacción cuando se producen afectan a zonas muy superficiales de los mismos, no influyendo de forma importante en su calidad y resistencia.

- Y por último, porque la aparición de minerales secundarios ligados a procesos de alteración, se encuentran en un estado incipiente. Aunque este hecho nos ha puesto de manifiesto la existencia de estos procesos, llamándonos la atención sobre la necesidad urgente de controlar cualquier fenómeno que pueda incidir y favorecer su avance. En este sentido podemos destacar la contaminación ambiental y el empleo de materiales de restauración inadecuados.

Análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM)

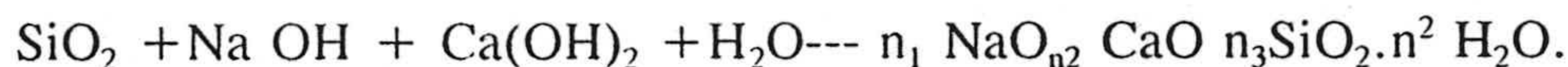
Resultados.

La observación detallada por medio de SEM, de los áridos que forman parte de los morteros estudiados, nos ha permitido conocer que son frecuentes los problemas de

reactividad entre los áridos y la pasta; ello se traduce en un aumento de la porosidad y alterabilidad de las zonas de contacto entre estos y el aglutinante. Un ejemplo de ello tenemos en la foto 56, donde se observan unos áridos de dolomita y feldespato, ambos enriquecidos en calcio hacia los bordes; lo que pone de manifiesto el intercambio iónico que ha tenido lugar entre estos minerales y el medio. En el caso de la dolomita, ésta ha cedido iones Mg^{++} y en el de feldespato K^+ y Al^{+++} a cambio de iones Ca^{++} (Espectros M-16/1, M-16/2 y AFR/3, AFR/4).

Este fenómeno se explica porque la cal viva en presencia de agua cambia las condiciones del medio, provocando la puesta en disolución del calcio y su posterior depósito en forma de portlandita. Esta favorece la alcalinidad del medio y por tanto su capacidad de respuesta con posibles áridos reactivos. La existencia de portlandita se ha constatado al observar el desarrollo de plaquetas hexagonales preferentemente en poros (Foto 57, espectro M-15/2). Esto nos puede indicar o que existe hidróxido de calcio que no ha carbonatado todavía, o bien restos de óxido de calcio.

La presencia de geles silíceo cálcicos alcalinos nos pone de manifiesto que en estos materiales han tenido lugar reacciones de tipo árido-álcali. Este proceso fue definido por Plum et al (1958) y Soriano et al. (1984) de acuerdo con la siguiente reacción:



Según Biczok (1978) el árido comienza a ser atacado por una solución alcalina, generando fisuras en el borde de los granos. Veronelli (1978) considera que estos procesos tienen lugar cuando el hidróxido de calcio reacciona con la sílice en solución, procedente de los áridos atacados, dando lugar a un gel de silicato cálcico insoluble con propiedades osmóticas.

Esta reacción tiene lugar entre los iones alcalinos (Na,K) y la cal (portlandita). Para que esto se produzca es necesaria una serie de condiciones:

- un aumento en el contenido en álcalis,
- que se produzca una concentración de álcali durante el proceso de fraguado del mortero,
- presencia de áridos reactivos, en cuya superficie se generan los geles alcalinos.

Si en esta reacción domina la cal se forman un gel cal alcalino silícico, si por el contrario dominan los álcali se forma un gel alcalino, que es expansivo en presencia de agua (Soriano et al, 1984).

La reacción árido-álcali en el mortero genera geles que normalmente se desarrolla alrededor de los áridos, tapizando su superficie (foto 58) y en algunos casos cristaliza de diferente modo. Esto va a estar en función de las condiciones espaciales (volumen de huecos, microfisuras, etc;) y de la concentración catiónica de los constituyentes de las mismas. De acuerdo con esto, estos geles pueden ser «amorfo», de aspecto cuarteado con fenómenos de expansión (59), o bien cristalizados como ceolitas macladas en forma de aspa, de acordeón o rosetas (foto 60).

El análisis de estos geles nos puede proporcionar información de su carácter expansivo (una importante concentración de Al indica que no es altamente expansivo, si por el contrario presenta una alta concentración en Si, su carácter es ampliamente expansivo en presencia de agua (Angel Martínez et al, 1995); así como, de su carácter cristalino y amorfo (cuanto mayor es la relación K/Ca mayor es la alcalinidad).

Los geles encontrados en estos morteros son muy ricos en Si, lo que establece su expansividad. Se encuentran en forma «amorfa» y también cristalina con distintas morfologías que describimos a continuación de acuerdo con Menendez Mendez, (1995):

- Gel tipo «amorfo» (Foto 61 , espectro AF/1). Son ricos en Ca y Si y bajo contenido en Al.
- Gel masivo «amorfo» (Foto 62). Se trata de la primera manifestación de la formación de un gel, muy ricos en calcio.
- Cristales tipo espada «ceolitas» (foto 63)

El análisis por difracción de rayos X, nos ha puesto de manifiesto la existencia de sulfatos en los materiales analizados. El SEM con la ayuda complementaria del EDX nos ha permitido, por una parte identificar estos elementos y por otra observar el aspecto que presentan.

Los sulfatos encontrados son fundamentalmente yeso, que aparece con distintas morfologías. Cuando éste se desarrolla en las zonas exteriores se presenta en forma tabular (foto 64). Cuando crece en el interior (criptoflorescencias) se presenta en forma acicular, constituyendo pequeñas agujas (foto 65); o bien creciendo caprichosamente en el seno del mortero (foto 66)

La observación detallada de estos materiales nos ha permitido identificar cristales de cloruros (Na y Ca). Estos se presentan como cristales de hábito cúbico (foto 67 y 68). Asociados a estos cristales aparecen pequeños cristales de halita (Cl Na), también de forma cúbica creciendo fundamentalmente en huecos (foto 69 y 70).

La alteración microbiológica también se pone de manifiesto por el desarrollo de micelos de hongos (foto 71).

Es de destacar la existencia de partículas esféricas de contaminación (foto 72) que nos ponen de manifiesto que la polución ambiental esta ya afectando a este complejo monumental.

Se han observado en la Alcazaba Cadima fibras de materia orgánica bien conservadas, que fueron agregadas al muro durante el proceso de fabricación (foto 73).

Conclusiones

La existencia de geles silícico-cálcicos muy ávidos al agua nos está indicando desaconsejable que puede resultar el estancamiento de agua en el seno de estas fábricas, por el efecto que pueden provocar en el seno de estas fábricas.

La existencia de cristales de yeso y la existencia de esferas de contaminación, nos está mostrando que la contaminación está ya afectando de forma importante a este complejo monumental.

La existencia de cristales de cloruros, de la misma manera que el yeso, puede tener distintos orígenes:

- Como hemos indicado anteriormente la contaminación puede ser un factor que influya en su presencia.

- Pero también puede estar asociado al empleo de morteros de cemento para restauración (tanto el yeso como los cloruros se suelen añadir durante la fabricación del cemento, como acelerante del fraguado). El agua que circula a través de estos materiales puede disolver estas sales y transportarlas al interior del muro.

IX.2.6. ANALISIS QUIMICOS.

De las muestras extraídas en los distintos recintos amurallados se ha llevado a cabo su análisis químico, tanto para muestras de interior de muro como para revestimientos. Los datos se determinaron con el ICP y mediante FRX.

Con ICP se han determinado elementos mayoritarios (Al, Fe, Mg, Mn, Ca, K, Na, Ti y P) y elementos traza (Co, Cu, Cr, Li, Ni, Sr, V, Y, Zn, Pb, Zr y Nb), y con el espectrómetro de fluorescencia de rayos X se ha determinado los siguientes elementos: Si, Al, Fe, Ca, Mg, S, Cl, Ti, Na, K y Ti.

De la misma forma que para el caso de las muestras de cantera, el análisis químico se ha efectuado sobre la fracción fina. Para el caso de los revestimientos si tenemos en cuenta que en su fabricación se eliminan las partículas finas, los datos obtenidos deben reflejar la composición del aglutinante. No obstante se ha constatado por difracción de rayos X que la composición de este fino no es calcita exclusivamente, sino que existe otros componentes en proporciones importantes.

Elementos mayoritarios.

Tabla IX-82. Composición química de revestimientos en %.

Muestras	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
MSA-8	3.3	1.4	3.9	0.03	30	0.85	1.6	0.14
MSA-10	2.3	1.1	3.4	0.03	17.3	0.89	1.2	0.12
MSA-6	3.6	1.5	4.2	0.04	20	0.70	0.78	0.14
MDG-6	4.3	2.1	2.1	0.02	13	0.97	1.0	0.2
ALZ-G2	4.3	1.6	3.6	0.09	26.7	1.3	2.7	0.13
ALZ-G8	3.1	0.9	6.1	0.03	10.5	1.0	1.2	0.12
ALZ-C5	6.0	5.9	4.9	0.05	20.1	1.7	2.9	0.3
MSA-9	4.3	2.1	2.6	0.01	12.8	0.42	0.7	0.07

Tabla IX-83. Composición química de interior de muro en %.

Muestras	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
ALZ-G7	3.4	2.8	3.6	0.07	13.2	1.6	1.5	0.4
ALZ-G4	5.2	2.6	2.2	0.05	11.9	1.8	0.9	0.3
ALZ-G6	4.3	1.8	1.9	0.03	15.3	0.1	0.8	0.18
MDG-1	6.5	2.7	4.4	0.05	19.0	1.9	1.1	0.3

Datos obtenidos con Fluorescencia de rayos X.

Tabla IX-84. Composición química de revestimientos en %.

Muestras	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CL.	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PC	Si
ALZG2	3.5	2.1	30.3	6.8	0.01	0.03	0.26	0.75	0.2	0.2	28.8	29
ALZG3	4.3	2.7	23.5	4.3	0.3	0.27	0.37	1.0	0.27	0.26	22.6	40
MSM-13	3.4	1.8	32.8	6.7	0.08	0.5	0.28	0.8	0.17	0.05	32.3	21

Tabla IX-85. Composición química de interior de muro en %.

Muestras	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CL.	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PC	Si
MSA5	3.2	1.8	34.1	4.9	0.0	0.15	0.2	0.7	0.2	0.1	28.4	26.0
MSA2	6.1	2.2	32.6	5.4	2.7	0.17	0.4	1.2	0.2	0.2	28.6	20
MSA4	5.8	2.6	22.5	2.2	0.1	0.26	0.5	1.5	0.4	0.1	17.7	4.3
ALG4	9.2	3.7	16.8	3.9	1.3	0.58	0.9	2.7	0.5	0.4	20.1	39.6
MDG2	3.9	2.1	33.0	4.3	0.5	0.01	0.2	0.7	0.2	0.1	27.8	24.

Elementos minoritarios.

Tabla IX-86. Composición química de revestimientos en ppm.

Muestras	Co	Cu	Cr	Ni	Sr	V	Y	Zn	Pb	Zr	Nb	Li
MSA8	8.2	85.3	28.1	16.5	273	38.1	11	70.4	39.6	199	57.8	0.15
MSA10	9.9	67.8	21.9	16.9	305.2	27.6	5.8	62.7	27.3	54.2	25.9	6.5
MSA1	19.7	38.4	45.1	39.6	508.9	56.0	10.6	24.7	13.6	62.7	10.1	19.3
MDG6	25.5	21.3	41.1	19.7	424	52.6	9.6	90.4	12.4	64.8	18.5	30.0
ALG2	13.5	38.6	35.4	47.4	643	36.7	7.6	269.8	18.0	209	34.0	1.3
ALG8	11.9	90.4	25.0	10.7	213	25.1	5.7	43.1	9.8	330	13.3	13.7
ALC5	16.8	137	45.4	32.9	513.3	55.6	12.0	109	11.2	70.7	10.2	18.9
MSA9	3.3	17.4	19.1	10.4	951	22.3	5.5	56.4	12.9	64.9	26.7	10.7

Tabla IX-87. Composición química de interior de muro en ppm.

Muestras	Co	Cu	Cr	Ni	Sr	V	Y	Zn	Pb	Zr	Nb	Li
ALZG7	14.9	39.9	40.6	26.6	273	60.2	12.5	95	21.8	81.0	32.6	2.3
ALZG4	25.7	43.1	64.7	33.7	675	69.0	12.7	355	14.6	46.5	13.5	27.1
MSM1	19.7	38.4	45.1	39.6	509	56.0	10.6	24.7	13.6	62.7	10.1	19.4
ALC5	16.8	137	45.4	32.9	513	55.6	12.0	109	11.2	70.7	10.2	18.8

Discusión.

- Componentes mayoritarios:

La composición química total de los componentes mayoritarios de estos materiales, tanto de interior de muro como de revestimientos, es variable debido a la diversidad de sus componentes (cantos de muy distinta composición).

En la figura 9.28, se representan gráficas comparando los datos obtenidos en Murallas respecto a los de cantera.

En estas gráficas se puede observar la tendencia que siguen estos elementos según su concentración en cantera y Murallas. En general puede decirse que se observa un incremento importante de CaO , Cl^- y SO_4^{2-} en la muestras de Murallas respecto a las de cantera y una disminución en el contenido en álcalis (Na y K).

Basándonos en los datos mineralógicos y de la simple observación visual podemos decir que el incremento en CaO se explica por una adición importante de cal a la fábrica de estos muros. Los sulfatos y cloruros en forma de cristales de yeso y halita están asociados a procesos de alteración.

La disminución en álcalis se puede explicar por su carácter móvil. El intercambio catiónico que tiene lugar entre los áridos y el medio hace que estos elementos, por su naturaleza, sean los primeros en liberarse, parte de los cuales quedan atrapados para formar nuevas fases minerales, y parte se eliminaran por lavado.

La disminución en el contenido en MgO también se puede explicar como en el caso anterior, pues es un elemento que se libera en este intercambio catiónico y no tiene tendencia a fijarse.

- *Elementos traza:*

El la figura 9.29 se han representados comparativamente los resultados obtenidos para cantera y murallas.

Las componentes minoritarios están también influenciados por la heterogeneidad del material, pero a la vez son elementos muy susceptibles al medio (procesos constructivos sufridos, así como, procesos de contaminación), de ahí la importancia de su estudio.

El Cu, Co, Ni, y Cu son elementos que no aparecen en cantera, sin embargo en Murallas se encuentran en cantidades variables aunque muy bajas, tanto en revestimientos como en el interior de muro. Su presencia se puede explicar porque entran a formar parte de los constituyentes de la contaminación. Estos elementos además actúan como catalizadores en la formación de otros fases de contaminación, (Rodríguez Navarro & Sebastián Pardo, 1994).

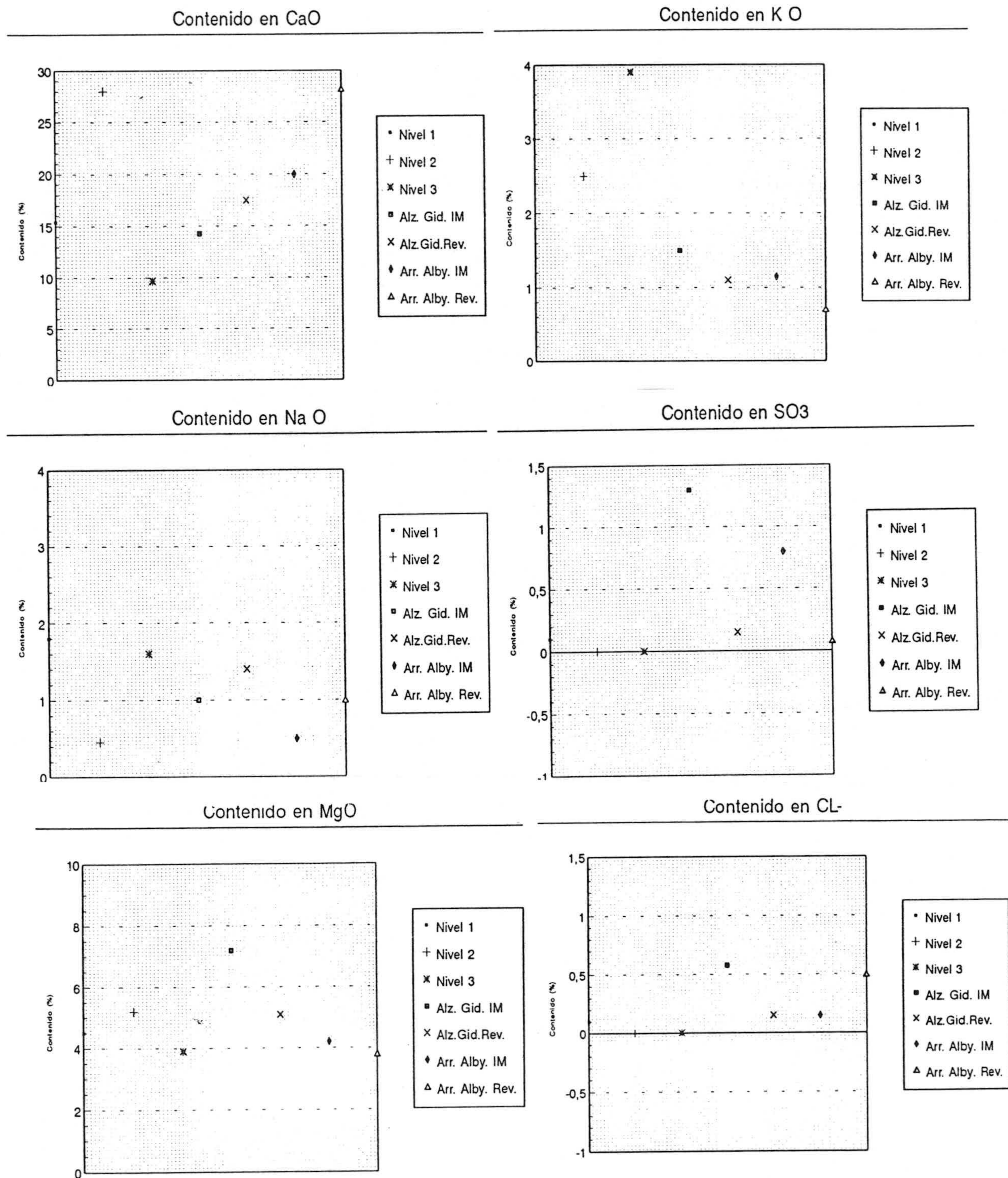


Fig. 9.28. Comparación de los resultados de los componentes mayoritarios en cantera y murallas.

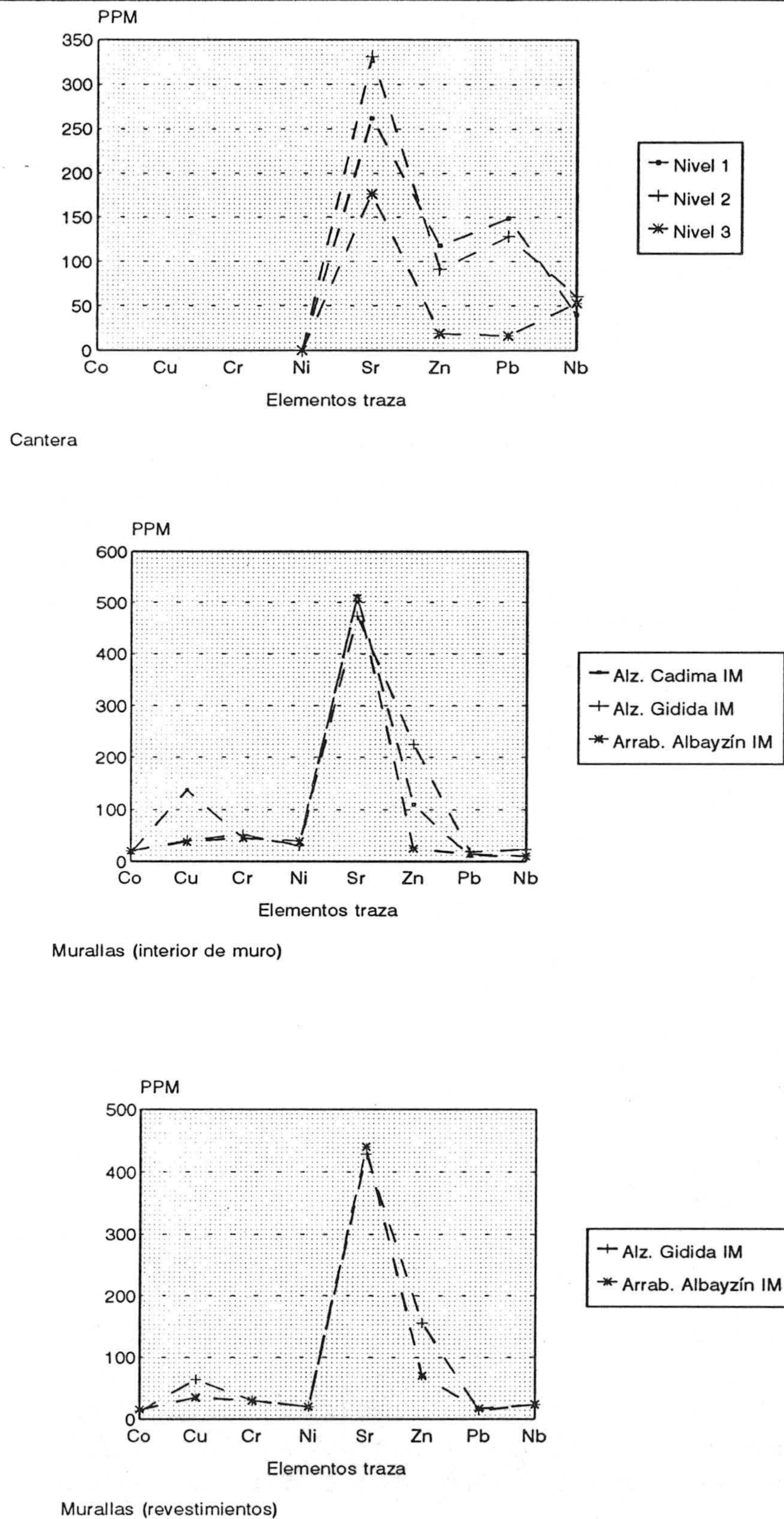


Fig. 9.29. Comparación de los resultados obtenidos de los elementos traza en cantera y murallas.

IX.2.7 CONTENIDO EN MATERIA ORGANICA.

Los datos obtenidos para las distintos lienzos de Murallas estudiados, vienen indicados en la tabla IX-88. Estos datos corresponden a muestras de interior de muro.

Tabla IX-88. Contenido en materia orgánica en %.

Muestras	% en materia orgánica.
ALZC	2.14
ALZGa	0.96
ALZGb	0.45
CDG	0.59
MSM	0.69
MSA	1.1

En la figura 9.30 se indican en un diagrama de barras de forma comparativa los resultados obtenidos en las distintas Murallas con respecto a los de cantera.

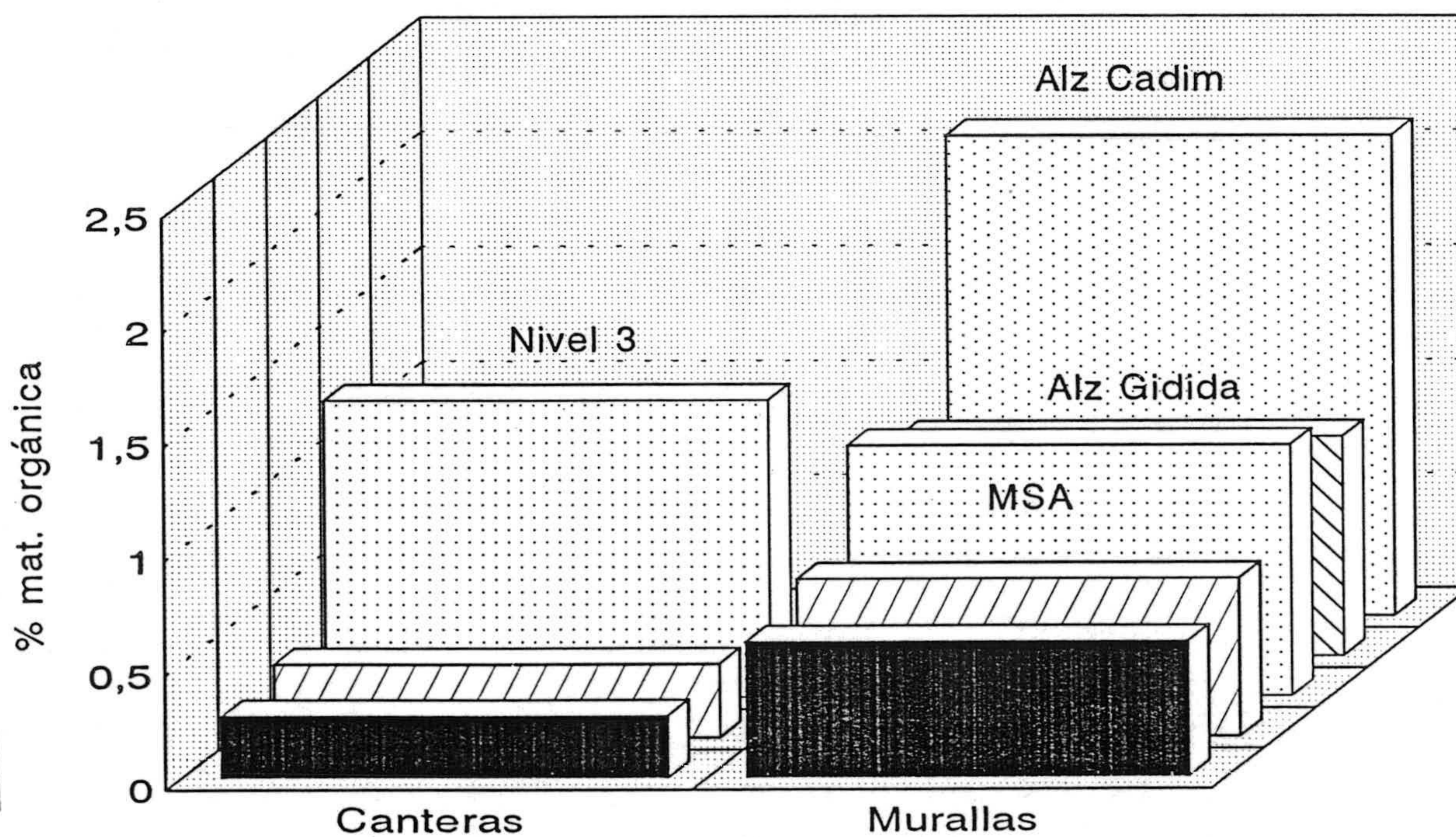


Fig. 9.30. Comparación del contenido en materia orgánica en cantera y en murallas.

Resultados

De los datos se deduce que La Alcazaba Cadima es la que tiene mas aporte de materia orgánica. Respecto a las demás sus valores son semejantes a los de cantera (según el nivel al que se han asociado).

En el caso de la Alcazaba Cadima, se ha confirmado éste aporte con observaciones visuales e incluso en el SEM, donde se han observado materia fibras de materia orgánica.

IX.2.9 RESULTADOS DE POROMETRIA.

El estudio de la porosidad se ha llevado a cabo sobre material de revestimientos (solo sobre los morteros y/o «hormigones» con una alta dosificación de cal. Los morteros rojizos, localizados en el tramo San Antonio suelen ser menos coherentes con material arcilloso en su composición.

Datos obtenidos por pesada hidrostática.

El cálculo por pesada hidrostática se ha llevado a cabo sobre un total de 20 muestras, representativas de los distintos recintos. En la tabla IX-89 vienen indicados los valores medios de porosidad obtenidos para los distintos tramos estudiados.

Tabla IX-89. Porosidad obtenida por pesada hidrostática.

Murallas	Porosidad (%).
Alcz-Cadima.	25.6
Alcz-Gidida	37
CDG	35
MSM	38
MSA	74.5

Las partes más superficiales de estos revestimientos presenta una porosidad menor estando su valor entorno al 19% de porosidad.

Datos obtenidos por porosimetría de inyección de Hg.

Con esta técnica se han obtenido datos de porosidad total y distribución del tamaño de acceso de los poros.

Se han analizado muestra de revestimientos exteriores representativas de los distintos recintos tanto de material original como de intervenciones posteriores, con la finalidad de comparar los resultados.

El estudio de la porosidad se ha llevado a cabo sobre muestras de los revestimientos originales, fundamentalmente, con la finalidad de poder caracterizar el sistema poroso de estos morteros.

El comportamiento que presenta en la actualidad el material utilizado en procesos de restauración, nos ha llevado a analizar su porosidad y ver en que medida esta puede afectar a su comportamiento e incompatibilidad con el material originario de estas fábricas.

A continuación se muestran las gráficas acumulativas de intrusión de Hg y los histogramas de distribución de tamaño de acceso de poro.

Revestimientos originales.

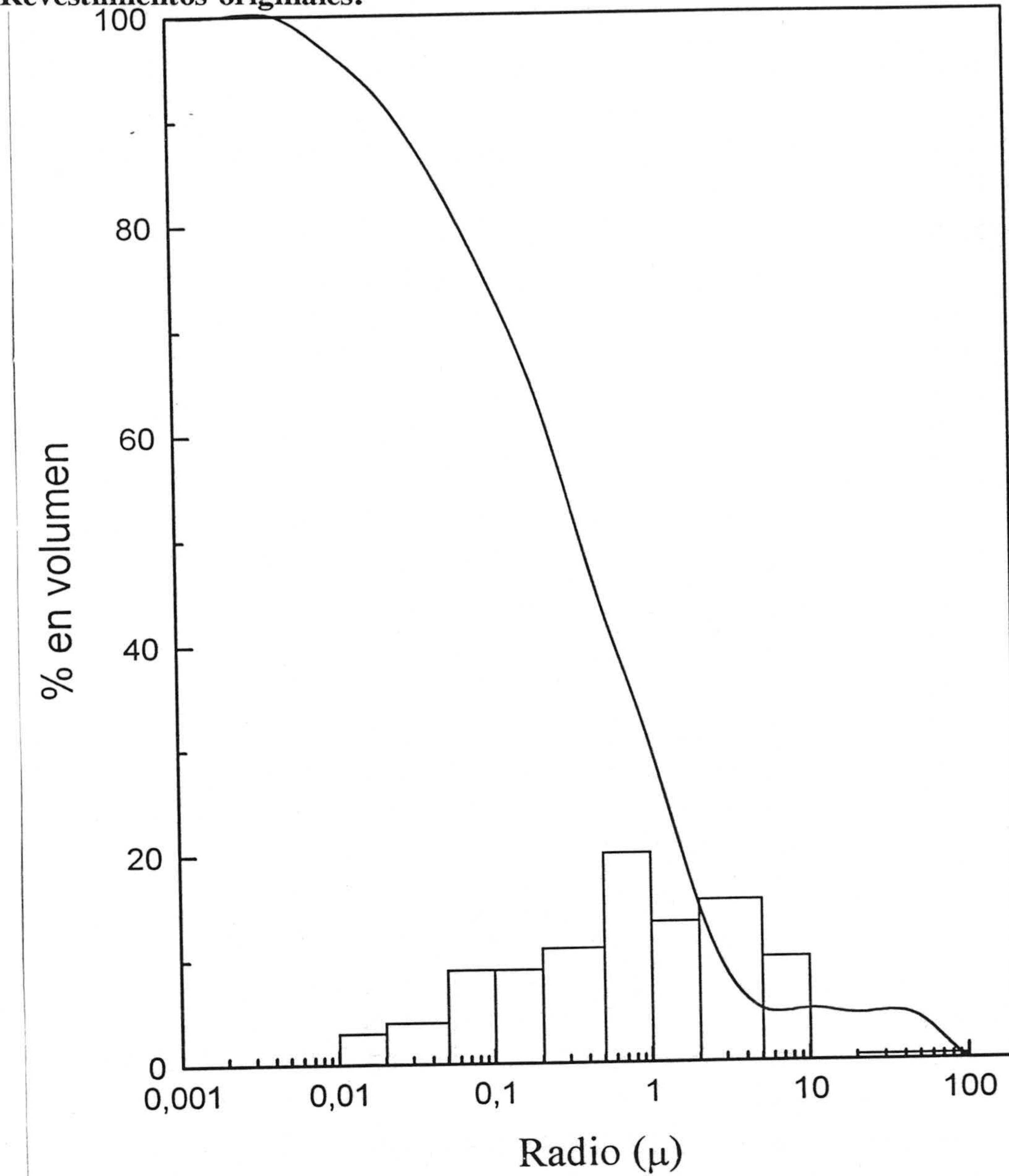


Tabla IX- 99. Alcazaba Cadima.

POROSIDAD	MACROPOROSIDAD	MICROPOROSIDAD	POROSIDAD DOMINANTE	
			ϕ poro dominante.	Area superficial (gr/cm ²)
	$r > 2.5 \mu$	$r < 2.5 \mu$	0.01-10 μm	1.800
7	1	6		

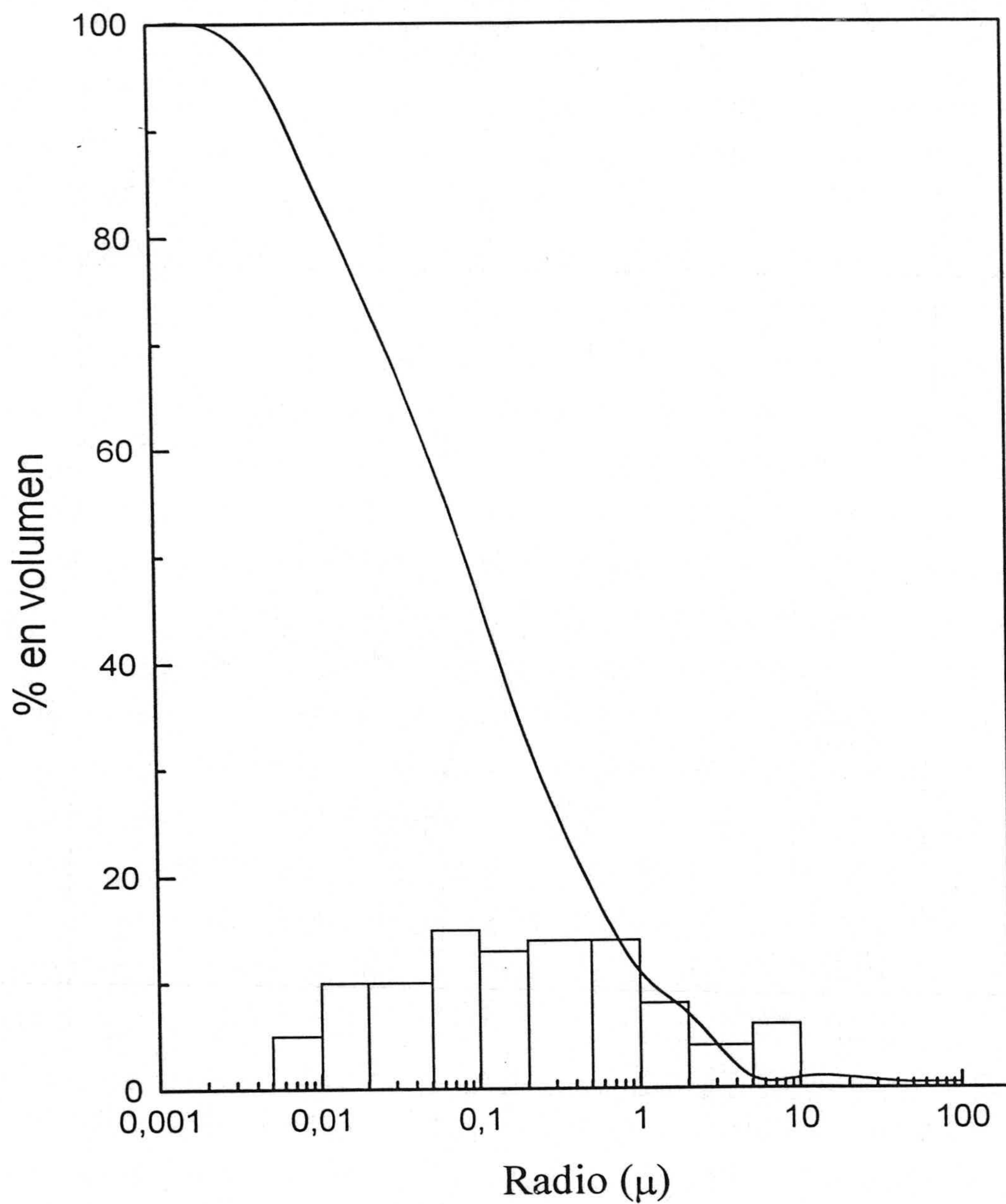


Tabla IX-91. Alcazaba Gidida

POROSIDAD	MACROPOROSIDAD	MICROPOROSIDAD	POROSIDAD DOMINANTE	
			ϕ de poro dominante.	Area superficial (gr/cm ²)
	$r > 2.5 \mu$	$r < 2.5 \mu$	0.01-10 μm	1.800
18	1	17		

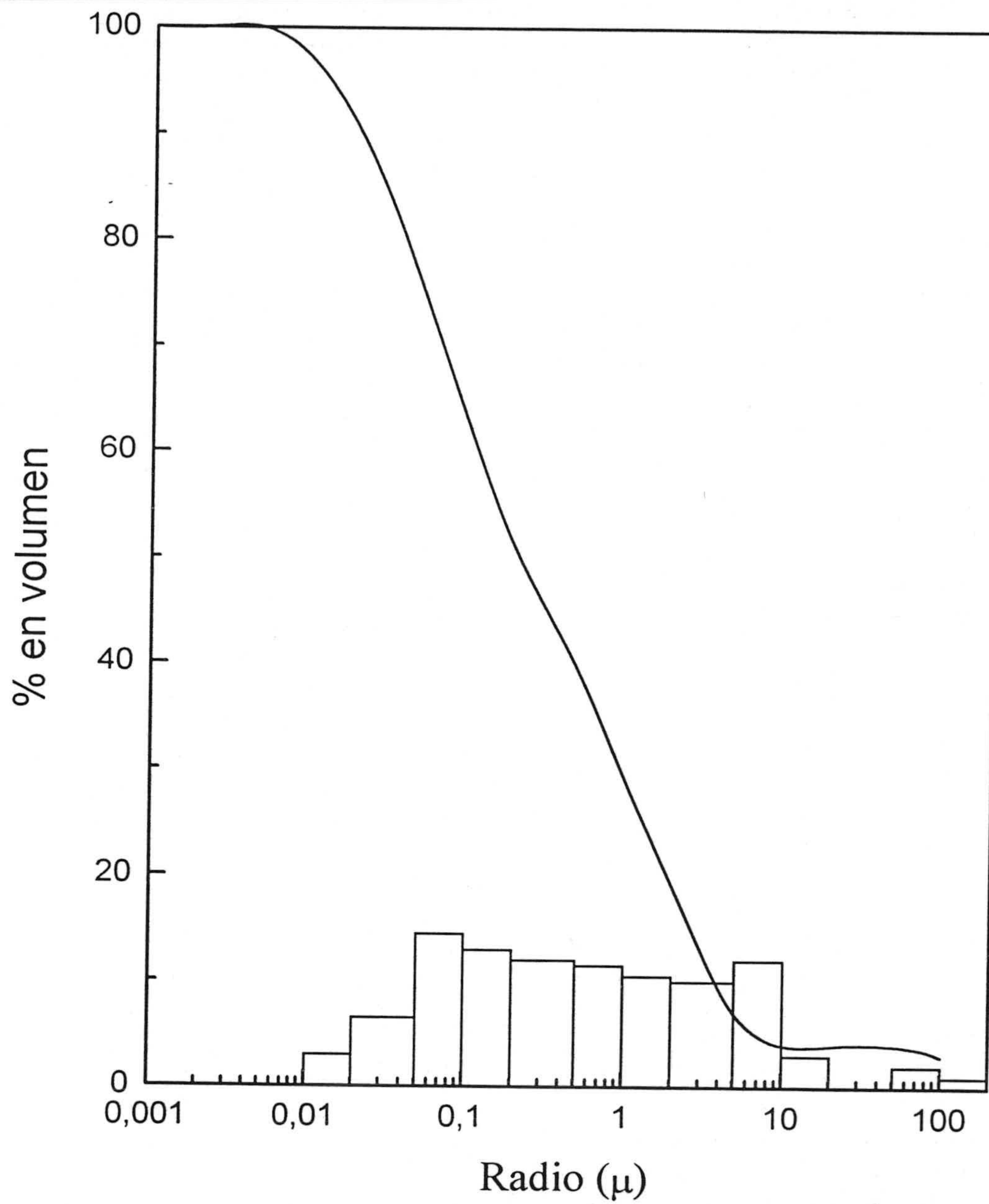


Tabla IX-92. Arrabal del Albayzín (calicastrado más inferior).

POROSIDAD	MACROPOROSIDAD	MICROPOROSIDAD	POROSIDAD DOMINANTE	
			ϕ de radio dominante.	Area superficial (gr/cm ²)
	$r > 2.5 \mu$	$r < 2.5 \mu$	0.5-20 μm	2.0873
15	2.5	12.5		

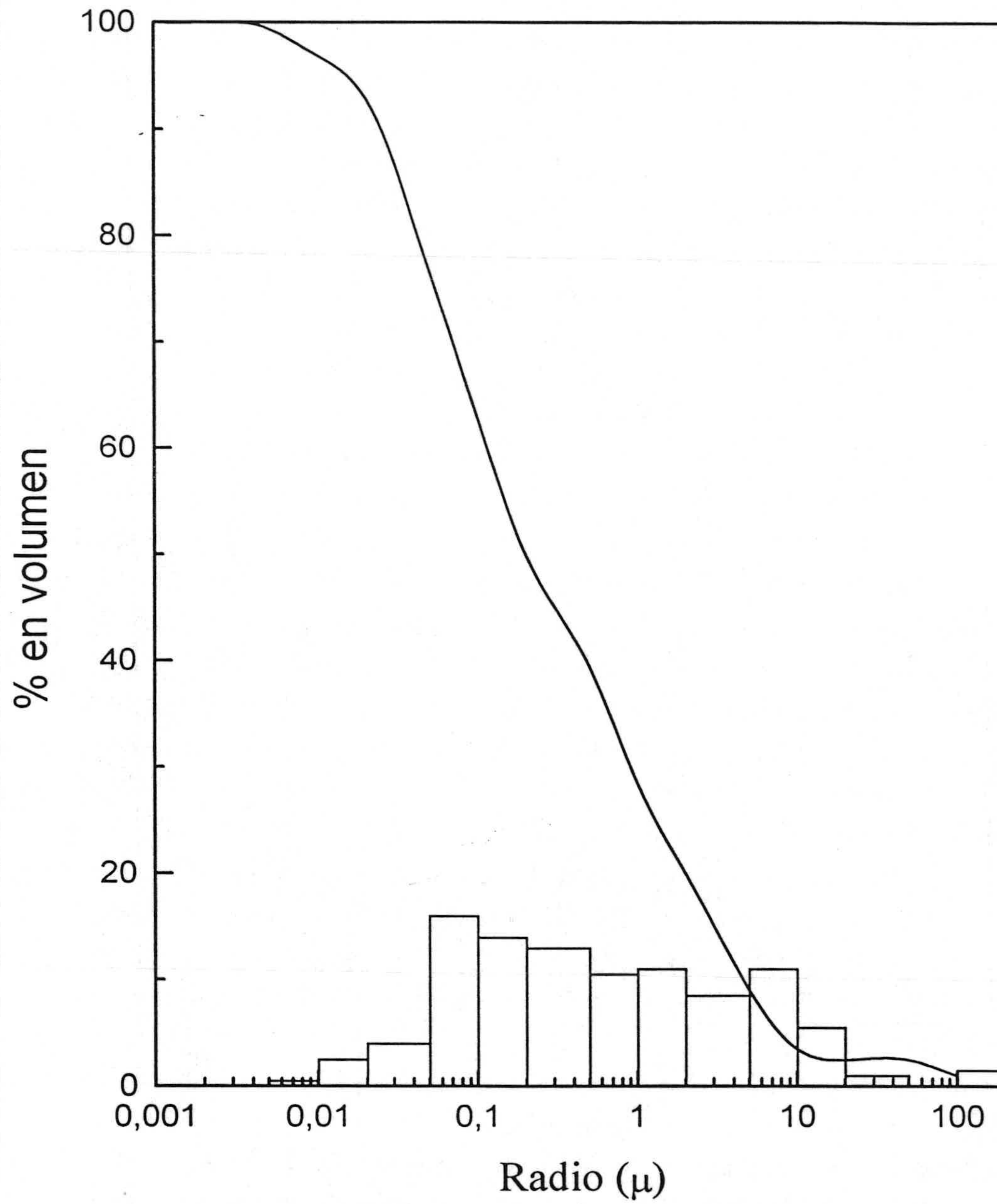


Tabla IX-93. Arrabal del Albayzín (revestimientos más exteriores).

POROSIDAD	MACROPOROSIDAD	MICROPOROSIDAD	POROSIDAD DOMINANTE	
			ϕ de poro dominante.	Area superficial (gr/cm ²)
	$r > 2.5 \mu$	$r < 2.5 \mu$	0.5-1 μm	1.945
23	4	19		

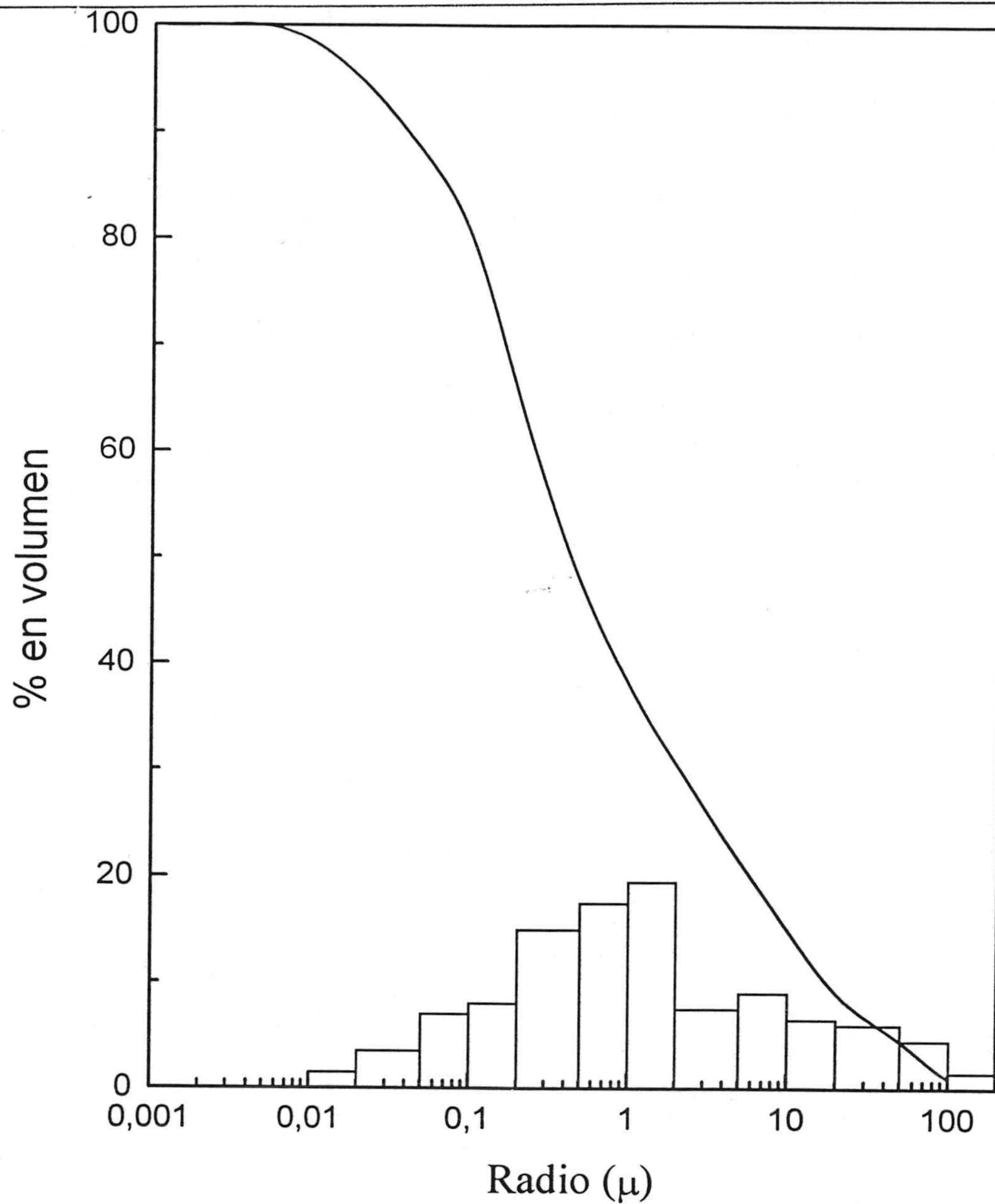


Tabla IX-94. Arrabal del Albayzín (morteros rojos)

POROSIDAD	MACROPOROSIDAD	MICROPOROSIDAD	POROSIDAD DOMINANTE	
			ϕ de poro dominante.	Area superficial (gr/cm ²)
	$r > 2.5 \mu$	$r < 2.5 \mu$	0.2-2 μ m	1.181
13	2.5	10.5		

Revestimientos de intervención

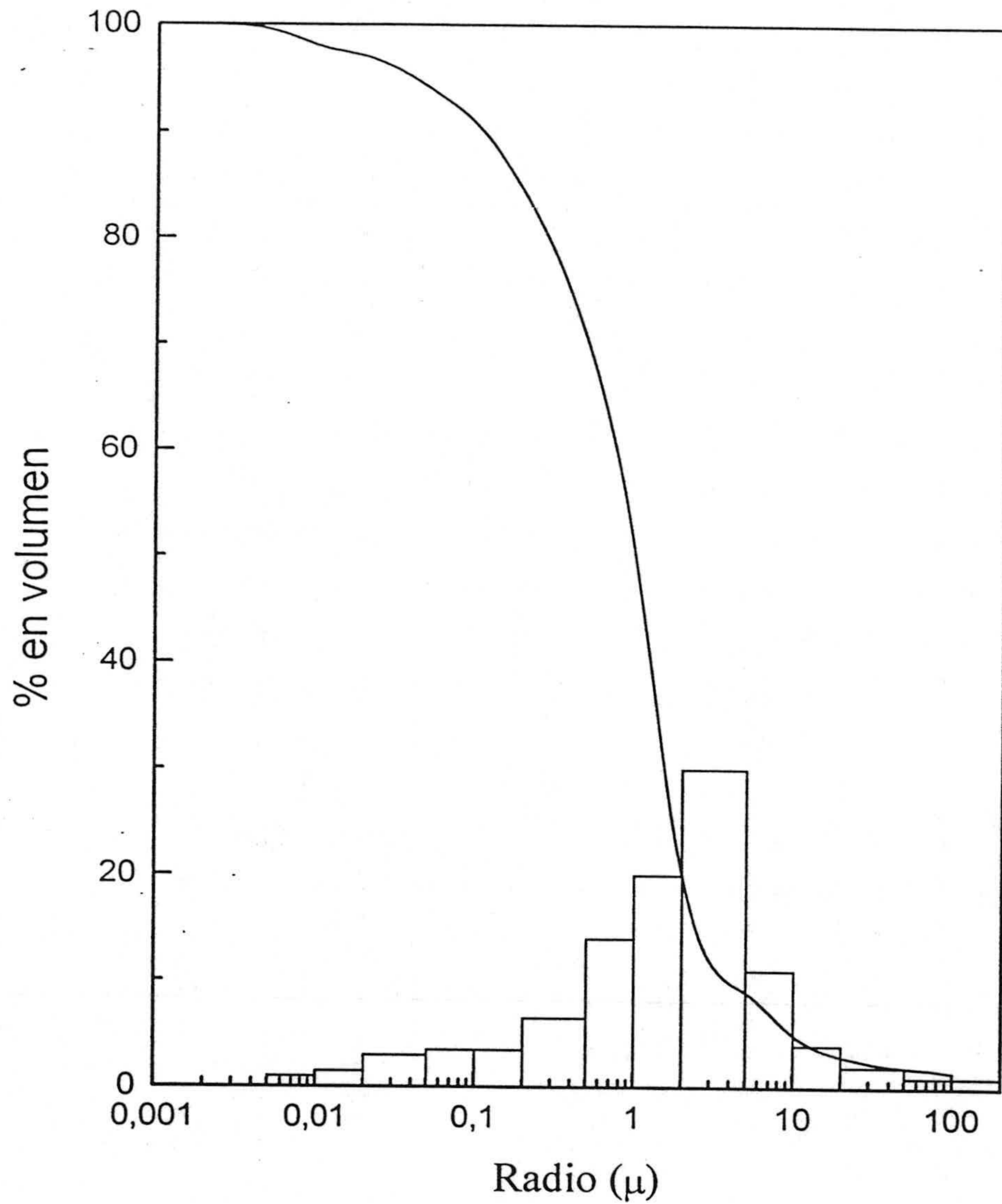


Tabla IX-95. Hormigón empleado en la restauración del Torreón de San Juan de los Reyes.

POROSIDAD	MACROPOROSIDAD	MICROPOROSIDAD	POROSIDAD DOMINANTE	
			ϕ de poro dominante.	Area superficial (gr/cm ²)
	$r > 2.5 \mu$	$r < 2.5 \mu$	1-5 μ m	1.413
23%	3.5	19.5		

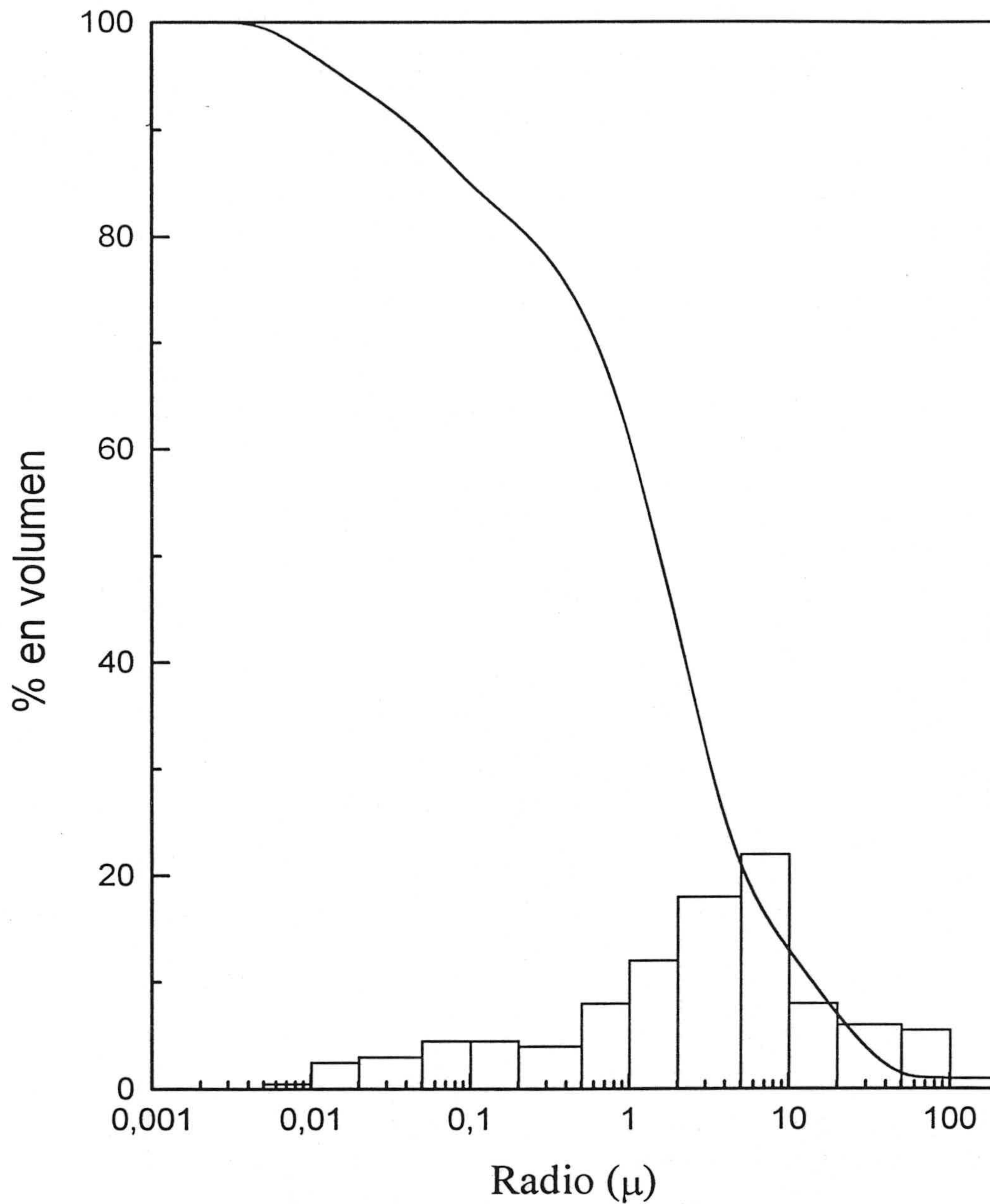


Tabla IX-96. Hormigón empleado en la restauración del Torreón de la Calle Guinea.

POROSIDAD	MACROPOROSIDAD	MICROPOROSIDAD	POROSIDAD DOMINANTE	
			ϕ de poro dominante.	Area superficial (gr/cm ²)
	$r > 2.5 \mu$	$r < 2.5 \mu$	1-10 μ m	2.007
21%	7.3	13.7		

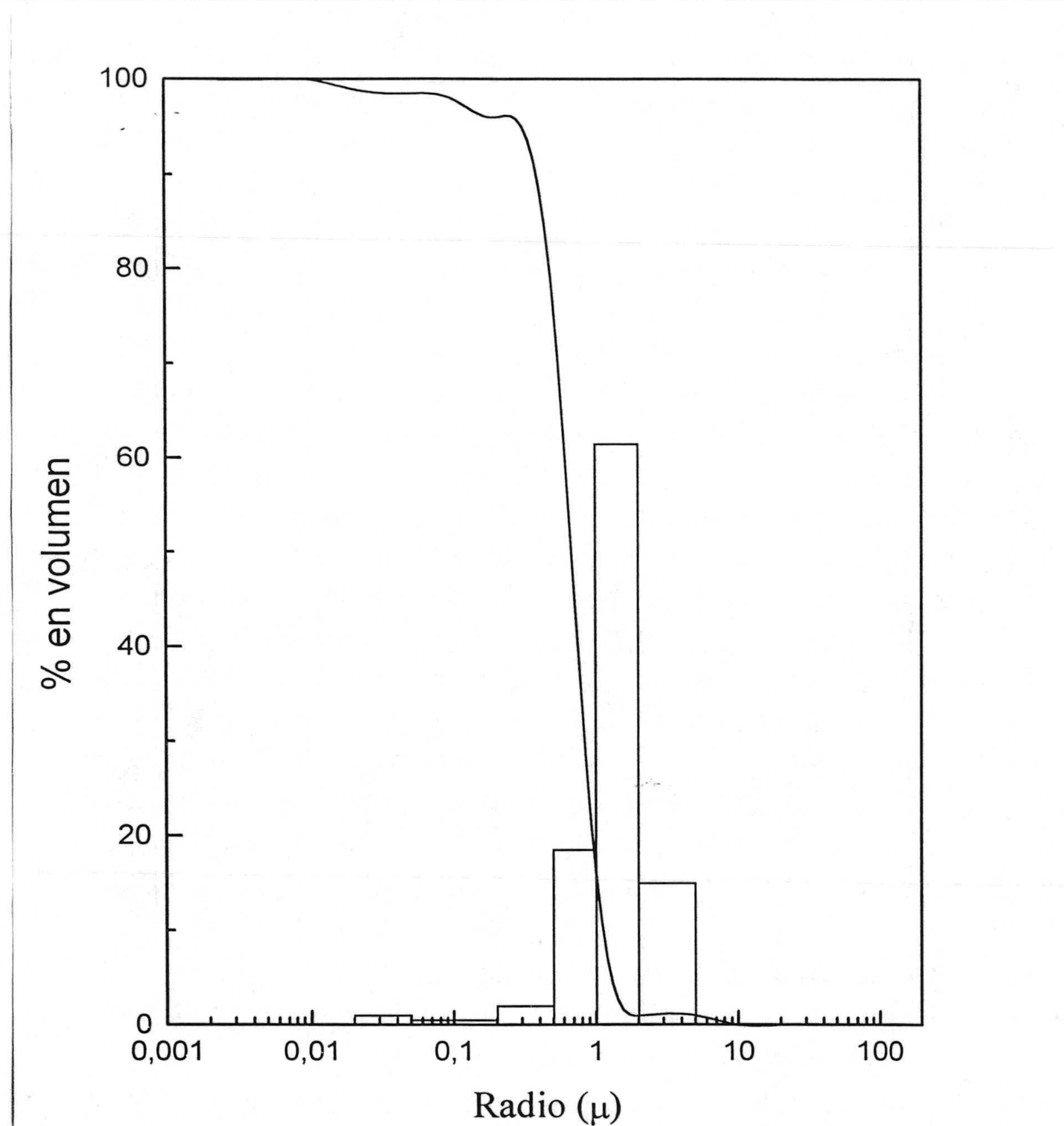


Tabla IX-97. Ladrillo de restauración empleado en la Cerca Don Gonzalo.

POROSIDAD	MACROPOROSIDAD	MICROPOROSIDAD	POROSIDAD DOMINANTE	
			ϕ de poro dominante.	Area superficial (gr/cm ²)
	$r > 2.5 \mu$	$r < 2.5 \mu$	0.5-5 μ m	1.806
90%	1	89		

Conclusiones

La porosidad de estos materiales es en general baja, estando su valor entorno al 15%. La distribución del tamaño de los poros es compleja, no existiendo en la mayoría de los casos un tamaño de poro dominante.

Los morteros de coloración gris, que son los más frecuentes, tienen una distribución de tamaño de poro que oscila entre 0.01 y 10 μm , y a veces resaltan suavemente los poros de tamaño 1 μm . Según estos datos la porosidad fundamentalmente es la de naturaleza microporosa ($< 2.5 \mu\text{m}$).

Para el caso de los morteros rojos (asociados al tramo San Antonio) presentan un radio de poro dominante en un intervalo de porosidad entre 0.2 y 2 μm .

En general no se observan diferencias importantes entre los distintos revestimientos empleados en la construcción de las Murallas. Estos revestimientos tienen que proteger el muro del exterior y actuar como una capa impermeable aislante, pero a la vez deben permitir la transpiración del muro, y según los datos obtenidos, una amplitud en el distribución de radio de poros favorece este proceso.

Si comparamos la porosidad obtenida por pesada hidrostática con la obtenida en porosimetría de Hg, observamos que en este último caso la porosidad es menor. Sin embargo esto se puede explicar si tenemos en cuenta que esta técnica registra sobretodo poros de tamaño inferior a 7.5 μ , es decir fundamentalmente macroporos, por lo que la diferencia en los resultados nos puede indicar el tanto por ciento en macroporos reales existentes en estos revestimientos (incluso de un 20%).

En cuanto a los revestimientos de restauración, hay que decir que la porosidad total, obtenida por porosimetría de Hg, de estos materiales es superior a la de los materiales originales ($> 15\%$); y la distribución del sistema poroso es distinta. En los histogramas se observa una tendencia claramente unimodal con concentración máxima de tamaños de poros entre 1 y 5 μm , para el caso de los hormigones de cemento y 1 μm para los ladrillos.



FOTO 15.-Nivel 1. Carretera de Murcia.



FOTO 16.- Nivel 1. Suelo.



FOTO 17.- Nivel 2. (Bajo la Alhambra; suelo rojo en la parte superior).

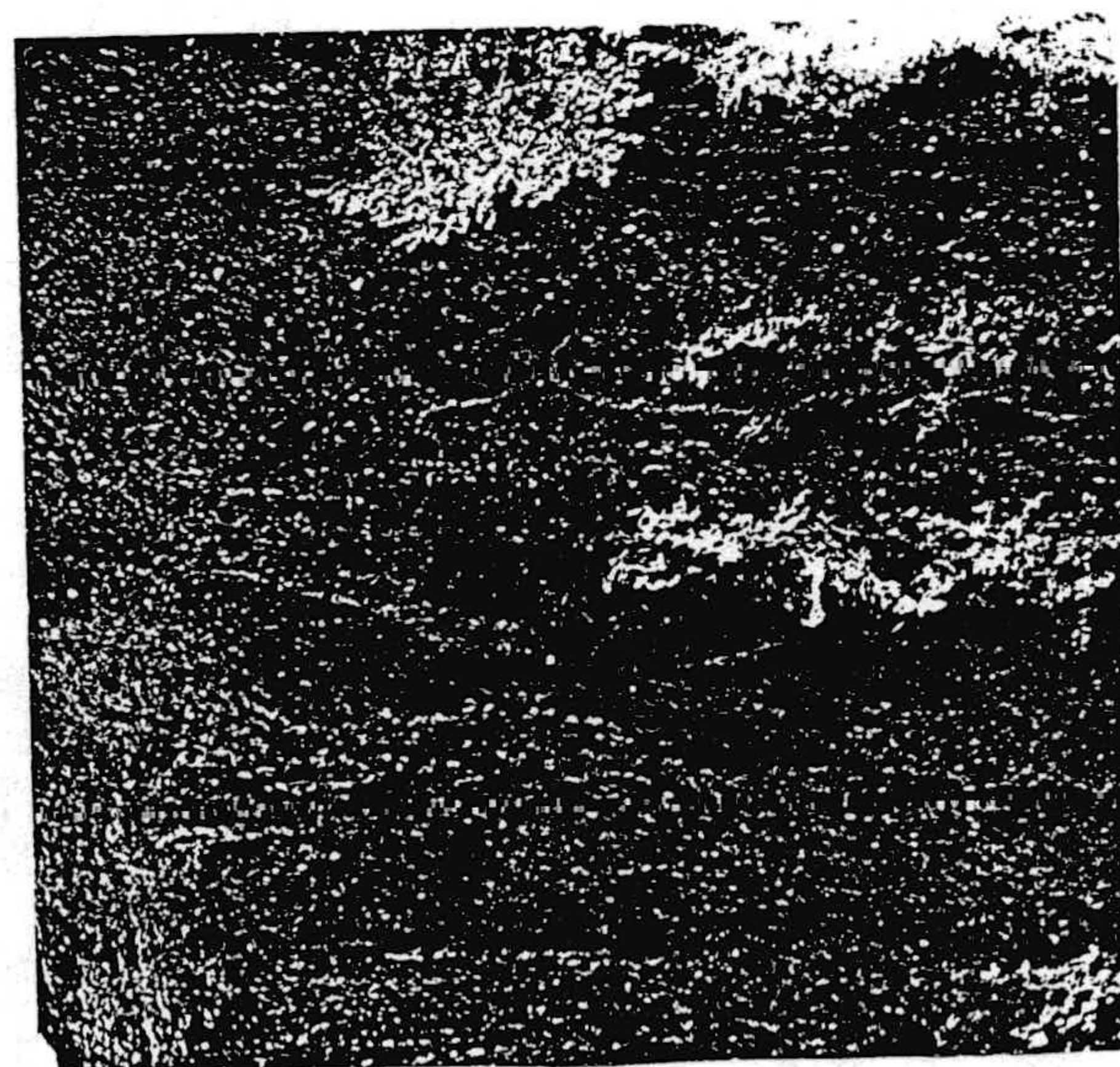


FOTO 18.- Nivel 2. Cerro de la Alhambra.



FOTO 19.- Nivel
2. Sacromonte.



FOTO 20.- Nivel
3. S u e l o
situado bajo la
Cerca de San
Antonio.



FOTO 21.- Nivel 3. Suelo
Formación Alhambra.

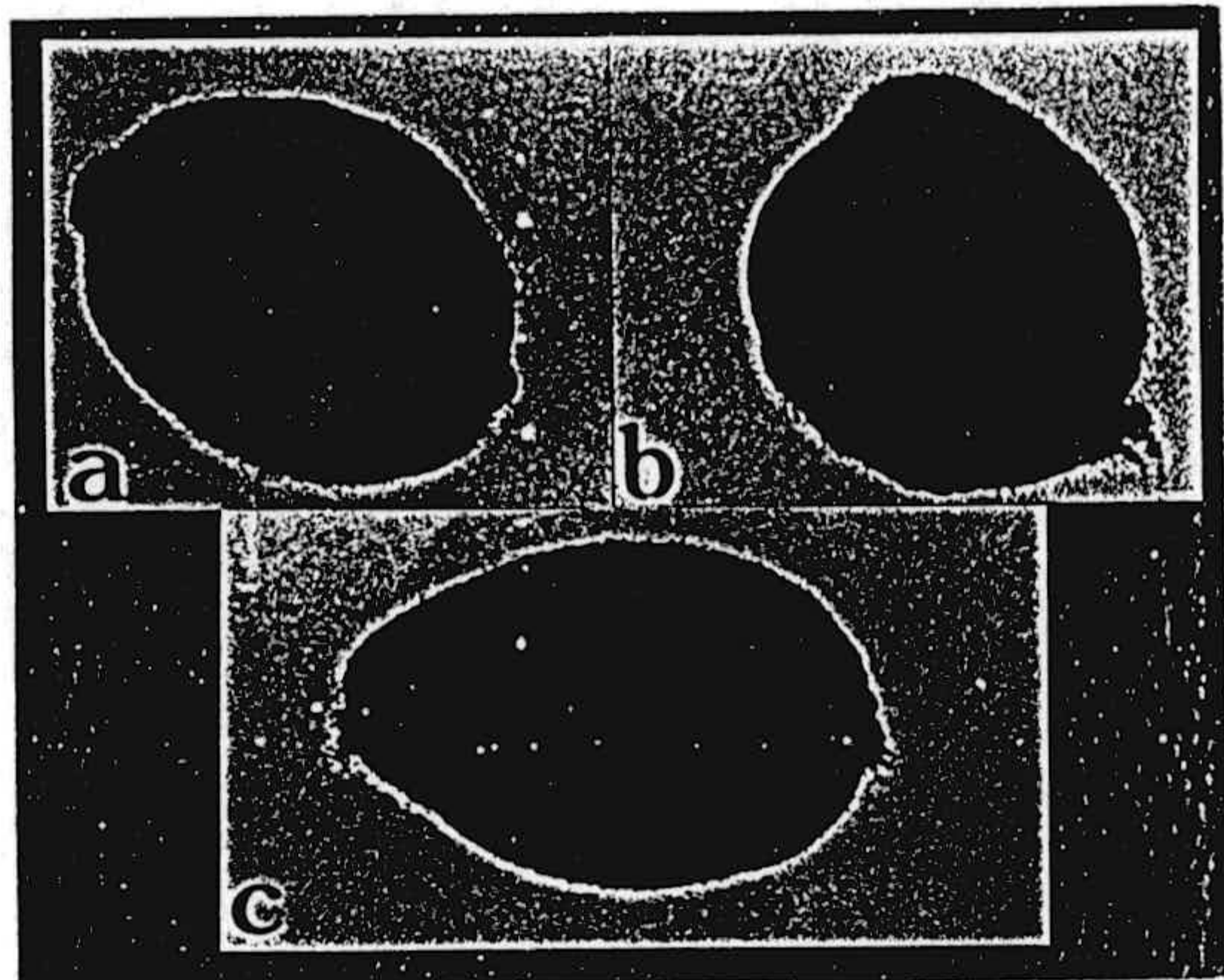


FOTO 22.- Nivel 1: a) 1A; b) 1C; c) 1E

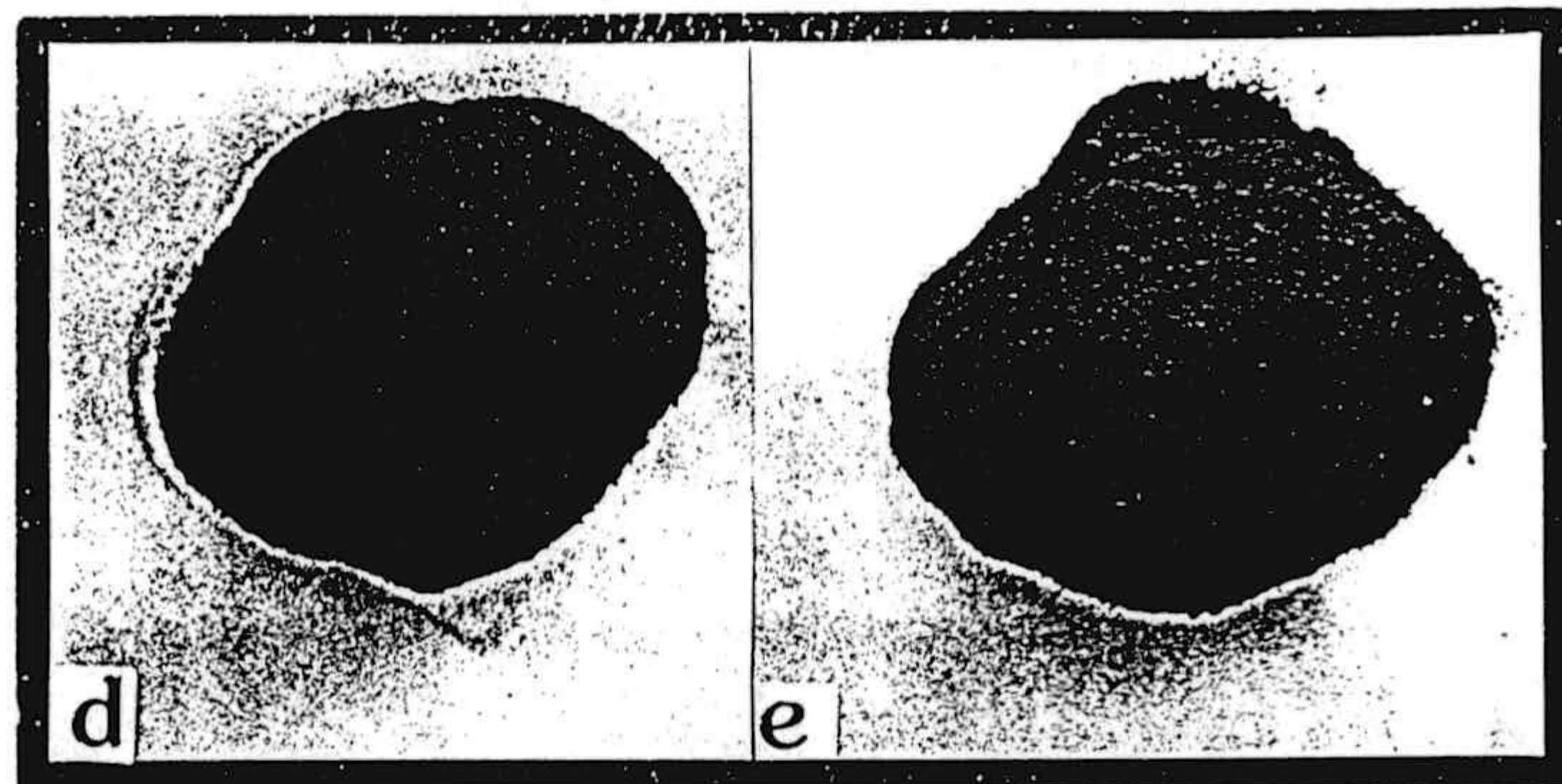


FOTO 23.- Nivel 2: d) 2A; e) 2B.

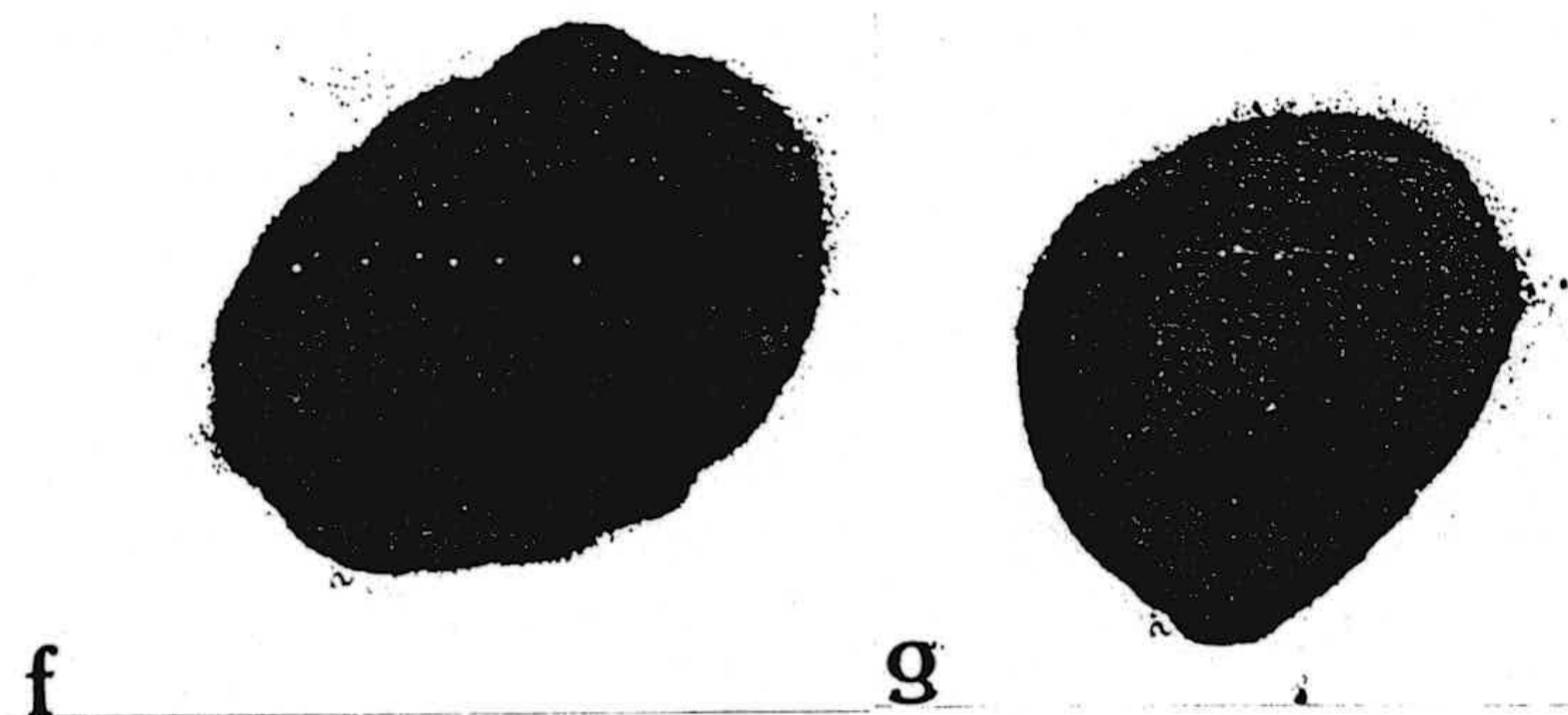


FOTO 24.- Nivel 3: f) 3A; g) 3A.

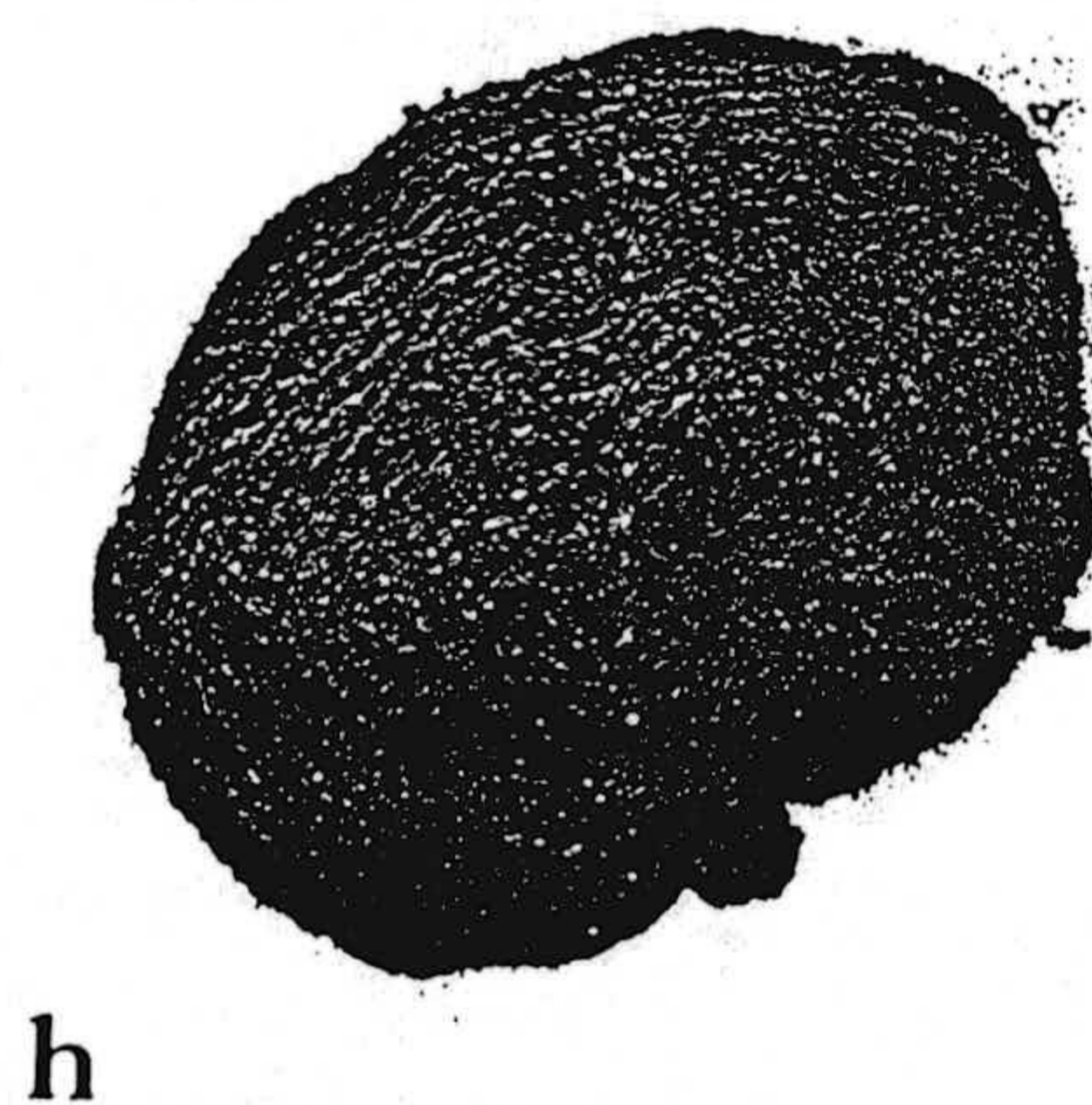


FOTO 25.- Nivel 3: h) 3C.

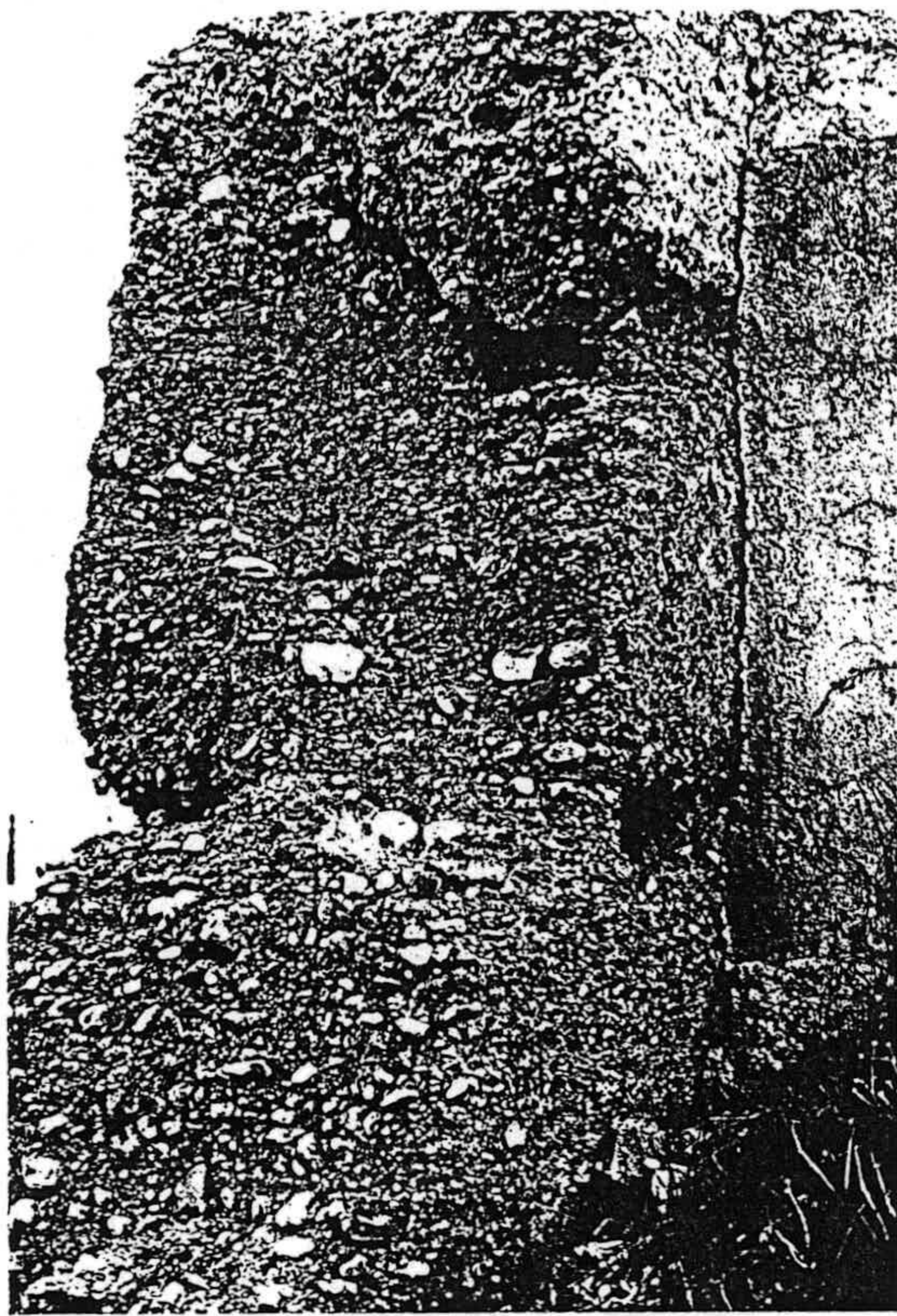


FOTO 26.- Aspecto del interior del muro,
Muralla de S. Miguel.



FOTO 27.- Detalle de la Foto 26.

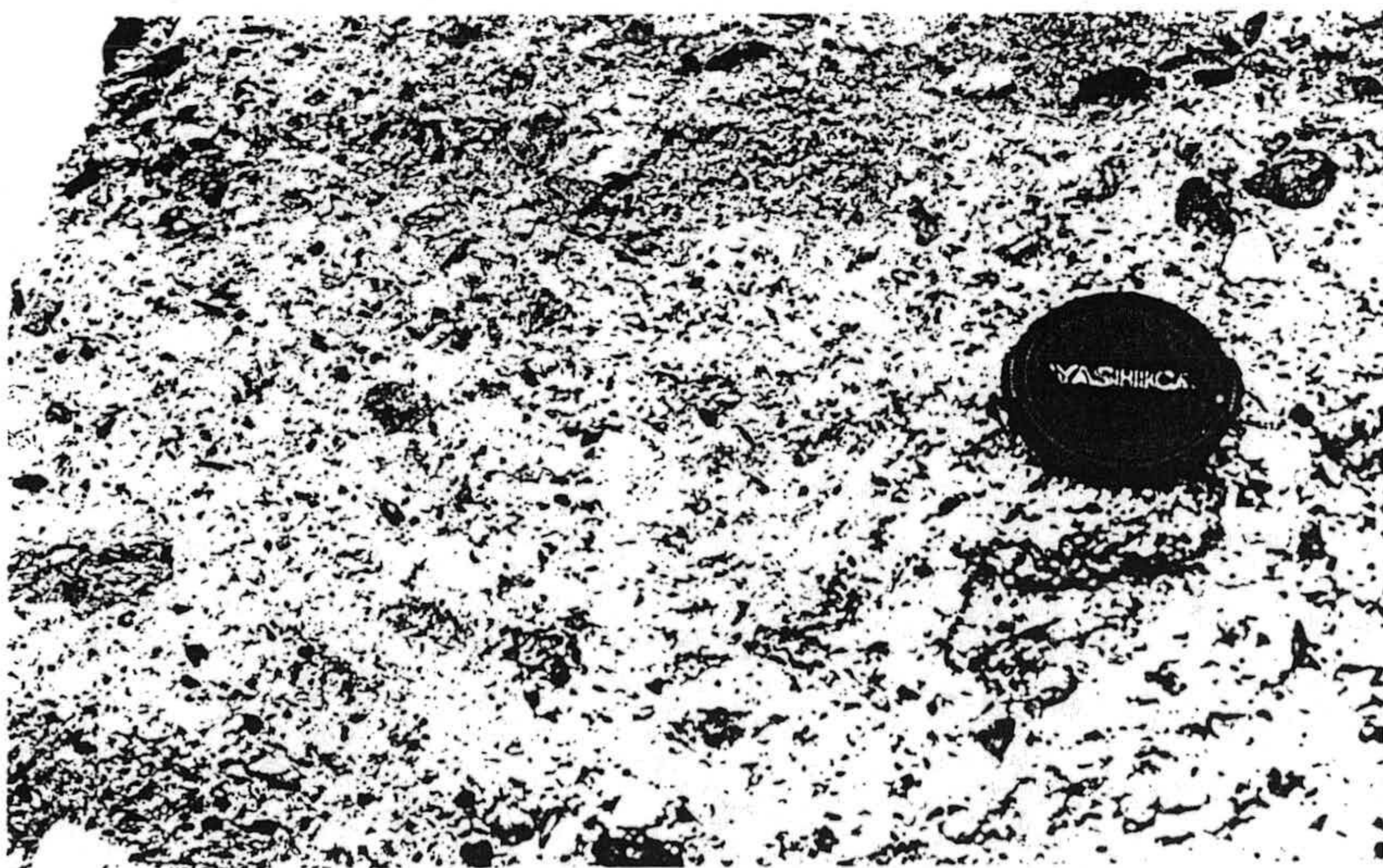


FOTO 28.- Aspecto del revestimiento, Muralla de S. Miguel.



FOTO 29.- Aspecto interior del muro de la
Muralla de S. Antonio.



FOTO 30.- Pérdida parcial del revestimiento. Revestimiento exterior sin pátina.

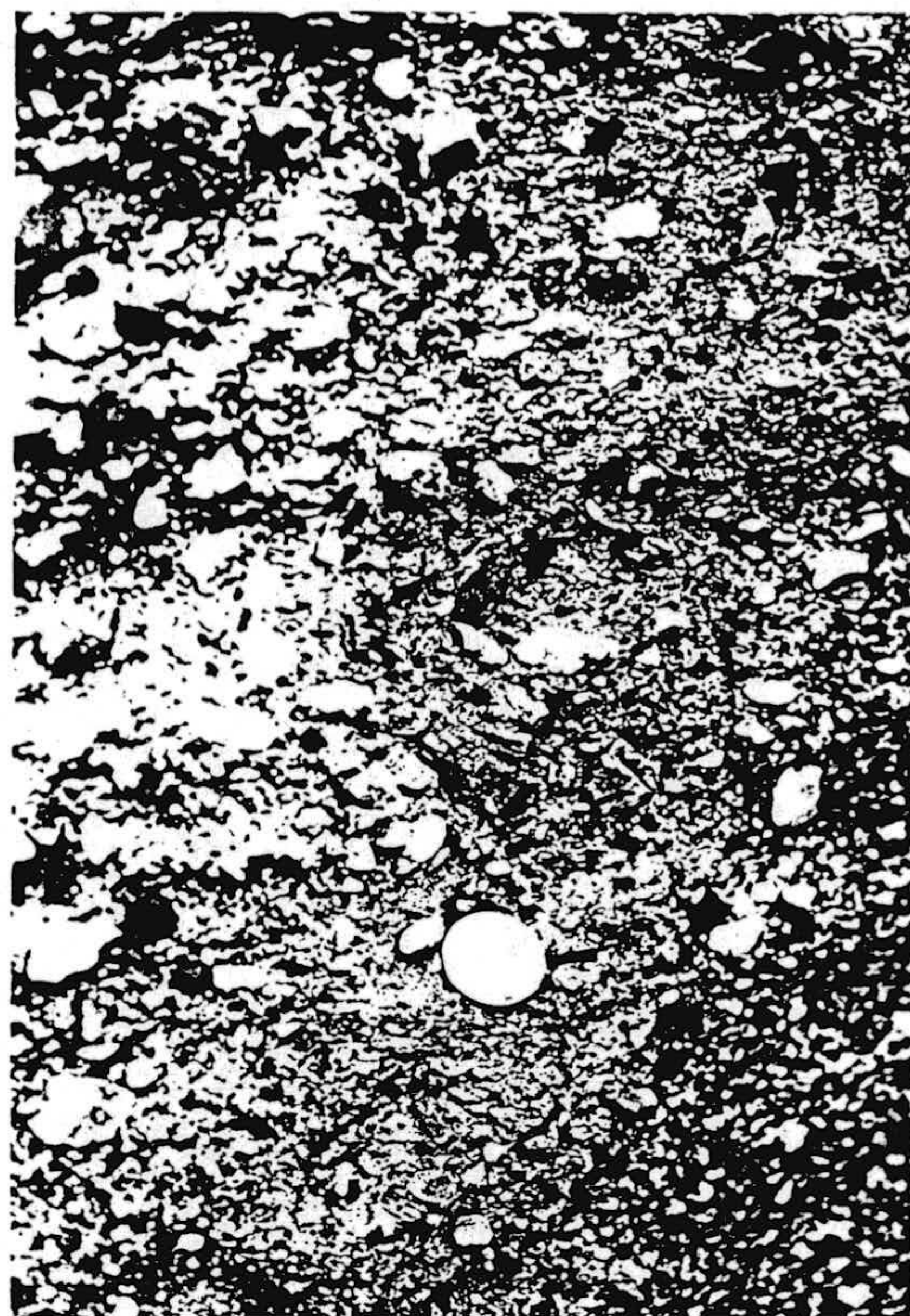


FOTO 31.- Pérdida total del revestimiento.



FOTO 32.- Aspecto de la fábrica de la Alcazaba Gidida.

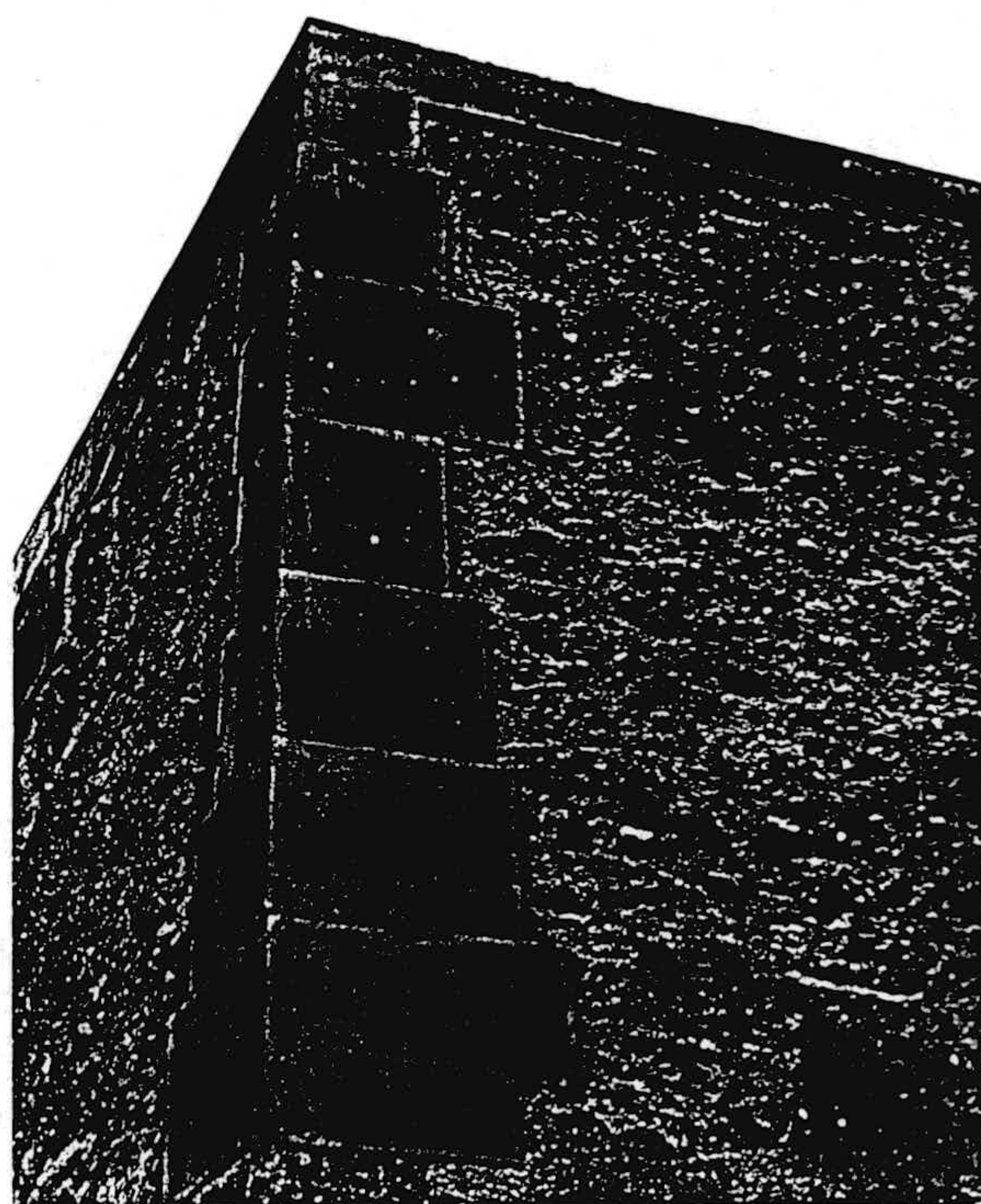


FOTO 33.- Aspecto de la fábrica de la Alcazaba Cadima.



FOTO 34.- Alcazaba Gidida (Muralla
cuesta de la Alhacaba).



FOTO 35.- Alcazaba Gidida. Torreón calle Guinea.



FOTO 36.- Arco Elvira.



FOTO 37.- Cerca de D. Gonzalo. Línea de
prolongación de las uniones.



FOTO 38.- Muralla San Antonio "parte Superior de coloración rojiza".

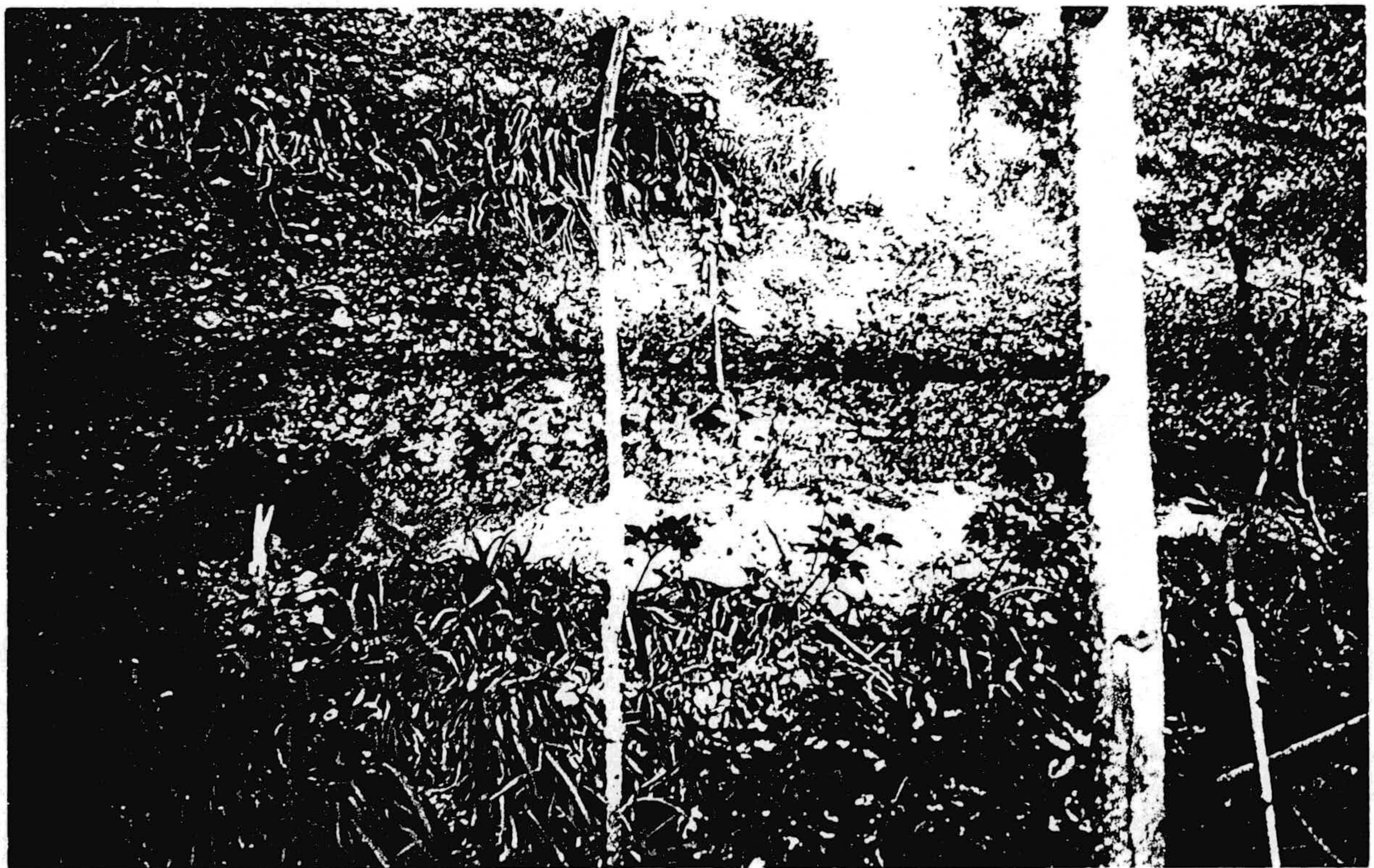


FOTO 39.- Muralla de San Antonio. "Parte inferior coloración rosada".

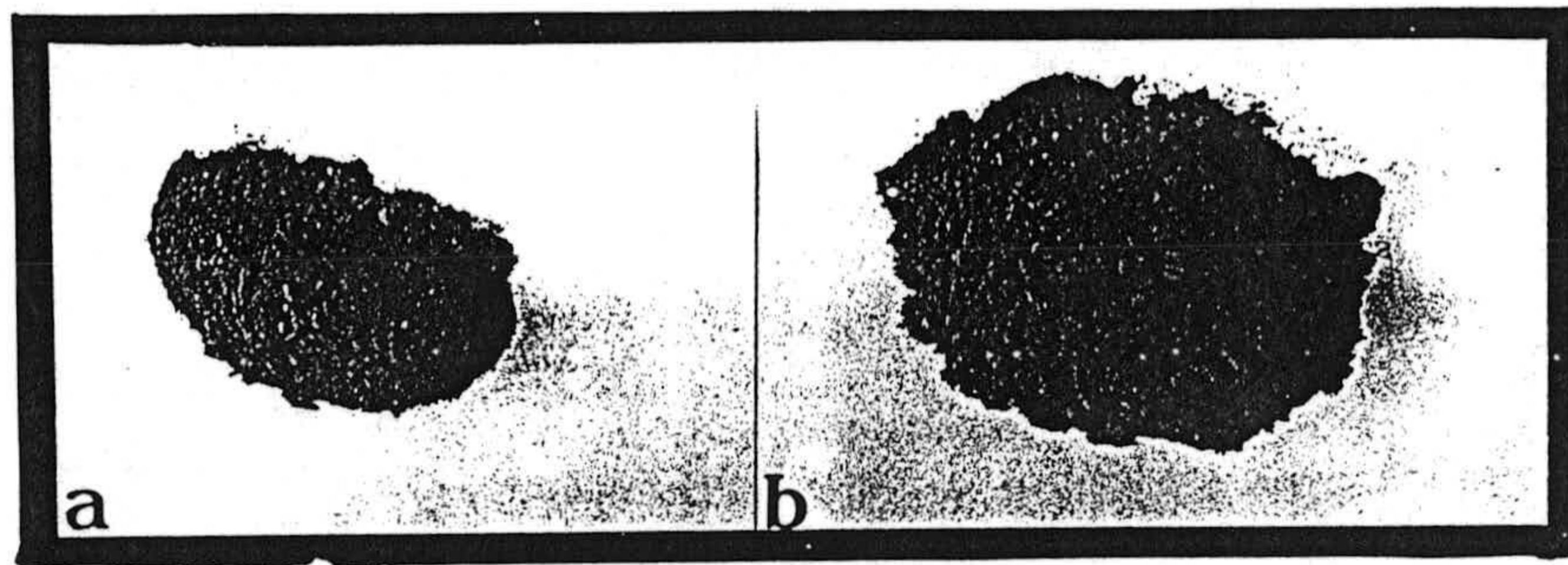


FOTO 40.- Tramos de San Antonio: a) Tramo inferior. b) Tramo superior.

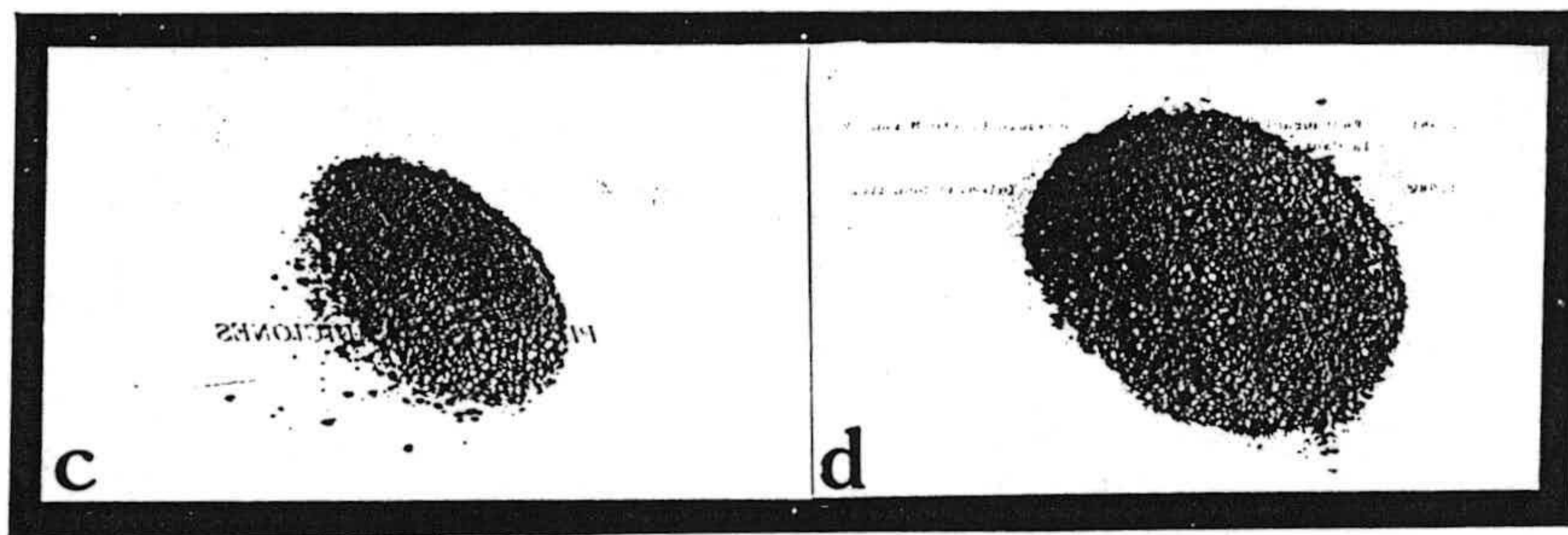


FOTO 41.- Tramo de S. Miguel - Cerca D. Gonzalo:
c) Puerta de Fajalauza. d) Cerca D. Gonzalo.

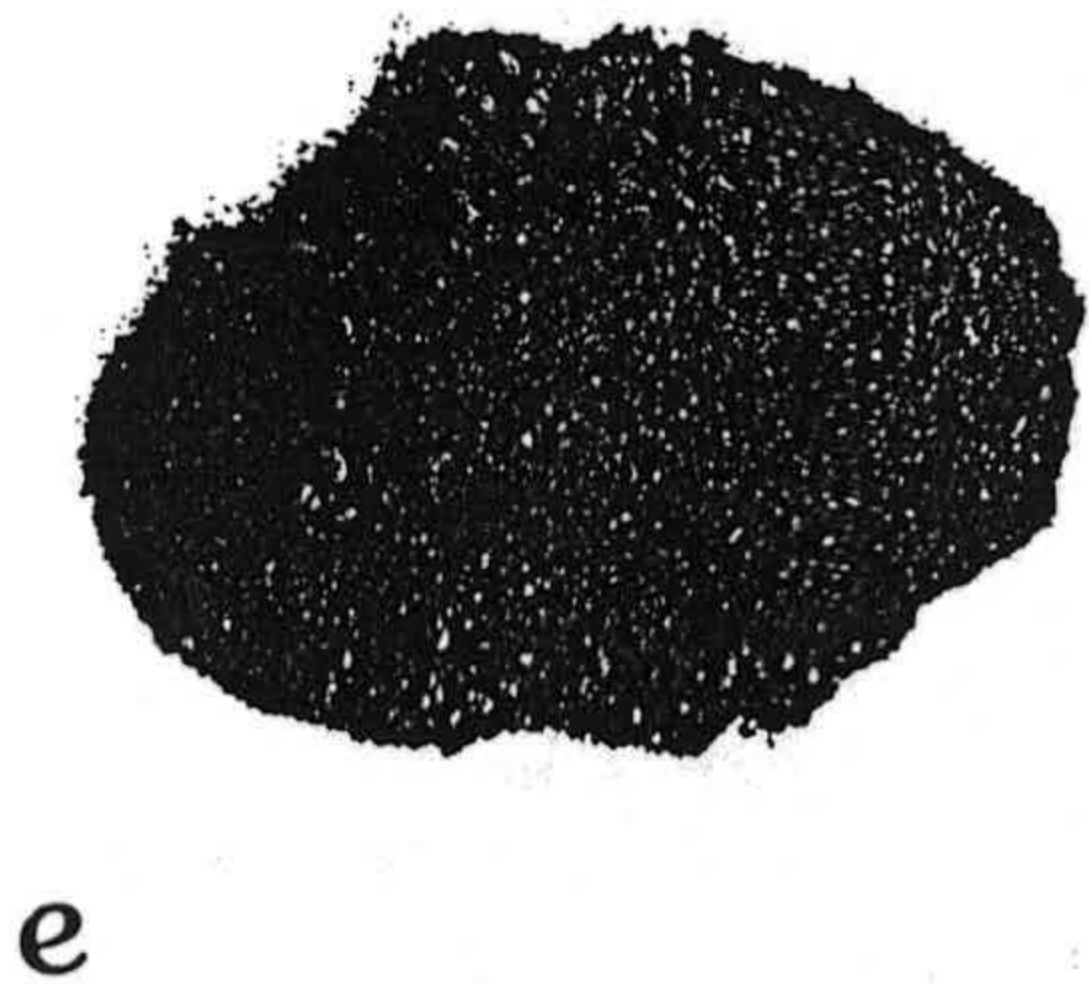


FOTO 42.- Arco Elvira.

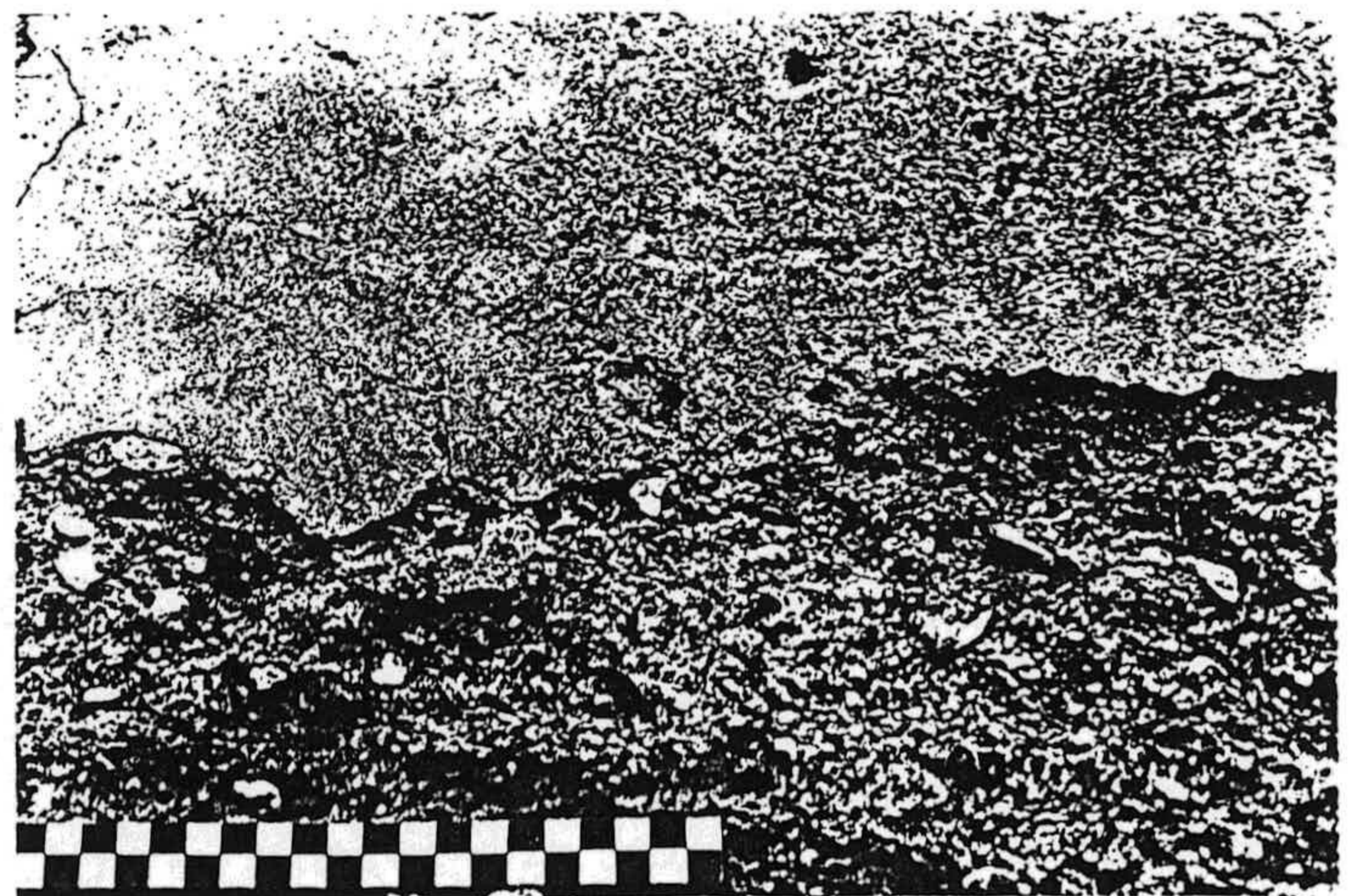


FOTO 43.- Revestimiento con Pátina.

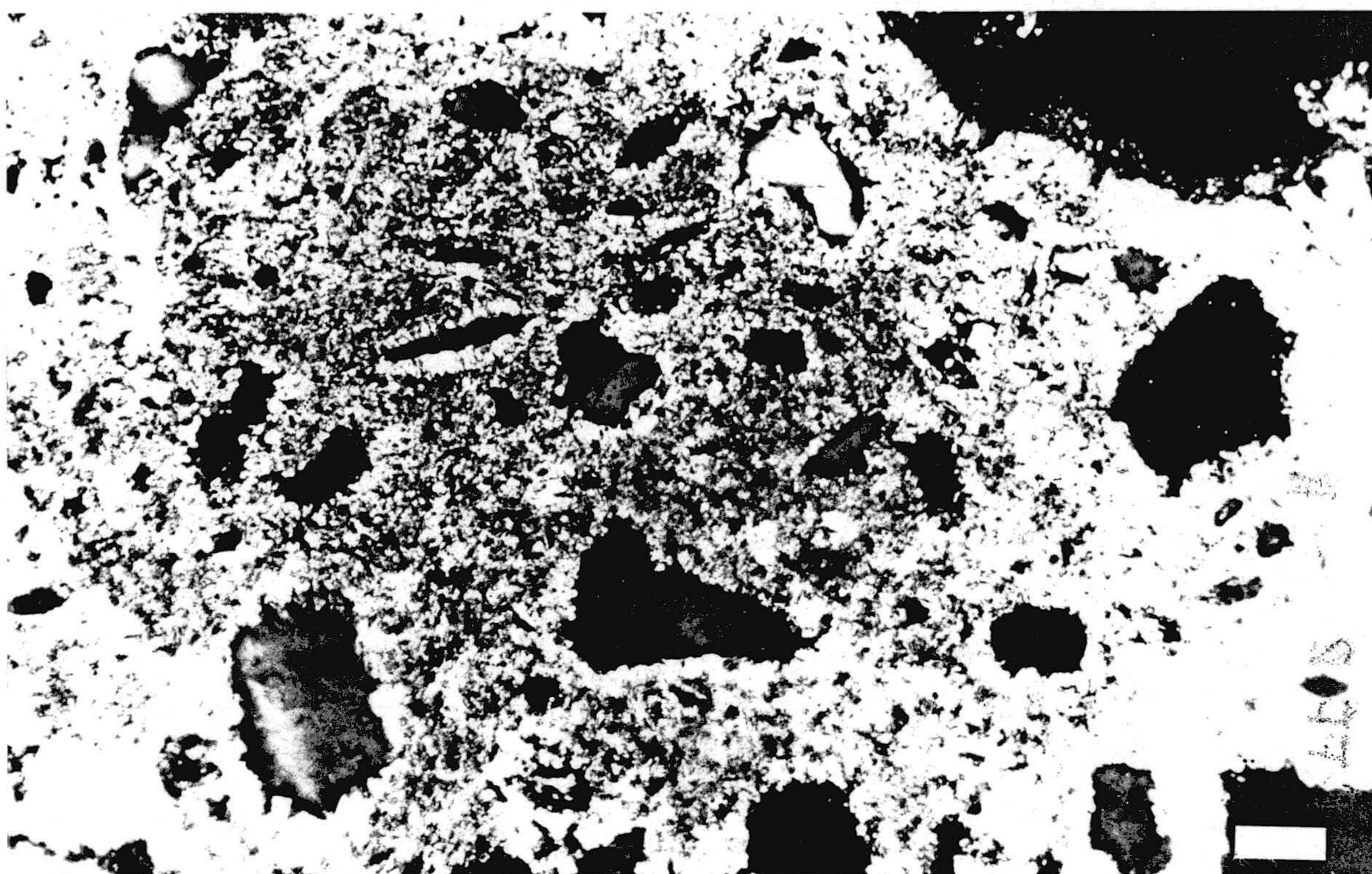


Foto 44. Recristalización del carbonato cálcico en los poros



Foto 45. Recristalización del carbonato cálcico en fisuras.

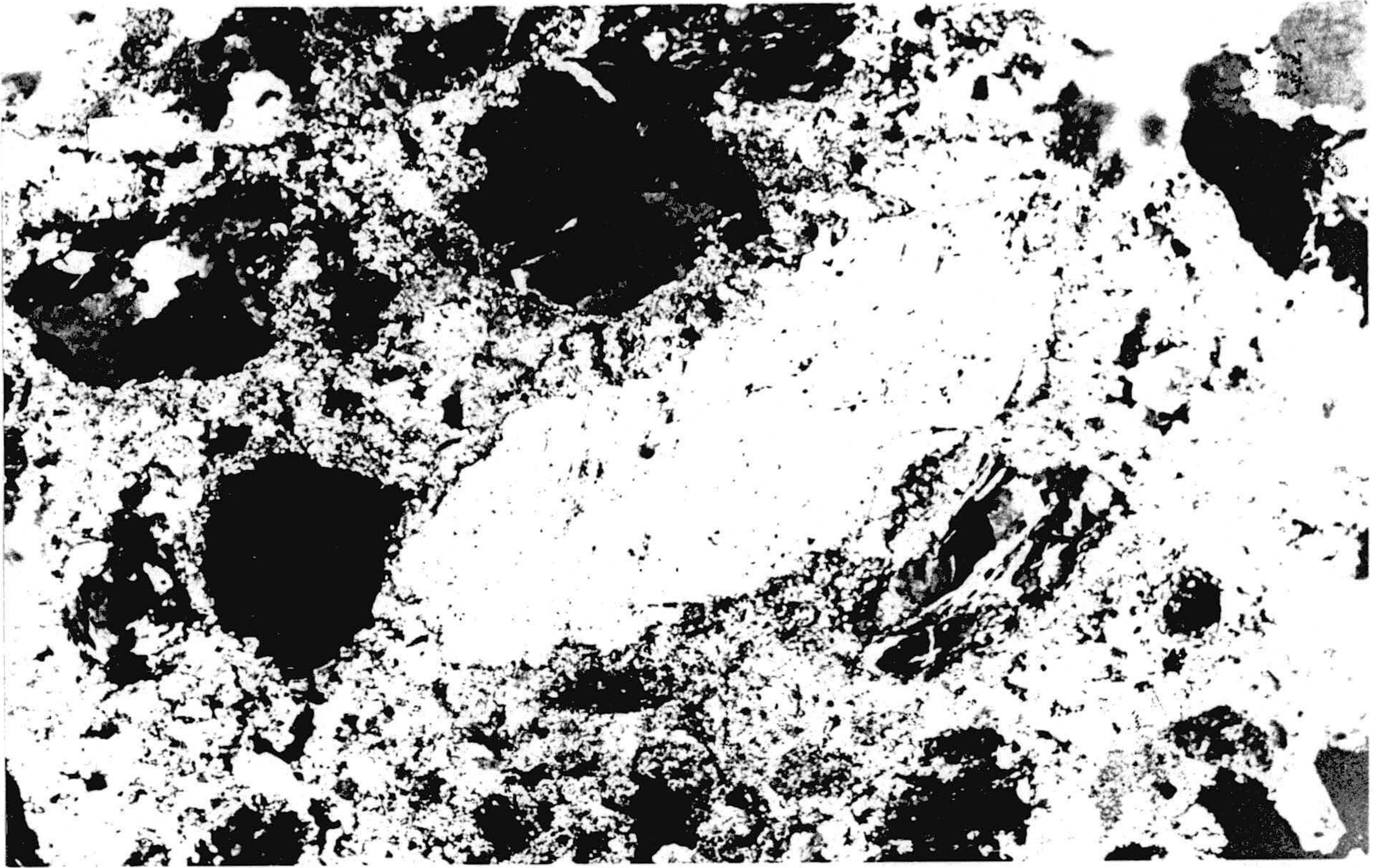


Foto 46. Poros colmatados por recristalizaciones de calcita.

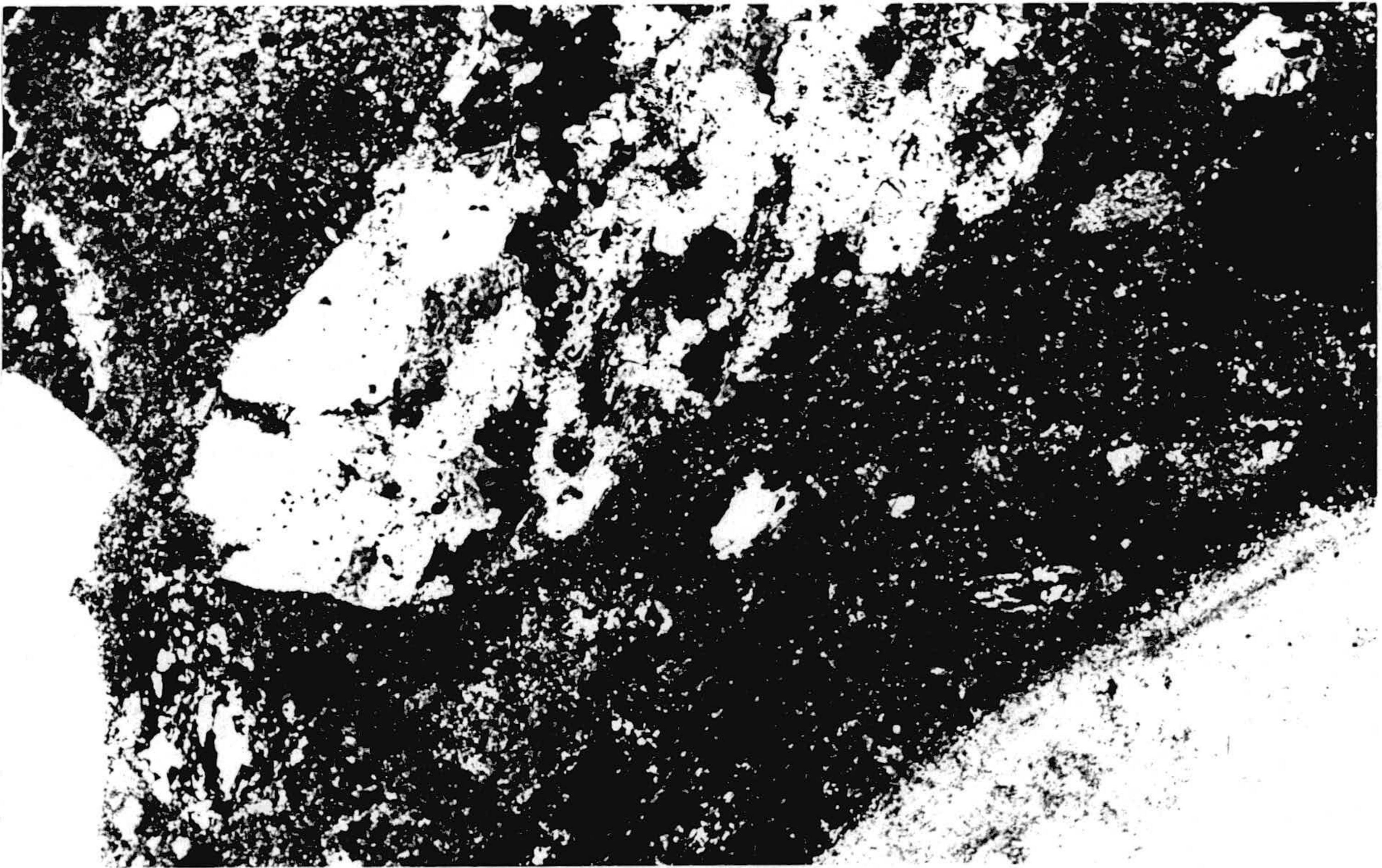


Foto 47. Crecimientos syntaxiales de calcita.

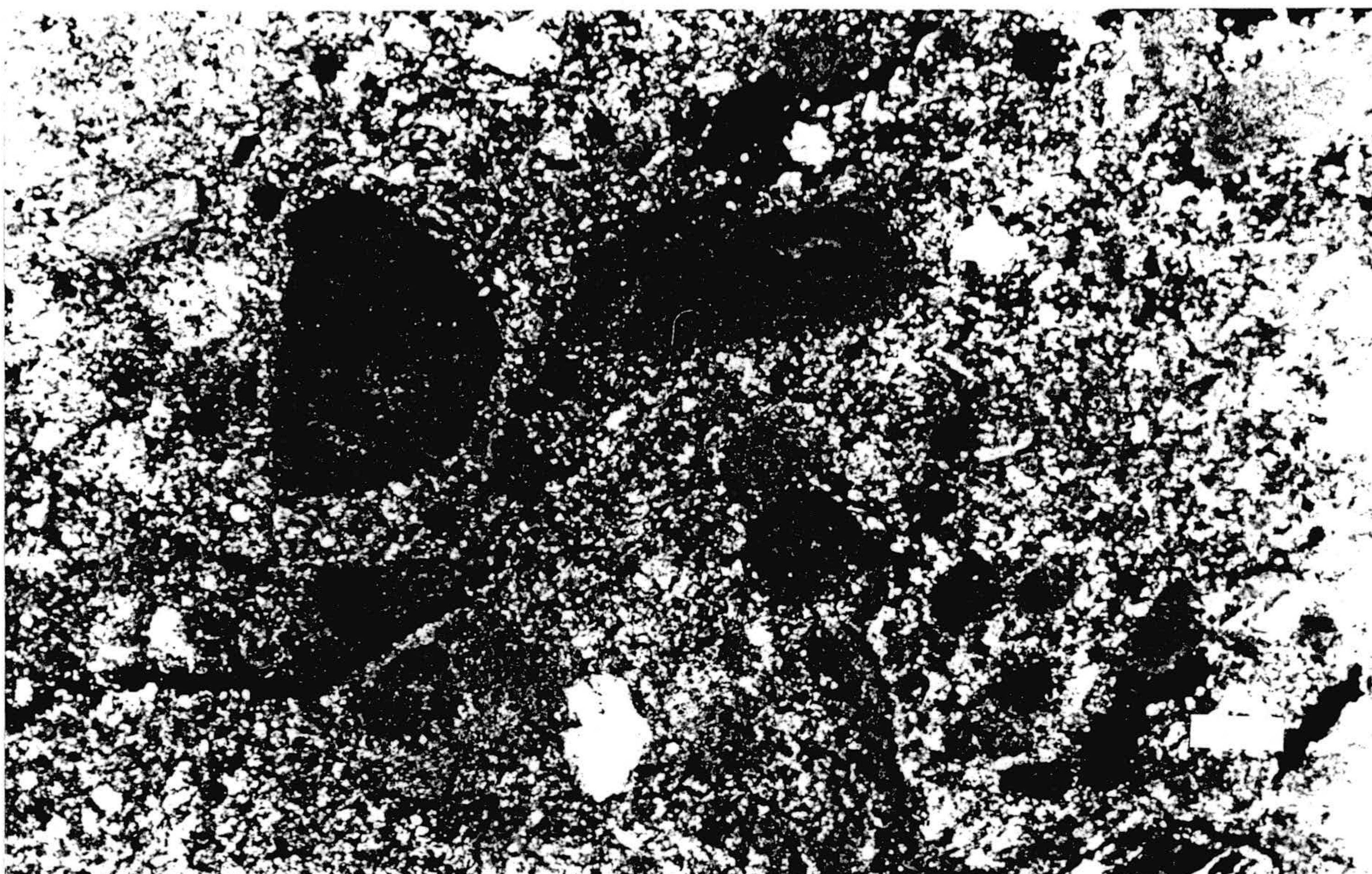


Foto 48. Núcleos o "inclusiones" de cal dentro de la pasta.

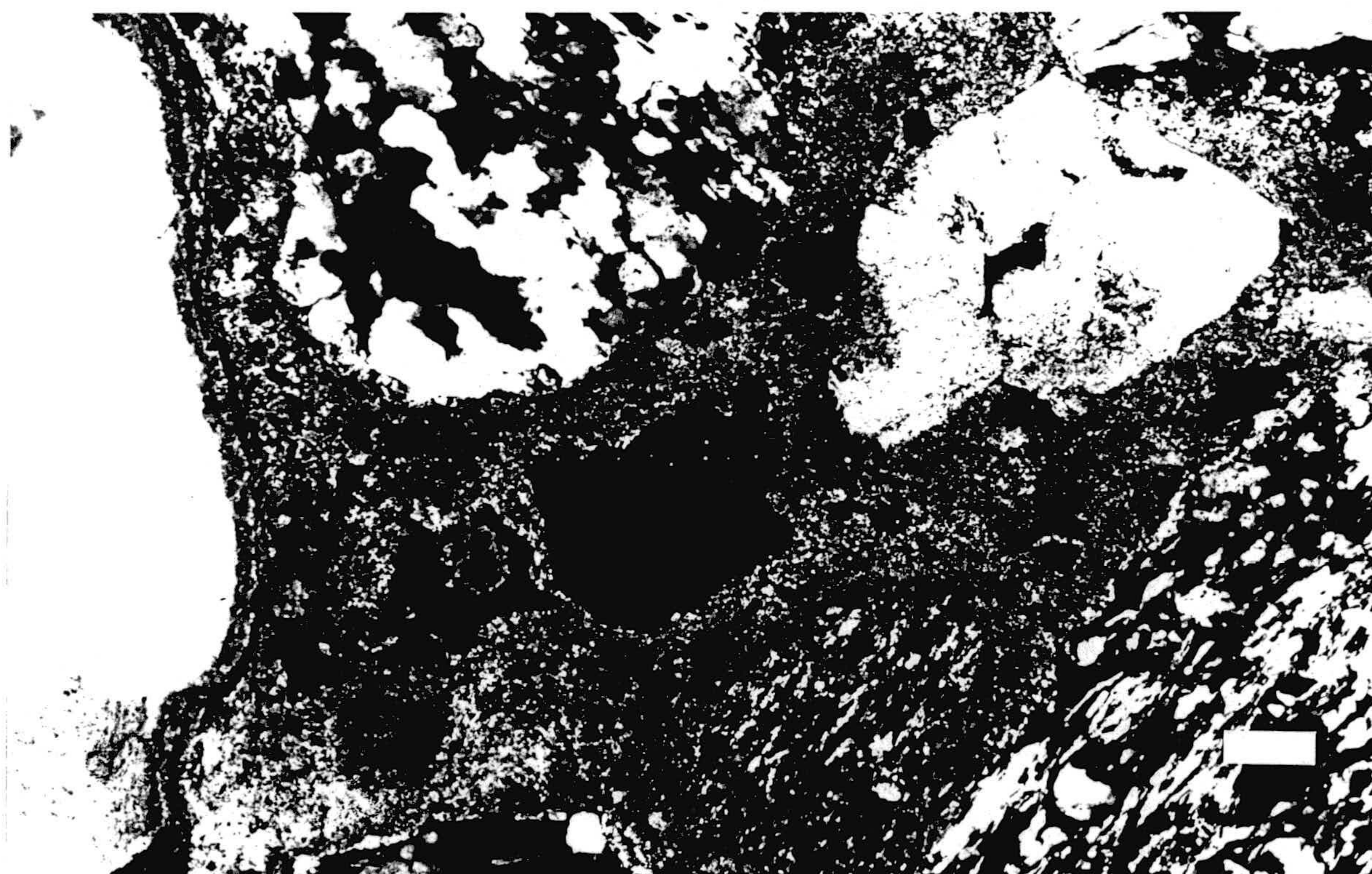


Foto 49. Naturaleza de los distintos áridos.

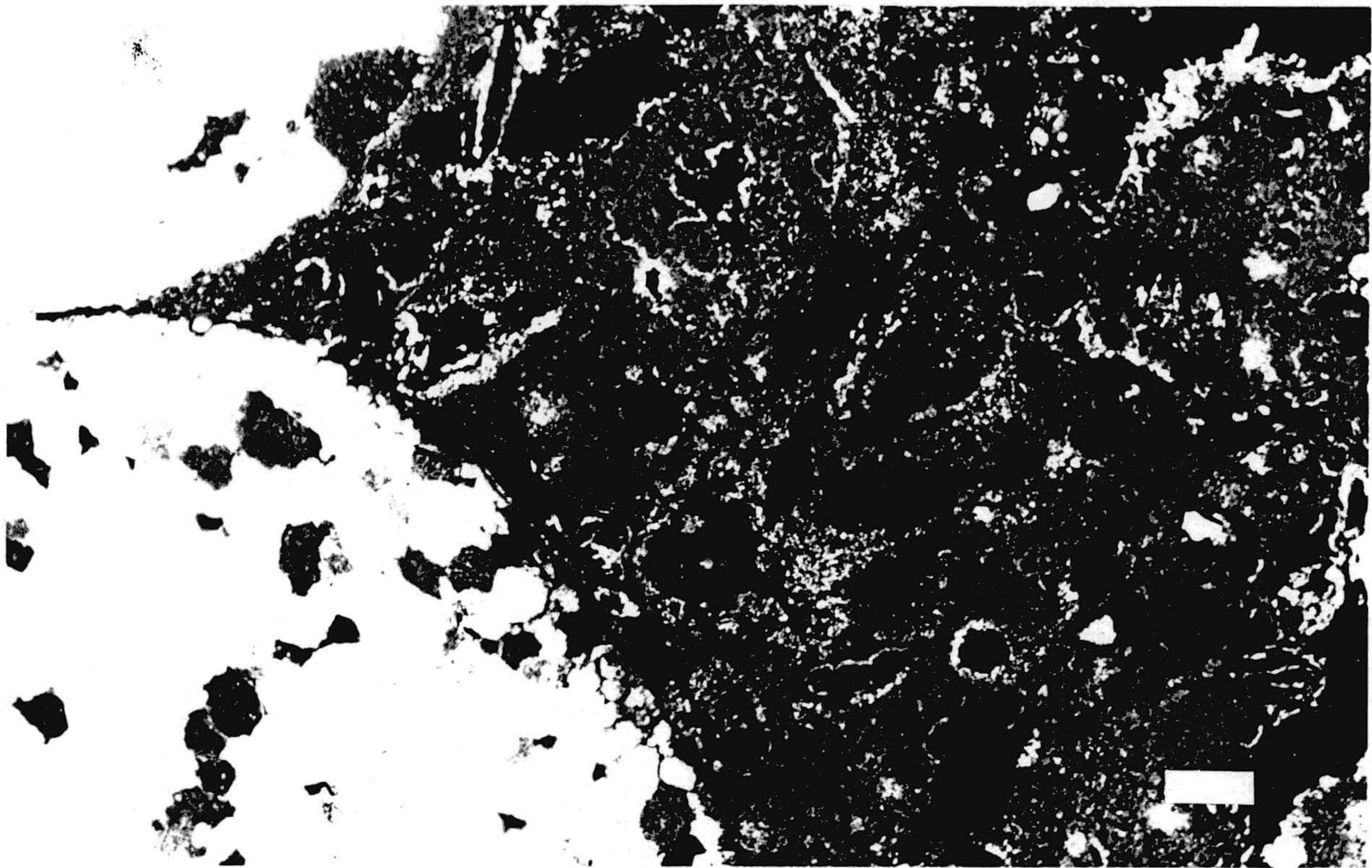


Foto 50. Procesos de reactividad en los bordes más externos de un cristal de dolomita.

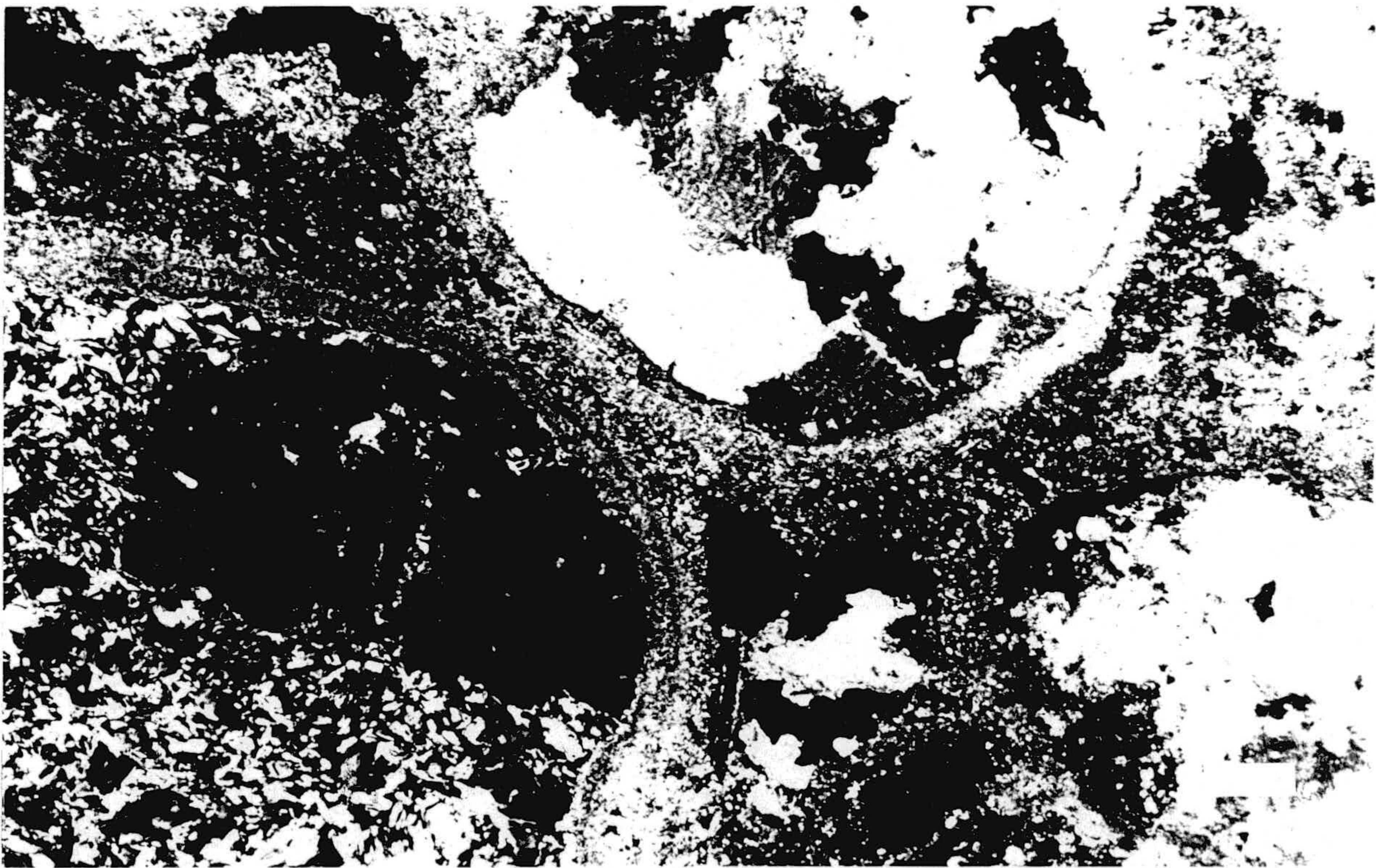


Foto 51. Desarrollo de halos de recristalización de calcita alrededor de un cristal de dolomita. Los cristales crecen perpendicularmente a los bordes de estos.

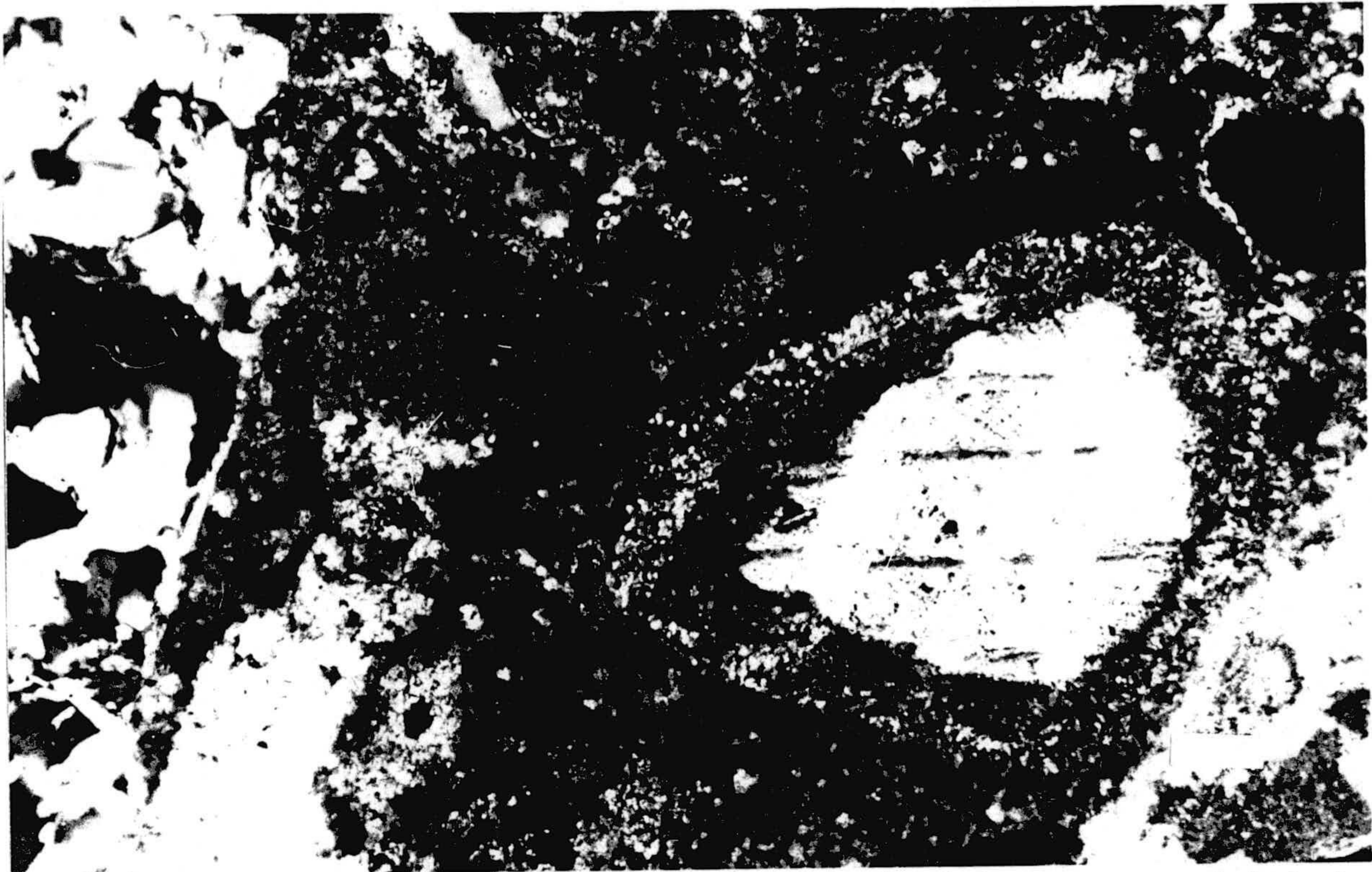


Foto 52. Desarrollo de un halo de reacción alrededor de un cristal de dolomita alterado en ambiente alcalino.

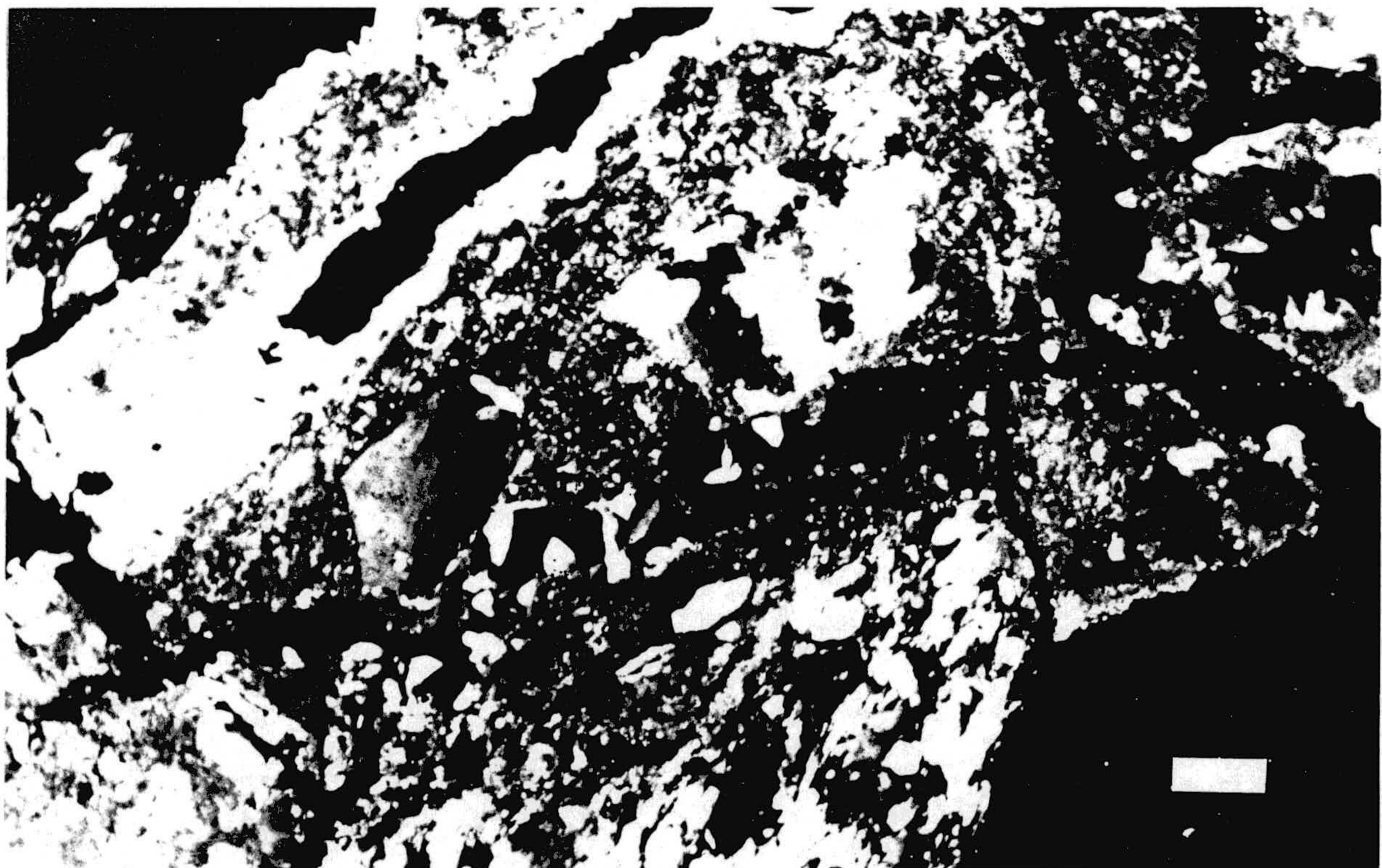


Foto 53. Desarrollo de cristales de yeso de alteración perpendicularmente a la superficie de las fracturas.

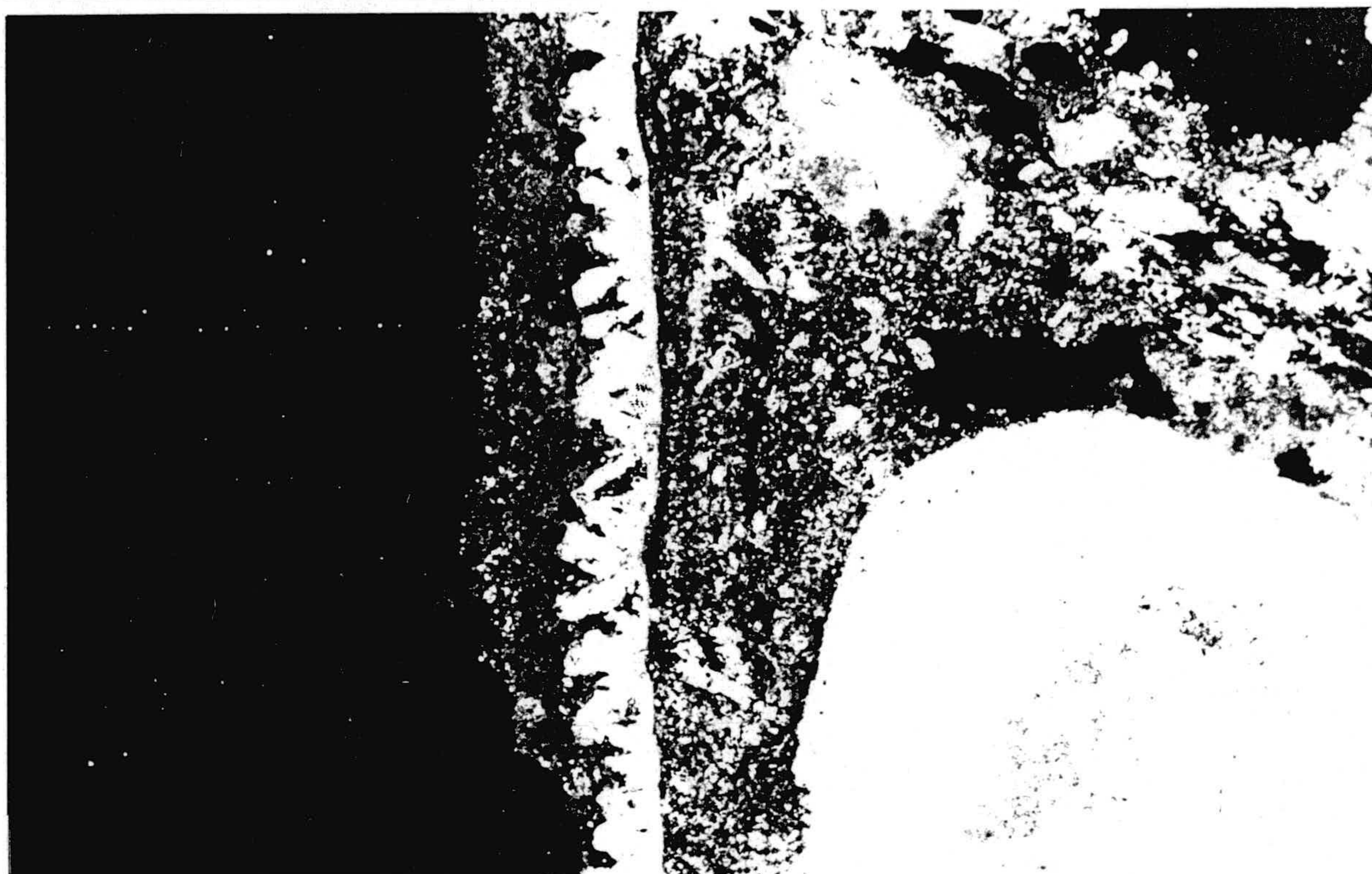


Foto 55 Aspecto que presentan al microscopio óptico la capa más superficial de los revestimientos.

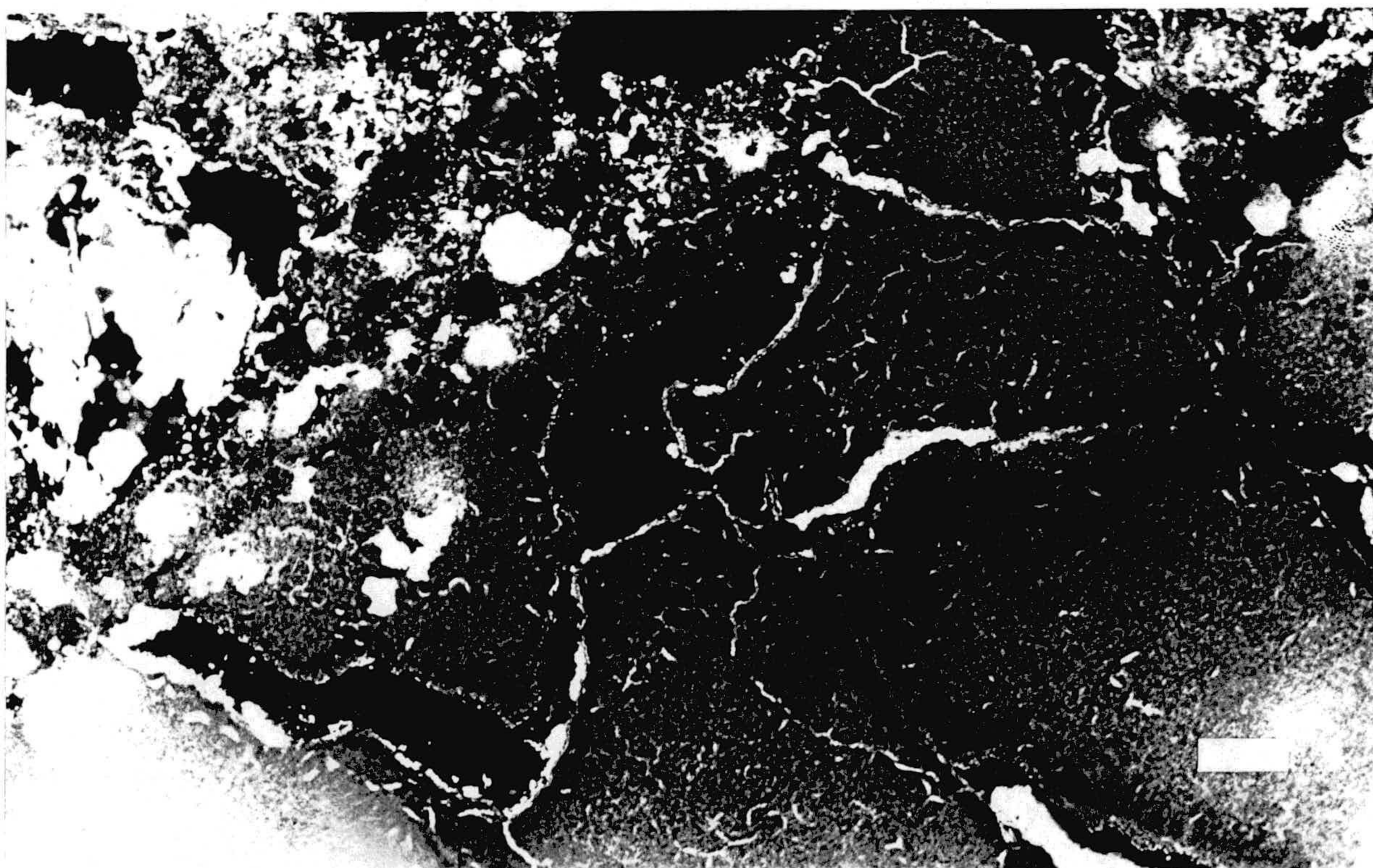


Foto 54. Desarrollo de retracción en las zonas donde el árido se encuentra en muy poca proporción.

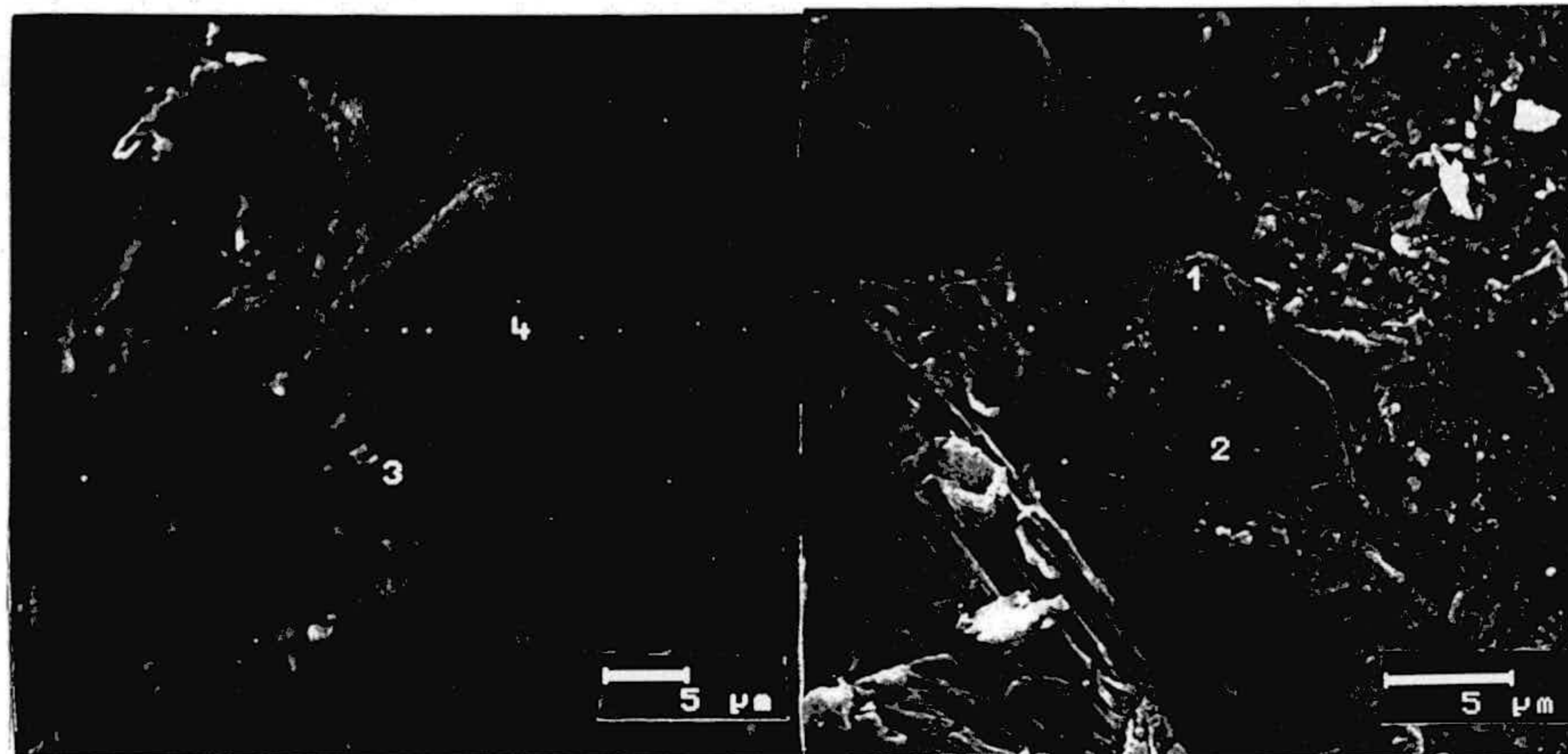


Foto 56. En esta microfotografía se observa un cristal de feldspato y dolomita atacado en sus bordes por una solución rica Ca.

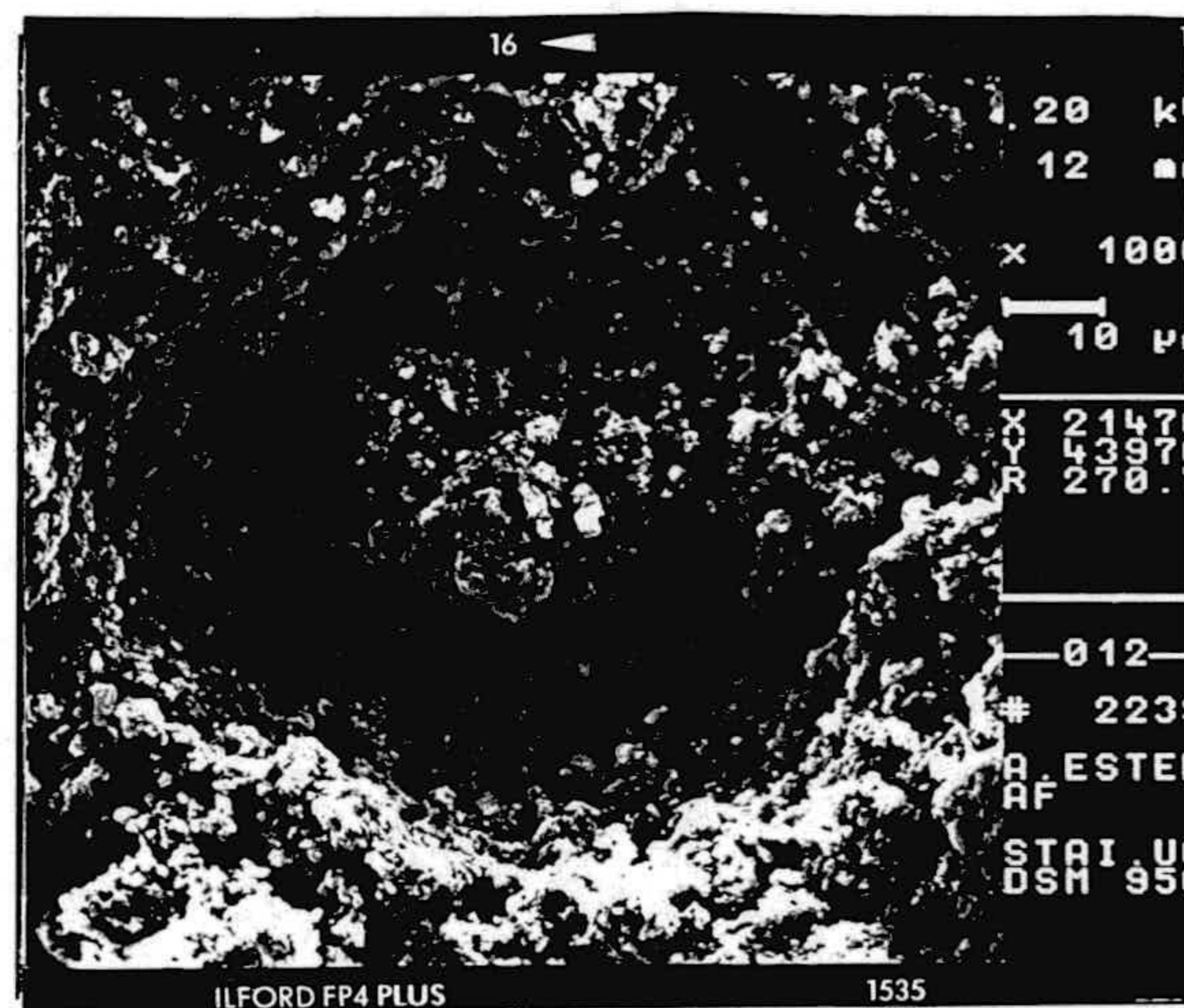
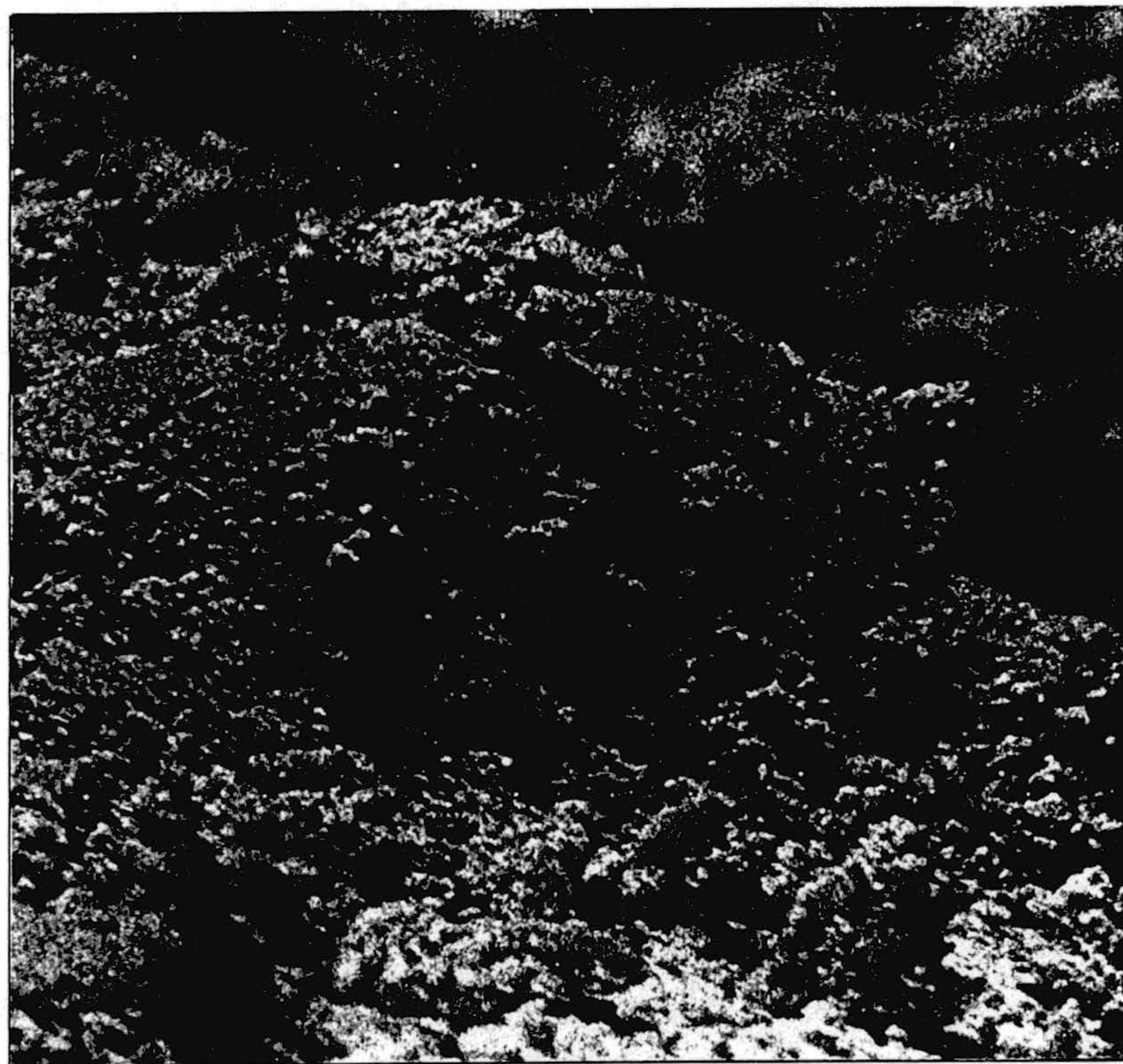
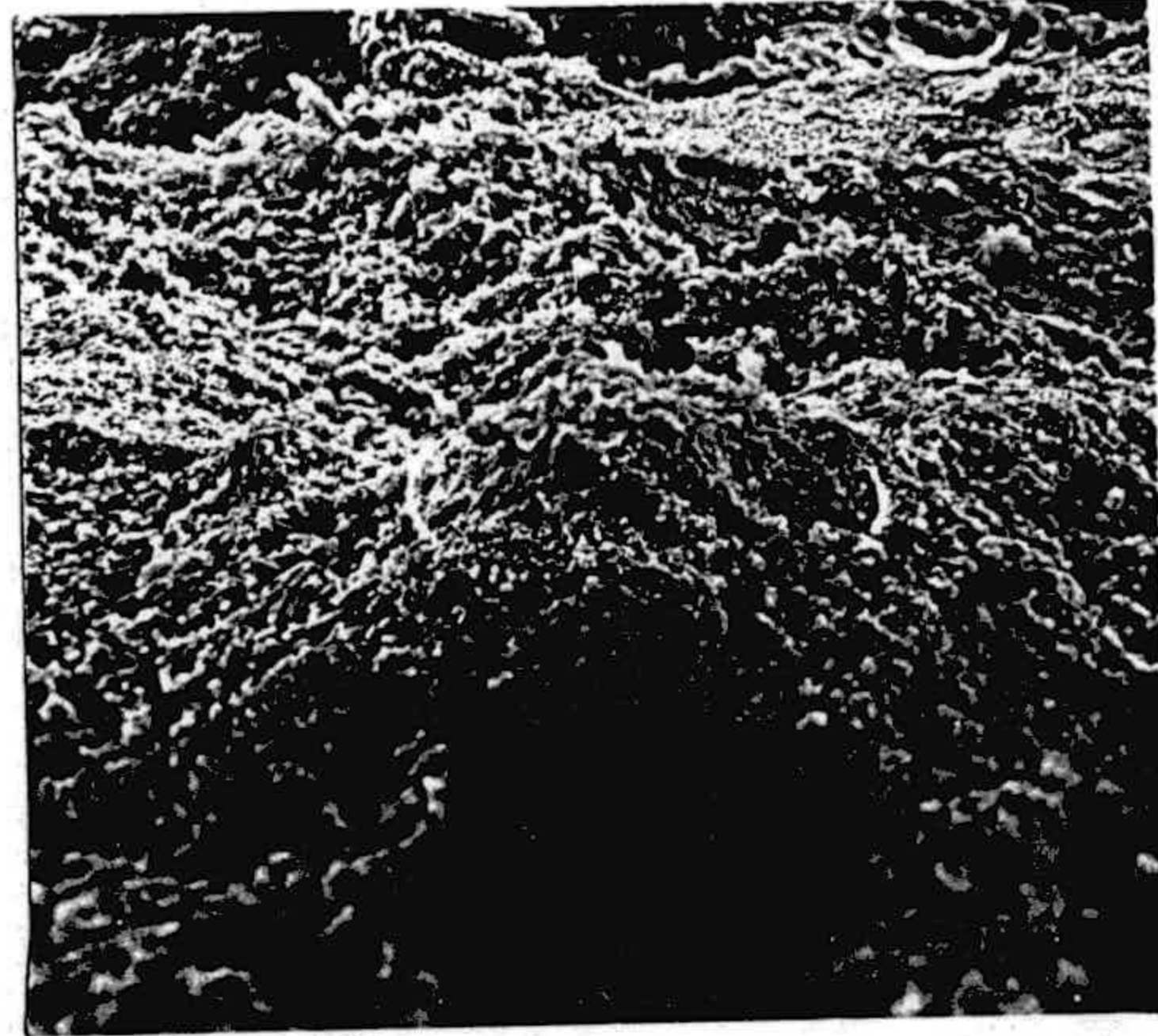


Foto 57. Cristales de portlandita recientemente formada.



Ftp 58. Desarrollo de geles alrededor de los áridos, tapizando su superficie.

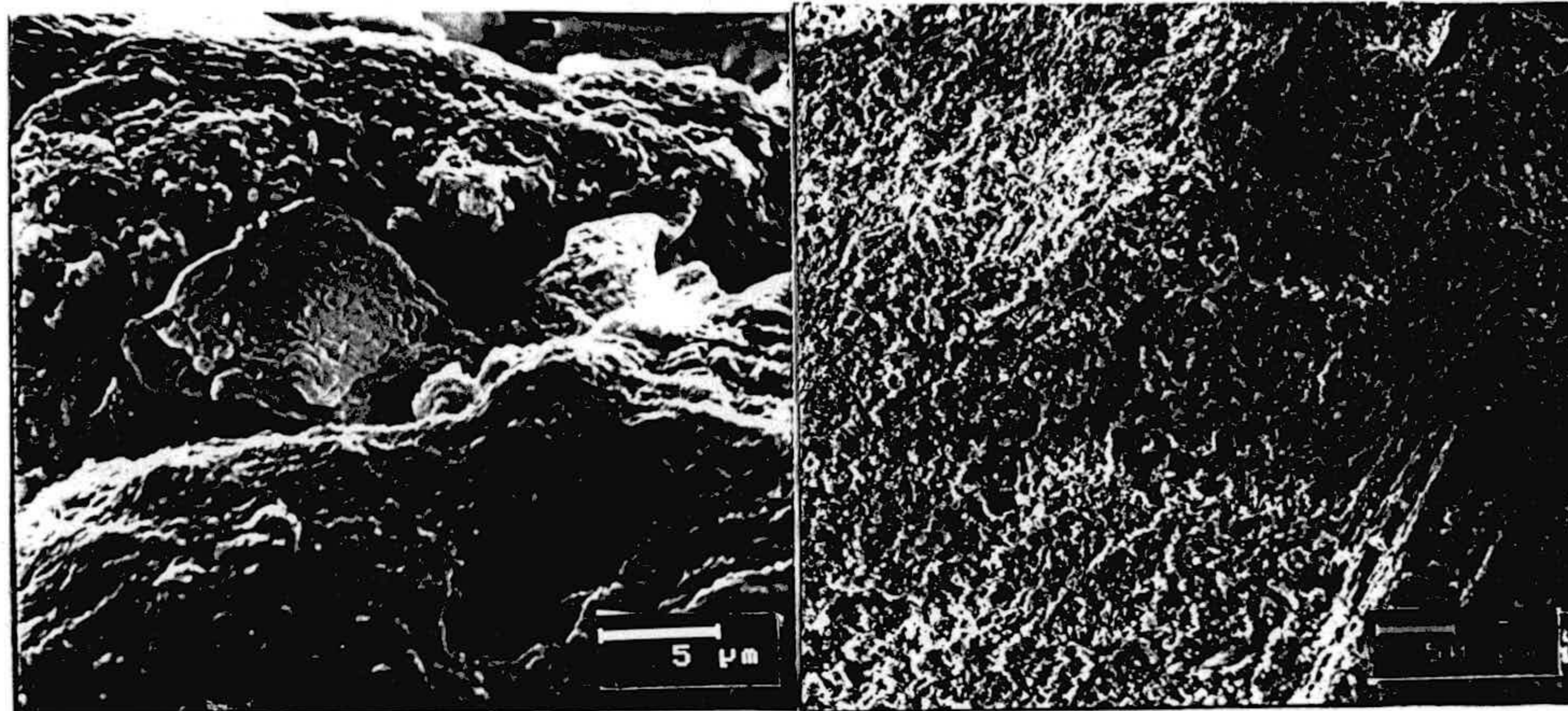


Foto 59. Geles tipo "amorfo" (de aspecto masivo).



Foto 60. Geles Cristalinos (ceolitas).

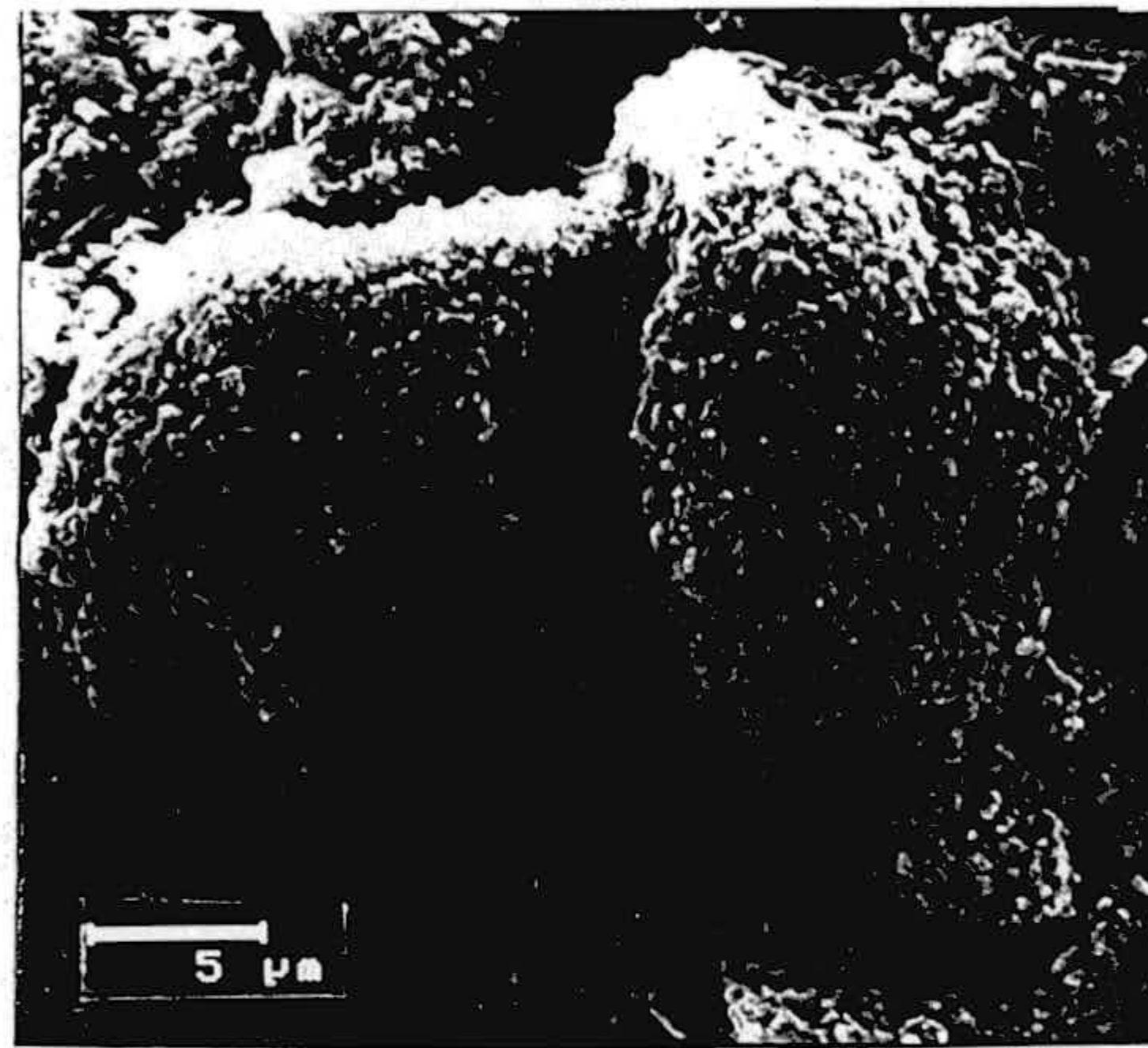


Foto 61. Geles «amorfo».

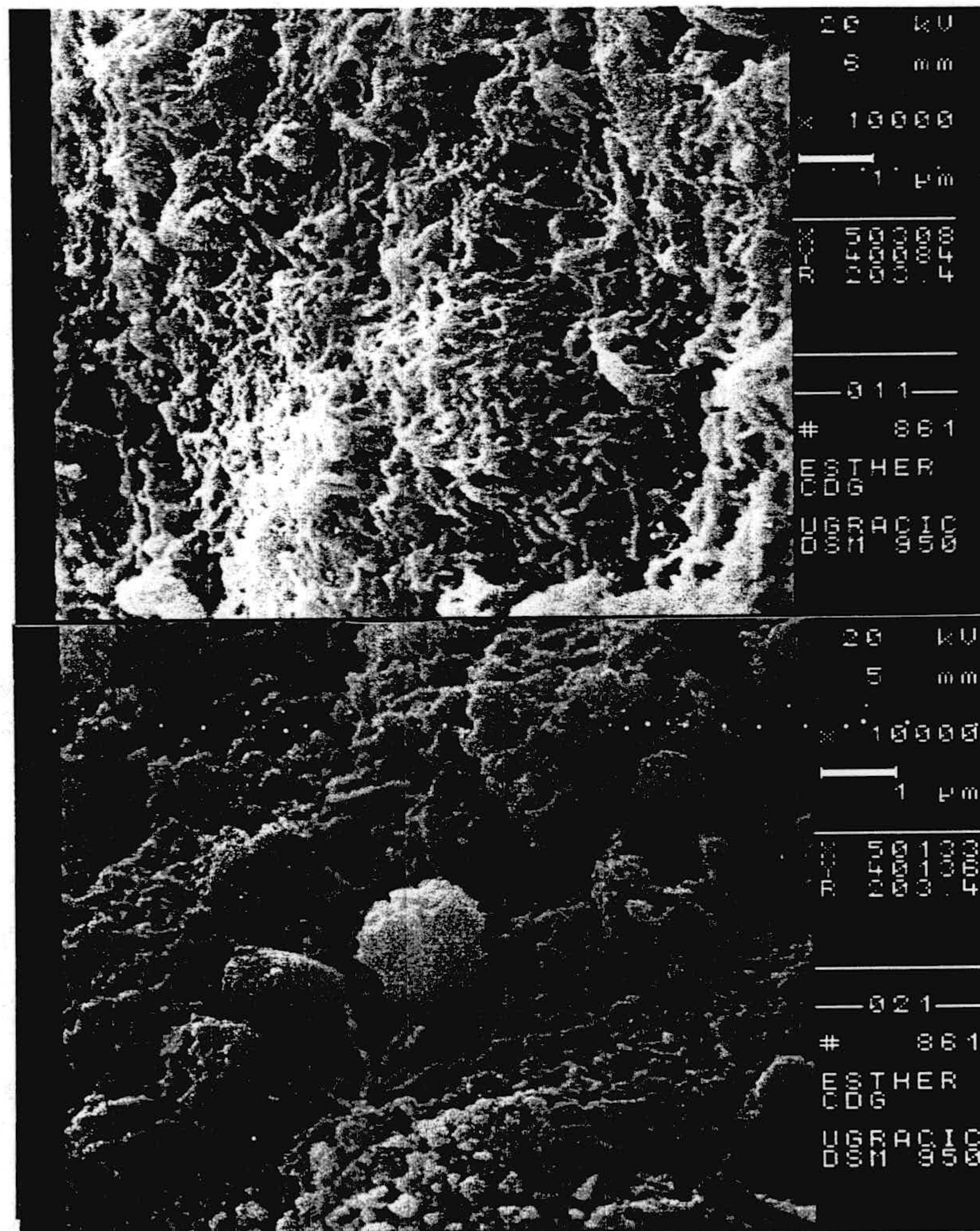


Foto 62. Geles masivos «amorfo».

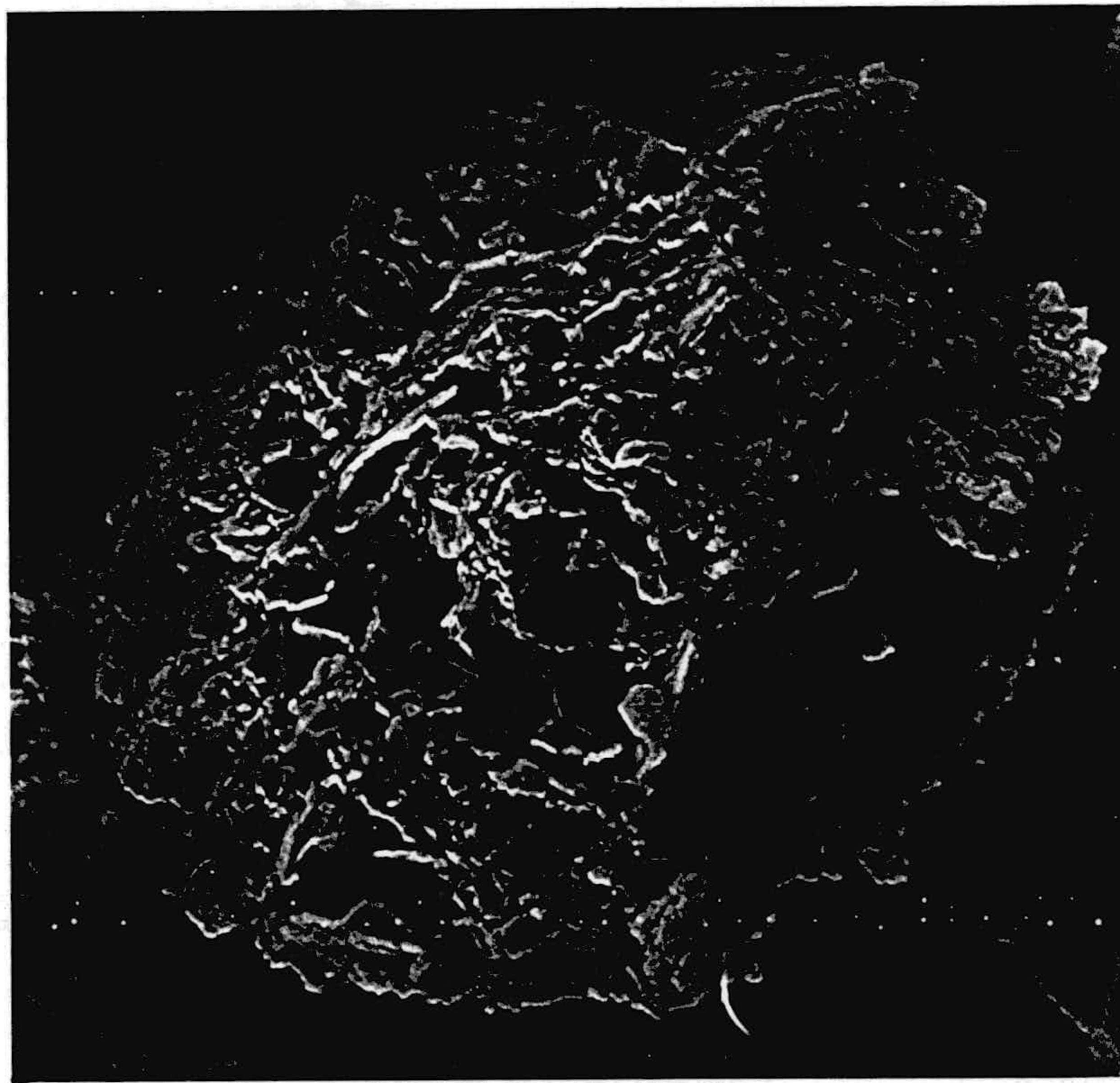
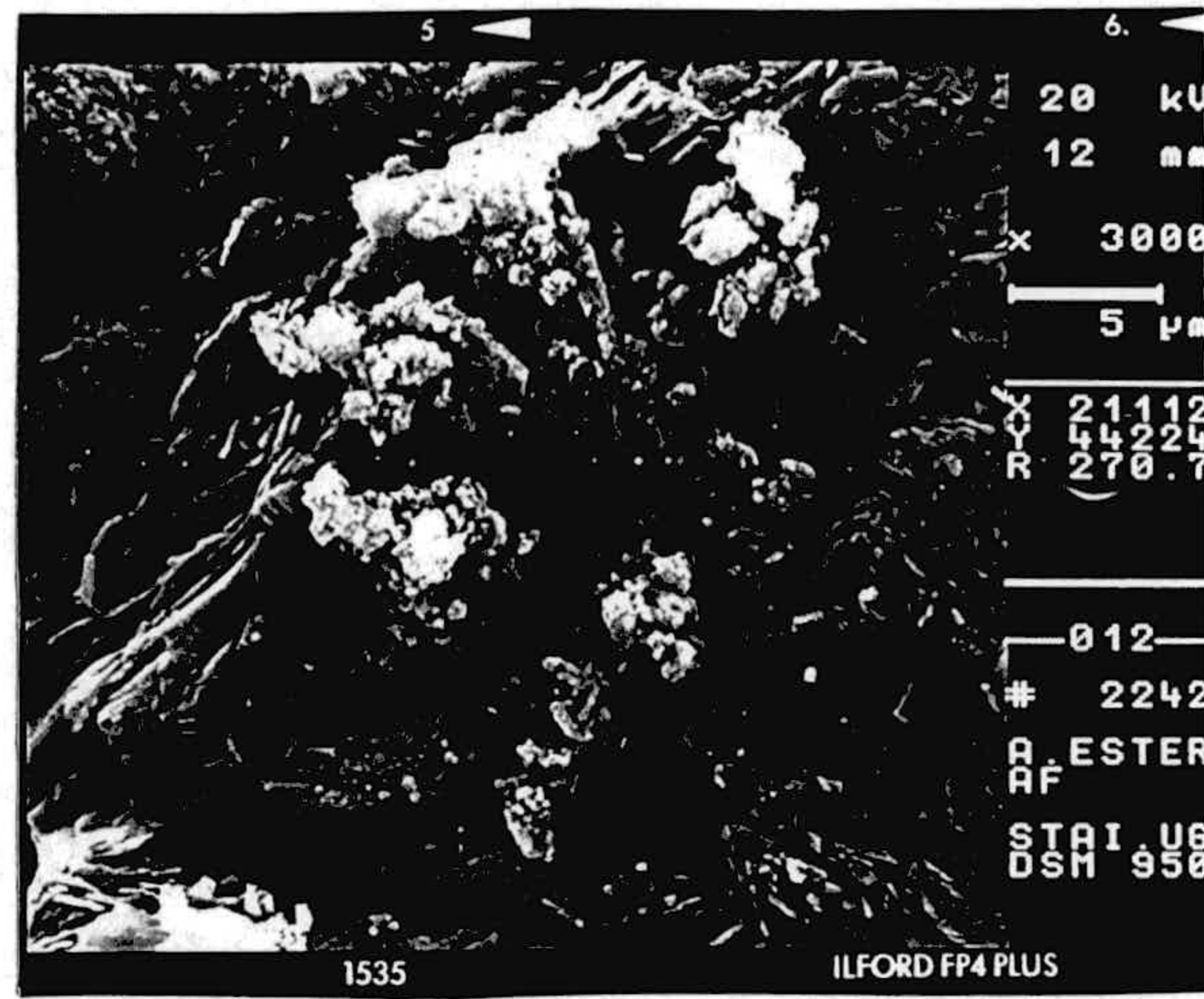


Foto 63. Desarrollo de geles cristalinos tipo espada «ceolitas».

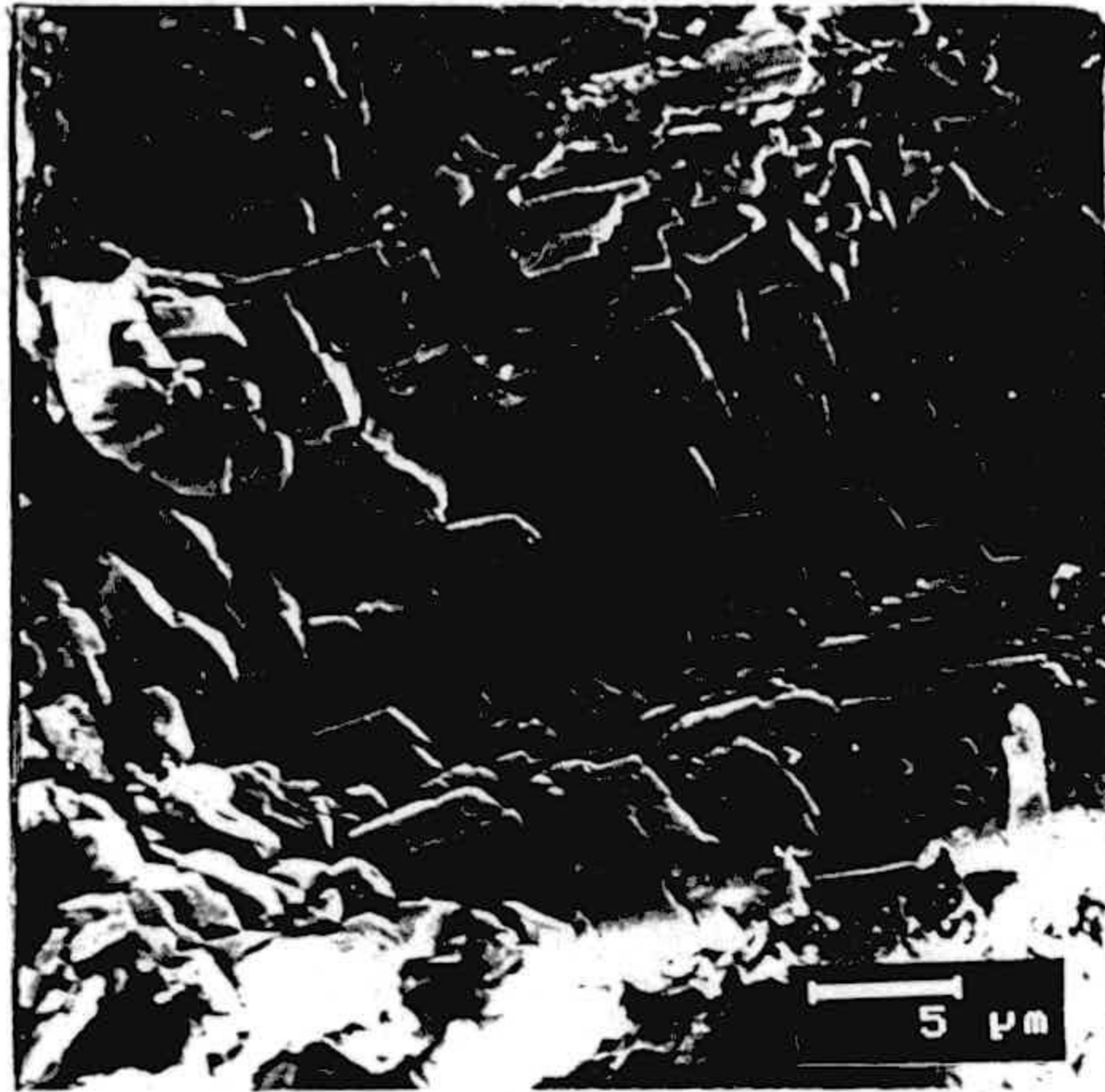


Foto 64. Yeso tabular que ha crecido en la superficie.

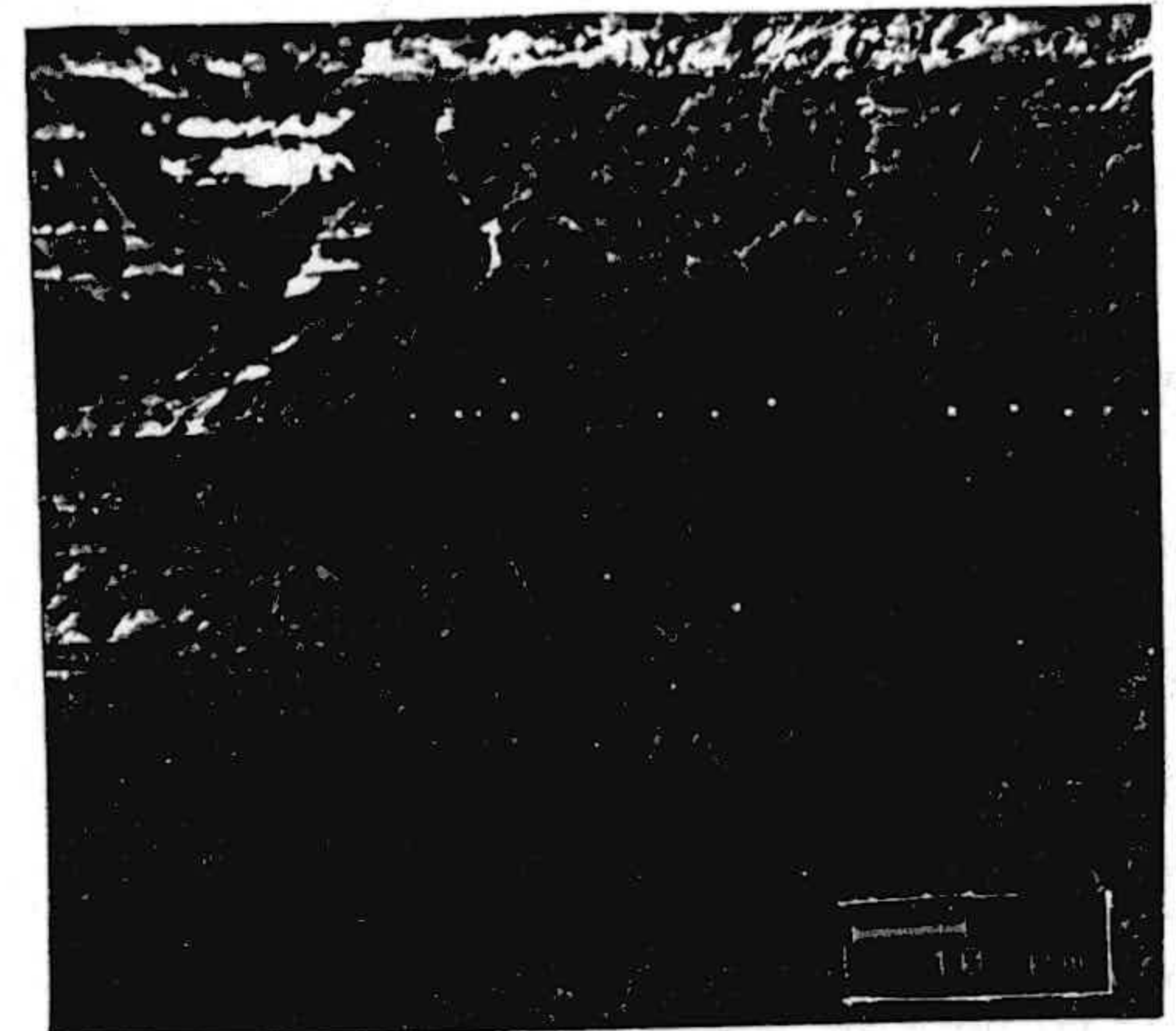


Foto 65. Yeso acicular recrecido en el interior.

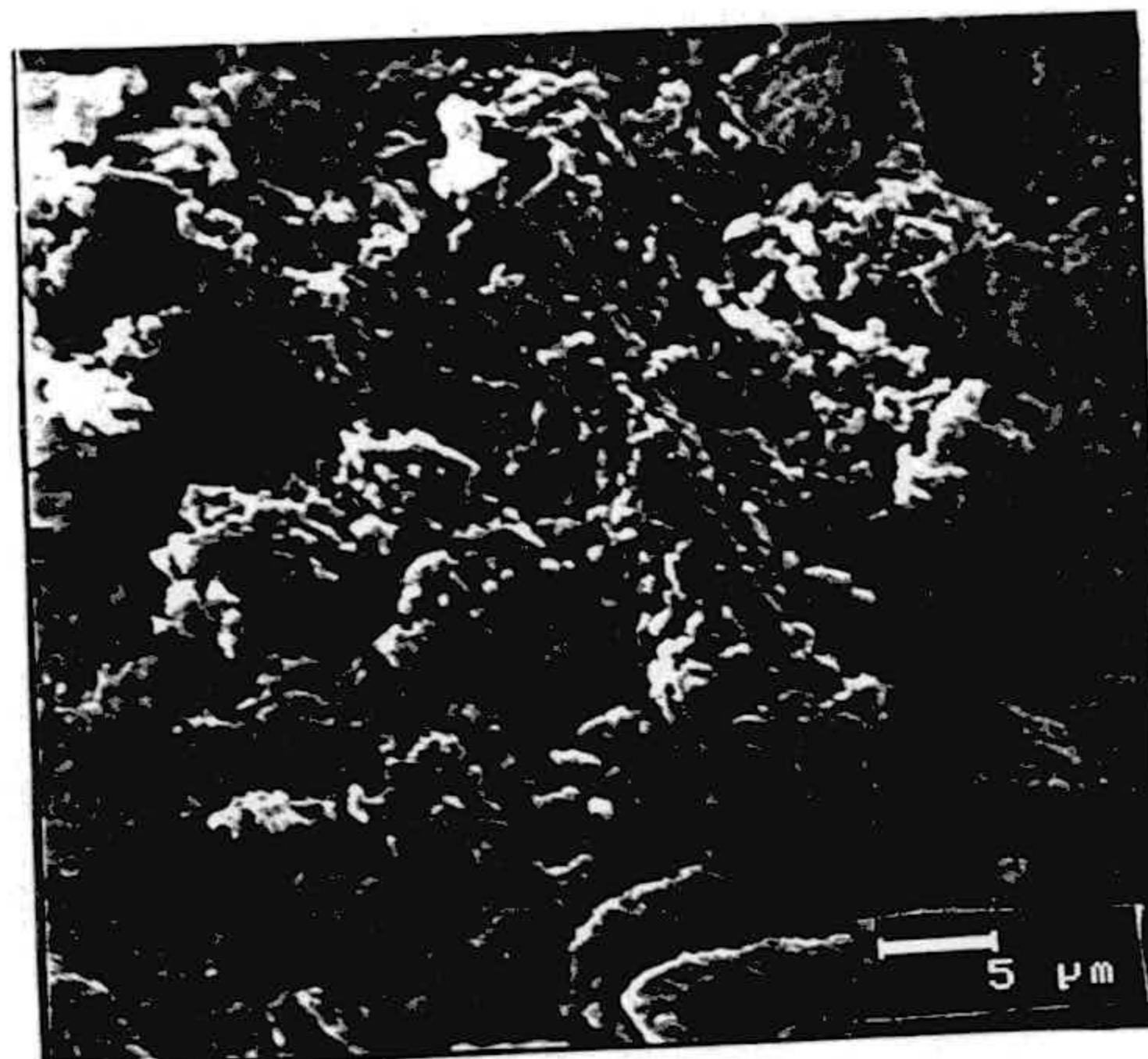


Foto 66. Crecimiento de yeso en el interior adaptándose a los huecos existentes de forma arbitraria.

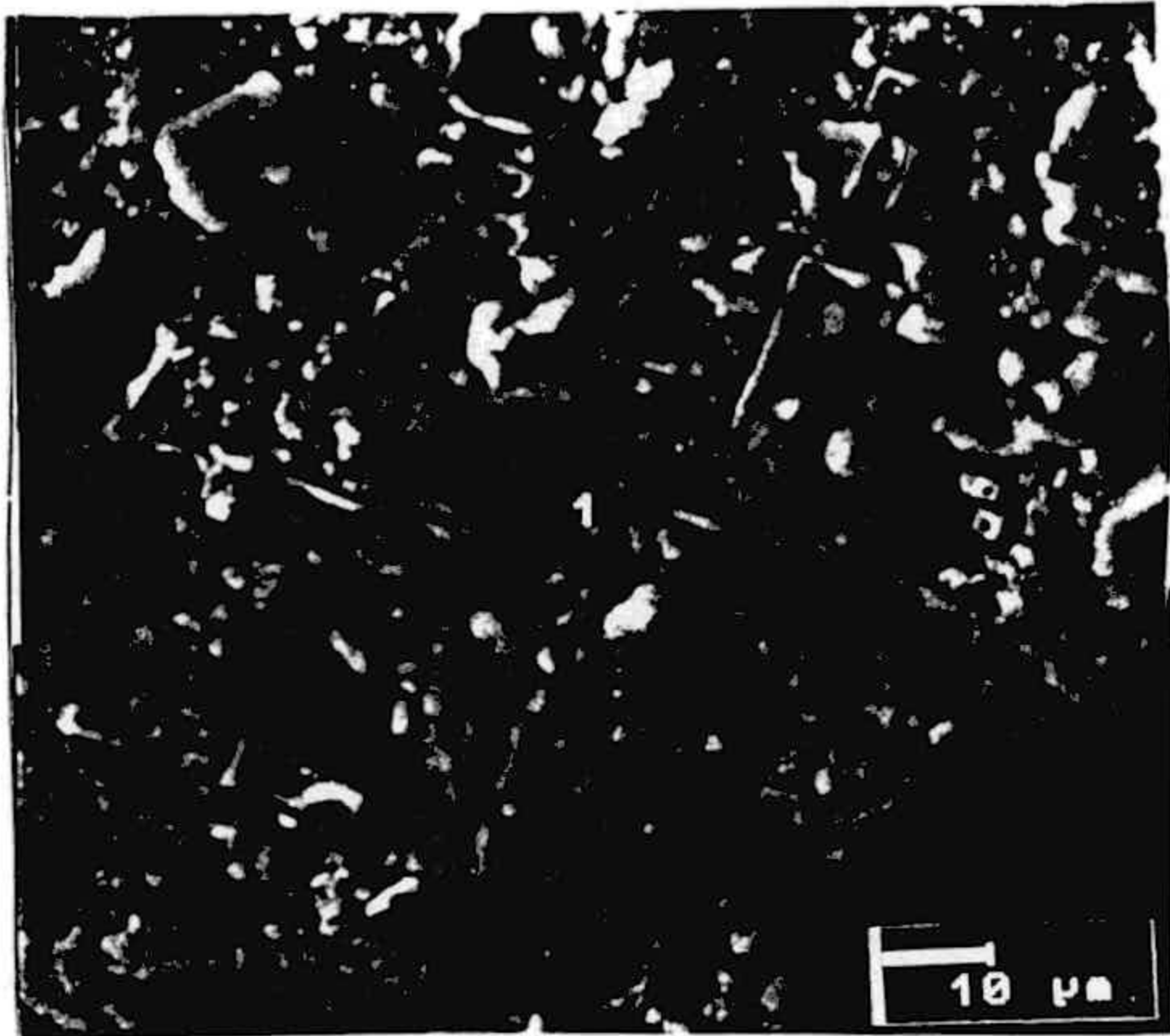


Foto 67. Cristales de cloruros.

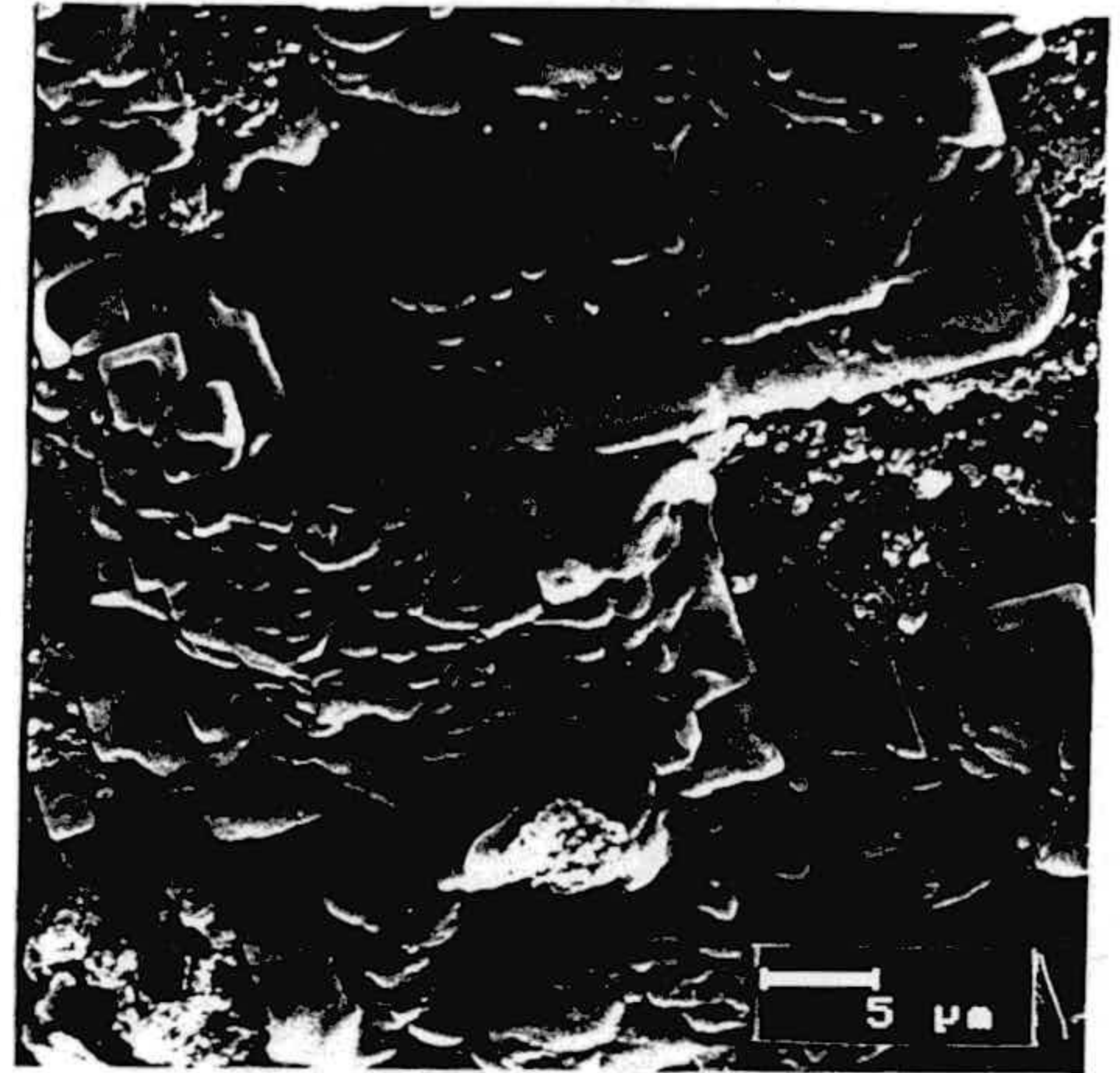


Foto 68. Ampliación de la foto 67.



Foto 69. Desarrollo de cristales de halita.



Foto 70. Ampliación de la foto 69.

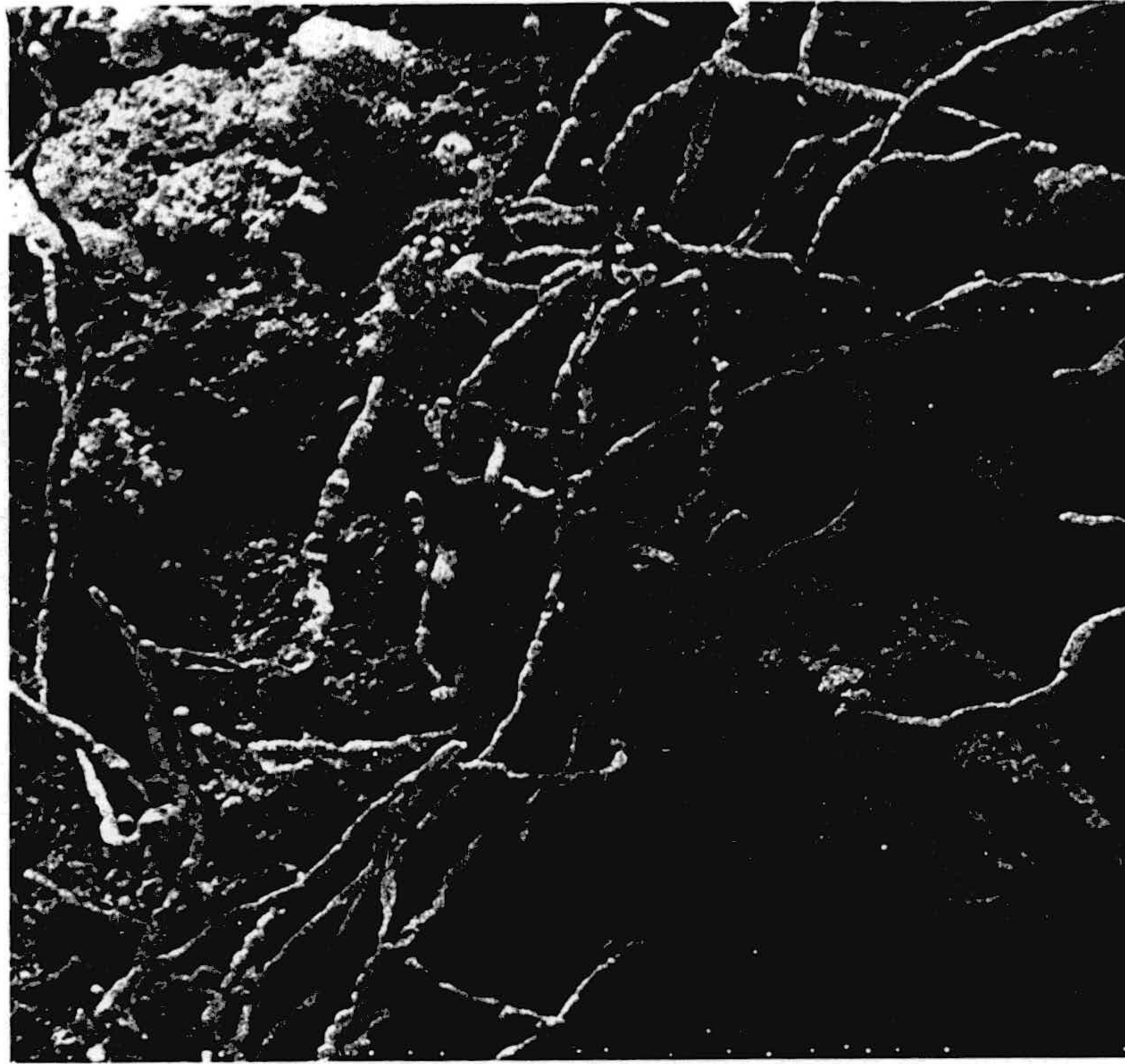


Foto 71. Desarrollo de hongos en el seno del hormigón (Alcazaba Cadima).

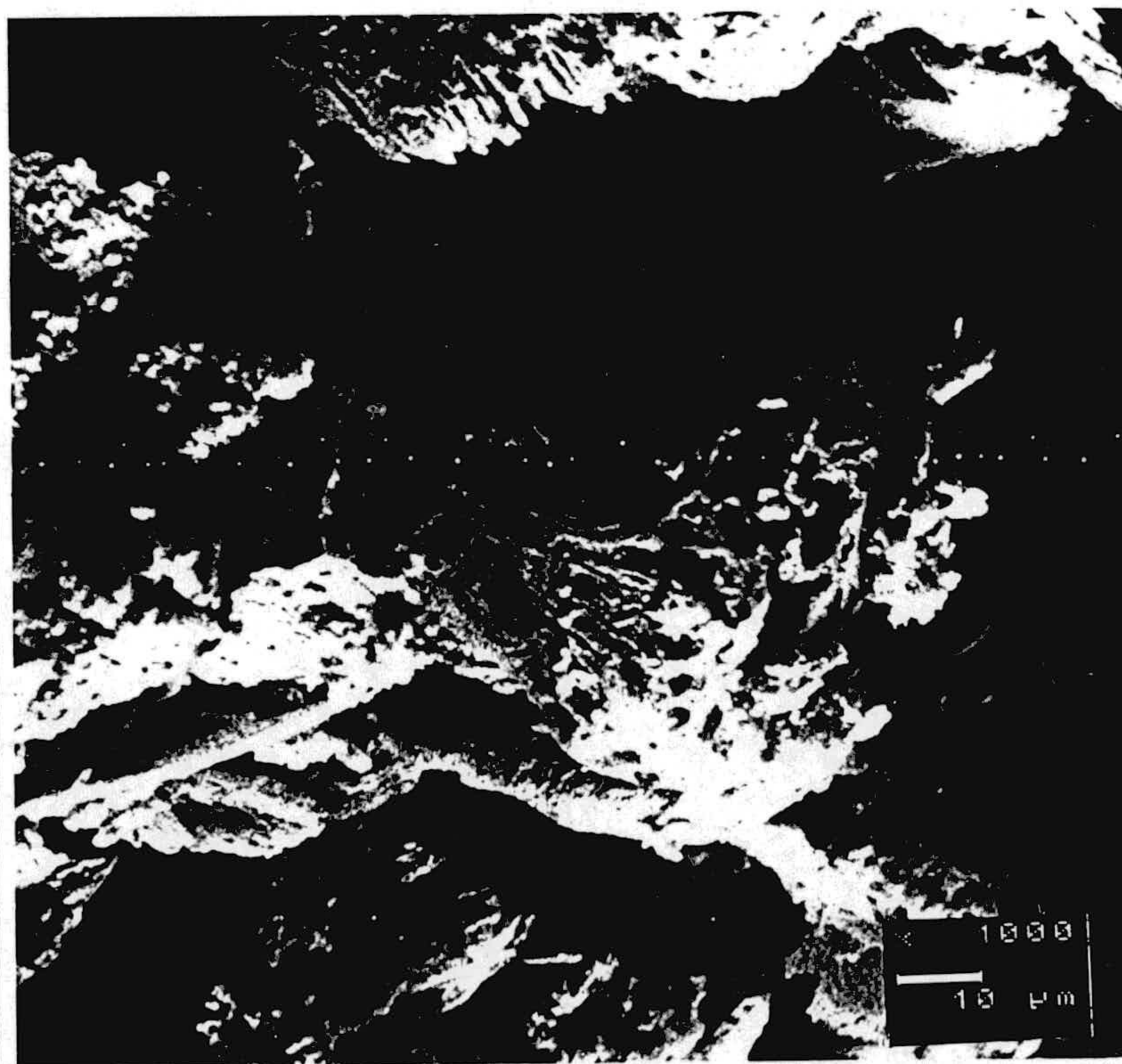


Foto 72. Desarrollo de esferas de contaminación ricas en S y Pb.

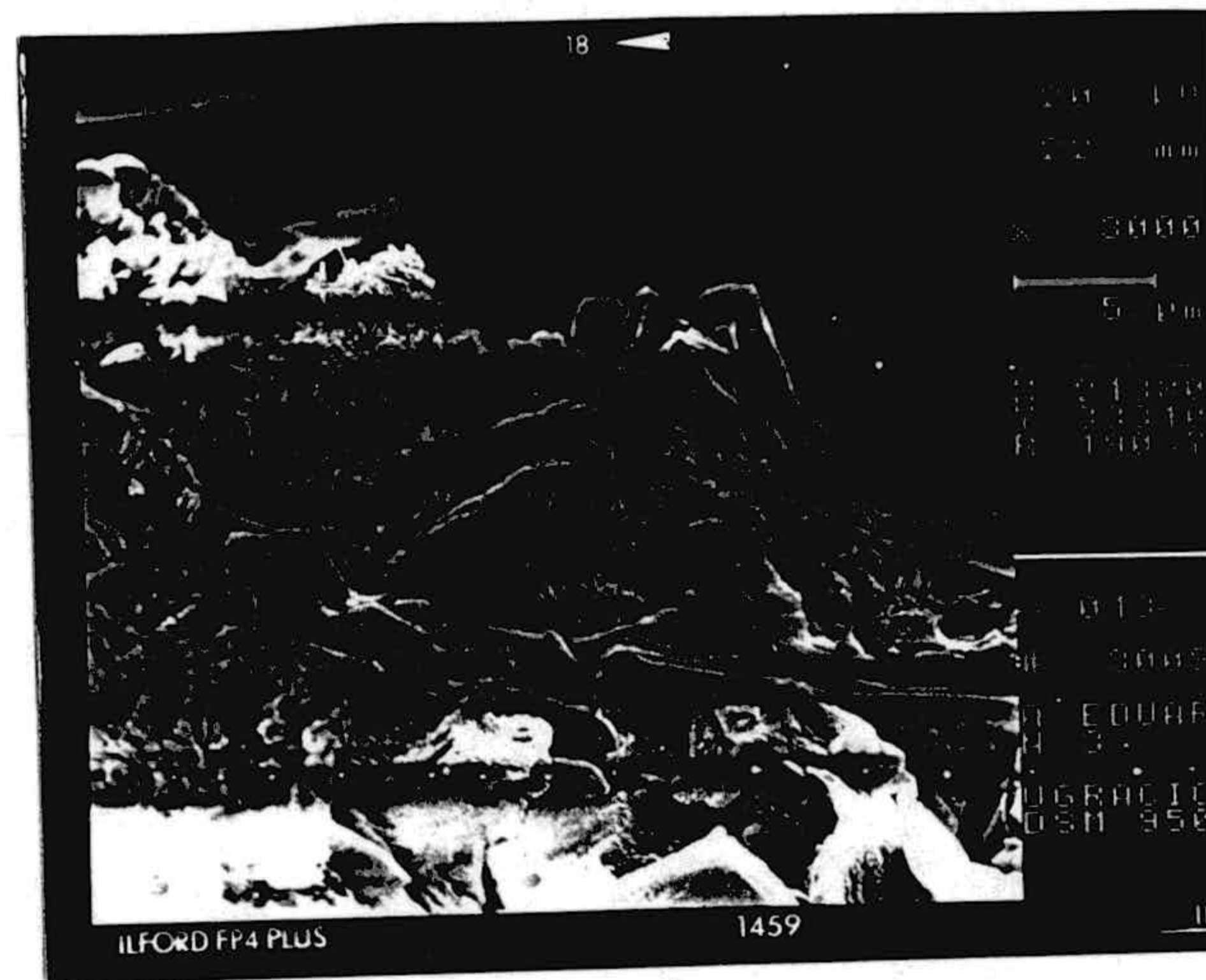
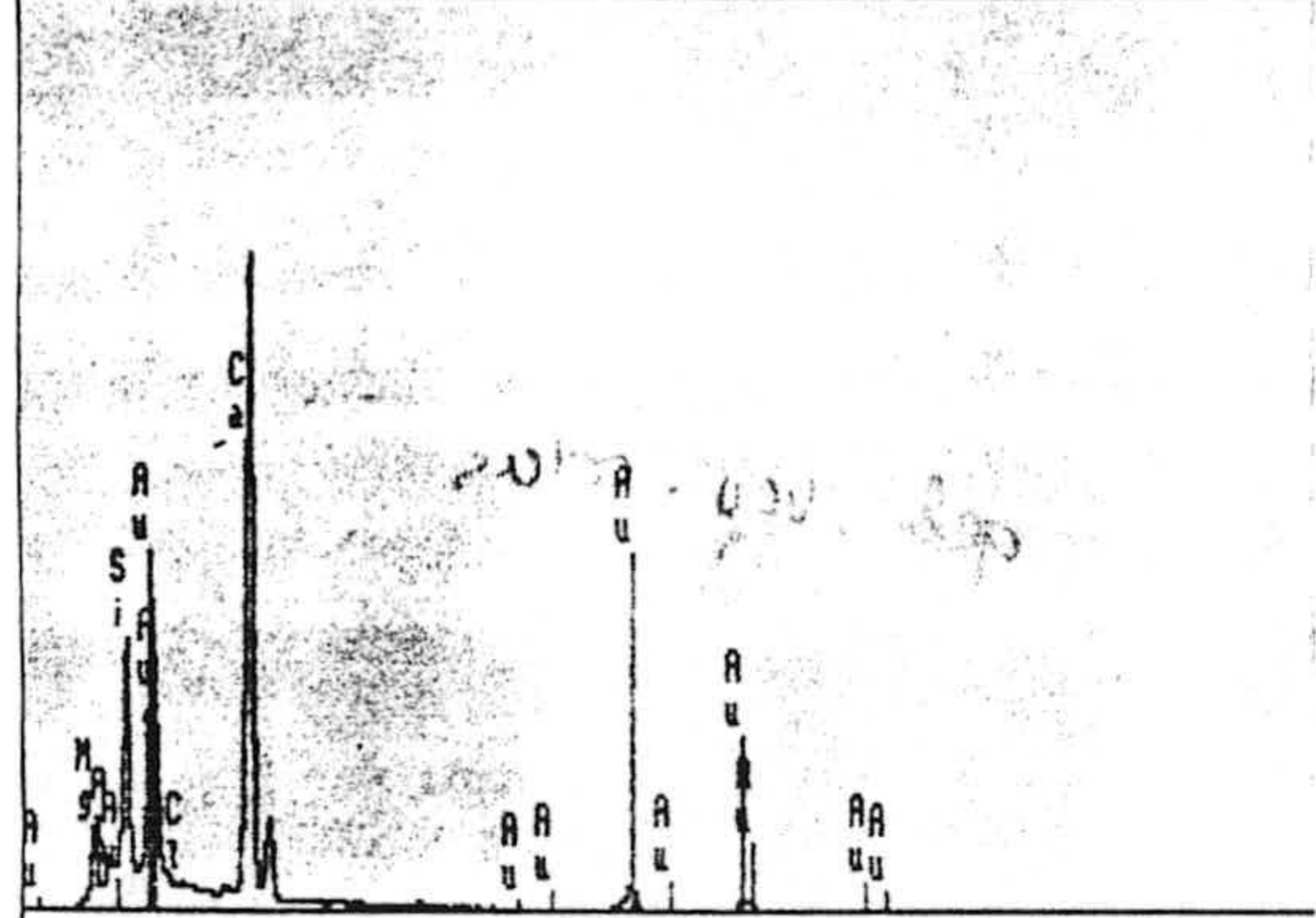


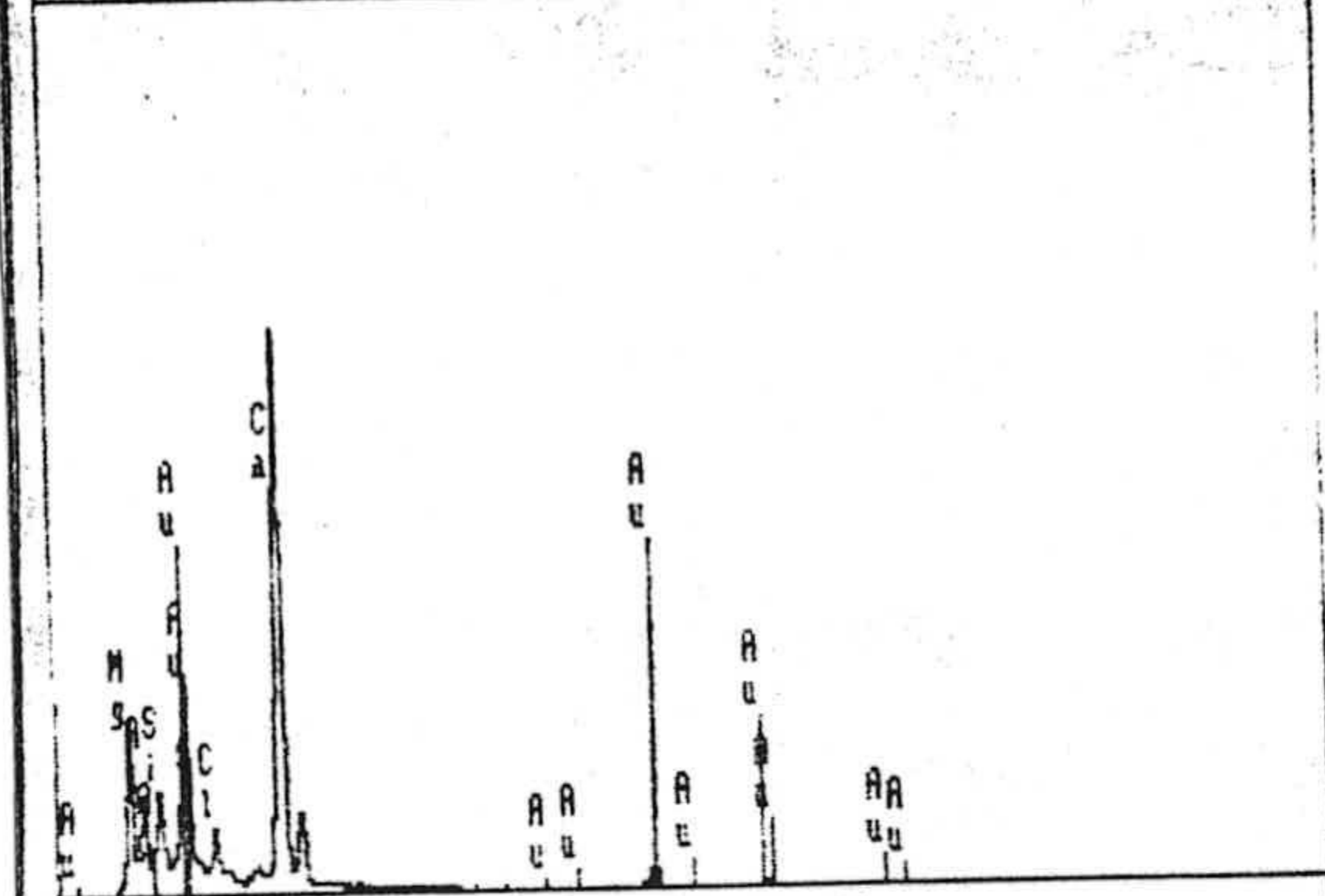
Foto 73. Fibras de materia orgánica añadida durante la fabricación del muro (Alcazaba Cadima).

X-RAY: 0 - 20 keV Window: Be
Live: 100s Preset: 100s Remaining: 0s
Real: 136s 26% Dead



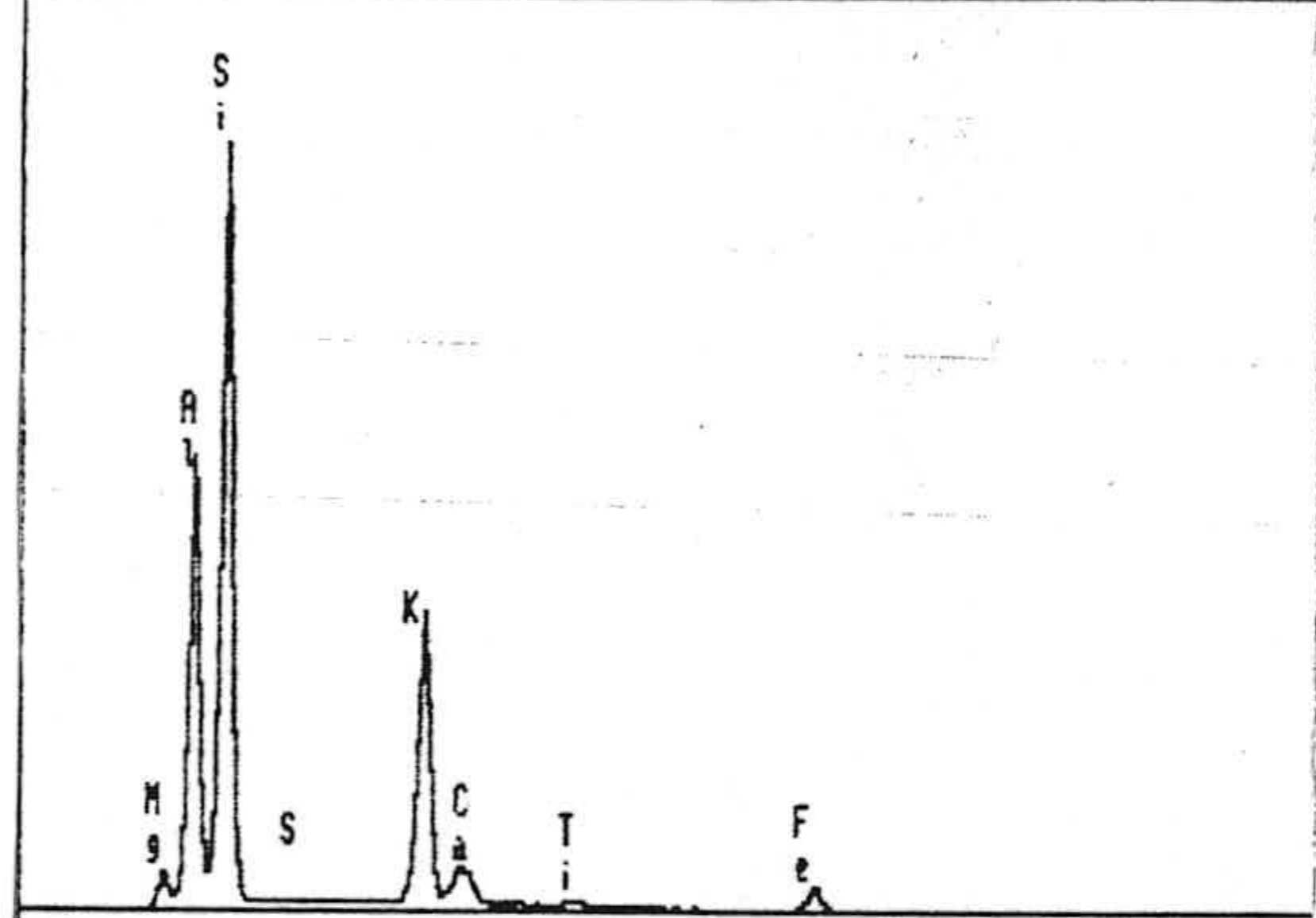
< .0 10.266 keV
FS= 8K ch 523= 51 cts
MEM1:M-16/1

X-RAY: 0 - 20 keV Window: Be
Live: 100s Preset: 100s Remaining: 0s
Real: 135s 26% Dead



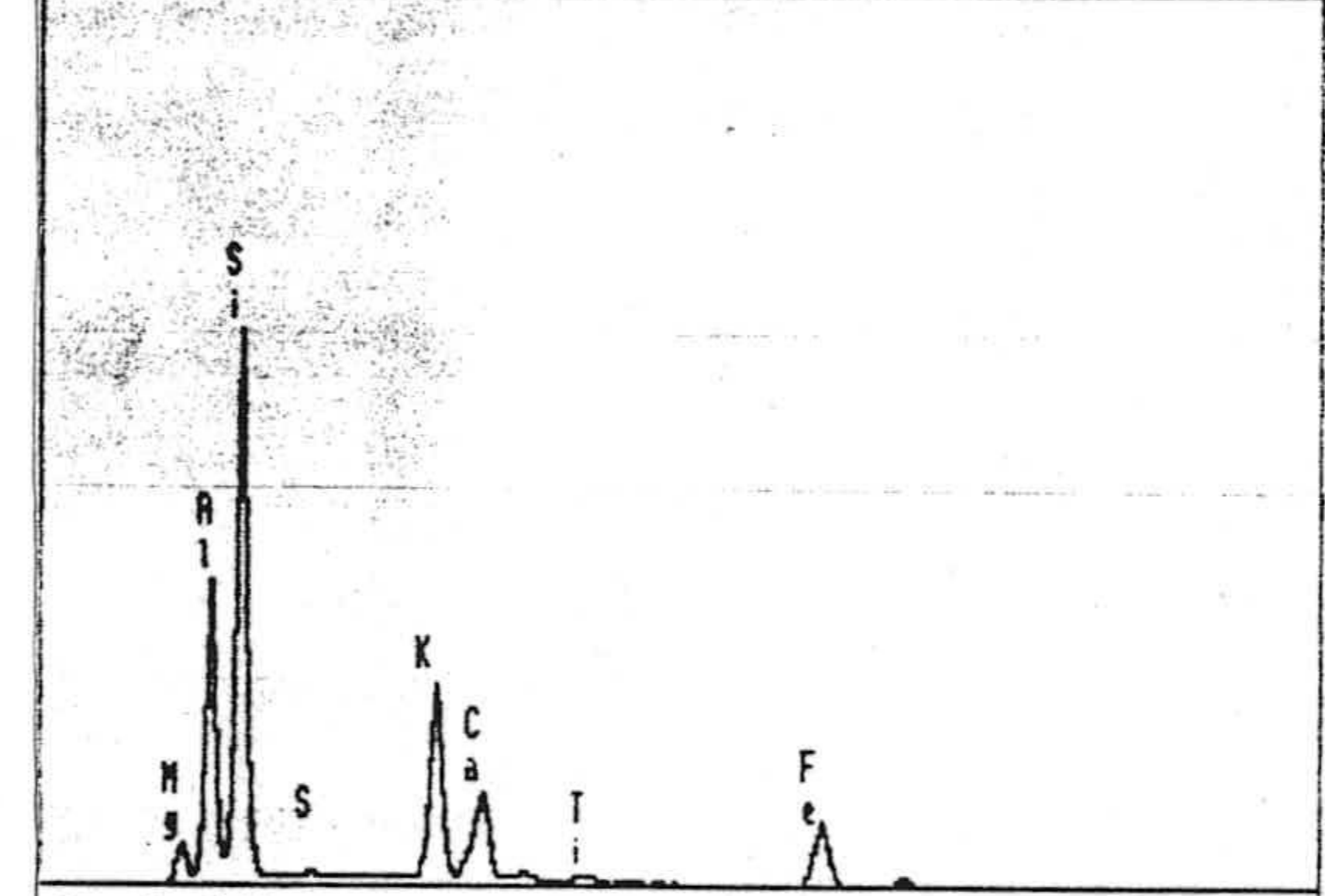
< .0 10.266 keV
FS= 8K ch 523= 42 cts
MEM1:M-16/2

X-RAY: 0 - 20 keV Window: Be
Live: 100s Preset: 100s Remaining: 0s
Real: 121s 17% Dead



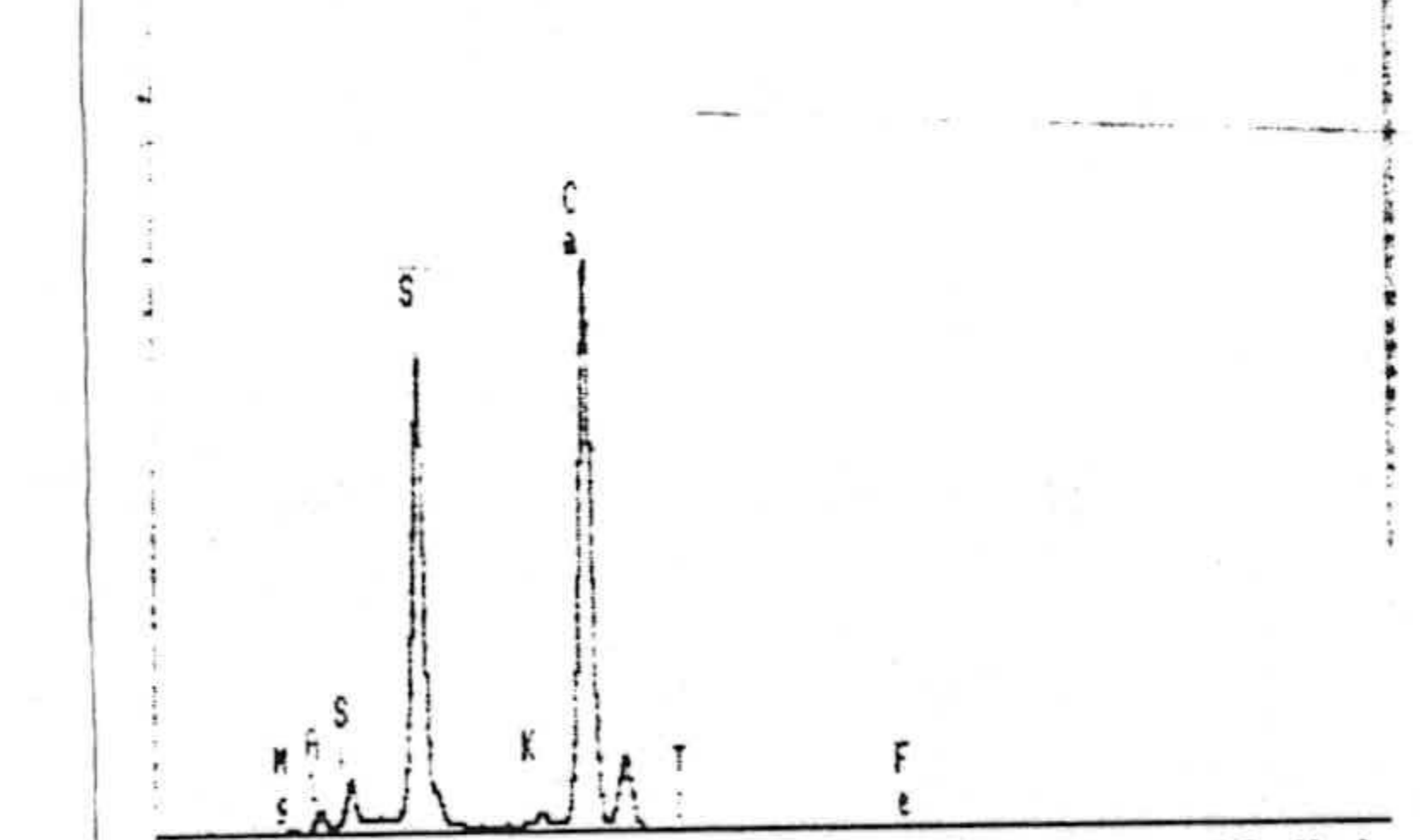
< .1 5.246 keV 10.4 >
FS= 16K ch 272= 189 cts
MEM1:AFR/4

X-RAY: 0 - 20 keV Window: Be
Live: 100s Preset: 100s Remaining: 0s
Real: 119s 16% Dead



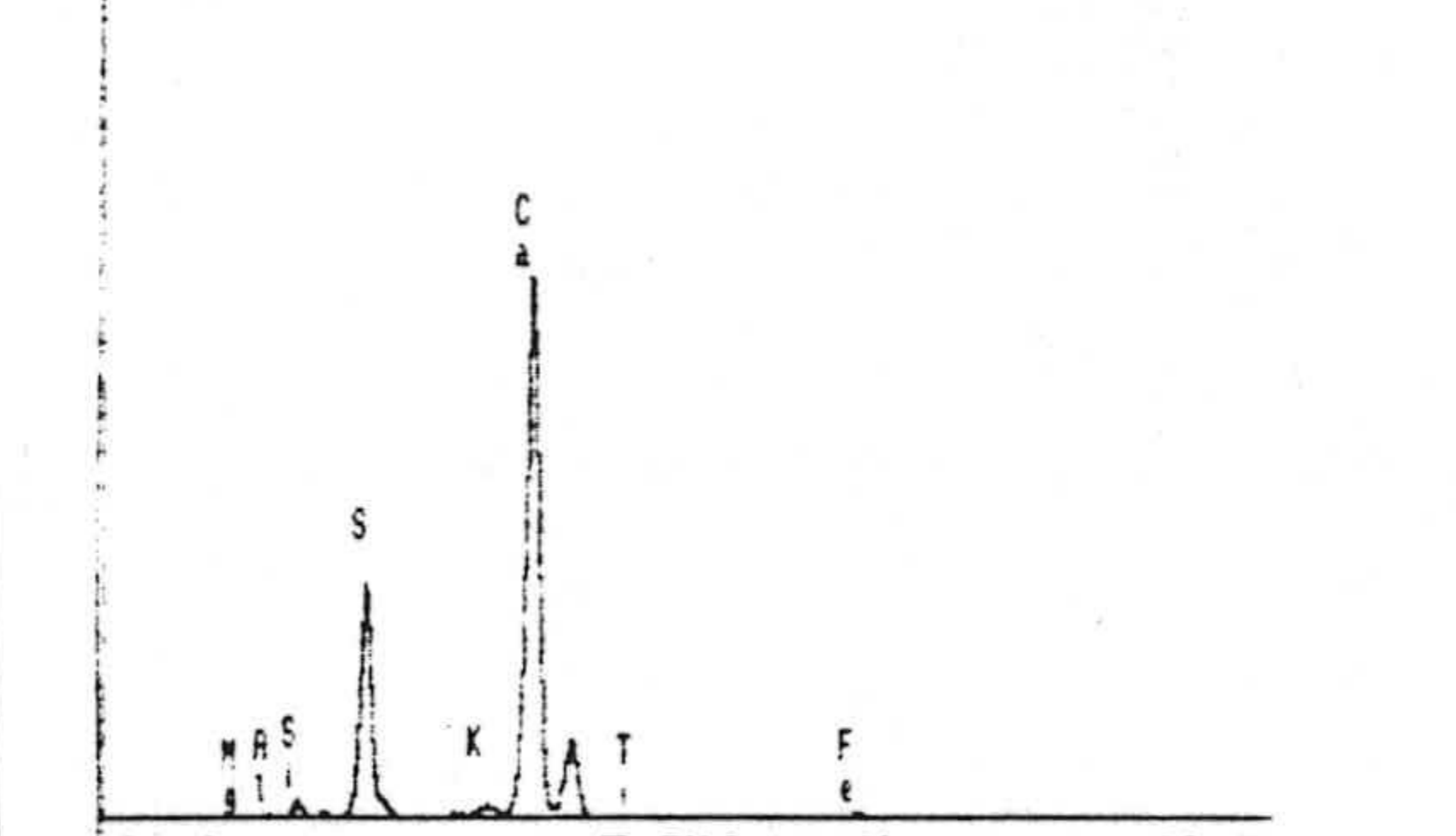
< .1 5.246 keV 10.4 >
FS= 16K ch 272= 198 cts
MEM1:AFR/3

X-RAY: 0 - 20 keV Window: Be
Live: 100s Preset: 100s Remaining: 0s
Real: 118s 15% Dead



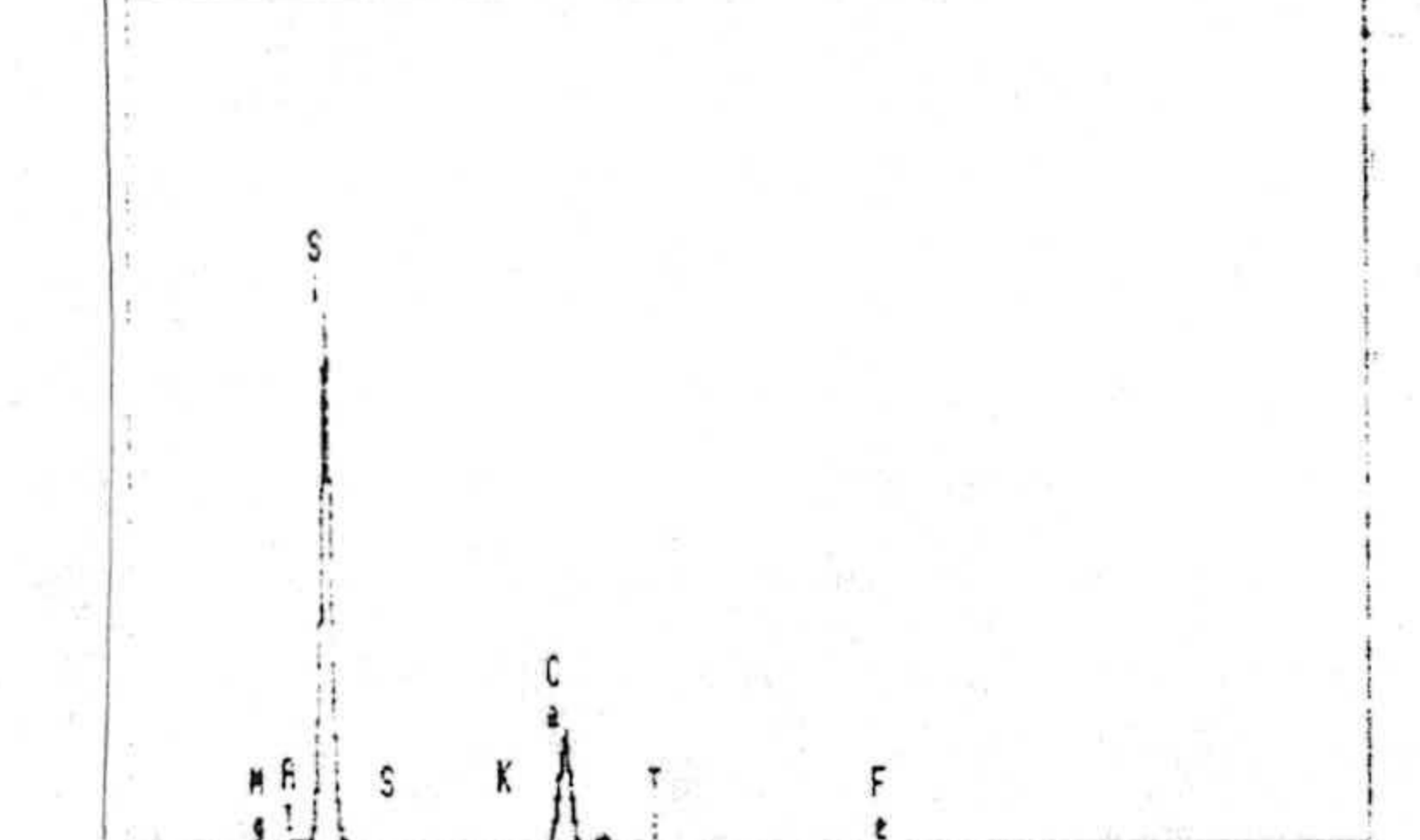
< .1 5.246 keV 10.4 >
FS= 16K ch 272= 161 cts
MEM1:AFR/1

X-RAY: 0 - 20 keV Window: Be
Live: 100s Preset: 100s Remaining: 0
Real: 116s 14% Dead



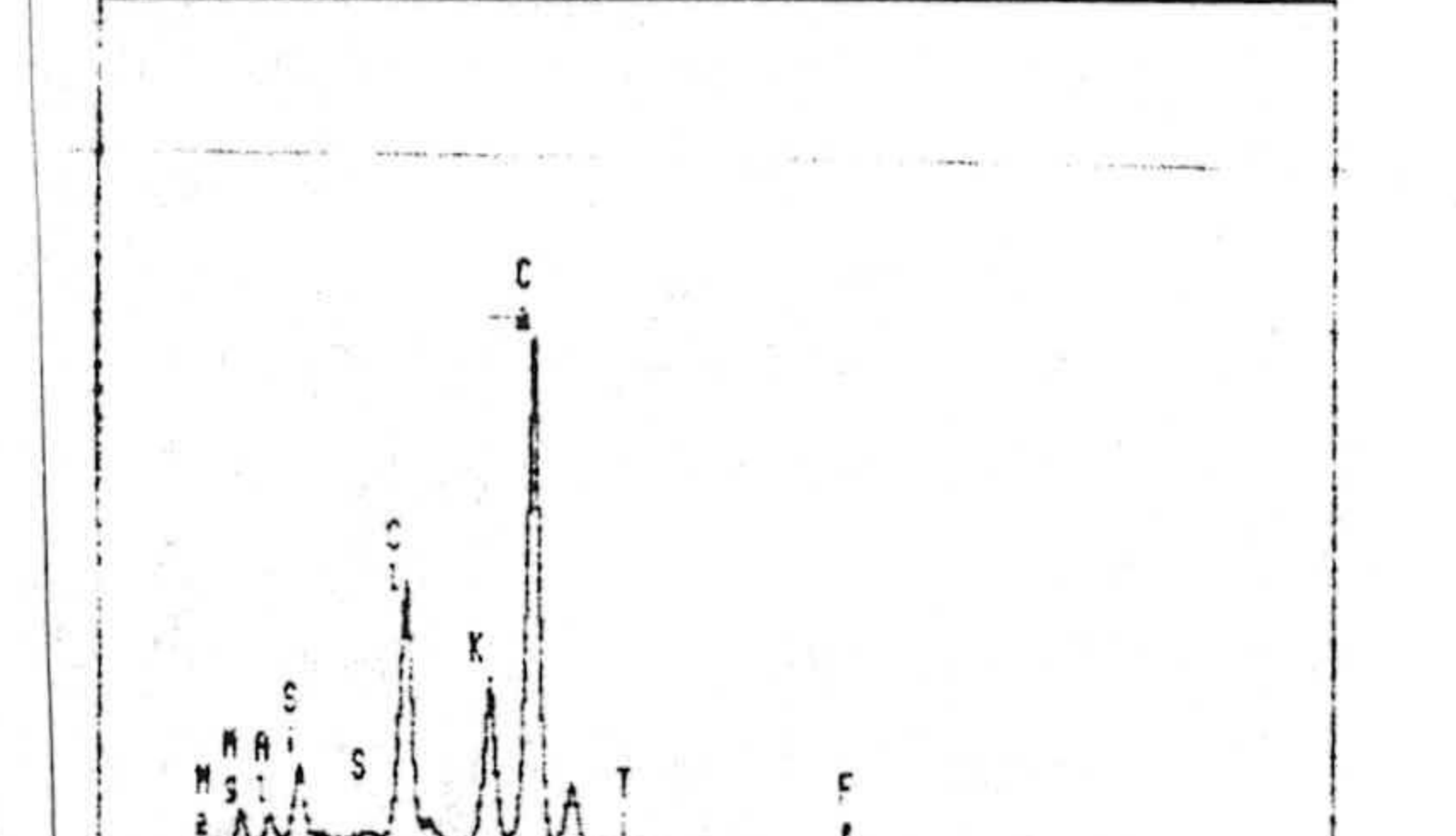
< .1 5.246 keV 10.4 >
FS= 16K ch 272= 156 cts
MEM1:AFR/2

X-RAY: 0 - 20 keV Window: Be
Live: 100s Preset: 100s Remaining: 0s
Real: 119s 16% Dead



< .1 5.246 keV 10.4 >
FS= 32K ch 272= 144 cts
MEM1:AFR/5

X-RAY: 0 - 20 keV Window: Be
Live: 100s Preset: 100s Remaining: 0s
Real: 121s 17% Dead



< .1 5.206 keV 10.3 >
FS= 16K ch 270= 201 cts
MEM1:CMC/3

X. DISCUSIONES GENERALES Y CONCLUSIONES.

X. DISCUSIONES GENERALES Y CONCLUSIONES.

X.1 APORTACIONES SOBRE LA FABRICACIÓN DEL TAPIAL.

X.1.1 TIPOLOGÍAS DE TAPIAL EMPLEADAS EN LA CONSTRUCCION DE LAS MURALLAS.

Según datos históricos, durante la dinastía de los tres reyes ziries, entre 1013 y 1090 se construye la Alcazaba de Granada y comienza a construirse la cerca de la Medina, que proseguirá hasta 1238. A lo largo del período nazarí (a partir de 1238) se construye la ciudadela de la Alhambra y las cercas de los distintos arrabales.

Es de destacar la regularidad que exteriormente presentan estas fábricas. Sin embargo el hecho de aparecer zonas muy deterioradas (desprendimientos de revocos y pérdida de trozos), nos ha permitido observar claras diferencias constructivas dentro de estos anillos amurallados, asociado como es de esperar a su período de construcción (Figura 10.1).

Las observaciones llevadas a cabo sobre el propio monumento y los resultados obtenidos en laboratorio nos permiten diferenciar las siguientes tipologías de tapial empleado en la construcción de los lienzos de murallas granadinas, que son esencialmente tres: "Hormigón de cal", Tapial Real y tapial Calicastrado (Valverde Espinosa et al, 1994).

La muralla de la Alcazaba Cadima, de la que sólo quedan escasos restos dispersos y muy afectados por los procesos de restauración, parece estar fabricada, en toda su totalidad, por tierra mezclada con cal, constituyendo lo que puede denominarse "hormigón árabe" o tapial monolítico de "hormigón de cal". Es de destacar el aporte de fibras vegetales durante el proceso de fabricación.

Tradicionalmente se conoce como Tapial Real, un tapial en el que la cal se mezcla con la tierra por tongadas. Según esto, en las construcciones granadinas encontramos dos variedades de Tapial Real: En unos casos alterna una tongada de "hormigón de Cal" con otra de tierra, ambas de 1 a 2 cm de espesor (ver foto 34); en otros, la cal se observa únicamente a techo y a muro de los diferentes cajones (ver foto 36). Esta forma constructiva fue muy empleada en el s. XI, teniendo como muestra la muralla de la Alcazaba Gidida.

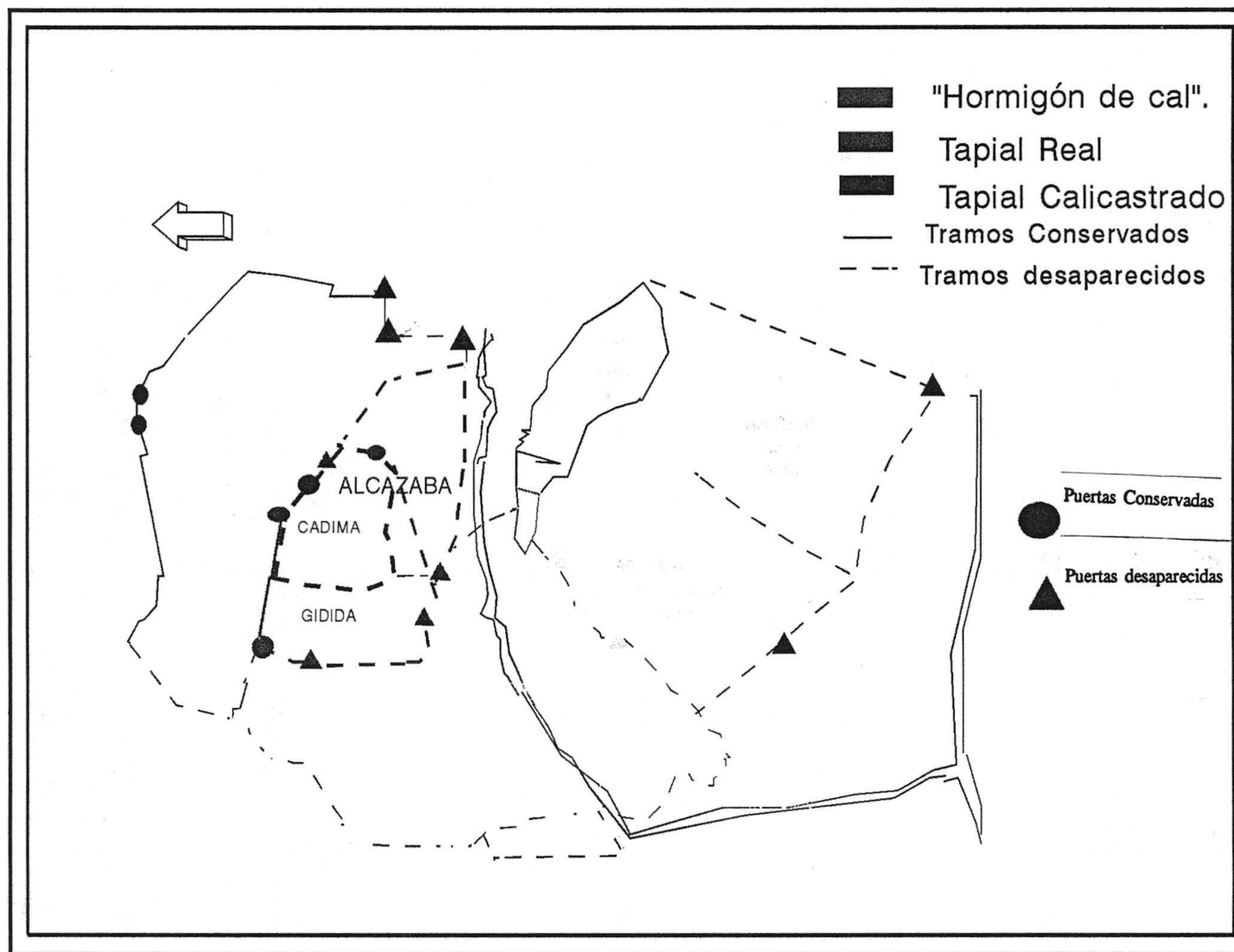


Fig. 10.1. Sectores de las murallas diferenciados en función de la tipología constructiva.



Fig. 10.2. Acuñaamiento del mortero de cal hacia el interior del muro.

En otra tipología, conocida como tapial calicastro, correspondiente a construcciones del s. XIV, se observa que el "hormigón de cal" aparece predominantemente en las caras exteriores del muro, acuñándose hacia el interior, formando una corteza variable, según la profundidad, de 6 a 8 cm. de espesor, como máximo (figura 10.2).

X.1.2 REVESTIMIENTOS EXTERIORES.

Los materiales esenciales de estas Murallas en algunos casos son "hormigones de cal" o/y morteros de cal (Alcazaba Cadima), siendo en la totalidad de los casos, como hemos indicado anteriormente, un elemento esencial en la protección exterior de estas fábricas.

Uno de los elementos esenciales de los morteros, son los ligantes. Su empleo en construcción tiene según Almagro, (1992) dos finalidades fundamentalmente :

a) Sirve como elemento de unión entre los distintos materiales que constituyen el muro. En el caso de las murallas estos materiales son piedra, arenas, y trozos de teja. Esta unión debe atender a tres funciones principales:

- Facilitar el asiento de unas piezas sobre otras, evitando su movimiento.
- Producir una unión mecánica, capaz de transmitir esfuerzos entre las piezas principales de la fábrica, configurando a esta cierto monolitismo.
- Garantizar el relleno de las juntas o intersticios entre las piezas mayores impidiendo el paso del aire y del agua.

b) Proporciona una superficie exterior de acabado de las fábricas, con dos finalidades principales:

- Una mecánica que es proteger la parte interior de la fábrica proporcionando una superficie más lisa e impermeable.
- Otra de tipo estético, mejorando o incluso variando totalmente el aspecto y apariencia de la fábrica.

Estos morteros deben actuar como protección superficial de los muros de tierra, y deben cumplir las siguientes funciones (Houben & Guillaud, 1989):

- proteger la construcción contra el viento, y el agua,
- realizar una barrera de anticapilaridad,
- adherirse bien a la fábrica del muro, sin provocar el despegue del mismo;
- ser flexibles para absorber la fisuración y deformación,
- ser impermeables a la lluvia, y permeables al agua y vapor de agua del interior del muro.
- Ser resistentes a las heladas y presentar una textura compatible con el ambiente local.

El aglomerante empleado en las murallas de Granada ha sido la cal en todos los casos, constituyendo morteros u hormigones de alta calidad.

- Respecto al origen de estos revestimientos, destacamos las siguientes conclusiones:

* El aspecto exterior que presentan estos morteros, está muy relacionado con el proceso constructivo, fruto del alisado que deja el tablero como consecuencia de la compactación del material en el interior del encofrado. El resultado en todos los casos es una capa exterior constituida por un "hormigón" y/o mortero de cal con una terminación muy fina, con una importante concentración de cal. Esta fina lámina superficial compuesta por carbonato cálcico, fundamentalmente, de espesor milimétrico observadas en las distintas anillos amurallados, es una consecuencia directa de la afluencia al exterior de una suspensión fluida muy rica en partículas finas y cal. Esta lámina será más gruesa en función del aporte de cal que lleve el interior del muro, carbonata rápidamente al estar en contacto con el exterior, y actúa como una capa impermeable al agua. Al desprenderse por cualquier causa, el muro comienza a disgregarse por efecto del agua que penetra en el interior acelerando los procesos de degradación.

Almagro (1992), en sus recientes observaciones e investigaciones que ha venido realizando sobre fábricas de tapial en construcciones hispanomusulmanas; comprendidas entre el s. X y el s. XIV indica:

«El acabado exterior de la superficie era el que producía el mismo encofrado, posiblemente con un ligero tratamiento de alisado con llana, para eliminar rebabas y coqueras, a la vez que tapaban los mechinales después de cortar con un golpe de azuela las tablas de apoyo de los encofrados. Esta operación que seguramente no afectaba más que a zonas limitadas de la superficie, se realizaba con un mínimo de aportación de material. La superficie quedaba así constituida por el mismo material de la masa del muro enriquecida en lechada de cal por efecto del apisonamiento de las tongadas».

* En relación con el origen del revestimiento la variedad de Tapia Real, ejecutada por tongadas alternativas de "hormigón de cal" y tierra, ambas de 1 a 2 cm. de espesor, el revestimiento (figura 12) resulta directamente del propio método constructivo, apareciendo de forma continua en todo el lienzo al producirse un afluencia hacia los bordes del "hormigón de cal" durante el proceso de compactación.

* En la variedad en la que el "hormigón de cal" se observa únicamente a techo y a muro de los diferentes cajones, debemos desestimar, por la separación que existe entre los lechos con adición de cal, la hipótesis anterior en cuanto al origen del revestimiento. Por tanto, su origen debe asociarse a un revestimiento de acabado, inmediatamente posterior a la ejecución del tapial propiamente dicho, o bien que sea resultado de intervenciones posteriores, quizás muy antiguas, con objeto de frenar el proceso de degradación del material sin cementar.

* En relación al tapial calicastro el revestimiento se realiza simultáneamente durante el proceso de fabricación del muro.

* En general en las distintas variedades, texturalmente, se observa una clara gradación decreciente hacia el exterior del revestimiento, quedando reducidos los últimos 3 mm. a una lámina compuesta básicamente de carbonato cálcico.

De la Torre, (1994) en relación a estas pátinas observadas en construcciones similares de la Alhambra; indican que se trata de un recubrimiento continuo de espesor constante que se dispone sobre las irregularidades de acabado del mortero o soporte. Sobre esta pátina suele haber otra de exudación de calcita o de suciedad. Según esta autora en microscopía electrónica suelen mostrar signos de retracción, su composición es homogénea, y en todo caso están enriquecidas en Fe y oxalatos, hecho que hemos podido constatar en nuestras muestras.

- Características de estos morteros.

* La composición mineralógica y textural de estos morteros o/y «hormigones» es muy homogénea en todos ellos, independientemente de la muralla y del método constructivo. Su calidad está en función de las características de la cal empleada (que presente un buen apagado) y la naturaleza de sus áridos. La recristalización de calcita, bien alrededor de los áridos o en poros y fisuras, juega un papel importante en este sentido. A medida que el tamaño de los cristales es mayor, el mortero es más resistente y mayor es su calidad.

La cal empleada, presenta pequeños núcleos de óxido de calcio (cal viva), esto se manifiesta por la existencia de procesos de reactividad entre los áridos y la pasta cementante, y la consiguiente formación de los geles (observados en el SEM) de carácter expansivo, y por otra parte la observación en lámina delgada de estas inclusiones a lo largo de la pasta aglomerante, y fenómenos de reactividad en los áridos también nos lo pone de manifiesto.

X.1.3 CARACTERÍSTICAS QUE PRESENTA EL MATERIAL UTILIZADO.

Los estudios llevados a cabo sobre el material de la formación Alhambra, nos indica que existen fundamentalmente tres tipos de materiales desde el punto de vista granulométrico. El Nivel 1 corresponde a un material grosero (grava) con un contenido en finos que varía del 7 y 17% , además, según se aprecia en campo, aparecen cantos y bloques de gran diámetro. Se trata de un material fundamentalmente detrítico con pequeños subniveles cementados. El Nivel 2, situado sobre el anterior, también es un material con un contenido en finos mayor (arena) que varía entre el 17 y 30%. Los cantos y bloques son menos frecuentes. El Nivel 3, el de coronación a nuestros efectos, presentan textura netamente más fina (arena más fina) y homogénea respecto a los anteriores. Destaca por sus tonalidades, que van desde el marrón oscuro al rojo intenso.

Basándonos en datos de granulometría, plasticidad e incluso mineralógicos, se ha podido constatar que el material empleado en la construcción de las murallas es el anteriormente indicado.

* En la elaboración de estos muros se observa claramente una selección del material para las muestras tratadas con cal respecto a las «no tratadas», con cierta

tendencia a emplear un material con un bajo contenido en finos (no superando el 10% y estando la media en un 5%).

Esto puede tener dos explicaciones o bien elegir una cantera que cumpla estas condiciones (menor contenido en finos, nivel 1), o bien, tamizar el material que tuviesen a pie de obra.

Esta última hipótesis parece más probable por varias razones:

1. En estos morteros y hormigones se observa además de una reducción de finos, una bajada en fracción gruesa (> 6.35 mm).

2. Se observa una coincidencia entre el aspecto textural y de color de los distintos lienzos de murallas en función de las características del terreno donde están ubicadas. Un ejemplo tenemos en San Antonio en su tramo inferior y superior o la muralla que sube la cuesta de la Alhacaba respecto al Arco de las Pesas.

* En las muestras tratadas con cal, independientemente del tipo de tapial utilizado, el contenido en arcilla es nulo, sin embargo el material de muralla «no tratado» o con poca adición de cal posee arcilla en su composición, utilizando una cantera más ricos en esta fracción.

* Finalmente podemos decir que en el caso de los materiales de interior de muro, «sin adición de cal», se lleva a cabo una selección del material, al menos en cuanto a la elección de determinados niveles estratigráficos de la denominada geológicamente, Formación Alhambra, siendo condición fundamental que el contenido en finos supere el 10%. Por el contrario, la presencia de grandes cantos y bloques, no incluidos en los análisis granulométricos, manifiesta que no se llevaron a cabo labores de cribado para la puesta en obra del material.

* Los "hormigones de cal" y /o morteros, tanto de interior de muro (detectados en la muralla Zirí) como de revestimientos, se confeccionaban con niveles estratigráficos de menor proporción en finos (asimilables a algunos tramos del nivel 1), o bien con el mismo material de interior de muro, previo cribado para la eliminación de fracciones finas menores de 2.5 mm.

La plasticidad de los materiales empleados en la fabricación de estas murallas varia desde arcillas de baja plasticidad (Arco Elvira), y arcillas limosas de baja plasticidad (arrabal del Albayzín) hasta limos de baja plasticidad (alcazaba Cadima, alcazaba Gidida y tramo San Antonio), coincidentes con los resultados obtenidos en cantera.

Otros datos que confirman lo anteriormente indicado son los resultados mineralógicos. De los que extraemos las siguientes conclusiones:

* El aporte de cal a los materiales trae consigo una serie de modificaciones sobre el material inicial, afectando sobre todo a los siguiente parámetros:

- A la granulometría resultante.
- A la configuración de los poros (tamaño, distribución e interconexión).
- A su capacidad de absorción de agua.

* Dentro de los resultados de los análisis mineralógicos, se deduce al menos una adición de cal del 10% al 15 %, en revestimientos y en "hormigones de cal" de interior de muro.

* Para muestras de interior de muro «con poca adición de cal» se observan aportes de un 5 a un 10% como máximo. Es posible que este aporte se lleve a cabo para mejorar las características de la tierra, reduciendo su plasticidad y favoreciendo su mayor compactación.

X.2. APORTACIONES SOBRE LA EVOLUCION CONSTRUCTIVA.

En la evolución del método constructivo de las distintas murallas, las diferencias más significativas corresponden al volumen relativo de tierra amasada con cal, su aporte y a la disposición de los diferentes niveles que la contienen, así como a los procedimientos constructivos que dan origen a los revestimientos. En esta evolución constructiva (del s. XI al XIV), se pasa de un tapial monolítico de "hormigón de cal" a tierra simplemente compactada protegida por un revestimiento; en épocas intermedias, existía adición de cal al material del interior del muro, si bien se limitaba a tongadas más o menos separadas.

El calicastro es la última evolución constructiva que observamos en este complejo monumental, que lleva consigo el máximo ahorro de cal. Esta forma constructiva, tiene las siguientes ventajas:

- ahorro frente a muros contruidos solo de hormigón de cal o tapial real, sin una importante pérdida de resistencia,
- el revestimiento exterior, esta íntimamente ligado al muro, con su característico acuñaamiento hacia el interior, evitando así el despegue de esta capa de protección,
- su carácter protector sobre la fábrica interior del muro, evitando su degradación que cuando se produce es lenta y gradual.

X.3 ANALISIS DEL ESTADO DE CONSERVACION.

X.3.1 DEGRADACIONES MACROSCOPICAS.

Las patologías que suelen afectar normalmente a las construcciones de tierra están motivadas por los siguientes factores: el acceso del agua al interior del muro y problemas de tipo estructural.

Los puntos de la construcción de tierra, que ofrecen mayor facilidad a la acción del agua son, la base del muro (basamento), la zona superior del muro y los mechinales.

Para que el agua pueda penetrar en este tipo de construcciones se tienen que dar las siguientes condiciones:

1. Presencia de agua en la superficie del basamento.
2. Presencia de una abertura que permita al agua introducirse por fisuras.
3. Acción de una fuerza, presión, gravedad o capilaridad que hace penetrar el agua.

La ascensión del agua por capilaridad tiene numerosos orígenes:

- Fluctuaciones del nivel freático.
- Retención del agua por las raíces de los árboles.
- Tubos de evacuación del agua deteriorados.

- Estancamiento del agua a pie de muro.

Una construcción de tierra con una adecuada conservación puede durar siglos. Si el revestimiento del tapial se desprende, esta zona del desprendimiento será la vía acceso para el agua, que provocará el total desprendimiento del revoco, dejando el tapial expuesto a la acción de los agentes climáticos que lo erosionarán. Por otra parte, el efecto del agua estancada en el revestimiento exterior, tiene consecuencias importante, favoreciendo el deposito de sales y el desprendimiento del material. Es por esto, que no se aconseja impermeabilizar la superficie del muro, porque éste necesita transpirar y ser permeable a la migración de vapor de agua.

En las Puertas y Murallas de Granada, se han observado una serie de patologías que vamos a describir a continuación:

a) Humedades.

Las murallas necesitan un profundo cimiento para garantizar su estabilidad por lo que al excavar en el terreno se llega a unos niveles freáticos que provocan una importante ascensión de la humedad por capilaridad.

Esta agua es también responsable de las pátinas negras o marrones de materia orgánica (musgos y líquenes) que tienden a depositarse después de la evaporación de la humedad, aunque es más frecuente que se localicen en zonas de mala evacuación del agua.

b) Cubrición en mal estado (o falta de cubrición).

Las murallas no disponen de una cubierta que les proteja del agua de la lluvia. Originalmente se construyeron adarves sobre los lienzos y terrazas en las puertas y torreones que con un correcto sistema de evacuación de aguas permitía que esta no afectase a la masa estructural.

En la mayoría de los casos la muralla se encuentra desprovista de esta protección, por lo que el agua afecta directamente al tapial, ocasionando importantes deterioros.

La lluvia unida a las variaciones importantes de la temperatura pueden arrastrar

y descomponer el material por lavado de las arcillas y material cementante reduciendo la cohesión de la tierra.

c) Grietas estructurales.

En algunos tramos de las murallas se pueden observar grietas estructurales debidas a pequeños asientos diferenciales. Estas grietas se trazan siguiendo los mechinales, al constituir este el punto más vulnerable del muro.

La causa de estas patologías pueden estar relacionadas con la no correcta puesta en obra del material, pero también pueden provenir de procesos externos a la propia construcción, como apilamientos, deslizamientos y catástrofes naturales.

Las fisuras de retracción son las más difíciles de encontrar, son de naturaleza vertical y regulares. Esta retracción también puede estar motivadas por variaciones hidrotérmicas, ciclos repetitivos de humedad y secado.

d) Parámetros degradados.

El tapial calicastrado y el hormigón de cal, debido a su composición, dota al paramento de una superficie resistente y muy adherente a la tierra que configura el muro. Aún así, la antigüedad de estas construcciones y las agresiones que han sufrido, han degradado los paramentos, y en algunos casos ha desaparecido por completo la costra de cal que los protegía. El origen de esta degradación puede ser diverso por problemas de estancamiento del agua o factores antrópicos.

e) Vegetación parásita.

El abandono total de estas construcciones ha producido el desarrollo descontrolado de la vegetación, que ha ocasionado agresiones y deterioros de espectaculares resultados, como consecuencia de la penetración de las raíces de las plantas y árboles; el resultado final es el desprendimiento total de la costra de cal.

f) Factores antrópicos.

Las murallas de Granada han servido de apoyo a numerosas viviendas "autoconstruidas" que dejaron su impronta y su huella en la superficie de los muros. Por ejemplo, en la cerca que corre paralela al camino de San Antonio se perforaron los muros, para abrir huecos en las viviendas adosadas.

A los problemas de tipo físico-químico, debidos a la acción de agentes externos como el agua hay que añadir los productos procedentes de la polución.

g) Restauraciones desafortunadas.

Con la aparición de los aglomerantes industriales (cemento porland), existió la tendencia a revalorizar sus propiedades y menospreciar sus inconvenientes, que han demostrado con el tiempo ser demasiado peligrosos.

El empleo de morteros de cemento para reparar los revestimientos perdidos no parece ser lo más adecuado por presentar características distintas al revestimiento original. Estos revocos producen un estancamiento del agua que al no poder salir con libertad termina por concentrarse en las partes bajas del muro, ascediendo por capilaridad. El mortero de cemento tiene una alta densidad y conductividad térmica que puede favorecer la formación de humedades de condensación. Si a ello añadimos su escasa y su consiguiente impermeabilidad, incluso al vapor de agua, su uso puede provocar desde tensiones internas a impedir la normal circulación y sobre todo la evaporación del agua existente siempre en el interior de la fábrica (Almagro, 1990). El resultado final es la inmediata ruptura entre el material de fábrica del muro y el revestimiento de cemento, con la consiguiente pérdida de cohesión del material.

Pero no solo los fenómenos de tipo físico son los que generan problemas en el uso del cemento, también pueden influir sus características químicas. El cemento suele contener iones libres y sales solubles capaces de emigrar a otras partes de la fábrica provocando eflorescencias, y además suelen ser muy sensibles a la acción de los sulfatos disueltos en agua para el caso de ambientes muy contaminados.

X.3.2 DEGRADACIONES MICROSCOPICAS.

Aunque no se perciben aparentemente problemas de alteración relacionados con la polución ambiental (costras negras, enriquecimientos de yeso superficial, etc.), se ha constatado mediante el SEM la presencia de minerales de alteración, sulfatos y cloruros, así como la existencia de esferas de contaminación en el seno de estos morteros y/o hormigones.

El hecho de detectar mediante los análisis químicos, en pequeñas cantidades sulfatos y cloruros tanto en revestimientos como en interior de muro (expuestos a las condiciones medio ambientales) nos viene a demostrar lo anteriormente indicado.

Estas sales están enriquecidas sobretodo en Ca, y en menor K, Na y Mg. Su enriquecimiento en Ca es fácil de explicar si tenemos en cuenta que el medio tiene lugar un aporte importante de hidróxido de calcio. Los elementos alcalinos (Na y K) provienen de las micas y feldespatos.

El yeso se presenta mayoritariamente como criptoeflorescencias. Su origen se puede explicar de dos maneras fundamentalmente:

1. El SO_2 de la atmósfera al ponerse en contacto con el material constituyente de las murallas reacciona con el agua que circule en su seno, enriquecida en carbonato calcico disuelto, dando lugar a la formación de sulfato calcico hidratado (yeso).

2. Al poner en contacto con este material morteros de cemento ricos en alcalis y yeso, el agua que circula en el seno de este material puede arrastrar estas sustancias y precipitarlas en el interior de los revestimientos que protegen a las murallas, favoreciendo la recristalización de yeso en poros y fisuras. Si las recristalizaciones de estas sales son importantes, se generan presiones que pueden traer consigo la aparición de ecamaciones en el material y su desprendimiento.

La formación de cloruros, aunque los análisis mineralógicos indican que aparece de forma generalizada en todos los lienzos de murallas, por medio del SEM sólo lo hemos observado en el tramo San Miguel. su origen también se le puede atribuir la genesis dada para la formación del yeso.

En algunos lugares se observan indicios de biodeterioro debido al crecimiento de hongos.

X.4 RECOMENDACIONES PROPUESTAS PARA SU RESTAURACION

Restaurar implica: " volver a construir en un edificio antiguo las partes arruinadas o a punto de arruinarse, en el mismo estilo original". A este respecto podemos decir que las construcciones procedentes de la dominación musulmana no despertaban gran interés y si alguna vez se reparaban era para evitar el mal aspecto de los escombros, llevándose a cabo esta reparación con el menor estudio posible, según lo demuestran las recientes restauraciones.

Existen ciertos principios fundamentales que no debe olvidar el restaurador:

1. Estudio previo y minucioso de la historia, carácter, elementos, estilo general y particular, con abundancia de datos gráficos.
2. Respeto total y absoluto a todo lo existente en el monumento, indicador de su pasado.
3. Parquedad extraordinaria en la restauración, no tocando sino lo imprescindible y de probable necesidad.
- 4 Conocer perfectamente el material original, con la finalidad de emplear material que presente las mismas propiedades y características.

La finalidad de una restauración debe ser intentar conservar dicho edificio en las mejores condiciones posibles para la posteridad. Esto implica utilizar técnicas y materiales adecuados para este fin.

En este sentido hay que advertir la necesidad de no intentar emplear morteros de reparación con cemento en general, por varias razones de las que podemos destacar:

- Carece de la fina capa exterior, característica de los morteros antiguos, que actua como aislante y proteja al muro de las agresiones externas.

- Favorece la condensación del agua en el seno del material evitando así la transpiración del muro.

En nuestro caso es fundamental emplear en restauraciones morteros de cal. Estos morteros antiguos no aportan sales solubles ni favorecen la alteración de cualquier material que se adicione o esté en contacto con él.

La permeabilidad de un mortero, como cualquier piedra natural está en función de los poros accesibles y de sus discontinuidades (de la Torre, 1994). La determinación de la estructura de los poros y la absorción de agua de un mortero es muy importante, porque esta cualidad de los poros es determinante a la hora de comportarse en la intemperie, y para la distribución del agua entre los materiales adyacentes. Estos materiales no deben ser repelentes al agua sino que deben permitir la absorción generosa del agua que circula por las fábricas porosas.

Los morteros de cal tienen un comportamiento mecánico armónico con la tierra (tapiales). La experiencia sobre su empleo es milenaria y además entre sus propiedades destacamos que son buenos hidrofugos y buenos aislantes térmicos; su gran poro deja transpirar el aire ocluido en los materiales que reviste, impidiendo el acceso del agua por capilaridad a través de la zona de contacto entre el muro y el revestimiento.

Su principal degradación viene de manos del agua, que disuelve la calcita como ligante de estos fábricas, con la consiguiente arenización y disgregación del mismo. Su poca resistencia a la disolución es su principal defecto.

La protección contra el agua de estos muros es fundamental para su conservación, en este sentido hay que procurar diseñar sustancias que favorezcan su protección exterior.

Se aconseja no emplear en ningún caso restauraciones que supongan una previa agresión al muro, porque es preferible conservar lo ya existente a intentar hacer reconstrucciones que a la larga pueden ser más perjudiciales para el edificio en si.

A la hora de plantearse una restauración adecuada no hay que recurrir a las formulas milagrosas ni restauraciones definitivas sino establecer una política de mantenimiento adecuada que implique un riguroso control de nuestro Patrimonio Arquitectónico.

XI. BIBLIOGRAFIA.

XI. BIBLIOGRAFIA.

- * **AENOR UNE-7050.** (1995). "tamices de ensayo". Definiciones de los términos utilizados en tamices y análisis granulométrico por tamizado.
- * **AENOR UNE-7133.**(1990). "Toma de muestras".
- * **AENOR UNE-7082.** (1954). "Determinación aproximada de la materia orgánica en arenas para hormigones o morteros".
- * **ACETTA. A.** (1984). "Ecole d'estude de la estabilisation des terres par compactage". Acta de Cologes Modernité de la construction en terre, Paris 1984.
- * **AGNEW. N, PREUSSER. F and DRUZIZ. J R.** (1987). "Estrategies for adobe preservation the Getty Conservayon Institute Research". Program 5 Th International meeting of Experts on Conservation of Earthen Acchitecture. ICCRON. (3-11).
- * **AGUIRRE. E.** (1957). "Una prueba paleomastológica de edad Cuaternaria del conglomerado de la Alhambra". Estudios geológicos nº 13. (135-140).
- * **AGUIRRE. E.** (1958). "Notas sobre la estratigrafía de las depresiones andaluzas". Estudios geológicos nº 14. (107-120).
- * **ALMAGRO A.** (1986). "El yeso material mudejar". Actas del III Simposio Internacional de mudejarismo. Teruel, Diputación Provincial. Instituto de estudios turolenses CSIC.
- * **ALMAGRO A.** (1992). "Técnicas tradicionales de construcción y Patrimonio". Acta de las primeras Jornadas sobre Técnicas Tradicionales de Construcción y Patrimanio. Diputación de Aragón (11-30).
- * **ALESSANDRINI G, BONECCHI R, BUGINI R, FEDEL, DOUTICELLIS S, ROSSI G and TORIOLO L.** (1989). "Bramante in Milan: The Cascina Pozzobonelli. Tecnical examination and restorration" Estudios in Conservation 34. (53-66).

- * **ALESSANDRINI, BUGINI, FOLLI, REALINI and TONIOLO.** (1992). "The compositional ratios of mortars comparason betwen chemical and petrographical methods". 7^a Th. International Congres on determination and Conservation of stone. Lisboa 1992.
- * **ALONSO RODRIGUEZ, J.** (1986). "Alterabilidad de calizas y dolomias". Tesis doctoral, Universidad de Oviedo. (63-172).
- * **ALVA BALDERRAMA, A.** (1979). "Protección y Conservación de estructuras excavadas de adobe". Constructure en terre, alternative et paralleles. 1979.
- * **ALVA A, DOAT P, GUILLAUD H, HUBEN H, JOFFROY T, ODUL, P, TEUTINICO JM, TRAPPENIER M.** (1990). "Long-term plan for the perservation of the earthen arquitectural Heritage the geles proyect". 6th International Conference on the Conservati3n of Earthen Arquitectue.(1990). CARRATerre, ICCRON.
- * **ANGEL MÁRTINEZ, FONTAO OROSA, MATEO SANZ, LEIRO LÓPEZ y PRENDES RIBERA** (1995). "Reacción árido-álcalis. Morfología de sus geles, por HEB". Sociedad Española de Microscopía electronica. XVII Reunión Bienal Oviedo 1995.
- * **ARREDONDO F.** (1991) "Yesos y cales". Servicio de publicación. Revistas obras públicas. Madrid, 1991).(pg. 136-161).
- * **BARDOU P y ARROUMANIAN V.** (1979). "Arquitectura en Adobe". Tecnología y Arquitectura. Ed. G. Gili, Barcelona 1979.
- * **BARRIOS MARTIN, J.** (1993). "Arquitectue en terre du Village preromain de Cuellar. Preelevement et Conservation Segovia (España). 7^a Conferência Internacional sobre o Estudo e Conservaçao da Arquitectura de terre". Portugal 1993.
- * **BARAHONA FERNANDEZ E.** (1974). "Arcillas de ladrillería de la provincia de Granada. evaluaci3n de algunos ensayos de materias primas". Tesis doctoral Universidad de Granada.

- * **BAZZANA, A.**(1978). "Murs nord d'enceinte haute et secteur nordoues de l'enceinte basse. Ls escavacion de la Magdalene de Castellón. Estudio de los yacimientos y primeros resultados arqueológicos". Cuadernos de prehistoria y arqueología castellanenses. (175-202).
- * **BAZZANA, A.**(1980). "Elementes d'archeologi musulmana dans al-Andalus". Caracteres especificques de l'architecture militaire arabe de la region Valenciane". Ed. Alcantera, Madrid 1980.
- * **BAZZANA, A et GUICHARRD, P.** (1987). " Construction en terre dans l'Espagne musulmana, la Tabiyas". Patriminoine Europeén en terre et su Rehabilitation. Colloque International place sous le Patronage de l'agence national pour, l'ameriorati3n de habital. (marzo del 1987).
- * **BERMUDEZ PAREJA** (1972). "Alcazaba y Torres de la Alhambra" Obra Cultural de la caja de ahorros de Granada, 1972.
- * **BERMUDEZ PEDRAZA.** (1938). " Historia Eclesiastica de Granada"
- * **BETAGMIN MAURO.** (1989). " La conoscenza del cautiere per cantiere del restaure dell'arquitectura in terra italianá". II Cantiere della Conoscenza. II cantiere del Restauro Bessanove, 1989.
- * **BICZOK** (1978). "Corrosi3n y protecci3n del hormig3n". Ed. Urmo, Bilbao (1978).
- * **BISCONTI G, DRIUSSI G, MARCHESINI L and VALLE, A.**(1980). "Characterization of Venetian marmorino thrigh. Porosity measurement". Inst. Rossi Meneseri ed the Conservati3n of stone. (171-176).
- * **BISCONTI, G; FASSINA, N; LAZZARUNI, L; MAZZON, R.** (1979). "Estudio dell'umidita ascendente delle caracteristiques fisique della murature di palazzo bardoer e prove di desalinificazione". (305-321).
- 11
- * **BLACHERRE G.**(1978). "Saber construir".Eds. T3cnicas Asociadas, Barcelona 1978.

- * **BOSQUEL MAUREL, J.**(1988). "Geografía urbana de Granada" Archivum. Universidad de Granada y Excmo. Ayuntamiento de Granada.
- * **BOUCHER, E.A.**(1976). "Review porous materials, structure, properties and capillary phenomena". Journal of Material Science (1734-1750).
- * **BOUSQUIE P, PELLERIN F M, STRUILLON et ARNOULD.** (1986). " Contribution de la porosimetrie en mercurie a l'estudie de quelque propietes de roches carbonateas". Bolletin de l'association International de Geology de ingenieur n° 22.
- * **BRAKEL VAN, MODRYS and SUATA, M.** (1981)." Mercury Porometry: state of the art" Powder tecnology 29. (1-12).
- * **BRINDA COMPTON, E.** (1990)."Arquitectura vernácula en el valle central de Chile". 6ª Th. International Conference on the Conservation of earthen Architecture. (8-13).
- * **BRUTONN. G** (1955)."Vapoux glycolation". Ana. Mineral, 40. (124-126).
- * **CARO CALATAYUD S.** (1994). " Piedra, ladrillo, mortero: características y alteración, Alfaro, Calahorra y Logroño. Gobierno de la Rioja. Instituto de estudios riojanos (300 pgs.).
- * **CASAL IGLESIAS T.**(1990). " insolite tradición de tapial en Cuba". 6th International Conference on the Conservation of earthen Architecture (8-13).
- * **CEBALLOS M.** (1990). "Restauración en adobe en antiguos edificios coloniales de la antigua Guatemala". 6th Conference International on the Conservation of earthen Architecture (24-28).
- * **CHAZELES C.A** (1993). "Savoir-faire indigenes et influences coloniales dans le architecture de terre autique de Extreme Occidente (Afeique du Nort, Espagne, France, Meridionale)". 7ª Conferênçie International de Terre Portugal.

- * **CHINCHON J S, LOPEZ A, QUEROX X y AYZA C** (1989). "Cantera de Montpalau, influencia de la mineralogía de los áridos en la durabilidad del hormigón". Ingeniería Civil/71.

- * **CHINCHON J.S, LOPEZ A, SORIANO J y VAZQUEZ E.** (1989). "Cantera de Mont-Palau II. Formación de compuestos expansivos generados en relación árido-hormigón". Ingeniería Civil/72.

- * **CONTRERAS RAFAEL** (1978). "Estudio descriptivo de los monumentos árabes de Granada, Sevilla y Cordoba. Reedición 1978.

- * **COPE M.** (1984). "une meuselleure connoissance du materiaux terre". Acta de colloques Modernité de la Constructure en Terre, Paris (pgs 15-25).

- * **DABRIO C J, FERNANDEZ J, PEÑA J A, RUIZ BUSTOS A y SANZ DE GALDEANO C** (1978). "Rasgos sedimentológicos de los conglomerados miocenicos del borde NE de la depresión de Granada". Estudios geológicos nº 34 (89-97).

- * **DAPENA GARCIA J E y URIEL ROMERO S.**(1980). " Determinación de la meteorabilidad de las rocas". Boletín del laboratorio de Carreteras y Gotenia, nº 142 Noviembre-Diciembre (3-34).

- * **DIAZ ROMERAL J, GUINEA M J, ROMBER E y SALES J,** (1986). "Primeros resultados del trabajo de investigación sobre la tierra como material de construcción, en el IETcc". Informe de construcción, Vol. 37, nº 377 Enero-Febrero Inst. Eduardo Torroja CSIC.

- * **DIAZ ROMERAL J y BRINGAS P,**(1986). "La tierra, material de construcción en los centros de investigación". Monografía nº 385-386. Inst. Eduardo Torroja CSIC (17-19).

- * **DRAYRE M and KENMOGNE NE,** (1993). " Etudie des transferts d'humidite dans les blocs des terre crue compactee; influence de la structure des terre". 7th Conferência International sobre o Estudo e Conservação de Architecture de terre, Portugal 1993 (348-352).

- * **EASTON D.** (1982). "The Rammed earth experience" CRAterre. Blue mountain press, wilseyville, California.

- * **ESBERT RM y MARCOS R C.** (1983). "Las piedras de la catedral de Oviedo y su deterioración". Ed. Colegiop Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Asturias y Oviedo.

- * **ESBERT R M y ORDAZ J.** (1989). "Glosario de términos relacionados con el deterioro de piedras de construcción". Materiales de construcción Vol. 28 nº 209 (39-45)

- * **ESBERT RM, MONTOTO M, SUAREZ DEL RIO L M, RUIZ DE ARGANDOÑA VG and GROSSR CM.** (1990). "Mechanical stress generated by cristallization of sals inside treated and non-treated monumental stone; monitoring and interpretation by acoustic emission, microsonic activity. Material research". Soc. San Francisco USA. (12 pg.).

- * **ESBERT R M, MONTOTO M y ORDAZ J.** (1991). "La piedra como material de construcción, durabilidad, deterioro y conservación". Materiales de construcción, Vol. nº 221 (61-73).

- * **ESTRADA C, y ROMHER E.** (1986). "Comprobaciones resistentes de elementos constantes de tierra". Informen de la construcción nº 385 Inst. Eduardo Torroja CSIC.

- * **ESTEVEZ A, RODRIGUEZ FERNANDEZ J, SANZ DE GALDEANO C y VERA TORRES J A.**(1982). "Evidencia de una fase comprensiva de edad Tortoniense en el sector Central de las coordilleras Béticas" Estudios geológicos 38 (35-60).

- * **ESTEVEZ A, GONZALEZ DONOSO JM, LINAREZ A, LOPEZ GARRIDO AC, RODRIGUEZ FERNANDEZ, SANZ DE GALDEANO y SERRANO F.**(1985). "El neogeno del valle de los Guajares (Coordilleras Béticas Granada)". Mediterraneo Sev. Geolog. nº 4 (33- 54).

- * **EVERETT D M and STONE P S.** (1958). " The structure and properties of porous materials". Proceeding of the Tenth Syposium of the Colston Reasearch Society Helth in the University of Bristol.

- * **FARRAN J and TENOZ** "L'arterabilité des roches ses facteurs, sa prevision". Annales de l'Institute Technique du Batimente et des Travaux. Publics n° 215 Novembre (1533-1548).

- * **FERNANDEZ RUIZ J A y VISEGO RODRIGUEZ J.** (1987). "Indice de arquitectura popular de Andalucía Oriental". Arquitectura de Andalucía Oriental n° 0 CAAO.

- * **FERRARI R.** (1986). "Materili, technologie e modi". Ed. Storici Architecture e mestieri del restauro Bologna, Inst Romagna. Grafid Edizioni.

- * **FIES J C.** (1992). " Analisis of soil texturel porosity relative to skeleton perticle size using mercury porosimetry". Soil SCI Soc AN. J. Vol 56 Julio-Agosto.

- * **FITZNER BERND** , (1988). "Porosity properties of naturally or artificially weathered sandstone". VI. International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Nicholas Copernius Universty Torum (236-245).

- * **FITZNER BERND, HEINRICHS K y KOWNATAKI R.** (1992). "Clasification and maping of weathering formas". 7th International Congr and Deterioration and Conservation of Stone. Portugal (957-967).

- * **FITZNER BERND** (1990). "Porosity analis. A method for the characterization of building stone in diferents etats d'alteration". Engineening Geology of Ancient Works, Monument and historical sites.

- * **FURLAN V.** (1981) "Experiences pratiques avec crespis a base de chaux". Syposium: Morts, cement, and grouts used in the Conservation of historic buildings.

- * **FURLAN V et PANCELLA R.** (1982). "Examen microscopique en lumiere refecdrie de cement betos et mortier". Chantiers, Vol 13, 11/82 (pgs 25-30).

- * **FURLAN V.** (1987). "Crespis a la chaux". Nos monuments d'art et d'histoire. n° 138/1987 (70-72).

- * **GALDIARI E.** (1990). "La arquitectura de tierra en España desde las colonias griegas hasta la dominación española". 6th International Conference on the Conservation of Earthen Architecture (50-52).

- * **GALLEGO Y BURIN.** (1987). "Granada, guía artística histórica de Granada". Ed. actualizada por F J Gallego Roca.

- * **GALLEGO ROCA F J.** (1986). "La torre de la sultana de los adarves o de arriate en la Alhambra de Granada". Monografía n° 385/386. Inst. Eduardo Torroja CSIC (48-56).

- * **GALLEGO ROCA F J, VALVERDE ESPINOSA I, LOPEZ OSORIO J M, MONTORO GARCIA R, PAREJO FERNANDEZ A, RODRIGUEZ GALLEG0 M G, LOPEZ ROBLES M y ONTIVEROS ORTEGA E.** (1992). "Muros de tapial en el Albayzín de Granada". Alzada Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Granada.

- * **GALLEGO ROCA F J, VALVERDE ESPINOSA I, LOPEZ OSORIO J M, MARTIN BARRANCO M J, SANTOS FERNANDEZ A, ONTIVEROS ORTEGA E y FAJARDO MARTINEZ R.** (1992). "The City walls of Granada (Spain). Use, Conservation and Restauration". 7th Conferência International sobre o estudo e conservação da Architecture de terre. Portugal (272-277).

- * **GARATE ROJAS I.** (1986). " La construcción en tierra un objeto de restauración". Monografía n° 385/386. Inst. Eduardo Torroja CSIC.

- * **GARATE ROJAS I.** (1993). "Las artes de la cal". Ministerio de Cultura. Dirección General de Bellas Artes y Archivos.

- * **GARCIA VERDUCH A.** (1986). "La tierra un material a investigar". Monografía n° 385/386. Inst. Eduardo Torroja CSIC.

- * **GEORGE M.** (1985). "Arquitectura del mundo árabe". Alianza editorial (98-100).

- * **GOMA F.** (1979) "El cemento porland y otros aglomerantes". Ed. Técnicas asociadas SA. Barcelona, 1979.

- * **GOMEZ MORENO M.** (1907). "Monumentos arquitectónicos de España" (pgs 3-5).

- * **GOMEZ MORENO M.** (1992). "Guia de Granada".

- * **GONZALEZ DONOSO and VERA TORRES.** (1965). "Estudio geológico de una parte de las laderas noroccidentales de Sierra Nevada (Granada)". Not y Cum del IGME Vol. 78 (93-124).

- * **GONZALEZ DONOSO.** (1968). " Conclusiones estratigráficas y paleográficas sobre los terrenos miocénicos de la Depresión de Granada". Acta Hispanica 3 (57-63).

- * **GONZALEZ DONOSO.** (1970) "Estudio geológico de la depresión de Granada". Cuadernos geológicos 1 Abril 1970 Universidad de Granada (5-8).

- * **GROOT K** (1967). " Experimental dedolomitization". Sed. Petro. 37 (1216-1220).

- * **GUARNER GONZALEZ I.** (1986). " Restauración en la muralla de Niebla". Monografía nº 385/386. Inst. Eduardo Torroja CSIC.

- * **GUINEA DIAZ M J** (1986). "La tierra un material resistente al agua". Monografía nº 385/386. Inst. Eduardo Torroja CSIC.

- * **GUINEA DIAZ M J.** (1986) "Normativa relacionada con la construcción de tierra". Vol. 37 nº 377.

- * **HARRA KECH.** (1987). "Habitat en terre". CRAterre.

- * **HAYS A y HATUK S.** (1986). "Construyendo con tierra en los Andes Peruanos" Monografía 385/386. Inst. Eduardo Torroja CSIC (85-91).

- * **HENRIGUEZ DE JONQUERA F.**(1934). "Anales de Granada". Ed. por A. Marín Ocete.

- * **HERNANDEZ RUIZ L E y MARQUEZ LUNA J.A** (1983). "Cartilla de pruebas de campo para la selección de tierras en la fabricación de adobes". Conescal (68 pgs).
- * **HOUBEN M.** (1982). "Construcción en tierra". Conescal nº 59/60 Mejico.
- * **HOUBEN M, GUILLAND M.** (1989). "Traité de Constructure en terre". Vol. 1 Marselle.
- * **IGLESIAS GONZALEZ A.** (1992). "Restauración llevada a cabo sobre la muralla Ziri". Ministerio de Cultura.
- * **IGME.** (1980). "Mapa geológico de España hoja 1010 (20-4) la Peza". Servicio de publicaciones del Ministerio de Industris y Energía.
- * **IGME** (1988). "Mapa geológico de España hoja 1009 (19-41) Granada". Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía.
- * **INTRUSION RCA-92.** Intrusión para la recepción de cales en obras de estabilización de suelos.
- * **JEFFREY W, CODY** (1990). " Earthen Walls from france and Englend". 6th International Conference on the Conservation of earthen Arquitecture (35-43).
- * **JEDZEJEWSK.** (1960). "Old nort en Poland". Estudios en Conservation 5 (132-139).
- * **JEDZEJEWSK.** (1967). "Investigation of ancient mortars". Arqueological chemistry (147-160).
- * **JENNY M and OVERTREET** (1938). "Cation interchangue, between plants, root and soil colloids". Soil Science, vol 47 (257-272).
- * **JIMENEZ SALAS J y ALPAÑEZ J.** (1975). "Geotenia y Cimientos. Propiedades de los suelos y de las rocas". 2^a edición Ed. Rueda Madrid (29-43, 221-225).
- * **JURADO GIMENEZ F.** (1986). "Rehabilitacion de la casa castillo de Betama, Valencia. Monografía nº 385/386. Inst Eduardo Torroja CSIC.

* **KRAEMER C y DEL VAL M.** (1990). "Firmes". Catedra de Caminos y Aeropuertos. Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid (91-94).

* **KOERAAD VAN BALEN.** (1990). "Metodologie de la Conservation et de la Restauration des monument en terre" 6th International Conference on the Conservation of Earthen architecture, Mejico.

* **LABORATORIO DEL TRANSPORTE Y MECANICA DEL SUELO "J. L ESCARIO"** (1972).

- NLT-101/72. Extracciones de las muestras.
- NLT-104/72 Granulometría por tamizado.
- NLT-105/72 y NLT-106/72 cálculo de la plasticidad.
- NLT- 108/76. Proctor normal.

* **LAMBER ELIE** (1956). "Esdudao Mediavales". Toulouse, Privat Dier Editeur Vol III.

* **LAUTRIDOU I P et OZOU F.** (1978). "Relaciones entre le gelivite et les propietes phisiques (porosité, ascension capillaire) des roches calcaries". Colloque International: alteration et procction des Monument en pierre, Paris.

* **LEWIS S Z and CHAROLA A L** (1979). "The Phisical Chemistry of deteriorated Brick and its imprefnacion tecnica". Il mattone di Veneczzia. Estado delle Cnnocenze tecnico-scientifique, Octubre.

* **LINAREZ A and COLON** (1957). "Observaciones sobre la sedimentación miocenica en el alto valle del Genil (Granada)". Cursillos y Conferencias del Inst. L. Mallado. Fasc. 4 (105-110).

* **LOPEZ OSORIO J M y MONTORO GARCIA R.** (1990). "La tierra en la arquitectura granadina, estudio de restauración y conservación". Dirigido pod D. J. Gallego Roca EAT. de la Universidad de Granada.

- * **MAMILLAN M** (1979). "Connaissances actuelles des essais pour evaluer les propietes et l'estat d'alteration des maconneires de briques". Il mattone de Venezia. Estado delle conoscenze tecnico-Scientifiche, Octubre (53-94).

- * **MAÑA F.**(1975). "Cimentaciones superficiales". Ed. Blume. 1º edición. (17-30).

- * **MARMOL CARVAJAL L.** (1797). "Historia de la revelión y castigo de los moriscos del reino de Granada".

- * **MARTIN GARCIA M.** (1987). "La muralla exterior del Albayzín o Cerca Don Gonzalo, estudio descriptivo". Cuadernos de historia Mediaval, Universidad de Granada.

- * **MARTIN HENRY.** (1926). "L'art Musuman". Deuxime edicion Paris.

- * **MAZZOCHI** (1946). "Cementos y Cales". Ed. Gustavo Gili.

- * **MELLIGUEZ RH.** (1979). "Quantitative X-ray, difraction analis of clay mineral". An Evolution SRC REpert Saskfchevan Reserach Council 6-79 (6-79).

- * **MENENDEZ MENDEZ** (1995). "Reacción árido-álcalis. Constatación de la experiencia de esta reacción en un hormigón español". Sociedad Española de Microscopía electronica. XVII Reunión Bienal Oviedo 1995.

- * **MENENDEZ PIDAL** (1955). "Primera crónica general de España". Madris (539-540).

- * **NENDOÇA DE OLIVERA.** (1990). "The study of acelerated carbonatation lime-stabilized soil". 6th International Conference on the Conservation of earthen architecture, Mejico (176-170).

- * **MEZCUA J M.** (1982). "Catalogo general de isocistas de la península Ibérica". 202 Inst Geográfico Nacional.

- * **MOSCOU L and LOUB S.** (1981). "Practical use of mercury porosimetry in the study of porous solidis". Pouder Technology 29 (45-52).

- * **MOUSA K, PRIN D et DICLIER G.** (1984). " Valoration des sol tropicaux (laterites du Mali)". Acte du Coloques, Modernité de la Constructure en Terre. Paris (pgs 93-111).
- * **MUÑOZ MOLINA A.**(1994). "Granada 1995, el año mágico de la última ciudad andalusi". Ed Semanal "El Pais" n° 179 año XIX tercera edición.
- * **NAVARRO PALAZON** (1985). " El despoblamiento islámico". Revista de Arqueología de Siyasa (Cieza). Año VI n° 53.
- * **NAVAS MAS A.** (1990). "Restauración y mantenimiento de las casa de labranza de Somontano en el alto Aragón". Diputación de Aragón.
- * **NORMA UNE. 80-502-92.** "Cales vivas o hidratadas utilizadas en la estabilización de suelos".
- * **OLIVER HURTADO J y M** (1875). "Granada y sus monumentos".
- * **ORDAZ and ESBERT R M.** (1985). " Porosity and capilarity in some sanstone and dolomite monumental stone". 5th int. Congr det Cons. stone lausanne. (93-103).
- * **ORDAZ and ESBERT R M.** (1990). "Caracterización de los adobes de Castilla León (España). 6th International Conference on the Conservation of earthen architecture.
- * **ORTEGA HUERTAS M.** (1979). "Mineralogia de la Block-Formación, Depresión de GRanada". Tesis Doctoral Universidad de GRanada.
- * **OSTROM H E** (1961). " Separation of clays minerals frons carbonate rock by and acido". Jour sed. Petrol; 31 (pgs 124-139).
- * **PALAI A PEREZ, GALVAN ILOPIS, VALIENTE SOLER and CAMPUZLLADRO.** (1986). " Experiencias de proyecto de fábricas de tapial". II Encuentro de Trabajo sobre tierra como material de construcción. Navapaloe 86.

- * **PAREJO FERNANDEZ A, LOPEZ ROBLES M y RODRIGUEZ GALLEGO M G.**(1992). "La tierra en la arquitectura Granadina, identificación de materiales". Monográfico fin de Carrera dirigido: Valverde Espinosa y F J Gallego Roca. EAT. Universidad de Granada.

- * **PAVIA SANTAMARIA S.** (1994). " Material de construcción antiguo de Logroño y la Rioja Alta: Petrografía, propiedades físicas, geología y alteración". Gobierno de la rioja Instituto de estudios riojanos (540 pgs.).

- * **PELLERIN F M.** (1980). " La porosimetrie de mercury appliqué a l'estude geotectonique de soils et de roches"

- * **PEÑA J.** (1975). "Estratigrafía del plioceno-pleistoceno del SEctor Occidental de la Depresión de Guadix". *Cadernos de Geológica* 6 (31-54).

- * **PEREIRA H.** (1990). "Revalorización del material tierra en la arquitectura chilena". 6th International Conference on the Conservation of Earthen Arquitectura Mejico (111-116).

- * **PETER A, RAGOT J P, and SIMA A.** (1970). "analys du spectre de porosite de diferentes roches explotees en arriere". Proc II Congr Inter Soc et des roches mechanics. Belgrado boletín 1.

- * **PITTMAN EWARD. and RUSCHATKO ROBERW** (1970) "Use of poro casts and scnning electron microscope to study poro geometry". *Journal of sedimentary Petrology* vol. 40 n° 4 (1153-1157).

- * **PLUMMER L N, WIGLEY T H and PARKURST D L** (1978). " Critical review of the kinetic of calcite dissolution and precipitation in: chemical modelling of aqueous system". Ed. by R F Gould Am. Chem Soc symp Seris 93. (537-577).

- * **PREVOSTEAU JM., RAGOT JP and SIMA A** (1970). "Le spectre de porosité des roches; critere possible de leur degré d'alterati3n et leur alterabilit3". Procc. I Symp Ins. Assoc Engin Geol. Paris. (548-560).

- * **PRIETO MORENO R.** (1969). "Proyecto de obras de Consolidación en la muralla del Albaycín de Granada".

- * **PUGA E.** (1971). "Investigación petrográfica en S. Nevada Occidental. Cordilleras Béticas (España)". Tesis Doctoral Universidad de Granada.

- * **PURURVAR, CHOWDRUZY A N, KUSHRESHTHA N P, GAURI K L** (1990). "Control of porosity on durability of limestone at the Great sphinx Egypt". Environ geol. warte SCi Vol. 15 nº 3 (225-231).

- * **RAY S, GAULT HR, DODD C G** (1957). "The separation of clay mineral from carbonate rocks". American Mine 42 (681-685).

- * **REAL ACADEMIA ESPAÑOLA.** (1992). "Diccionario de la Real Academia Española". Ed. Espasa, vigésima edición.

- * **RODRIGUEZ GALLEGO M, MARTIN POZAS J M, MARTIN VIVALDI J L** (1969). "Análisis cuantitativo de los silicatos de arcilla por difracción de rayos X. Influencia de las sustituciones isomórficas y cristalinidad". An R. Soc Española Física-química 65 (25-29).

- * **RODRIGUEZ NAVARRO C. and SEBASTIAN PARDO E** (1990). "Pollution-derived heavy-metal enrichment on building stone". Mineralogy magazine, 59A (781-782)

- * **RODRIGUEZ NAVARRO C. and SEBASTIAN PARDO E** (1995). " " XVII Reunión Soc. Esp. Microscopía Electrónica, Oviedo (314-315).

- * **RODRIGUEZ FERNANDEZ J.** (1982). "El mioceno del sector central de las cordilleras béticas. Tesis Universidad de Granada (224 pg.)

- * **ROHMER E.** (1986). "La investigación del barro en Navapalos" Navapalos 86 II Encuentro de Trabajo sobre la tierra como material de Construcción.

- * **ROSSI DORIA.** (1986). "Mortars for restoration basic requirement and quality control". Materiaux et Construction Vol 19 nº 114.

- * **ROTA P and ROSSI DORIA.** (1990). "Report on the rilm workshop. Ancient mortars por restoration". *Materials and structures* 23 (235-238).

- * **VERONELLI** (1978). ""Durabilidad del hormigón. Reacción árido-álcalis". Monografía nº 352 del IE Tcc. Madrid, 1978.

- * **SANZ DE CALDEANO C** (1983). " Los accidentes y fracturas principales de las coordilleras béticas". *Estudios geológicos* 39. (157-165).

- * **SCARATO PASCAL.**(1987). "Pathologie restauration terre. Patrimoine europeen. Construct en terre sa rehabilitation". Cologue international place sous le patronage de l'agence national pour l'amelioration de l'habitat.

- * **SEBASTIAN PARDO E, RODRIGUEZ NAVARRO C, VELILLA N, RODRIGUEZ GORDILLO J, ZEZZA H, and SALMERON.** (1992). "Petrographic study, evaluation of the state of decay and proposals for preservation of stony material fron Jaen Cathedral (Spain)". 7th International Congress on deterioration and Conservation of stone.

- * **SECO DE LUCENA ESCALADA.** (1910). "Plano árabe de Granada"

- * **SECO DE LUCENA PAREDES.** (1966). "El barrio del Cenete, las Alcazabas y las Mezquitas de Granada". *Cuadernos de la Alhambra* Vol 2 (43-51).

- * **SECO DE LUCENA PAREDES.** (1970). "Notas arqueológicas granadinas. Estructura del casco urbano de Granada musulmana". *Cuadernos de la Alhambra* VI.

- * **SECO DE LUCENA PAREDES.** (1974). "Las Cercas y Puertas árabes de granada". *Obra Cultural de la Caja de Ahorros de Granada.*

- * **SHULLER K H and KROMER M.** (1991) "The potential contribution of thermal analysis to the caracterización of ceramic clays". *Proc 7th Euroclay conf. Dresden 91, Greifswal* (951-956).

- * **SIMON M, ALFARO P, GONZALEZ M, LOPEZ J.A y GONZALEZ J.** (1989). "Suelos rojos como representantes de la edafogénesis de finales del mioceno al pleistoceno". Actas de la 2ª Reunión del cuaternario iberico. Dpto de Edafología y química agrícola de la Universidad de Granada.

- * **SORIANO CARRILLO J.** (1978). "Proceso de endurecimiento del cemento portland". II Congreso de Geoquímica de España (279-292).

- * **SORIANO CARRILLO J, RUESTO y DE LA PEÑA.** (1984). "Influencia de la naturaleza de los áridos en el comportamiento del hormigón". I Congreso Español de Geología (959-969).

- * **TAYLOR R K and SPEARS** (1970). "Break-down of British Coal Measure Rocks". Inst. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol 7 (481-501).

- * **TERRESSE** (1932). "l'art hispano-mauresque des origines au XIIIe siecle". Paris (158 pgs.).

- * **THARAN M.**(1978). "Architecture de terre dans la Surd-oeste de France". Patrimoine europeén en terre et sa rehabilitation. Coloque International place sous le Patronage de l'agence nationale pour l'amerioration de habitat. 18/19/20.

- * **de la TORRE M J, RODRIGUEZ GORDILLO J y SEBASTIAN PARDO E.** (1991). "Presencia sw yeso en morteros y hormigones nazaries en la Alhambra". Boletin Sociedad Española de mineralogía 14-1 (3-4).

- * **de la TORRE M J, RODRIGUEZ GORDILLO J y SEBASTIAN PARDO E.** (1992). " Characterization of the Alhambra (Granada, Spain). 7th International Congress on deterioration and conservation of stone. Portugal.

- * **de la TORRE M J, RODRIGUEZ GORDILLO J and SEBASTIAN PARDO E.** (1992). " Brciks in some arqueological zones of the Alhambra, Granada (SWpain)". Mineralogy and chemistry. Mediterranean clay Meeting. Lipari, Italia.

- * **de la TORRE LOPEZ M J.** (1994). "Estudio de los materiales de construcción en la Alhambra". Tesis Doctoral, Universidad de Granada.

- * **TORRACA G.** (1979). "Physical-Chemical deterioration of porous material". Notes for a general model. II Mattone di Venezia (95-114).

- * **TORRACA G.**(1986). " Porous building materials". ICCRON Technical notes 149.

- * **TORRES BALBAS L.** (1985). "Ciudades Hispanomusulmanas". 2ª Edic. Ministerio de Asuntos Exteriores. Instituto Hispánico Árabe de Cultura.

- * **TORROJA E.**(1991) "Razón de ser de los tipos estructurales. 7ª ed. Editado Instituto E. Torroja.

- * **TUCKER ME and WRIGTH VP.** (1990). " Carbonate Sedimentology ". Scientific. Publ., London (pg. 482).

- * **TUSET J.** (1986). "La construcción con tierra estabilizada. Utilización de la síntesis". Monografía nº 385/386. Inst. Eduardo Torroja CSIC (60-71).

- * **VALVERDE ESPINOSA I, LOPEZ OSORIO J M, MONTORO GARCIA R, PAREJO FERNANDEZ A, LOPEZ ROBLES M, RODRIGUEZ GALLEGOS M G y ONTIVEROS ORTEGA E.**(1992). "Arquitectura en tierra en el Albayzín de Granada". Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. Canarias, España.

- * **VALVERDE ESPINOSA I, LOPEZ OSORIO J M, SEBASTIAN PARDO E y ONTIVEROS ORTEGA E.**(1993). " Study of the materials used in the earthen walls of the city of Granada (Spain)". 7th Conferência Internacional sobre o estudo e conservação da arquitectura de terre. Portugal (464-468).

- * **VARGAS NEUMANN.** (1986). "La construcción con tierra hoy, una visión desde Latinoamérica". Monografía nº 385/386. Inst. Eduardo Torroja CSIC (107-114).

- * **VAZQUEZ ESPI** (1986). "Barro y cemento, dos tecnologías convexas". Monografía 385/386. Inst. Eduardo Torroja CSIC (73-75).

- * **VIENNOT.** (1930). "Observation géologiques dans la région de Granada (Andalousie)". Soc Geolog. de France Vo II (633-660).