

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES



**CARACTERIZACIÓN Y UTILIZACIÓN DE
PUZOLANAS COMO ADITIVOS
MINERALES ACTIVOS EN CEMENTOS.
APLICACIÓN EN VIVIENDAS DE BAJO
COSTE**

PROYECTO FIN DE CARRERA

AUTOR:
Antonio Gómez González

DIRECTOR/A:
D. Alfonso Cárcel González

DIRECTOR/A
D. José María Monzó Balbuena

Valencia, 15 de Abril de 2009

INDICE

0. RESUMEN	9
1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Definición del problema y antecedentes.....	13
1.1.1. La escasez de vivienda y América Latina.....	13
1.1.2. Vivienda y materiales de construcción.....	14
1.1.3. Aproximación histórica del cemento, aglomerantes y aglomerados.....	15
1.1.4. Cemento y medio ambiente.....	16
1.1.5. Producción mundial de cemento.....	16
1.2. Propuesta y justificación	17
1.2.1. Propuesta	17
1.2.2. Justificación	18
1.2.3. Desarrollo	19
1.3. Fundamentos teóricos	20
1.3.1. Puzolanas	20
Definición	20
1.3.1.1. Aproximación histórica	20
1.3.1.2. Clasificación	20
1.3.1.3. Reacción puzolánica	22
1.3.1.4. Puzolanidad y reactividad puzolánica	23
1.3.2. La cascarilla de arroz	26
1.3.2.1. Generalidades	26
1.3.2.2. Caracterización	27
1.3.2.3. Puzolanidad y reactividad	30
1.3.3. La ceniza volante	35
1.3.3.1. Generalidades	35
1.3.3.2. Caracterización	36
1.3.3.3. Puzolanidad y reactividad	37
1.3.4. La ceniza volcánica	39
1.3.4.1. Generalidades	39
1.3.5. La teja de microhormigón	39
1.3.5.1. Introducción	39
1.3.5.2. Fabricación y características	40
1.3.5.3. Ventajas y desventajas	41
1.4. Limitaciones	42
1.4.1. De disponibilidad	42
1.4.2. Tecnológicas	43
1.4.3. Fisicomecánicas	43
1.4.4. Normativas	43
2. OBJETIVOS	45
2.1. General y específicos	46
2.2. Colaterales	46
2.2.1. Tecnológicos	46
2.2.2. Sociales	46
2.2.3. Económicos	47

3.	MATERIALES Y MÉTODOS	48
3.1.	Caracterización de los materiales	49
3.1.1.	Arena	49
3.1.2.	Cemento	49
3.1.3.	Puzolana	50
3.1.3.1.	Ceniza de cascarilla de arroz	50
3.1.3.2.	Ceniza volante	62
3.1.3.3.	Ceniza volcánica	62
3.2.	Morteros. Diseño de mezclas	68
3.2.1.	Valencia.....	68
3.2.2.	Lima	69
3.3.	Ensayos realizados	71
3.3.1.	Ensayos realizados sobre los morteros	72
3.3.2.	Ensayos realizados sobre las tejas	73
3.4.	Equipos utilizados	75
3.4.1.	Molino	75
3.4.2.	Trituradora	75
3.4.3.	Tamizadota	76
3.4.4.	Balanza	76
3.4.5.	Amasadora	77
3.4.6.	Compactadota	77
3.4.7.	Mesa de sacudidas	77
3.4.8.	Mesa vibradora	78
3.4.9.	Moldes	78
3.4.10.	Regla y llana	78
3.4.11.	Máquina de ensayo de compresión	78
3.4.12.	Máquina de ensayo de flexión	79
3.4.13.	Depósito estanco	79
3.4.14.	Horno	79
3.5.	Metodología	80
3.5.1.	Ensayos sobre los morteros	81
3.5.1.1.	Ensayo de fluidez o consistencia	81
3.5.1.2.	Ensayo de flexión	84
3.5.1.3.	Ensayo de compresión	86
3.5.1.4.	Ensayo de absorción	88
3.5.2.	Ensayos sobre las tejas	89
3.5.2.1.	Ensayo de impermeabilidad	89
3.5.2.2.	Ensayo de flexión	91
3.5.2.3.	Ensayo de impacto	92
3.6.	Cronograma	92
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	94
4.1.	Presentación de resultados	95
4.1.1.	Valencia	95
4.1.1.1.	Prismas. Ensayo de compresión	95
4.1.1.2.	Prismas. Ensayo de flexión	97
4.1.1.3.	Prismas. Ensayo de absorción por capilaridad	99
4.1.1.4.	Ensayo de fluidez	100
4.1.1.5.	Tejas. Ensayo de flexión	101

4.1.1.6. Tejas. Ensayo de impacto	103
4.1.1.7. Tejas. Ensayo de impermeabilidad	104
4.1.2. Lima	104
4.1.2.1. Serie I. Ensayo de compresión	104
4.1.2.2. Serie II. Ensayo de compresión	106
4.1.2.3. Serie III. Ensayo de compresión	107
4.1.2.4. Ensayo de fluidez	108
4.2. Análisis	109
4.2.1. Valencia	109
4.2.1.1. Prismas. Ensayo de compresión	109
4.2.1.2. Prismas. Ensayo de flexión	110
4.2.1.3. Prismas. Ensayo de absorción por capilaridad	111
4.2.1.4. Ensayo de fluidez	111
4.2.1.5. Tejas. Ensayo de flexión	112
4.2.1.6. Tejas. Ensayo de impacto	112
4.2.1.7. Tejas. Ensayo de impermeabilidad	113
4.2.2. Lima	113
4.2.2.1. Serie I. Ensayo de compresión	113
4.2.2.2. Serie II. Ensayo de compresión	113
4.2.2.3. Serie III. Ensayo de compresión	114
4.2.2.4. Ensayo de fluidez	114
5. CONCLUSIONES	115
5.1. Conclusiones específicas	116
5.1.1. Respecto a las puzolanas utilizadas	116
5.1.2. Respecto a la molienda	116
5.1.3. Respecto a la trabajabilidad de las mezclas y la absorción de agua	116
5.1.4. Respecto a la resistencia a la compresión	117
5.1.5. Respecto a la resistencia a la tracción	117
5.1.6. Respecto a su aplicación en tejas de microhormigón	118
5.1.7. Respecto a la Viabilidad tecnológica	118
5.2. Conclusiones generales	118
6. BIBLIOGRAFÍA	120
7. ANEXOS	123
7.1. Anexo I	124
7.1.1. Valencia.....	124
7.1.1.1. Prismas. Ensayo de compresión.....	124
7.1.1.2. Prismas. Ensayo de flexión.....	127
7.1.1.3. Prismas. Ensayo de absorción por capilaridad.....	129
7.1.1.4. Ensayo de fluidez.....	132
7.1.1.5. Tejas. Ensayo de flexión.....	133
7.1.1.6. Tejas. Ensayo de impacto.....	135
7.1.2. Lima.....	136
7.1.2.1. Serie I. Ensayo de compresión.....	136
7.1.2.2. Serie II. Ensayo de compresión.....	137
7.1.2.3. Serie III. Ensayo de compresión.....	137
7.2. Anexo II. Planos	

PRÓLOGO

El artículo nº 25 de la Declaración Universal de los Derechos Humanos de 1948 expone que “toda persona tiene derecho a un nivel de vida adecuado”, especificando que la vivienda es uno de los componentes de este derecho.

Más tarde, en 1966, la Asamblea General de las Naciones Unidas en su Pacto Internacional relativo a los derechos económicos, sociales y culturales, señala en su artículo nº 11 que “toda persona tiene derecho a un nivel de vida adecuado para sí y su familia, incluyendo alimentación, vestido y vivienda digna, y una mejora continua de sus condiciones de existencia”.

Si nos centramos en Latinoamérica las diferentes Constituciones de cada Nación también hacen referencia a este derecho.

La Constitución Nacional de Argentina recoge en su artículo 14 que “... la ley establecerá: seguro social obligatorio... defensa del bien de familia, compensación económica familiar y acceso a una vivienda digna.”

El artículo 65 de la Constitución de Costa Rica indica que “el estado promoverá la construcción de viviendas populares.”

La Constitución de la República de Cuba establece que “el Estado Socialista trabaja para asegurar que no haya familia sin una vivienda confortable.”

En Ecuador la Constitución de la República en su Título III, numeral 20 contempla “el derecho a una calidad de vida que asegure la salud, alimentación y nutrición, agua potable, saneamiento ambiental, educación, trabajo, empleo, recreación, vivienda, vestido y otros servicios sociales necesarios.”

En su artículo 119 la Constitución de la República de el Salvador “declara de interés social la construcción de viviendas. El Estado procurará que el mayor número de familias salvadoreñas lleguen a ser propietarias de su vivienda.”

La República de Guatemala escribe lo siguiente en el artículo 119 de su Constitución: “El Estado debe fomentar con prioridad la construcción de viviendas populares, mediante sistemas de financiamiento adecuado, a efecto de que el mayor número de familias guatemaltecas las disfruten en propiedad.”

México, en el artículo 4º de su Constitución declara que “toda familia tiene derecho a disfrutar de una vivienda digna y decorosa.”

Artículo 113 de la Constitución Política de la República de Panamá: “El Estado establecerá una política nacional de vivienda destinada a proporcionar el goce de este derecho social a toda la población, especialmente a los sectores de menor ingreso.”

El artículo 83 de la Constitución Nacional de Paraguay dice que “toda familia tiene derecho a un hogar asentado sobre tierra propia, para lo cual se perfeccionarán las instituciones y se dictarán las leyes más convenientes a fin de generalizar la propiedad inmobiliaria urbana y rural y

promover la construcción de viviendas económicas, cómodas e higiénicas, especialmente para trabajadores asalariados y campesinos.”

Título II, artículo 15 de la Constitución de la República Dominicana: “Se declara de alto interés social el establecimiento de cada hogar dominicano en terreno o mejoras propias. Con esta finalidad el Estado estimulará el desarrollo del crédito público en condiciones socialmente ventajosas, destinado a hacer posible que todos los dominicanos posean una vivienda cómoda e higiénica.”

El artículo 45 de la Constitución de la República Oriental de Uruguay dice que “todo habitante de la República tiene derecho a gozar de una vivienda decorosa. La ley provendrá a asegurar la vivienda higiénica y económica, facilitando su adquisición y estimulando la inversión de capitales privados para ese fin.”

Artículo 82 de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela: “Toda persona tiene derecho a una vivienda adecuada, segura, cómoda, higiénica, con servicios básicos esenciales que incluyan un hábitat que humanice las relaciones familiares, vecinales y comunitarias. La satisfacción progresiva de este derecho es obligación compartida entre los ciudadanos y el Estado en todos sus ámbitos.”

Parece evidente que el derecho a la vivienda es reconocido mundialmente, pero lamentablemente el respeto a este derecho no está tan extendido. Y realmente no hablamos de un derecho “cualquiera”. Es cierto que todos y cada uno de los Derechos Humanos es fundamental y debiera ser respetado universalmente, pero también es cierto que si somos un poco críticos debemos reconocer que existen una serie de derechos que prevalecen por encima del resto a la hora de evaluar las necesidades básicas del ser humano.

Si nos planteáramos la supervivencia “animal” como forma de vida nuestro instinto nos haría buscar tres cosas principalmente: alimento, refugio e interrelación con otros seres vivos.

Por tanto estamos ante un problema de grandes dimensiones, tanto por su naturaleza “vital” como por su extensión a una parte muy importante de la población mundial.

Lógicamente el propósito de este proyecto no es erradicar este problema, ya que esto implicaría la participación de otros muchos actores de la sociedad, que lamentablemente o no están por la labor o no disponen de los recursos necesarios. Su objetivo final es sumar en esa dirección, es tratar de facilitar de alguna manera el acceso a la vivienda tratando de reducir sus costes y permitiendo la utilización de materiales locales disponibles en las zonas donde esta carencia es más pronunciada.

0. RESUMEN

0. RESUMEN

El presente proyecto se presenta como Proyecto Fin de Carrera para la obtención del título de Ingeniero de Materiales por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Valencia

Se engloba dentro del marco del proyecto de cooperación interuniversitaria "Utilización de puzolanas naturales en la elaboración de prefabricados con base cementicia destinados a la construcción de viviendas de bajo coste", financiado por la AECID, y cuyos responsables son la profesora Raquel Barrionuevo de Machicao, por parte de la Universidad Nacional de Ingeniería de Lima, y el profesor José María Monzó Balbuena, por parte de la UPV. Además destacar que para su realización se disfrutó de una estancia de 4 meses en Lima gracias a la concesión de una beca PROMOE-Cooperación concedida por el Centro de Cooperación al Desarrollo de la UPV.

También hacer constar que la tutorización y seguimiento de este proyecto final de carrera fue compartida por los profesores Alfonso Cristóbal Cárcel, del Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, y José María Monzó Balbuena, del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil.

Ante el problema del excesivo coste, tanto económico como medioambiental, del cemento portland, se propone su uso en combinación con una adición activa, las puzolanas, que suponga una disminución de la cantidad de cemento utilizada. La selección de las puzolanas como adición se basa en que se trata de un componente utilizado desde la antigüedad, por lo que se tiene un punto de partida sólido, pero del que no se conoce aún todo su potencial, por lo que resulta susceptible de investigación.

El proyecto se llevó a cabo en tres etapas principales:

- La primera etapa fue la de documentación previa, realizada en Valencia y que consistió básicamente en la búsqueda de publicaciones (libros y artículos científicos) relacionados con el tema, y en su análisis.
- La segunda etapa fue la de desarrollo experimental, tanto en su planificación como en su ejecución. A su vez esta etapa puede dividirse en otras dos, una primera desarrollada en Valencia y una segunda que se llevó a cabo en Lima (Perú).
- La tercera etapa fue el análisis de los resultados obtenidos y la redacción de las conclusiones finales.

Para la evaluación de las puzolanas se realizaron varios ensayos sobre distintas muestras y además se trató de aplicar alguna de ellas a la construcción de prefabricados de bajo coste. Principalmente se evaluó la resistencia a compresión, a flexión, al impacto, la impermeabilidad, la absorción por capilaridad y la trabajabilidad de las mezclas de puzolana con cemento portland en distintas proporciones. Además se realizó un estudio paralelo, dentro del marco de proyecto mencionado anteriormente, por el que se caracterizaron las distintas puzolanas y cuyos resultados se incluyen en este texto.

Las conclusiones generales a las que se llegó fueron las siguientes:

- Se pueden alcanzar mejores resultados en prácticamente todos los aspectos analizados al añadir una adición de puzolana al cemento portland.

- La obtención de estos resultados requiere por un lado unos materiales de determinadas características y por otro un procedimiento más o menos costoso, siempre visto desde el punto de vista de personas de escasos recursos.
- La aplicación de estas adiciones a componentes prefabricados para construcciones de bajo coste resulta viable en la mayoría de los aspectos, y cuando menos resulta susceptible de una investigación más profunda con visos de alcanzar grandes resultados.
- La participación de estos prefabricados en el fomento de la creación de microempresas podría resultar aconsejable siempre que se adaptara el proceso de molienda a las necesidades y posibilidades de las regiones más desfavorecidas.
- Dependiendo de la trabajabilidad y resistencia necesarias en la mezcla se podrían elegir distintas proporciones ideales, en general combinando pequeñas cantidades de CV con grandes cantidades de CCA.
- Las puzolanas naturales resultan aconsejables por su mayor resistencia, mejor trabajabilidad y disponibilidad en la naturaleza sin necesidad de tratamiento (sólo molienda).
- Las cenizas de cascarilla de arroz resultan aconsejables por suponer un residuo que se desea eliminar, la generación de energía primaria (calor) en su procesamiento, su disponibilidad en puntos más repartidos de la geografía y la no repercusión en el medio ambiente en forma de canteras.
- Las cenizas volantes resultan aconsejables por su gran aportación a la trabajabilidad y a la resistencia y por ser un residuo que se desea eliminar.

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y ANTECEDENTES

1.1.1 La escasez de vivienda y América Latina

En los últimos 50 años se ha duplicado la población mundial, se ha pasado de 3000 millones a 6000 millones de habitantes en medio siglo. Esto en condiciones normales hubiera supuesto una expansión económica, industrial, de infraestructura social... y también habitacional, de grandes dimensiones. Lamentablemente esta expansión se ha producido sólo a medias y en determinados lugares, mientras en muchos otros se sufren únicamente las consecuencias de la expansión demográfica.

En particular, también Latinoamérica ha doblado su población, y ha pasado de 240 millones a 480 millones, contribuyendo aproximadamente en un 8% al aumento de población mundial. Pero este dato debe ser analizado en mayor profundidad, ya que este crecimiento no ha sido uniforme, sino que se ha concentrado en las grandes ciudades, pasando la tasa de urbanismo del 50% a aproximadamente el 74% (entendiendo por tasa de urbanismo el porcentaje de población de un país que vive en núcleos de más de 25000 habitantes). Resumiendo, Latinoamérica tiene la misma población rural que hace 50 años, mientras que la urbana se ha triplicado.

Y es que el concepto de ciudad como generadora de oportunidades, como centro económico, industrial y político está muy extendido en el continente (y también en el resto del mundo), y esto unido al escaso interés demostrado por los gobiernos hacia las zonas rurales ha propiciado el éxodo masivo de los ciudadanos latinoamericanos a las ciudades. Algunas de los núcleos de población más grandes del planeta se encuentran en América Latina; México DF, Sao Paulo, Buenos Aires y Rio de Janeiro se encuentran dentro del top de ciudades más pobladas. Y el fenómeno, lejos de estabilizarse apunta a un crecimiento continuado, que hace prever que dicha tasa de urbanismo sea del 85% en 2025.

Evidentemente esta expansión demanda una cantidad de viviendas difícilmente asumible para un continente en pleno proceso de desarrollo; tanto para sus gobiernos preocupados en otros asuntos de discutible impacto, como de sus habitantes, que generalmente abandonan el campo huyendo de una pobreza que amenaza con acabar con ellos y sus familias, y que lógicamente no disponen de los recursos necesarios para su construcción.

Ante este panorama el único recurso que le queda a la población es la autoconstrucción o construcción informal, y su relevancia ha llegado hasta tal punto que supone porcentajes de entre el 30% (Chile, Argentina...) y el 80% (Ecuador, Perú...) de la totalidad de viviendas que se construyen en cada país. Hasta tal punto llega esta situación que en muchos países la cantidad de cemento consumido por el sector informal supera ampliamente el consumido en la construcción formal.

Según datos de la Comisión Económica para América Latina (CEPAL) existen en Latinoamérica cerca de 26 millones de viviendas susceptibles de ser reformadas con urgencia, y la necesidad de construir otros 28 millones de viviendas. A una media de cinco habitantes por vivienda supondría que 150 millones de personas habitan viviendas sin las mínimas condiciones y otros 190 millones directamente carecen de vivienda. Más datos, 25 millones de viviendas sin agua potable y un tercio del total de viviendas urbanas no dispone de evacuación de aguas fecales.

Las "villas miseria", "favelas", "cantegriles", "poblaciones callampas", "tugurios", "pueblos jóvenes", "ciudades perdidas", "arrabales" o "chacaritas" se han convertido en habituales en los extrarradios de las grandes ciudades latinoamericanas, donde se aglutinan millones de personas en condiciones de vida insalubres y sin grandes esperanzas de mejora a corto y medio plazo.

Por si todo esto fuera poco se trata de una zona particularmente maltratada en los últimos años por desastres ecológicos, y lo que en otras zonas del mundo supone solamente pérdidas materiales, aquí se paga con miles de vidas humanas, precisamente debido a la precariedad de sus construcciones. Sin tratar de hacer registro de todas las tragedias sucedidas valga como ejemplo el huracán Mitch, que en 1998 dejó 10000 muertos y 9000 desaparecidos en Centroamérica, o más cerca en el tiempo el terremoto en Pisco, Perú, en 2007, con 600 muertos, 1800 heridos y 76000 viviendas destruidas.

1.1.2. Vivienda y materiales de construcción

A la hora de evaluar el coste de una vivienda hay tres factores que aglutinan la práctica totalidad de la inversión: terreno, mano de obra y materiales. Por supuesto existen otra serie de elementos como pueden ser los permisos o licencias, el alquiler de maquinaria, los costes burocráticos, etc., pero evidentemente resultan minoritarios enfrentados con los tres anteriores.

Dependiendo de la zona del mundo en la que nos encontremos la importancia de cada uno de estos factores varía, adquiriendo cada uno de ellos mayor o menor peso relativo dependiendo de las circunstancias del lugar.

Salvo algunas excepciones en las que los precios del terreno o la mano de obra sean especialmente elevados, en la mayoría de las ocasiones son los materiales los que representan la mayor parte de la inversión. En el denominado primer mundo pueden rondar el 50% del coste total de la vivienda, siempre dependiendo de la localización y el tipo de construcción.

Pero el tipo de construcción que nos ocupa, como hemos planteado anteriormente es aquel destinado a la vivienda social, que tendrá como usuarios a familias con muy pocos recursos. Este es el caso de las zonas rurales y urbanas marginales que se encuentran en la práctica totalidad de los países de América Latina. La autoconstrucción, ya sea individual o dirigida, es la práctica habitual en muchas zonas y es aquí donde el coste de los materiales alcanza proporciones mucho mayores. El sector informal no suele atender a propiedades de terrenos, a planos, a licitaciones, a métodos constructivos reglados, sino que muchas veces sólo se dispone de las manos de los miembros de la familia y de los materiales que puedan adquirir con sus escasos recursos. Tal esa así que en muchos casos los materiales de construcción pueden representar el 100% del coste de la vivienda.

Existe una gran variedad de materiales de construcción: cerámica, madera, acero, piedra, tierra, pero hay uno que es el indiscutible rey de la construcción a nivel mundial, el cemento. En su calidad de aglomerante representa la base de la mayoría de las construcciones modernas, ya sea formando parte de su estructura (hormigón) o de su recubrimiento (morteros).

El cemento se ha convertido en un material prácticamente indispensable por un montón de cualidades, pero a decir verdad no se trata de un material económico ni ecológico, por lo tanto su producción y consumo en las condiciones actuales no resulta sostenible a nivel mundial.

1.1.3. Aproximación histórica del cemento, aglomerantes y aglomerados

Los materiales aglomerantes forman parte de la historia de la construcción prácticamente desde su nacimiento. Su función fundamental es la de servir de pegamento, ya sea entre materiales pétreos de tamaño relativamente pequeño para formar los aglomerados, o bien entre aquellos de mayor tamaño, como los ladrillos, para formar conglomerados.

Las primeras referencias históricas de su uso datan de la civilización egipcia, donde utilizaban barro mezclado con paja para pegar ladrillos. También se han encontrado restos de cal y yeso en las pirámides, utilizados como morteros. En la misma época los chinos utilizaban materiales cementantes para la construcción de la Gran Muralla. Pero no fue hasta la llegada de los romanos cuando se produjo definitivamente la expansión de estos materiales. Descubrieron que mezclando cal con cenizas volcánicas procedentes de la ciudad de Pozzoli, cerca de Nápoles, se obtenían pastas con propiedades cementantes. Esta puede considerarse la primera aproximación a los aglomerantes cal-puzolana, que como veremos más adelante constituirán la base de este proyecto.

Después de los romanos este material cayó en desuso hasta que a mediados del siglo XVIII un ingeniero británico, llamado John Smeaton, descubrió la fabricación de un cemento hidráulico quemando piedra caliza, que contenía impurezas de arcilla.

En 1812 Louis Vicat demostró que la naturaleza hidráulica de este componente procedía de la quema conjunta de caliza y arcilla, y en 1824 Joseph Aspdin patentó el cemento Pórtland.

Su combinación con áridos y grava para convertirse en hormigón, y la inclusión en este de refuerzos metálicos para la fabricación del hormigón armado proyectó su aplicación en obras de ingeniería cada vez de mayores dimensiones, como puentes, presas y edificios cada vez más altos, adaptándose perfectamente a la producción industrial.

El desarrollo del hormigón ha sufrido un gran impulso en el último siglo. En los años 30 la inclusión de aireantes mejoró considerablemente su resistencia ante las heladas. Posteriormente, en la década de los 80 los aditivos superplastificantes impulsaron la producción de hormigones de altas prestaciones, mediante la introducción de adiciones minerales activas, que en combinación con los aditivos anteriores permitieron bajar el consumo de agua y lograr una matriz mucho más compacta.

De este desarrollo prácticamente empírico se ha pasado en la actualidad, y gracias al gran avance en la ciencia de materiales, a un estudio en profundidad de las reacciones químicas que se dan en el proceso de hidratación, permitiendo obtener resultados muy satisfactorios y un comportamiento predecible.

El cemento Pórtland es hoy día uno de los materiales más utilizados en todo el mundo. Se produce en alrededor de 150 países, principalmente en Asia, Europa y Medio Oriente.

Su uso universal, su costo relativamente bajo (en comparación con otros materiales de construcción), la posibilidad de producción industrial, su gran versatilidad y los grandes resultados obtenidos en su utilización han hecho que este material haya relegado al olvido o a usos menores a todos sus predecesores.

Tal es su expansión y su contribución al desarrollo de la humanidad que su nivel de producción nacional es hoy día considerada representativa del nivel de desarrollo de un país.

1.1.4. Cemento y medio ambiente

La industria cementera se encuentra dentro de las cinco industrias que consumen mayor cantidad de energía a nivel mundial. En compañía de la siderúrgica, la petrolera, la química y la papelera es la responsable del consumo del 50% de la energía primaria, y a su vez del 53 % del total de emisiones de CO₂. Específicamente las cementeras absorben el 2% del consumo total de energía y un 5% de la energía industrial a nivel mundial.

El proceso de producción de cemento consiste básicamente en la calcinación en horno de las materias primas hasta su reducción a polvo de clinker. Se estima que la producción de un kilo de este clinker requiere entre 3.6 y 6 MJ de energía térmica dependiendo del proceso utilizado. El consumo eléctrico que se estima para la producción de una tonelada de clinker está entre 90 y 120 Kw/h y el promedio de consumo mundial aproximado es de 4.8 MJ/Kg de cemento. Las regiones de mayor consumo son Europa Oriental, Norteamérica y Medio Oriente.

En lo referente a emisiones de gases de efecto invernadero la principal aportación de la industria cementera es la enorme cantidad de CO₂ liberado al medio ambiente. Este dióxido de carbono procede de dos fuentes principales: la primera es directamente de la descomposición de la piedra caliza para formar óxido de calcio (CaO); y la segunda directamente de la quema de combustible, bien sea directamente en el horno rotatorio utilizado para la obtención del clinker, bien sea indirectamente en las centrales térmicas para generar la energía eléctrica necesaria.

Hay varios factores que influyen en la cantidad de CO₂ emitido, como las particularidades de cada proceso productivo, los diferentes combustibles utilizados, la eficiencia energética o el contenido de clinker en el cemento, pero se puede estimar una emisión media de entre 0.81-0.89 kg. de CO₂ por kg. de cemento producido.

1.1.5. Producción mundial de cemento

Durante 2007 fueron producidos alrededor de 2600 millones de toneladas de cemento portland en todo el mundo. China destaca sobre todos los países como principal productor, con casi el 50% de esta producción mundial (unos 1300 millones de toneladas), lo que da una idea de el proceso de expansión que está viviendo este país. Le siguen muy de lejos la India (160 millones de toneladas) y Estados Unidos (96 millones de toneladas). España produjo durante este año unos 50 millones de toneladas, mientras que los primeros productores dentro de los países de América Latina son México y Brasil, con aproximadamente 40 millones de toneladas cada uno.

Si comparamos estos datos resulta llamativo que un país como España, con unos 46 millones de habitantes produzca más cemento que, por ejemplo, Brasil que tiene 184 millones o México con 106 millones. Pero aún resulta más desconcertante desde el punto de vista del consumo, mientras que España consume unos 55 millones de toneladas de cemento anuales, Brasil sólo consume 41 millones y México 35 millones, y más si tenemos en cuenta las necesidades de viviendas e infraestructuras en los tres países.

Si bien es cierto que el caso de España es un caso particular, ya que en los últimos años ha sufrido una gran expansión en el sector inmobiliario y de infraestructura ocupando en 2006 la primera posición mundial en consumo de cemento per capita, con 1'278 kg/habitante, es representativo que México ocupe el lugar nº18 en esta lista, y Brasil el nº22 con 334 y 219 kg/habitante respectivamente, por detrás de países como Italia, Grecia o Francia, con poblaciones mucho menores y necesidades habitacionales también mucho menores.

Otro dato representativo se puede extraer de la comparación entre precios del cemento y los sueldos medios de los distintos países. En España un saco de cemento cuesta entre 3 y 4 € dependiendo del fabricante, y el ingreso medio por persona es de unos 900 € mensuales, mientras que en Perú, con un sueldo medio de unos 250 € mensuales se paga entre 5 y 7 € por cada saco de cemento. Esto nos da una idea del enorme desequilibrio existente entre dos países bastante representativos de ambas realidades.

1.2. PROPUESTA Y JUSTIFICACIÓN

Como se indicó anteriormente se está tratando con un problema de tal magnitud que un proyecto final de carrera por sí mismo sólo puede llegar a mostrar un posible planteamiento que sume a un conjunto de muchos otros orientados hacia la solución del problema a largo plazo.

Por lo tanto este texto representa tan sólo una declaración de intenciones, un posicionamiento hacia la utilización de materiales alternativos y locales, una pequeña prueba que demuestre que existen otras formas de construcción eficientes y eficaces tanto técnica como económicamente, y sobre todo sostenibles.

1.2.1. Propuesta

Este proyecto propone la sustitución parcial del cemento utilizado en construcción de viviendas para su aplicación en módulos prefabricados, por un porcentaje de puzolanas de origen diverso.

Se propone la reutilización de desechos industriales y materiales locales de fácil acceso con propiedades puzolánicas para esta sustitución. Estos materiales serían cenizas volantes procedentes de centrales termoeléctricas, cenizas de cascarilla de arroz y cenizas volcánicas.

La aplicación propuesta de estos materiales sería en tejas de microhormigón como componente prefabricado.

Las distintas puzolanas utilizadas serían las siguientes:

- Ceniza de cascarilla de arroz quemada en horno, procedente de la empresa "DACSA S.A.", en Valencia (España)
- Ceniza de cascarilla de arroz quemada en horno, de Tarapoto (San Martín - Perú)
- Ceniza de cascarilla de arroz quemada en horno, de Picota (San Martín - Perú)
- Ceniza de cascarilla de arroz quemada al aire libre, de Picota (San Martín - Perú)
- Ceniza de cascarilla de arroz quemada al aire libre, de Tarapoto (San Martín - Perú)
- Ceniza de cascarilla de arroz quemada al aire libre, de Arequipa (Perú)
- Ceniza volante, de la central térmica de Andorra, en Teruel (España)
- Roca volcánica, de Conchupata (Ayacucho - Perú)

- Roca volcánica, de Totorillas (Ayacucho – Perú)
- Roca volcánica, de Tantarjo (Ayacucho – Perú)

1.2.2. Justificación

Ante el problema del excesivo coste, tanto económico como medioambiental, del cemento portland, se propone su uso en combinación con una adición activa, las puzolanas, que suponga una disminución de la cantidad de cemento utilizada. Esta propuesta se fundamenta en la evidencia de que el cemento es y seguirá siendo, al menos a corto y medio plazo, difícilmente sustituible dentro de la construcción, y que una utilización sostenible del mismo pasa por una reducción efectiva de su empleo. Otra opción sería conseguir que su proceso de producción fuera más eficaz y eficiente, pero se considera que se trata de un desarrollo con menor margen de actuación, y correspondiente a otras especialidades ajenas al ámbito de la ingeniería de materiales.

La selección de las puzolanas como adición se basa en que se trata de un componente utilizado desde la antigüedad, por lo que se tiene un punto de partida sólido, pero del que no se conoce aún todo su potencial como material no convencional para prefabricados de bajo coste, por lo que resulta susceptible de investigación.

La búsqueda de una aplicación práctica donde corroborar las bondades de la mezcla cemento-puzolana llevó a la elección de los módulos prefabricados por considerarse una de las opciones más sencillas y económicas para la autoconstrucción (ya sea individual o dirigida) y por su enorme potencial como base para la constitución de microempresas que ayuden al desarrollo económico local y fomenten la creación de empleo.

Se seleccionaron las tejas dentro del ámbito de los prefabricados en primer lugar porque forman parte del conjunto del techo, uno de los componentes críticos para que una vivienda resulte o no confortable. Y en segundo lugar porque se contaba con experiencia previa en su producción y se disponía de las herramientas necesarias.

Perú se presenta como localización perfecta para la aplicación del proyecto por varias razones. Se trata de un país que engloba perfectamente las carencias principales en materia de vivienda de un país latinoamericano en vías de desarrollo: excesivo centralismo, caracterizado por una marginación en todos los aspectos de las zonas rurales; centros urbanos excesivamente poblados, con el déficit habitacional que ello supone; gran cantidad de materias primas locales desaprovechadas o mal gestionadas; y un altísimo índice de construcción informal y de muy baja calidad.

A la hora de seleccionar el tipo de puzolana se tuvo en cuenta sobre todo su disponibilidad, en cada caso de la puzolana correspondiente, además de las características particulares de cada una de ellas. La cascarilla de arroz fue elegida por tratarse de un residuo agrícola muy abundante, de escasa utilización (en algunas granjas se usa como cama para las gallinas) y cuya gestión en muchos casos resulta problemática. Además diferentes estudios realizados con anterioridad demuestran que dentro de los residuos agrícolas es uno de los más adecuados para esta aplicación, como se verá más adelante. El caso de las rocas volcánicas es distinto, ya que no suponen un residuo, sino que se encuentran en la naturaleza, en muchos casos de forma abundante, lo que supone su principal ventaja. Además su explotación industrial actualmente es limitada, por lo que existen gran cantidad de canteras disponibles. Y por último las cenizas

volantes, las cuales no fueron elegidas por su disponibilidad, ya que para esta aplicación resulta escasa, sino para solventar un problema de manejabilidad de algunas mezclas, como se verá más adelante.

Como se ha visto en el punto anterior, las puzolanas provienen de lugares diversos, teniendo cada uno de ellos su razón de ser. Ayacucho se seleccionó por contar con una gran cantidad de canteras de puzolanas naturales (rocas volcánicas). Arequipa y San Martín son dos de los departamentos de mayor producción de arroz del Perú, al igual que Valencia es una de las provincias españolas que lideran esta clasificación.

1.2.3. Desarrollo

El proyecto se llevó a cabo en tres etapas principales, aunque algunas de ellas se solaparon en el tiempo por necesidad. La primera etapa fue la de documentación previa, realizada en Valencia y que consistió básicamente en la búsqueda de publicaciones (libros y artículos científicos) relacionados con el tema, y en su análisis. De esta etapa se extrajeron los conocimientos previos necesarios para desarrollar las siguientes desde un punto de vista científico, del que se carecía en parte, debido a la formación recibida orientada principalmente hacia otros campos.

La segunda etapa fue la de desarrollo experimental, tanto en su planificación como en su ejecución. A su vez esta etapa puede dividirse en otras dos, una primera desarrollada en Valencia y una segunda que se llevó a cabo en Lima (Perú). En Valencia se desarrollaron los ensayos sobre morteros y tejas de microhormigón, con las puzolanas locales. Fueron realizados en el Laboratorio del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, y se contó con la colaboración del Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, ambos pertenecientes a la Universidad Politécnica de Valencia. Por su parte en Lima tuvieron lugar los ensayos sobre morteros elaborados también con las puzolanas locales. En este caso se trabajó en el Laboratorio de Ensayos de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, en colaboración con la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Artes, ambos miembros de la Universidad Nacional de Ingeniería.

La tercera etapa del proyecto fue el análisis de los resultados obtenidos, que permitieron llegar a las conclusiones finales que se exponen al final de este trabajo.

Cuando se habla del solape de alguna de estas etapas nos referimos principalmente al proceso de documentación, que necesariamente se extendió a lo largo de todo el desarrollo del proyecto como medio para resolver los diferentes problemas surgidos durante el mismo. Así mismo, la redacción del texto presente también se llevó a cabo durante todo el lapso de tiempo comprendido durante el inicio y el fin del proyecto.

Cabe señalar que la estadía por un período de cuatro meses en la Universidad Nacional de Ingeniería de Lima se disfrutó gracias a la concesión de una beca PROMOE-COOPERACION por parte del Centro de Cooperación al Desarrollo y la Oficina de Programas Internacionales de Intercambio, de la Universidad Politécnica de Valencia.

También reseñar que este proyecto final de carrera se desarrolló en el marco del Proyecto de Cooperación Interuniversitaria concedido por la Agencia Española de Cooperación Internacional y que lleva por título "Utilización de puzolanas naturales en la elaboración de prefabricados con

base cementicia destinados a la construcción de viviendas de bajo coste”, cuyos responsables son la profesora Raquel Barrionuevo de Machicao, por parte de la UNI, y el profesor José María Monzó Balbuena, por parte de la UPV.

Por su parte la tutorización y seguimiento de este proyecto final de carrera fue compartida por los profesores Alfonso Cristóbal Cárcel, del Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, y José María Monzó Balbuena, del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil.

1.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este punto se trata de dar una aproximación teórica al mundo de las puzolanas, sin entrar en el campo de los cementos ya que se considera una información más conocida y accesible a todos. Cabe señalar que todas las gráficas, tablas y cuadros de este punto han sido tomados de distintas publicaciones, todas ellas incluidas en la bibliografía.

1.3.1. Puzolanas

1.3.1.1. *Definición*

La norma ASTM C 618 define las puzolanas de la siguiente forma:

“Las puzolanas son materiales silicios o silicios y aluminosos, los cuales por si solos tienen muy poco o ningún valor cementante, sin embargo, finamente divididas y ante la presencia de humedad, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a la temperatura ambiente para formar compuestos que poseen propiedades cementantes”.

Esta definición ha sido objeto de muchas críticas, ya que se ha probado la existencia de materiales que aún saliéndose de los límites marcados aquí presentan un comportamiento netamente puzolánico. Por tanto debe tomarse como un punto de partida aproximado y no como una verdad absoluta.

Generalmente los materiales puzolánicos presentan un alto contenido de sílice (SiO_2) y/o alúmina (Al_2O_3) en estado vítreo, caracterizado por tanto por su baja cristalinidad. En ocasiones también contienen minerales inactivos en distintas proporciones, tales como cuarzo, feldespato, magnetita, etc...

1.3.1.2. *Aproximación histórica*

El término “Puzolana” proviene de la localidad italiana de Puzzuoli, cercana a Nápoles, donde los romanos encontraron un material reactivo de origen volcánico y con gran cantidad de sílice. Lo llamaban “pulvis putelaneus”.

Las construcciones de los antiguos imperios Egipcio, Griego y Romano muestran evidencias de la utilización de puzolanas en sus cementos. También existen pruebas de su presencia en las cerámicas características de la dinastía Minoan, en China (3000-1500 a.C.). Los ingenieros de estas épocas descubrieron que el uso de polvo fino de materiales naturales podía ser utilizado

para hacer cemento, y lo desarrollaron hasta el punto de realizar construcciones de gran calidad. Prueba de esto es que el cemento utilizado en las grandes pirámides de Egipto hace 4500 años se encuentra en perfectas condiciones, mientras que el cemento portland que se usó en las restauraciones modernas se encuentra considerablemente degradado en apenas 50 años de vida.

La aparición de los aglomerantes cal-puzolana trajo consigo un gran desarrollo en la construcción, gracias al gran avance en la resistencia de los materiales. Se hizo posible la construcción de arcos, bóvedas, estructuras marinas, de gran durabilidad. También se utilizaron morteros puzolánicos en recubrimientos para baños, acueductos y tanques o depósitos con muy buenos resultados.

La forma en que los romanos utilizaban las puzolanas consistía en mezclarlas con cal y escombros formando una pasta compacta al añadirle agua. Usaban la roca volcánica finamente molida, o ladrillos y azulejos cerámicos también molidos en caso de no estar disponible. Un ejemplo muy gráfico es el Pantheon de Roma, construido utilizando este material y que ha sobrevivido 2000 años en un estado envidiable.

En la antigua civilización de Camiros, en la isla de Roda, se encontraron tanques de almacenaje submarino fabricados en una aproximación a lo que hoy en día es el hormigón. El análisis de este material demostró la utilización de un cemento consistente en tierra volcánica y cal constituyendo aproximadamente un 20% de la masa total. Data aproximadamente de año 500 a.C. Analizada también la resistencia y el módulo elástico del material se obtuvieron resultados de 12 MPa y 8 GPa respectivamente.

Las grandes construcciones de la India, durante los imperios griego y romano se desarrollaron a partir de morteros producidos a base de ladrillos de arcilla molidos y mezclados con cal. Este material, denominado "sukhi" es utilizado en nuestros días para la construcción de canales y diques, ya que presenta gran impermeabilidad y absorción de tensiones internas. Como bien es sabido, los principales componentes de la arcilla son precisamente la sílice y la alúmina. No fue hasta el siglo XVII cuando las puzolanas fueron utilizadas por primera vez en Inglaterra, desde donde se extendió su uso a Holanda para su aplicación en puertos y defensas marítimas. Precisamente este fue el impulso del desarrollo de las puzolanas como materiales muy aptos en entornos marítimos.

A partir de la construcción, en 1912, del acueducto de Los Angeles, donde se invirtieron 100.000 toneladas de cemento, la mitad producido a partir de puzolanas, se desarrollaron grandes investigaciones en el campo en los EEUU. Demostraron que los cementos portland mezclados con puzolanas adquirirían buenas propiedades, como la impermeabilidad y la resistencia a ambientes agresivos. Las construcciones de los diques de Bonneville, en 1935, y Friant, en 1942, confirmaron estos avances.

Si bien estas características impulsaron su desarrollo la principal razón del uso de las puzolanas en los EEUU fue la reducción de costes. Además de reducir el consumo de cemento portland, mucho más caro, los grandes proyectos que permitían la utilización de puzolanas se situaban muy próximos a la fuente de obtención. Así, la pizarra de Monterrey se utilizó en la construcción del Puente de San Francisco (Golden Gate).

Más actualmente construcciones como las Torres Petronas, en Malasia, o el puente Confederation y la plataforma marina Hibernia, en Canadá, fueron construidos con hormigones de altas prestaciones con contenido en puzolana.

1.3.1.3. Clasificación

Existen distintos sistemas de clasificación para las puzolanas basados en distintos criterios. Sistemas según su composición química, según su composición mineralógica, según sus propiedades físicas, según su reactividad, pero el sistema más comúnmente utilizado es aquel que clasifica a las puzolanas según su origen, natural o artificial.

Las puzolanas naturales son principalmente rocas o tierras y abarcan dos grandes grupos:

- Rocas volcánicas, donde la formación de vidrio amorfo se produce por fusión. Incluye principalmente a las cenizas volcánicas y piedra pómez, aunque también se encuentran en este grupo la obsidiana, los tufos volcánicos, las andesitas...
- Rocas o tierras que contienen ópalos, entre las que se encuentran la roca de sílice, las diatomitas, las pizarras y algunas arcillas.

Dentro de este grupo aquellas de origen volcánico se encuentran entre las más reactivas, debido a su alto contenido en zeolitas. Las zeolitas son básicamente aluminosilicatos con espacios intermoleculares de entre 3 y 10 Å que contienen moléculas de agua en movimiento facilitando el intercambio iónico, fenómeno fundamental en la reacción puzolánica, como se verá más adelante. Su composición básica consiste en aluminio, silicio, hidrógeno y oxígeno.

Las puzolanas artificiales se obtienen como subproducto de distintos procesos industriales y agrícolas. Existe una gran variedad dentro de este grupo, y evidentemente se encuentra en pleno proceso de expansión debido a su amplísimo campo de investigación. Como ejemplo podemos citar las cenizas de combustible pulverizado (conocidas como cenizas volantes), la escoria de alto horno, la arcilla cocida, la ceniza de cáscara de arroz, la ceniza de hoja de maíz, la ceniza de bagazo de caña de azúcar...

La norma americana ASTM C 618 clasifica las puzolanas en tres grandes grupos, clase F, clase C y clase N. La norma peruana NTP 334.104 adopta exactamente la misma clasificación. La siguiente tabla, extraída de la norma, muestra las características químicas y físicas de los tres grupos.

- Clase F, corresponde a cenizas volantes procedentes de la quema de antracita o carbón bituminoso.
- Clase C, corresponde a cenizas volantes procedentes de la quema de lignita o carbón sub-bituminoso.
- Clase N, corresponde a las puzolanas naturales, como tierras diatomeas, pizarras o cenizas volcánicas.

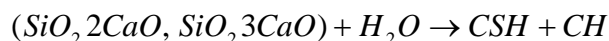
Chemical		F	C	N
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	min %	70	50	70
SO ₃	max %	5	5	4
Moisture Content	max %	3	3	3
Loss on Ignition	max %	6	6	10
Optional Chemical				
Available Alkalies	max %	1.5	1.5	1.5
Physical				
Fineness + 325 Mesh	max %	34	34	34
Strength Act.Mty/Cem.	min %	75	75	75
Water Requirement	max %	105	105	115
Autoclave Expansion	max %	0.8	0.8	0.8
Uniformity Requirements				
Density Max. Var.	max %	5	5	5
Fineness Points Var.	max %	5	5	5
Optional Physical				
Multiple factor		225	-	-
Inc. In Drying Shrinkage	max %	0.03	0.03	0.03
Uniformity Requirements				
A.E. Admixture Demand	max %	20	20	20
Control of ASR				
Expansion, % of low alkali cement	max %	100	100	100
Sulfate Resistance				
Moderate exposure, 6 months	max %	0.10	0.10	0.10
High exposure, 6 months	max %	0.05	0.05	0.05

Tabla 1.1- Características fisicoquímicas

1.3.1.4. Reacción Puzolánica

La denominada reacción puzolánica es principalmente la que se da entre el óxido de Silicio o sílice (SiO₂), la cal o hidróxido de Calcio (Ca(OH)₂, conocido como portlandita) y el agua, para producir silicatos de calcio hidratados (en adelante CSH). Es una reacción equivalente a la que se da en el cemento portland y se obtiene un producto muy similar. Además de esta reacción se producen otras secundarias, como la que da como resultado el aluminato de calcio (en adelante C₃A).

La reacción de hidratación del cemento portland puede simplificarse, sin tener en cuenta la estequiometría ni las fases aluminosas, de la siguiente manera:



En esta ecuación SiO₂2CaO y SiO₂3CaO (silicatos bicálcico y tricálcico) son los componentes principales del cemento portland, y CSH y CH (hidróxido de calcio, CaOH) son los productos de la reacción. Mientras que el CSH podría definirse como el "pegamento" del cemento, y principal responsable de su resistencia e impermeabilidad, el CH no tiene valor cementante y se disuelve fácilmente en medios agresivos. La principal aportación de este compuesto es la de mantener un ambiente alcalino (pH alto) que ayuda a proteger de la corrosión las armaduras en el cemento armado. La capacidad cementante de estos compuestos es debida, entre otras cosas, a su estructura atómica. El CSH posee una estructura altamente amorfa, con gran cantidad de ramificaciones que al entrecruzarse unas con otras forman un conjunto sólido, salpicado por partículas de CH, cristalinas, y que suponen puntos de ruptura del entramado amorfo, creando puntos débiles en la estructura global.

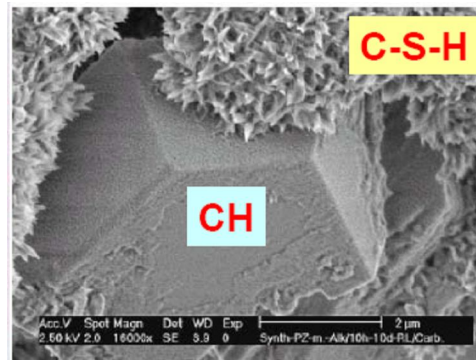
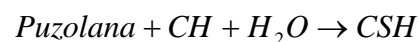


Fig. 1.1 – Micrografía: reacción de hidratación

Los granos de cemento, al contacto con el agua comienzan a desarrollar unos filamentos a su alrededor que en su conjunto forman el denominado “gel”. Los filamentos de cada grano se van entrelazando con los pertenecientes a los granos vecinos y así se forma la estructura ramificada de la figura.

Pero esta red no ocupa todo el volumen de la mezcla. Como hemos visto se ve salpicada por partículas de CH, pero además existen espacios libres donde esta red no puede llegar debido al relativo gran tamaño de las partículas, dejando una serie de huecos que contienen moléculas de agua. Debido a la diferencia de densidad esta agua tiende a salir hacia la superficie, formando en su camino los denominados poros capilares, que terminan debilitando la estructura global, al igual que las partículas de CH.

Por su parte la reacción puzolánica tendría la siguiente forma:



Es decir, no produce cal, sino que la consume, siendo el CSH su principal producto de reacción. Por tanto, si se adiciona cierta cantidad controlada de puzolana dentro del cemento portland ésta reaccionaría con el CH producto de la hidratación provocando la reducción de fases no deseadas y transformándolas en otras que contribuirían al aumento de su resistencia. La nucleación del CH alrededor de las partículas de puzolana, más finas, y distribuidas por toda la red reemplazará los cristales de CH (grandes y orientados) por otros cristales (mucho más pequeños y amorfos) procedentes de la reacción puzolánica.

Hay que tener en cuenta que si el consumo de CH resulta excesivo puede derivar en un problema de autoneutralización debido al desequilibrio creado entre los elementos de reacción, pudiendo conducir a la destrucción parcial de la matriz. Este efecto sería especialmente grave en el caso concreto del hormigón armado, ya que favorecería la corrosión del acero.

Cabe señalar que, además de estos productos, la reacción puzolánica da lugar a muchos otros que influirán de distinta manera en las propiedades de la mezcla final. Los casos más relevantes se describen más adelante.

Además de los efectos derivados de la componente química de la adición son igualmente importantes aquellos derivados de la componente física, relacionados con su tamaño de partícula y su superficie específica. Aunque depende del tipo de puzolana y del proceso de molienda (en su caso) éstas presentan generalmente tamaños de grano muy pequeños, esto es, una gran superficie específica. Estas partículas minúsculas se introducen en la red creada por el

cemento, situándose entre sus granos y desarrollando sus propios filamentos de gel, y promoviendo una mayor compacidad de la mezcla que da como resultado una menor porosidad y por tanto una mayor resistencia e impermeabilidad.

También las puzolanas intervienen en el proceso de liberación del calor de hidratación que se produce durante el fraguado. La reacción de hidratación del cemento es un proceso altamente exotérmico, con una gran cantidad de calor liberado en muy poco tiempo, y por tanto muy inestable. La presencia de puzolanas ralentiza este proceso, alargando el tiempo de fraguado y haciendo la reacción mucho más estable, y en consecuencia menos vulnerable a los ataques.

En resumen:

- La reacción puzolánica consume CH en lugar de generarlo, lo que hace más resistentes a las mezclas en ambientes ácidos.
- Debido a su pequeño tamaño de grano las puzolanas rellenan muy eficientemente los espacios muertos dificultando la formación de los poros capilares que se generan en la hidratación del cemento.
- Es una reacción lenta, por lo que la liberación de calor también lo será, aportando estabilidad, pero retrasando el fraguado.

1.3.1.5. *Puzolanidad y reactividad puzolánica*

Estos dos términos son básicos a la hora de analizar las cualidades de un material para formar compuestos cementantes mediante la reacción puzolánica. Como se ha descrito, los factores que determinan la puzolanidad de un compuesto son su contenido en sílice amorfa (una baja cristalinidad, y por tanto una estructura netamente amorfa resulta un factor crítico para que la puzolana resulte reactiva) y su tamaño de partícula. Ahora bien, no todos los compuestos que posean estas características similares se comportan de la misma manera, sino que su capacidad vendrá determinada por su reactividad.

Existen varios métodos para evaluar esta reactividad, no resultando ninguno de ellos concluyente al 100% a la hora de evaluar las bondades de una puzolana para su uso como adición activa. Es por esto que resulta recomendable la combinación de varios de estos métodos para una correcta selección.

a) Medida de la reducción de contenido de HC con el tiempo; la desaparición paulatina de la cal indica que ha reaccionado de alguna manera, y se ha combinado para formar otros compuestos. Si bien esta observación no es definitiva para asegurar un aumento de la resistencia, sí lo es en sentido negativo para descartar aquellas combinaciones en las que no se produzca dicha reducción.

b) Medida de la reducción de poros capilares con el tiempo; los productos de la reacción deben precipitarse alrededor de los granos ocupando espacios vacíos entre los granos de cemento. Según avanza la reacción estos productos se expanden evitando la formación de poros capilares e incluso cerrando parte de los ya formados. Puede darse una disminución del contenido de HC y no observarse una reducción significativa de la porosidad de la matriz, lo que podría

entenderse como una reacción insuficiente. Este es un método que puede orientar la investigación en uno u otro sentido, pero nunca resultar definitivo.

c) Observación microscópica; mediante la utilización del microscopio electrónico puede observarse la formación de los productos de reacción gracias a su morfología característica. Al igual que el primero de los métodos descritos éste puede considerarse sólo definitivo en caso negativo, si no se observan los productos esperados se puede descartar la mezcla.

d) Medida del aumento de la resistencia mecánica; éste puede considerarse como la evidencia más fiable de que realmente se ha producido la reacción, además de tratarse de la verificación definitiva de si se han logrado o no los objetivos, al menos en parte.

Todos estos métodos deben evaluarse teniendo en cuenta la menor velocidad de la reacción puzolánica, por lo que es necesario realizar comprobaciones intermedias y dar a las muestras el suficiente tiempo para desarrollar la reacción (al menos 28 días).

Lamentablemente en el ámbito de este proyecto sólo se han podido evaluar estos factores a través de la resistencia mecánica, que como se verá en las conclusiones ha sido el principal elemento de referencia.

1.3.2. La cascarilla de arroz

1.3.2.1. Generalidades

Es bien sabido que el arroz constituye uno de los pilares de la alimentación mundial, siendo el segundo alimento más consumido en el mundo, después del trigo y constituyendo la base de la alimentación en Asia y América Latina. Esto implica una producción que satisfaga estas necesidades, y por tanto un área cosechada que permita alcanzar esta producción.

Según datos de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) el área cosechada en el mundo durante el año 2007 alcanzaba los 157 millones de hectáreas, de los cuales casi 5 millones de hectáreas se sembraron en América del Sur. Si hablamos de producción también a lo largo del año 2007, se estima el cultivo mundial de arroz en alrededor de 650 millones de toneladas, y 21'5 millones de toneladas en América del Sur. Otros datos del mismo año:

- Área cosechada en el mundo: 156.952.666 hectáreas
- Rendimiento mundial: 41.524 hectogramos/hectárea
- Producción mundial: 651.742.616 toneladas
- Área cosechada en Perú: 338.870 hectáreas
- Rendimiento en Perú: 72.470 hectogramos/hectárea
- Producción en Perú: 2.455.809 toneladas
- Área cosechada en América del Sur: 4.805.662 hectáreas
- Rendimiento en América del Sur: 44.534 hectogramos/hectárea
- Producción en América del Sur: 21.401.528 toneladas

Esta producción supone una gran cantidad de subproductos derivados de su procesado para extraer el fruto, que precisan también de ser procesados evitando que supongan un problema económico y medioambiental.

La planta de arroz (*Oryza sativa*) es una monocotiledónea perteneciente a la familia de las Poaceae o Gramíneas. Sus raíces son delgadas y fibrosas. Su tallo está formado por nudos y entrenudos alternados, es cilíndrico y oscila entre los 60 y 120 cm de longitud. Las hojas son alternas, envainadoras, con el limbo (lámina que forma parte de la anatomía de la hoja) lineal, agudo, largo y plano. En la unión entre la vaina y el limbo se encuentra la lígula membranosa, bífida y erguida.



Fig. 1.2 – La planta de arroz

Al igual que multitud de vegetales, la planta de arroz contiene sílice en su interior. Esta sílice desempeña principalmente funciones estructurales y aumenta su resistencia. En la mayoría de las plantas es tomada de la tierra como componente inerte, para pasar a situarse en determinadas zonas, e incluso participar en su metabolismo, y en la formación de compuestos orgánicos. Normalmente se encuentra concentrada en los tallos, para reforzarlos y endurecerlos.

En 1934 algunos científicos japoneses ya habían descubierto que el silicio era beneficioso para el crecimiento del arroz, pero no fue hasta 1938 cuando se confirmó la presencia de la sílice en la estructura de la planta.

Dependiendo de la parte de la planta que estemos considerando, el contenido en sílice es distinto, variando entre un 2.63% y un 13.3%, presentándose los mayores porcentajes en la cascarilla.

Otro de los factores positivos que presenta la cascarilla de arroz es que al ser calcinada produce una gran cantidad de ceniza, entre el 13% y el 29% del peso inicial, y el contenido de sílice que presenta es altísimo, entre el 87% y el 97%. Además presenta pequeñas cantidades de sales inorgánicas, que constituyen impurezas eliminables con reflujos en medio ácido. A parte de la sílice, la cascarilla de arroz contiene cerca de un 85% de sustancias orgánicas, como celulosa o lignina.

Su aplicación en la industria del cemento se debe a que esta ceniza está compuesta por una sílice de alta reactividad, y un tamaño de partícula muy fino.

Dado el fino tamaño de partícula y la alta reactividad de la sílice, la ceniza obtenida de la calcinación de la cascarilla se usa en la industria del cemento y como fuente para la preparación de compuestos de silicio como carburo de silicio, nitruro de silicio, sialones y zeolitas.

1.3.2.2. Caracterización

La superficie externa de la cascarilla de arroz, también llamada exocarpo, está constituida por una estructura simétrica de celdas convexas separadas por surcos y granos de compuestos de silicio que se reparten por toda la superficie.

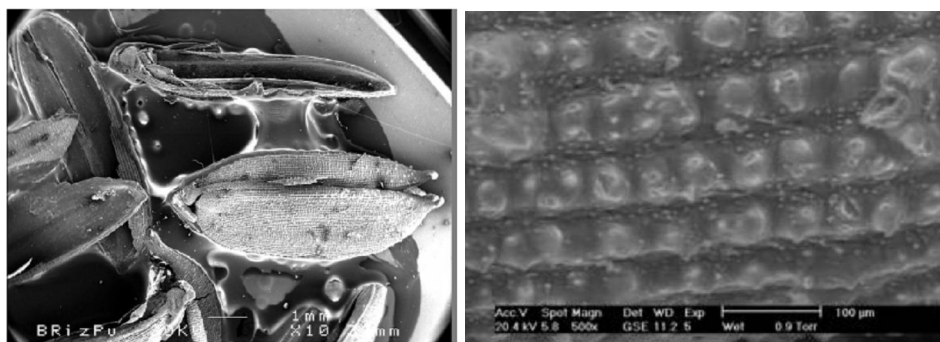


Fig. 1.3 – Micrografías: a) Cascarilla de arroz; b) Parte externa

La fig. 3 muestra una imagen de la parte externa de la cascarilla obtenida por microscopía electrónica. Se pueden observar claramente las superficies redondeadas, con un tamaño de 50x45 µm aproximadamente. Los pequeños puntos blancos corresponden a los microfotolitos, o compuestos de sílice, y su tamaño varía entre 2'2 y 7'5 µm. Los surcos por su parte miden alrededor de 21'5 µm.

Es también destacable la presencia, en la parte exterior, de unas protuberancias en forma de aguja o micropelos unicelulares; son estructuras aciculares (a semejanza con las hojas de los pinos) con un tamaño promedio de unas 200 µm.

La superficie interna, o endocarpo, presenta una serie de celdas cóncavas separadas unas 47 µm entre ellas.

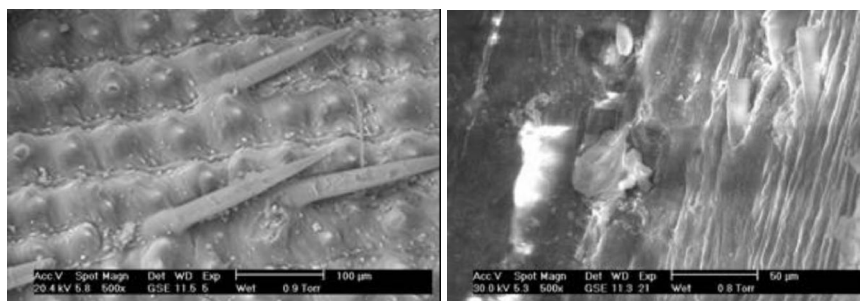


Fig. 1.4 – Micrografías: a) Micropelos; b) Parte interna

Mediante un análisis por difracción de rayos X se puede determinar la presencia de sílice y materia orgánica en ambas partes, interna y externa, de la cascarilla, siendo mayor la concentración de sílice en la superficie externa. La materia orgánica se ve reflejada en forma de CO₂. También se observan signos de presencia de agregados que contienen impurezas, sobre todo alúmina, en la superficie interna.

<i>Compuesto</i>	<i>SiO₂ %</i>	<i>CO₂ %</i>	<i>Al₂O₃ %</i>
Superficie externa	55,25	44,75	0,00
Superficie interna	35,48	58,24	6,27

Tabla 1.2 – Elementos más importantes

Analizando mediante microscopía óptica la estructura interna de la cascarilla se pueden observar tres zonas claramente diferenciadas (figura 3) con tres tipos de tejidos distintos. Primero se observa un tejido uniestratificado con proyecciones epidérmicas, correspondiente a la superficie

externa (1). Luego nos encontramos con la parte intermedia, o mesocarpo, formado por un tejido biestratificado con células de pared gruesa (2). Y por último, de nuevo un tejido uniestratificado, con células delgadas y alargadas, correspondiente a la parte interna (3).

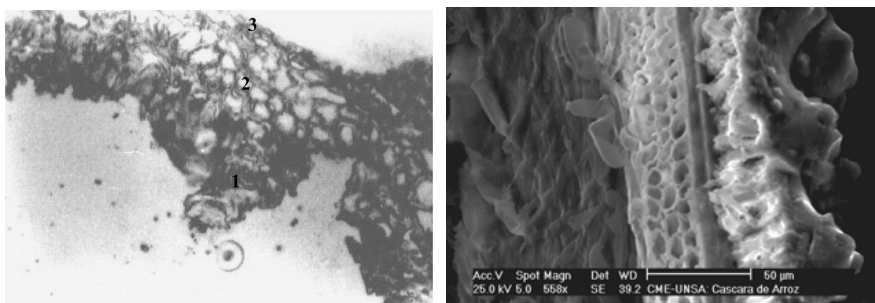
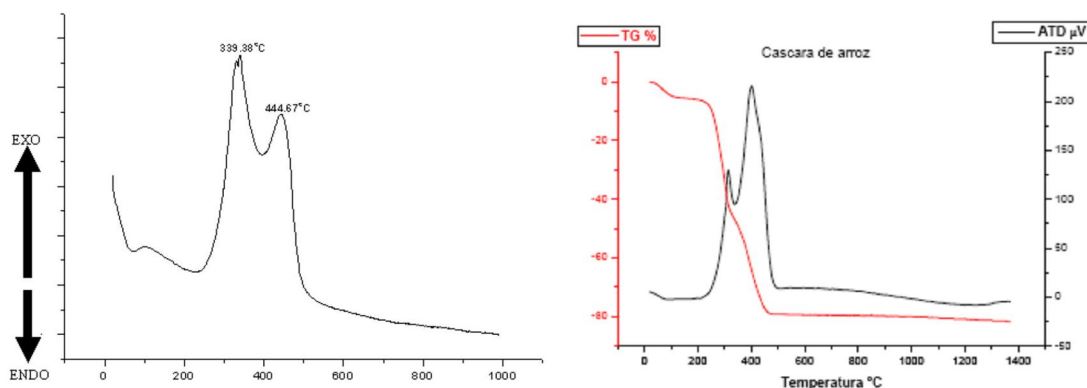


Fig. 1.5 – Distintas capas de la cascarilla

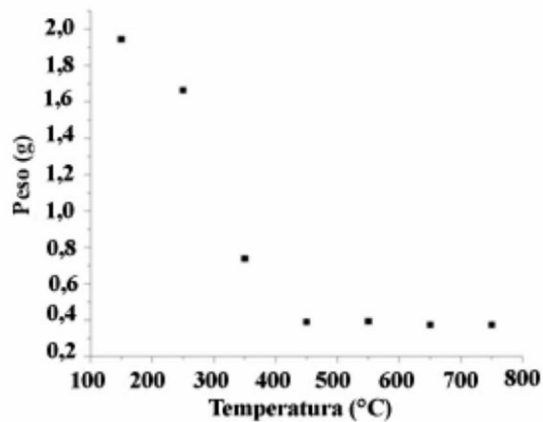
Las siguientes gráficas muestran las curvas características de los análisis Termogravimétrico y Térmico Diferencial de una cascarilla, y sólo el análisis Térmico Diferencial de otra. En lo referente a la termogravimetría puede observarse que la pérdida de masa ocurre en tres etapas en el rango entre 50°C y 500°C. Una primera etapa, hasta los 150°C, representa aproximadamente un 6% de pérdida, seguida de una descomposición térmica hasta cerca de los 250°C. Una segunda pérdida del 40% ocurre hasta los 375°C y la tercera va hasta los 500°C correspondiendo a un 35% de pérdida. Esta última etapa representa los procesos de carbonización. Al final del análisis se puede observar que resta aproximadamente un 21% de ceniza, que incluye la sílice y las impurezas inorgánicas que no se han descompuesto.



Gráfica 1.1 – Análisis Térmico Diferencial

En las curvas de los dos análisis térmico diferenciales se pueden observar diferencias evidentes al tratarse de cascarillas distintas, pero ambas siguiendo un mismo patrón. Ambas presentan un pico endotérmico alrededor de los 100°C, que representa la pérdida de agua absorbida. Cerca de los 330°C muestran un pico exotérmico correspondiente a la eliminación de los materiales volátiles, y alrededor de los 440°C otro pico exotérmico característico de la combustión del carbono. No se observa ningún movimiento más antes de los 1000°C, pero en una de las gráficas si muestra una pequeña curva endotérmica alrededor de los 1200°C, que correspondería con la cristalización de la cristobalita.

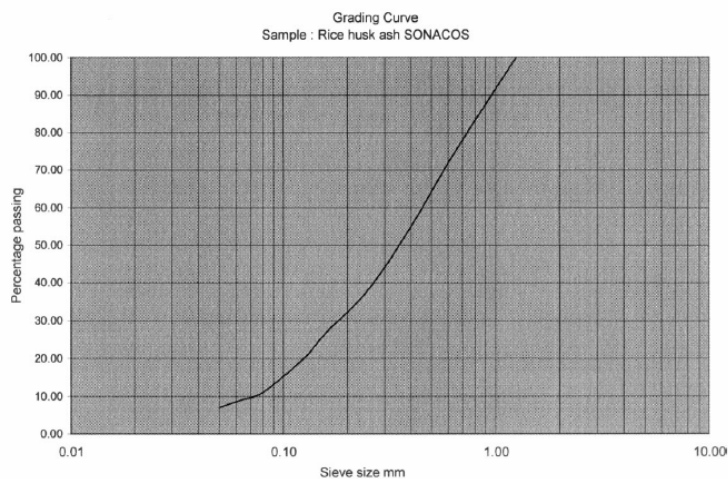
Si observamos la gráfica 1.2, que muestra la curva de pérdida de peso de la cascarilla en función de la temperatura, se puede observar que los 444°C correspondientes al segundo pico coinciden aproximadamente con el inicio de la zona de peso constante.



Gráfica 1.2 – Curva de pérdida de peso

Como puede observarse la zona de mayor pérdida de peso se da entre los 250°C y los 450°C que, en concordancia con el ATD, representa el intervalo en el que se produce la oxidación de la parte orgánica de la cascarilla.

En lo referente a la granulometría la siguiente gráfica muestra un ejemplo de lo que podría ser una distribución de tamaño de partícula típico de la ceniza, sin sufrir ningún proceso de molienda.



Gráfica 1.3 - Granulometría

Puede observarse que el tamaño de partícula va desde 0.1mm hasta 1mm, no demasiado fino, por lo que cabe suponer que la superficie específica no sería muy grande.

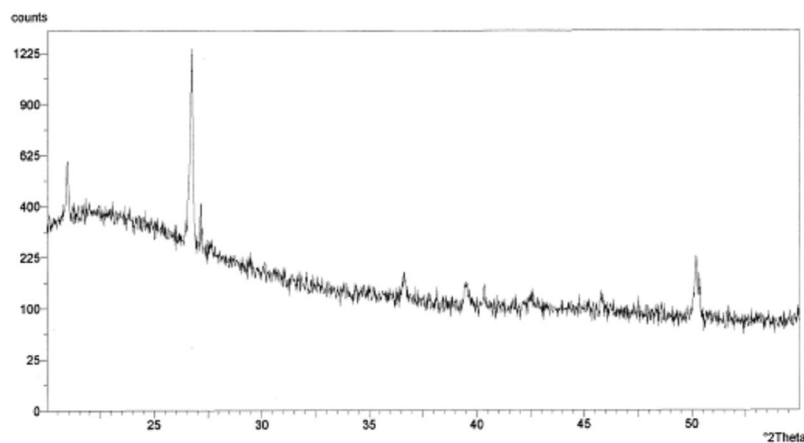
Evidentemente las imágenes, gráficas y tablas mostradas corresponden a un determinado tipo de cascarilla, pudiendo variar ligeramente para otros tipos, pero manteniendo siempre una caracterización muy similar. Se han seleccionado por considerarse representativas.

1.3.2.3. Puzolanidad y reactividad

El origen de la actividad puzolánica de la cascarilla de arroz está precisamente en su composición mineral, que como hemos visto anteriormente es rica en sílice y alúmina. Como es sabido éstas son también las principales componentes de la arcilla, que al combinarse con la piedra caliza da origen al clinker de cemento Pórtland.

Hay que tener muy en cuenta que el proceso de quemado y posterior enfriamiento influirá de forma determinante en las características de la ceniza obtenida. Sobre todo las variaciones en las condiciones de incineración van a dar como resultados cenizas totalmente distintas. Por ejemplo, si la temperatura resulta muy baja no se consumiría por completo la parte orgánica de la cascarilla; si por el contrario, resulta excesiva se corre el riesgo de que la sílice sufra un proceso de cristalización; ambas condiciones supondría una disminución de la reactividad, pudiendo incluso llegar a convertirla en totalmente inerte. Varias investigaciones precedentes señalan que las condiciones idóneas se presentan con un quemado entre 500 y 700°C. Algunas van más allá indicando los valores exactos de temperatura, tiempo y método de enfriamiento, demostrando que la ceniza con mejores características se obtiene con un quemado a 500°C durante 12 horas, seguido de un enfriamiento rápido (el enfriamiento puede hacerse dentro del horno, considerado enfriamiento lento, o extrayendo la ceniza inmediatamente al exterior, lo que sería el enfriamiento rápido). Evidentemente, estos valores corresponden al tipo de cascarilla con el que se ensayó. Debido a la gran variedad de cascarillas existentes no resulta adecuado establecer estos resultados como únicos, pero sí nos pueden dar una idea de los márgenes en que deberíamos movernos.

Además de la composición descrita anteriormente, un análisis por difracción de rayos X de una ceniza tomada como ejemplo nos muestra una única fase cristalina, el cuarzo, mientras que puede observarse un halo centrado sobre 20° 2 θ , que corresponde a la sílice amorfa.



Gráfica 1.4 – Curva de difracción por rayos X

Este contenido en cuarzo se confirma observando las imágenes de la ceniza obtenidas mediante microscopía electrónica. Se aprecian claramente las distintas fases resaltando sobremanera las partículas de cuarzo, con las caras más pulidas, y forma y tamaños similares, y la parte amorfa, correspondiente a la sílice y consistente en partículas irregulares tanto en formas como en tamaños.

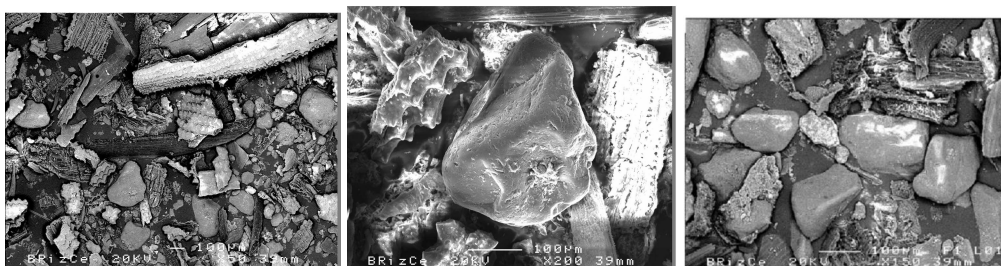


Fig. 1.6 – Ceniza de cascarilla de arroz

La presencia de cuarzo (fase cristalina) se explica de dos formas. Una es que la cascarilla se encontrara contaminada con arena en el momento de introducirla en el horno. La otras es que la temperatura de combustión fuera demasiado alta, produciéndose la cristalización de la sílice.

Si se observa al microscopio la cascarilla puede apreciarse la distribución de la sílice en sus diferentes zonas. Para esta observación es necesario seccional la cascarilla y embeberla en una matriz de resina.

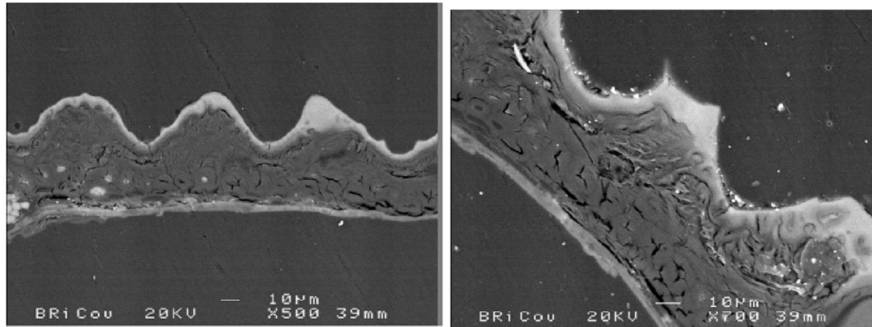
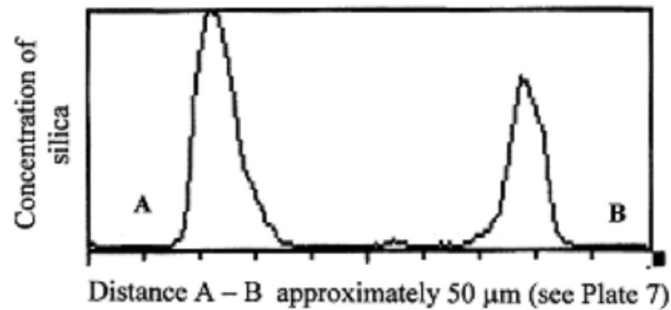


Fig. 1.7 – Sección de cascarilla

El contraste entre las zonas claras y oscuras que muestran las imágenes es debido a la diferente absorción atómica que presentan las sílice y los componentes orgánicos. La concentración de sílice es, por tanto, muy alta en la cara externa, un poco más baja en la interna, y prácticamente nula en la zona interior. La gráfica 1.5 muestra la distribución transversal de la concentración de sílice



Gráfica 1.5 – Distribución de sílice en la sección de la cascarilla

En las tablas 1.3 se muestran las diferentes proporciones que se obtienen del microanálisis. Como puede verse se confirma la existencia de grandes cantidades de sílice, lo que a su vez confirmaría una actividad puzolánica teórica, que debe ser confirmada mediante el análisis de su reactividad.

El tamaño de partícula, como vimos en la caracterización, no resulta demasiado pequeño, pero es susceptible de sufrir sucesivos procesos de molienda hasta conseguir la granulometría adecuada.

Table 1
Micro analysis of the external surface of the rice husk

Element	% (by weight)	% (atomic)
C	6.91	11.11
O	47.93	57.84
Si	45.16	31.05
Total	100.00	100.00

Table 2
Micro analysis of the interior of the rice husk

Element	% (by weight)	% (atomic)
C	62.54	69.54
O	35.19	29.38
Si	2.27	1.08
Total	100.00	100.00

Table 3
Micro analysis of the internal surface of the rice husk

Element	% (by weight)	% (atomic)
C	30.20	40.93
O	42.53	43.27
Si	27.27	15.80
Total	100.00	100.00

Tablas 1.3 – Microanálisis de la cascarilla

En cuanto a la reactividad, como hemos visto hay muchas formas de evaluarla, y uno de los métodos más extendidos es la medida de la cantidad de hidróxido de calcio fijado por la puzolana a través de medidas sucesivas de conductividad eléctrica. Es el denominado método Luxan.

Esta técnica se lleva a cabo añadiendo 2gr de puzolana en una disolución insaturada de 80mg de hidróxido de calcio y 100mL de agua destilada. La reacción debe producirse a una temperatura de 40°C, en vaso cerrado para evitar la carbonatación y con agitación continua para homogeneizar el sistema. La fijación de la cal por parte de la puzolana se mide por la variación de conductividad eléctrica ($\mu\text{s/cm}$) de la suspensión con el tiempo.

En principio cabe esperar que esta conductividad disminuya, ya que la puzolana fija los iones Ca^{+2} , sin embargo hay que tener en cuenta que la CCA posee sales que se disuelven en el medio líquido pudiendo aumentar la conductividad. Para controlar este efecto debe realizarse la muestra también en ausencia de cal para poder comparar los resultados.

Se calcula la diferencia de conductividad en las dos experiencias y teniendo en cuenta el valor inicial de la conductividad de la disolución insaturada de cal se obtiene el porcentaje de pérdida de conductividad con respecto al tiempo producido por la puzolana.

Un estudio realizado por el GIQUIMA de la Universidad Politécnica de Valencia muestra los resultados de la medida de la conductividad para diferentes muestras de CCA, cuya composición y propiedades se muestra a continuación:

(%)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	N1	N2	N3	N4
H	0.0	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.6	0.8	0.5
PF	0.5	0.1	3.0	0.1	0.1	0.3	0.2	0.6	0.6	0.1	7.5	7.0	13.0	3.5
RI	7.2	7.8	6.4	8.2	8.4	7.3	7.79	7.32	8.1	7.3	6.3	6.6	5.7	6.0
SiO ₂	89.4	88.6	85.7	89.1	85.2	88.6	88.8	88.9	87.3	90.3	83.7	83.5	78.4	87.8
K ₂ O	0.2	0.2	0.5	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3
Na ₂ O	0.5	0.4	0.7	0.2	0.3	0.3	0.3	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1
P ₂ O ₅	1.1	1.8	1.2	1.3	1.2	1.6	1.4	1.6	1.3	1.0	1.1	1.2	1.0	1.2
SO ₃	0.5	0.4	1.2	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.7	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
ρ	2.2	2.3	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.1
d _m	12.4	13.9	13.4	14.1	15.1	13.1	11.0	13.1	13.8	12.8	15.2	15.9	16.4	14.0
Color	G	G	G	B	G	G	B	G	B	B	N	N	N	N

H: humedad, PF: pérdida al fuego, RI: Residuo insoluble en HF, G: gris, B: Blanco, N: Negro

Tabla 1.4 – Composición química y propiedades

En la siguiente tabla se muestran los resultados correspondientes al porcentaje de pérdida de conductividad a los 100, 1000 y 10000 segundos:

	P _C (%)		
	Tiempo (s)		
	10 ²	10 ³	10 ⁴
A	10	12	21
B	7	8	12
C	33	43	89
D	5	7	16
E	9	14	22
F	10	12	18
G	7	9	15
H	8	10	17
I	8	10	16
J	6	7	18
N1	13	18	33
N2	12	15	26
N3	15	19	32
N4	14	17	35

Tabla 1.5 – Pérdida de conductividad

Estos datos ponen de manifiesto la capacidad de la CCA para fijar cal, aunque se puede observar que en este caso no se obtienen reactividades muy grandes, sólo una muestra destaca por encima del resto con un 89%, siendo la más reactiva de resto capaz de fijar sólo el 35% de la cal presente en la fase acuosa.

Como se vio anteriormente, dos factores que resultan decisivos son la superficie específica y la cantidad de sílice amorfa de la muestra. Mediante el control del proceso de quemado y enfriamiento, y con una adecuada molienda se puede conseguir optimizar sus características. Las muestras empleadas por GIQUIMA fueron obtenidas de procesos industriales por lo que estos factores no fueron controlados en ningún momento.

1.3.3. La ceniza volante

1.3.3.1. Generalidades

Las cenizas volantes son un subproducto de la industria energética, concretamente de las centrales termoeléctricas que utilizan carbón para la generación del vapor de agua, que luego se direcciona hacia las turbinas generadoras. Concretamente, la norma UNE 83415 las define como “productos sólido y en estado de fina división procedente de la combustión del carbón pulverizado en los hornos de centrales termoeléctricas y que es arrastrado por los gases del proceso y recuperado de los mismos”.

La quema de este carbón genera una gran cantidad de humo que, además de contener los típicos gases generadores del efecto invernadero y la lluvia ácida, transporta en suspensión gran cantidad de partículas sólidas. Antes estas partículas eran expulsadas a la atmósfera, pero los graves problemas medioambientales que causaron obligaron a promulgar leyes que limitaran su emisión. Actualmente se retienen aproximadamente el 65% de las cenizas producidas en todo el mundo.

Contienen un alto porcentaje de sílice y alúmina, que como hemos visto son las componentes básicas de los materiales puzolánicos. Además pueden contener distintas proporciones de óxidos de hierro, calcio, magnesio, potasio, etc. Son consideradas puzolanas artificiales.

Normalmente se obtienen directamente del proceso de expulsión de los gases, mediante un sistema de filtros, o por precipitación electrostática como indica el esquema de la figura:

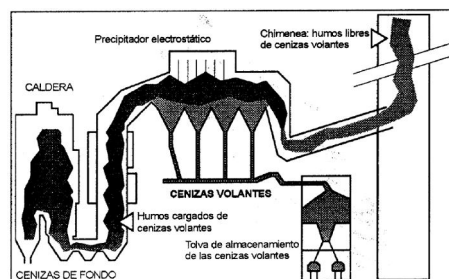


Fig. 1.8 – Esquema precipitación electrostática

La preocupación por el desarrollo sostenible ha hecho que se produzcan muchos avances en el reciclado de estas cenizas, también debido a que su almacenamiento en las proximidades de las centrales acarrea problemas económicos y riesgos para la seguridad. Usos como rellenado de terraplenes, estabilización de suelos débiles, recuperación de minas o solidificación de basuras se han desarrollado en los últimos años. Evidentemente, debido a su potencial puzolánico, también son utilizadas como adiciones activas en los cementos portland.

Su contenido en metales pesados, perjudiciales para la salud en determinadas proporciones, hizo que se planteara un debate sobre si era o no adecuada su utilización. Diversos estudios confirmaron la presencia de elementos tales como níquel, vanadio, arsénico, berilio, cadmio, bario, cobre, molibdeno, zinc, selenio, uranio, torio, radio o plomo, pero todos ellos en proporciones tan pequeñas que la Agencia de Protección Medioambiental de los EEUU hizo pública la declaración de estas cenizas fuera del marco de los residuos peligrosos.

Existen distintos tipos de cenizas volantes en función del tipo de carbón empleado en la central térmica. La norma ASTM las clasifica en clase F, procedente de carbones bituminosos y

antracita, y clase C que se obtiene cuando se usan carbones sub-bituminosos y lignita. Su principal diferencia es su composición química, y básicamente su contenido de cal; mientras que la clase F contiene solamente un 10%, la clase C puede llegar hasta un 20% lo que la dota de ciertas propiedades autocementantes. El uso como aditivo en cementos está prácticamente limitado a aquellas cenizas pertenecientes a la clase F.

En la actualidad se generan anualmente unos 650 millones de toneladas de cenizas de carbón en todo el mundo, de las cuales se estima que el 70% son cenizas volantes, aptas para su aplicación como puzolana. Lamentablemente sólo 35 de esos millones son reutilizados mientras que el resto son almacenados, con todos los riesgos y gastos que esto conlleva, o utilizadas como relleno de tierras lo que supone, además de un desperdicio de un material valioso, un grave peligro de contaminación de suelos y aguas.

1.3.3.2. Caracterización

Las partículas de ceniza volante son generalmente esféricas, con unos tamaños promedio entre 0.5µm y 100µm. Estas partículas pueden resultar huecas, conteniendo en su interior carbono en estado amorfo. El aumento en la proporción de estas partículas huecas provoca una disminución en la densidad de la ceniza.

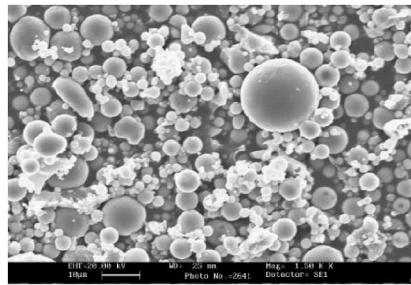


Fig. 1.9 – Micrografía: Ceniza volante

Su composición química resulta bastante variable en función, como se ha indicado anteriormente, del tipo de carbón del que proceden. Los carbones antracíticos y bituminosos generan cenizas muy ricas en alúmina, sílice y óxidos de hierro, con porcentajes cercanos al 70% (cenizas clase F). Por su parte los carbones ligníticos y sub-bituminosos dan como resultado cenizas un poco más pobres en estos componentes, sobre todo en alúmina, y más ricas en otros tipos de óxidos, como el de calcio, magnesio o azufre (cenizas clase C). Este mayor contenido en óxido de calcio, o cal, hace que estas cenizas posean ciertas propiedades autocementantes. La siguiente tabla muestra los rangos de valores típicos en su composición química.

Table A – Typical oxide analysis of PFA

Element	Typical range of values for PFA
Silicon (% as SiO ₂)	45 – 52
Aluminium (% as Al ₂ O ₃)	24 – 32
Iron (% as Fe ₂ O ₃)	7 – 15
Calcium (% as CaO)	1.1 – 5.4
Magnesium (% as MgO)	1.2 – 4.4
Sodium (% as Na ₂ O)	0.8 – 1.8
Potassium (% as K ₂ O)	2.3 – 4.5
Titanium (% as TiO ₂)	0.9 – 1.1
Chloride (% as Cl)	0.005 – 0.02 [*]
Phosphorus Pentoxide (P ₂ O ₅)	0.09 – 0.65
Loss on ignition (%)	3 – 20
Sulfate (% as SO ₃)	0.35 – 1.7
Free calcium oxide (%)	<0.1 – 1.8
Water soluble sulfate (g/L as SO ₄)	1.3 – 4.0
2:1 water solid extract	
PH	9 – 12

* Chloride may be up to 0.3 % for PFA conditioned with sea water

Tabla 1.6 – Composición ceniza volante

Estos óxidos básicos y ácidos que las componen se encuentran formando parte de constituyentes muy similares a los de las arcillas, de tal forma que entre el 65% y el 85% son silicoaluminatos, en mayor proporción cuanto mayor sea la edad de los carbones. Estos silicoaluminatos se forman por fusión, resultando en el enfriamiento distintas proporciones de fases vítreas y cristalinas.

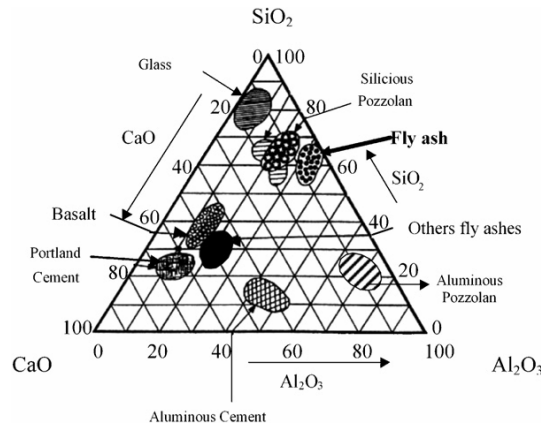
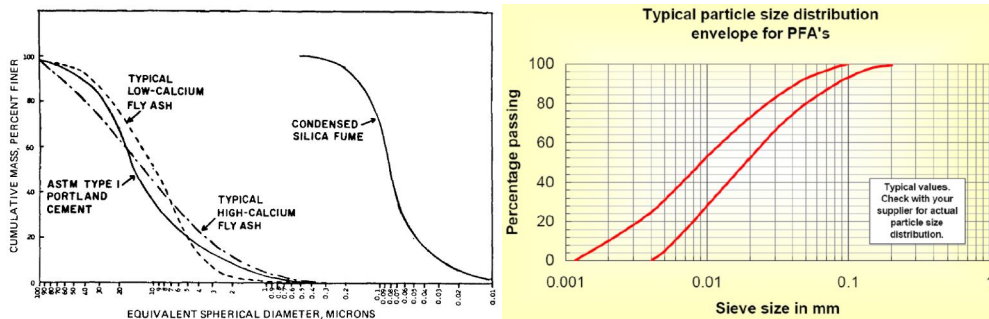


Fig. 1.10 – Diagrama ternario ceniza volante

Las siguientes gráficas muestran ejemplos de granulometría y tamaño de partícula en comparación con otros componentes. Como puede observarse tienen un tamaño en muchos casos inferior al de las partículas de cemento portland, y en todo caso muy inferior al mostrado en el punto anterior sobre la ceniza de cascarilla de arroz.



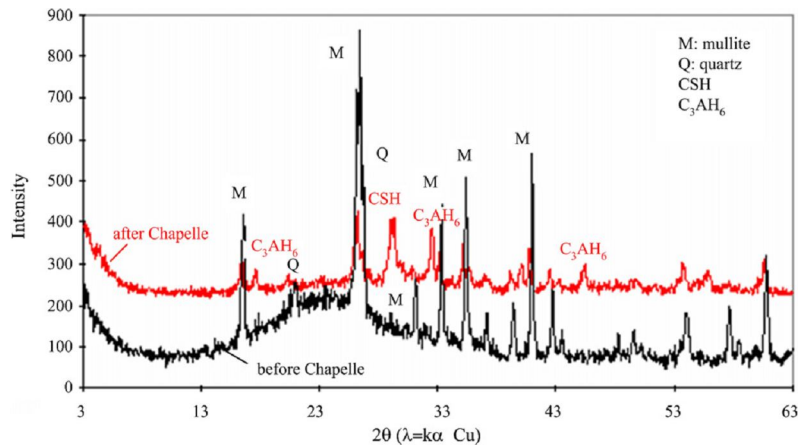
Gráfica 1.6 - Granulometría

1.3.3.3. Puzolanidad y reactividad

Al igual que en el caso de la ceniza de cascarilla de arroz, es el alto contenido en sílice y alúmina el que proporciona a la ceniza volante su potencial puzolánico. En este caso, además de su composición, su finísimo tamaño de partícula influye decisivamente en su reactividad. Este factor del tamaño de grano también influirá de forma determinante a la hora de su adición a la mezcla de cemento portland, como veremos más adelante.

Uno de las formas existentes para determinar la reactividad de esta puzolana consiste en el denominado método Chapelle, que se basa en la cantidad de cal consumida por la reacción después de 16 horas de ebullición de una mezcla de un gramo de puzolana, un gramo de cal y 200 cm³ de agua. Tiene la ventaja de permitir medir la cantidad real de cal consumida evaluando no solo la que queda en la solución, sino también la que queda en estado sólido. Es importante que el ensayo se desarrolle con la mezcla en agitación para evitar la deposición de las partículas. Esto se consigue por corrientes de convección, y permite conocer la actividad puzolánica de una muestra en un plazo de tres días.

Si se toma una muestra de una ceniza volante común y se le somete a una prueba por difracción de rayos x antes y después de aplicarse el método Chapelle se puede observar claramente la formación de dos nuevas fases resultado de la reacción de las puzolanas con la cal.

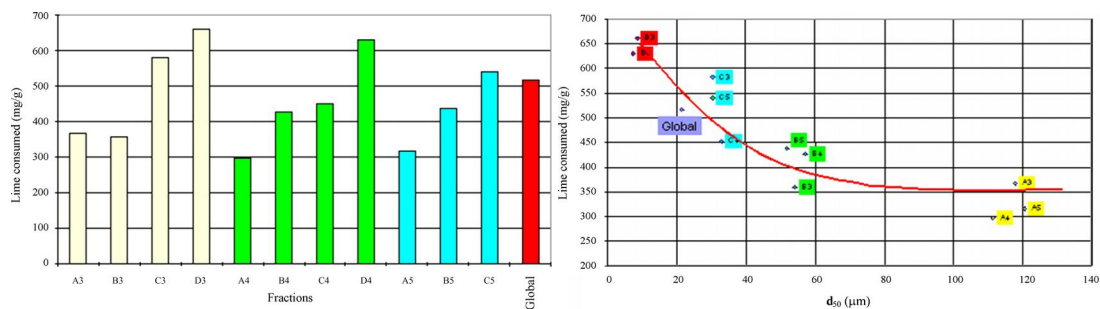


Gráfica 1.7 – Curva de difracción de rayos X

La imagen muestra en negro y rojo los difractogramas efectuados antes y después de dicha prueba respectivamente. Además de mullita, cuarzo y otras fases cristalinas no identificadas se puede observar la formación de nuevos picos correspondientes a CSH y C_3AH_6 , que demuestran que efectivamente se ha producido la reacción puzolánica.

Pero esta apreciación por si sola no da una idea de la cantidad de cal fijada por la ceniza volante, sino que habría que evaluarla por medio de métodos como la medida de conductividad eléctrica, u otros métodos químicos basados en medidas de pesos. Estudios como el realizado por la Escuela de Minas de Alés, en Francia, demuestran que esta capacidad para fijar cal es función indirecta del tamaño de partícula de la ceniza.

Las siguientes gráficas, resultado del estudio nombrado, muestran los distintos consumos de cal para distintas cenizas con distintas granulometrías y densidades. Sin entrar en pormenores sólo indicar que la muestra A es la más basta y la D la más fina. La curva logarítmica de la derecha pone de manifiesto claramente esta evolución.



Gráficas 1.8 – Consumos de cal

1.3.4. La ceniza volcánica

1.3.4.1. *Generalidades*

La ceniza volcánica podemos englobarla dentro del grupo de las rocas volcánicas, las cuales se constituyen en vidrios amorfos debido al enfriamiento brusco de la lava. Con una composición similar a la piedra pómez o la obsidiana, surgen de la deposición y sedimentación de finas partículas de magma que son expulsadas al aire durante la erupción, o bien de la solidificación de la propia lava.

Al contrario de las anteriores este material no constituye un desecho o subproducto (agrario o industrial) sino que se encuentra en la naturaleza, normalmente en formando grandes bloques que después son explotados como canteras.

Constituyen el primer referente histórico de lo que hoy en día conocemos como puzolana, ya que como hemos visto los romanos descubrieron su aplicación en la construcción.

Debido a la gran variedad de materiales que abarca esta denominación no se entrará a valorarlas en profundidad en este apartado, sino que más adelante se analizarán una por una las muestras utilizadas en este proyecto.

1.3.5. La teja de microhormigón

1.3.5.1. *Introducción*

Ya se ha explicado con anterioridad el gran problema que representa la obtención de materiales para la construcción de viviendas de bajo costo, y como es natural esto afecta a todas las partes de la vivienda. Si no nos centramos en la vivienda como conjunto y analizamos sus partes individualmente nos encontramos con que el componente que presenta mayores dificultades en América Latina es el techo, y no sólo dificultades económicas, sino también relacionadas con su calidad y durabilidad, debido a lo complicado de su meteorología.

El Seminario de San Juan (República Dominicana, 1991) definió las características óptimas que debería reunir el techo ideal para las viviendas de bajo costo: "...debe estar hecho con materiales locales o fácilmente accesibles, ser impermeable, aislar convenientemente el calor, liviano, tener buena presencia y sobre todo ser económico, duradero y de fácil mantenimiento".

En la actualidad los elementos de techo más utilizados son las losas de hormigón, las planchas de cemento o de zinc y las tejas de barro. Las dos primeras suponen una alta inversión, lo que las descarta para su uso en este tipo de viviendas, mientras que la tercera opción supone un riesgo medioambiental, debido a la gran cantidad de madera que se utiliza para su curado en horno.

El mencionado seminario de San Juan declaró además que las cubiertas ligeras son la mejor solución para su aplicación en el trópico húmedo, el altiplano andino y las zonas sísmicas. Estas cubiertas ligeras son, frente a las cubiertas monolíticas, mucho más adecuadas económica y tecnológicamente.

La teja de microhormigón es un elemento que posee todas estas características, además de muchas otras, convirtiéndola en una opción realmente válida y que ya está siendo utilizada en muchos países en vías de desarrollo en América Latina, África y Asia.

1.3.5.2. Fabricación y características

Más conocida en Latinoamérica como teja de microconcreto, la teja de microhormigón se produce a partir de cemento portland, arena con la granulometría adecuada y agua. Se fabrican empleando una máquina vibradora accionada por un motor de 12 voltios que puede ser conectado a una batería corriente de automóvil, un panel solar o mediante un transformador a la red de corriente eléctrica. Para su fabricación se emplea un mortero con una dosificación de una parte de cemento por 2.5 a 3.5 de arena y una relación agua – cemento de 0.5. La dimensión nominal de la teja es de 25x50 cm con 8 ó 10 cm de espesor y su dimensión efectiva es de 20x40 cm por lo que se utiliza 12.5 tejas por m² de techo.

Un esquema sencillo de los pasos a seguir para su fabricación podría ser el siguiente:



Fig. 1.11 – Fabricación teja microconcreto

Se trata de un proceso muy sencillo, que requiere muy poca preparación técnica y una instrumentación simple y económica.

El siguiente cuadro muestra algunas de sus características técnicas más importantes:

PRODUCTO	Teja de 8mm	Teja de 10mm
Unidades / m ²	12.5u	12.5u
Dimensión neta (mm)	500x250	500x250
Dimensión útil (mm)	400x200	400x200
Peso (kg) aprox. unidad	2.5	3.00
Peso (kg) aprox. m ²	31.2	37.5
Conductividad térmica	0.5 Watt/m °C	0.5 Watt/m °C
Durabilidad	Hay techos en buen estado con más de 20 años	
Resistencia: FLEXIÓN	Más de 60 kg	Más de 80 kg
Resistencia: IMPACTO aprox., con esfera de 220 g	Caída libre de una altura de 300 mm	Caída libre de una altura de 400 mm
Rendimiento cemento, aprox. bolsa de 50 kg	80 u	64 u
Rendimiento cemento aprox. / bolsa de 42.5 kg	68 u	54 u
Producción de tejas: HOMBRE / DÍA	100 a 200	100 a 200
Pendiente mínima recomendable	30 %	30 %

Tabla 1.7 – Características técnicas teja microhormigón

Estas características son valores de referencia que lógicamente están sujetos a variación según la pericia de los operarios y las propiedades de los componentes. Además, presentan el caso de tejas elaboradas con cemento portland como único cementante, mientras que este proyecto tratará su fabricación con la adición de puzolanas, por lo que algunas de esas características podrían variar sensiblemente.

1.3.5.3. Ventajas y desventajas

a) Ventajas

- Producción local: Puede ser producida localmente, sin necesidad de materia prima importada en la mayoría de los países siempre que se disponga de cemento suficiente.
- Adaptabilidad económica: adaptable a cualquier escala de producción, incluyendo unidades familiares. La técnica de fabricación puede ser dominada por casi cualquier persona, formada previamente.
- Buen comportamiento físico: comportamiento acústico y térmico superior al de las planchas metálicas o de asbesto cemento.
- Buen comportamiento climático: la TMC ha demostrado en la práctica su adaptabilidad a los diferentes climas y a diversidad de fenómenos naturales. Se está utilizando en Los Andes a más de 4.200 m sobre el nivel del mar, con buenos resultados para mantener el calor dentro de las viviendas, y también en el Caribe, donde se necesita fresco en el interior. También en esta área ha soportado sismos y huracanes sin mayores problemas; comprobado durante varios terremotos en Centroamérica y ante un número de huracanes como Gilbert, Lily, George, Mitch, Michelle y otros.
- Colocación eficiente: requieren menos madera para el soporte, en comparación con las otras conocidas; son más económicas e igualmente duraderas.

- Posibilidad de formación de microempresas: la sencillez de fabricación y la economía de los equipos hace que sea un prefabricado ideal para ser producido en pequeñas industrias. Una producción de entre 100 y 200 unidades por persona y día se considera una escala bastante rentable.

b) Desventajas o limitaciones

- Límites climáticos: a temperaturas inferiores a 0°C puede bajar su eficacia, por lo que los métodos de fabricación deben sufrir modificaciones, con los costos que ello supone. Además, a pesar de su buen comportamiento demostrado en caso de huracanes, su peso ligero puede hacer que se levante en casos de fuertes vientos.
- Inclinación del techo: para garantizar su impermeabilidad debe respetarse una inclinación del techo superior a los 30°.
- Estructura del techo: necesita de una estructura bien definida y elaborada con exactitud, lo que requiere mayores esfuerzos que otros tipos de cubiertas. Además, no constituye un diafragma rígido que pueda contribuir a la estabilidad estructural de los muros.
- Calidad variable: dependiendo del operario y de los materiales su calidad podría variar, por lo que requiere controles estrictos.
- Resistencia: no se pueden lograr las resistencias de las losas de concreto, o de los techos monolíticos de mayor espesor.

De nuevo mencionar que estas indicaciones son válidas para las tejas producidas con cemento portland. Al agregarle la puzolana podrían surgir otras desventajas propias de dicho material (como las que se indican más adelante) pero también habría que añadir las ventajas que presenta, además de que algunas de las limitaciones podrían eliminarse o reducirse.

1.4. LIMITACIONES

El empleo de puzolanas como adición activa en cementos portland presenta una serie de limitaciones dependiendo de la aplicación prevista, y por lo tanto de los resultados esperados. Evidentemente estas limitaciones no serán las mismas para una empresa cementera que desee añadir esta adición dentro de su proceso industrial para mejorar algunas características de sus productos, que para una comunidad que desee aprovechar la disponibilidad de este material dentro de sus límites cercanos para abaratar los costes fabricación de sus propias viviendas. Y estos son sólo dos ejemplos dentro del gran abanico de posibilidades que posee este material.

Como hemos explicado, este proyecto se orienta hacia el segundo de los ejemplos, pero sin descartar la posibilidad real de fomento de creación de microempresas que se dediquen a la producción de prefabricados. En ambos casos el objeto de aplicación siempre será la vivienda social y de bajo coste, por lo que este será el punto de vista desde el que se enfoquen las posibles limitaciones.

1.4.1. De disponibilidad

No se concibe la aplicación de este proyecto si no existe disponibilidad próxima del material, ya que los gastos relacionados con su transporte eliminarían todo el beneficio generado. Por lo tanto resulta esencial que el material se encuentre disponible a una distancia razonable del punto de aplicación.

Y no sólo en distancia, sino también en cantidad y en posibilidad de explotación. Por ejemplo, en el caso de la ceniza volcánica habría que estudiar la presencia de canteras cercanas y analizar su capacidad y las disposiciones legales adscritas a su explotación. De la misma manera con las plantaciones de arroz, o las centrales termoeléctricas.

1.4.2. Tecnológicas

Tanto en su sentido teórico como práctico, la tecnología utilizada debe estar adaptada al tipo de población que va a hacer uso de ella. Generalmente estará siendo aplicada por personas con escaso nivel de formación académica, aunque en muchas ocasiones con conocimientos de aplicación práctica adquiridos por la experiencia. Es decir, se trata de gente con buenas aptitudes para el trabajo manual, pero sin formación, por lo que deben utilizarse procesos sencillos que no requieran especialización en ningún campo.

Este apartado también se refiere al tipo de maquinaria y herramientas necesarias. Como hemos dicho son poblaciones de escasos recursos que no pueden permitirse grandes inversiones, por lo que el proceso debe adaptarse a los medios disponibles en el lugar, y en caso de ser necesaria alguna instrumentación debe ser tan económica y sencilla de utilizar como sea posible.

1.4.3. Fisicomecánicas

Al hilo de lo expuesto en el punto anterior, es evidente que esta simplificación tecnológica llevará a resultados inferiores a los que podría obtenerse disponiendo de los medios más avanzados.

Es necesario ser realista con las propiedades requeridas, y no tratar de maximizarlas si ello lleva consigo un aumento en la complejidad del proceso y en la carestía de los equipos. Sabemos que se trata de viviendas sociales, y no de rascacielos o puentes sobre el mar.

Este factor tampoco debe confundirse con una disminución de la calidad. Se trata de construir viviendas seguras y confortables, con costes reducidos y teniendo siempre en cuenta el factor ecológico.

1.4.4. Normativas

Una de las limitaciones más evidentes es la establecida por las diferentes normas vigentes en cada país. La norma americana ASTM C618 establece un límite del 30% de puzolana en relación a la cantidad de cemento en peso que contiene la mezcla. A pesar de que ningún texto normativo indica el por qué de esta limitación es de suponer que pueda deberse al proceso de autoneutralización que pueden sufrir los cementos cuando se produce un consumo excesivo de la cal producida durante su reacción de hidratación. También podría ser el punto en el que el aumento de resistencia aportada por la puzolana llega a su límite, aunque para realizar esta afirmación sería conveniente el hacer los ensayos respectivos con proporciones mayores. No es el caso, ya que nos hemos ceñido a las dosificaciones límite indicadas por la norma.

Esto supone, además de un límite tecnológico, un límite al ahorro económico pretendido, estableciendo precisamente en un máximo del 30% la cantidad de cemento no utilizada. Aunque existe un condicionante que podría hacer aumentar este porcentaje, si se lograran resistencias

mayores a las propias del cemento se podría utilizar en menores cantidades para lograr la resistencia deseada. Como veremos al evaluar los resultados no es un objetivo descabellado ni mucho menos, pero requiere tener en cuenta ciertas consideraciones, que se exponen más adelante.

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL Y ESPECÍFICOS

El objetivo general del proyecto es la evaluación de algunas puzolanas locales como materiales susceptibles de ser utilizados como adición mineral activa en la elaboración de elementos prefabricados para la construcción de viviendas de bajo coste.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Estudiar las puzolanas de origen volcánico y de las cenizas de cascarilla de arroz disponibles en Perú y en Valencia
- Realizar una caracterización físico-química de dichas puzolanas y evaluar sus propiedades
- Estudiar sus propiedades mecánicas en morteros de base cementicia.
- Incorporar estos morteros a algunos prefabricados de uso habitual en construcciones de bajo coste
- Estudiar las propiedades mecánicas de dichos prefabricados

2.2. COLATERALES

Nos referimos a los objetivos colaterales como aquellos que sin ser específicamente científicos se derivan de la búsqueda de estos, y que se consideran igualmente importantes, o quizá incluso más, ya que representan la consecución práctica de los avances logrados en la investigación.

2.2.1. Tecnológicos

Los objetivos tecnológicos del proyecto son los siguientes:

- Establecer las dosificaciones ideales de sustitución de cemento por puzolana
- Establecer el procesado ideal de las puzolanas para maximizar sus propiedades
- Identificar la tecnología adecuada para su aplicación, estableciendo un compromiso entre capacidades/medios disponibles y resultados requeridos
- Reducir las emisiones de CO₂ y la energía consumida en la fabricación del cemento

2.2.2. Sociales

Dentro de los objetivos sociales está el que probablemente sea el objetivo final del proyecto, su fin último, que es precisamente contribuir a facilitar el acceso a la vivienda a las familias más desfavorecidas. Como mencionamos al principio se trata de un objetivo muy ambicioso y que necesitaría de muchas más acciones conjuntas para lograrlo.

Específicamente podríamos nombrar los siguientes objetivos:

- Contribuir a una tecnificación progresiva de la construcción informal, mejorando su calidad y como consecuencia su seguridad y salubridad
- Fomentar el desarrollo comunitario, la colaboración vecinal y el asociacionismo

- Incentivar el aprovechamiento de los recursos locales como respuesta al aislamiento y la marginación
- Sensibilizar sobre el problema medioambiental que conlleva la utilización masiva de cementos

2.2.3. Económicos

Aquí también podríamos incluir el objetivo final nombrado dentro de los objetivos sociales. Facilitar el acceso a la vivienda a las personas más desfavorecidas tiene evidentemente una componente económica esencial. Además:

- Reducir el costo final de los materiales de construcción
- Fomentar la creación de microempresas, a través de la transferencia tecnológica y la capacitación
- Fomentar la creación de cooperativas

Al igual que en los objetivos anteriores, lógicamente, este proyecto por si sólo no puede lograr la consecución de todos ellos, pero sí colaborar hacia un avance en la misma.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

A la hora de caracterizar los materiales se debe tener en cuenta que no fueron utilizados los mismos en ambas experiencias, y es por ello que se indica su localización en cada caso.

Hay que indicar que la mayoría de los datos que a continuación se muestran se obtuvieron de pruebas realizadas paralelamente a este estudio, pero siempre dentro del ámbito del proyecto principal, y fueron cedidos por el Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) perteneciente a la UPV.

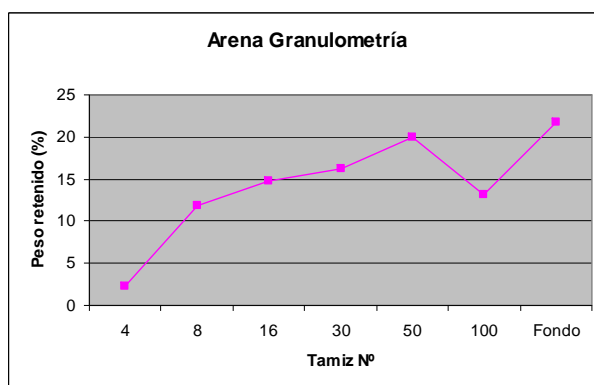
3.1.1. Arena

a) Valencia

Se utilizó una mezcla de áridos grueso y fino al 28%.

b) Lima

Se utilizó lo que en el Perú es el denominado agregado fino, que en realidad correspondería a una mezcla de áridos finos y gruesos similar al utilizado en Valencia, pero con mayor variabilidad y abarcando un mayor abanico de tamaños como indica su curva granulométrica.



Gráfica 3.1 – Granulometría arena

3.1.2. Cemento

a) Valencia

El cemento utilizado es un cemento Portland CEM I-52.2R, suministrado por la empresa Lafourge, cuya composición se muestra en la siguiente tabla.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	P. fuego	CaO libre
22.05	5.44	3.64	62.53	2.43	3.75	1.42	1.6	1.12

Tabla 3.1 – Composición química cemento

b) Lima

En Lima también se utilizó un cemento Portland tipo I, producido por la empresa Cementos Lima S.A., y con la siguiente composición química.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	P. fuego	CaO libre
19.33	5.98	2.84	62.72	3.11	2.77	0.86	1.52	0.45

Tabla 3.2 – Composición química cemento

3.1.3. Puzolana

3.1.3.1. Ceniza de cascarilla de arroz

a) Valencia

Solamente se utilizó un tipo de ceniza de cascarilla de arroz, proporcionada por la empresa DACSA S.A., y procedente de un proceso de incineración industrial. Presentaba un color negruzco y aspecto pulverulento, que dejaba restos en suspensión en el aire al ser manipulado. Antes de ser utilizada fue molida en un molino de bolas de alúmina de 18 mm de diámetro durante 20 minutos, obteniendo un tamaño medio de partícula de 17 μ m.

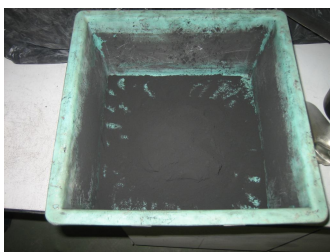


Fig. 3.1 – Ceniza DACSA

Observada al microscopio óptico se puede distinguir una mayoría de zonas oscuras salpicada por zonas más blancas que corresponderían a trozos de cáscara sin quemar. También se advierte que en la gran mayoría de las partículas se mantiene la estructura física de la cascarilla.

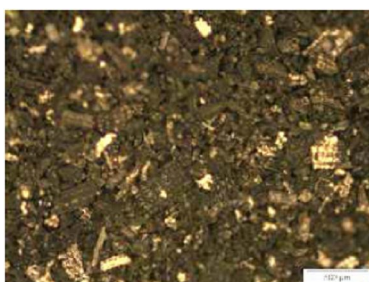


Fig. 3.2 – Micrografía óptica ceniza DACSA

Las siguientes imágenes muestran fotografías tomadas mediante microscopía electrónica (SEM) donde puede apreciarse la estructura amorfa e irregular de sus partículas. Se alternan bordes angulosos con algunos más redondeados.

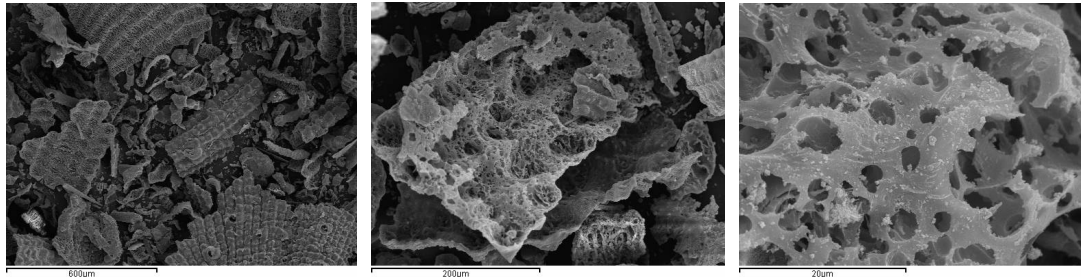
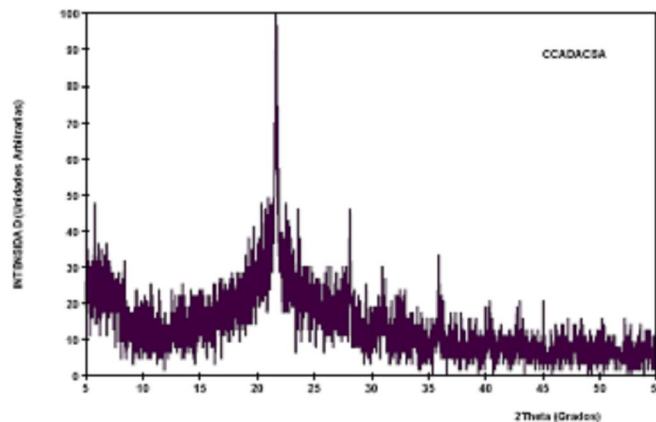


Fig. 3.2 – Micrografía electrónica ceniza DACSA

Un análisis por energías dispersivas de rayos X demostró que el elemento predominante en esta ceniza es el Si, y presenta porcentajes menores de K, Ca y Na. Esta presencia masiva de Silicio parece indicar que su componente principal sea la Sílice.

La difracción de rayos X confirma esta sospecha, presentando picos que indican la presencia de Sílice en forma de Cristobalita mayoritariamente y en menor proporción Tridimita y Cuarzo. Además se observan compuestos de Potasio, Calcio y Carbono, este último en forma de Grafito. La dispersión de la línea base da una idea de la predominancia de estructuras amorfas.



Gráfica 3.2 – Difractograma ceniza DACSA

b) Lima

En Lima se utilizaron tres tipos distintos de ceniza, siendo dos de ellas incineradas de dos maneras distintas, lo que nos da un total de cinco muestras diferentes. A continuación se muestran las características de cada una de ellas.

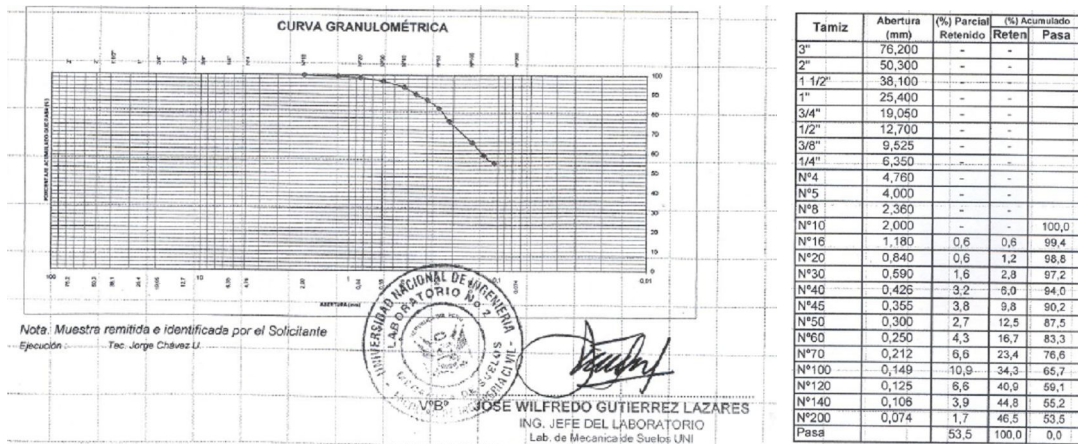
- Ceniza de cascarilla de arroz quemada en horno, procedente de Tarapoto (Perú)

Esta ceniza procede de la quema industrial en la Molinera San Hilarión, en el distrito de Tarapoto, dentro del departamento de San Martín. Presenta un color grisáceo, cercano al negro y unas partículas bastante pequeñas (casi polvo) en combinación con otras un poco más grandes. Además se observa una cantidad considerable de impurezas, consecuencia seguramente de un tratamiento no demasiado cuidadoso.



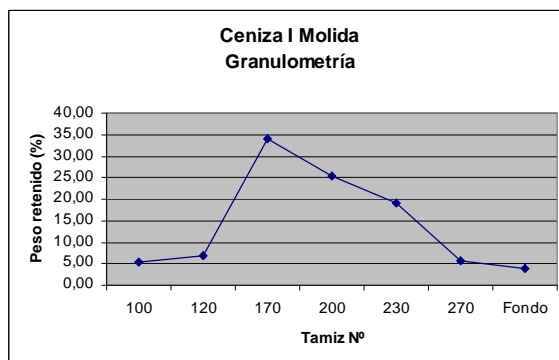
Fig. 3.3 – Ceniza horno Tarapoto

Se utilizó tanto molida en molino de bolas de acero como sin moler, simplemente tamizada para eliminar el mayor número de impurezas posible, y se realizó un análisis granulométrico en ambas condiciones. El análisis de la ceniza al natural, tal cual se recibió del proveedor, fue encargado al Laboratorio de Mecánica de Suelos de la UNI, al igual que el resto de muestras con las que se trabajó en Lima. A continuación se muestra un resumen de la información emitida en su informe.



Gráfica 3.3 – Granulometría ceniza horno Tarapoto, sin moler

Por su parte el análisis después de la molienda se realizó, de forma más elemental y con menos medios, en el Laboratorio nº 1 de la Facultad de Ingeniería Química, también de la UNI. En la imagen se muestra la gráfica elaborada con los datos obtenidos.



Gráfica 3.4 – Granulometría ceniza horno Tarapoto, molida

Si analizamos la gráfica 3.3 podemos observar que el mayor porcentaje parcial retenido (10.9%) corresponde a una abertura de malla de 0.149mm, mientras que en la gráfica 3.4 vemos que este valor ha pasado al 35% retenido en el tamiz nº170 (0.09mm).

La microscopía óptica revela una ceniza bastante blanca, con zonas más oscuras que probablemente correspondan a partículas de inquemados.

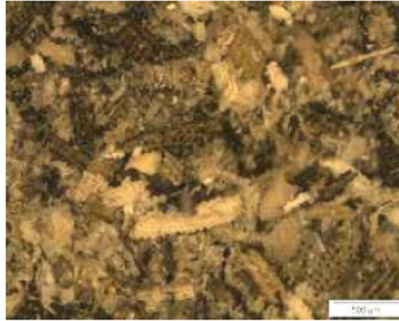


Fig. 3.4 – Micrografía óptica ceniza horno Tarapoto

En las imágenes obtenidas por SEM se puede observar una estructura amorfa, con bordes más o menos angulosos.

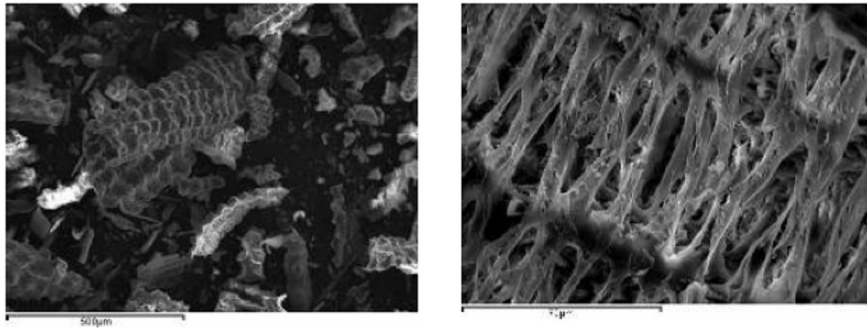
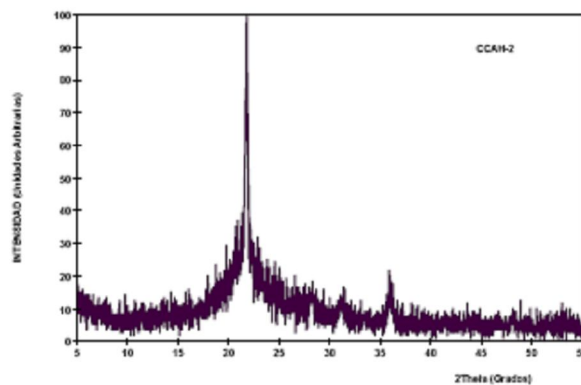


Fig. 3.5 – Micrografía electrónica ceniza horno Tarapoto

El ensayo por energías dispersivas de rayos X revela la presencia del Silicio como elemento principal, y Potasio como elemento minoritario. Por su parte el espectro de difracción de rayos X muestra la dispersión de la línea base como respuesta al carácter parcialmente amorfo de la muestra, y confirma la presencia de Sílice en forma de Tridimita como componente principal, además de otros compuestos de P, K y Al.



Gráfica 3.5 – Difractograma ceniza horno Tarapoto

Señalar que se trabajó de la misma forma la práctica totalidad de las puzolanas utilizadas en la parte del proyecto desarrollada en Lima, tanto en la parte de granulometría, como en la obtención de aquellos parámetros que, como hemos dicho, fueron cedidos por ICITECH por

encontrarse este PFC dentro del marco de un proyecto mucho mayor, del que se ha hablado con anterioridad.

- Ceniza de cascarilla de arroz quemada en horno, procedente de Picota (Perú)

Esta ceniza procede de la quema industrial en la Molinera Transamazónica, dentro del distrito de Picota, en el departamento de San Martín. Muestra un aspecto muy similar al de la anterior, con un color gris oscuro y textura de polvo, con pequeñas cantidades de impurezas.

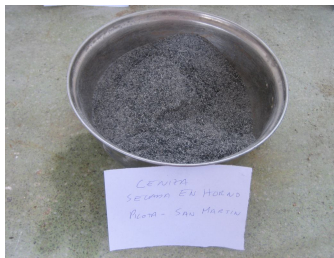
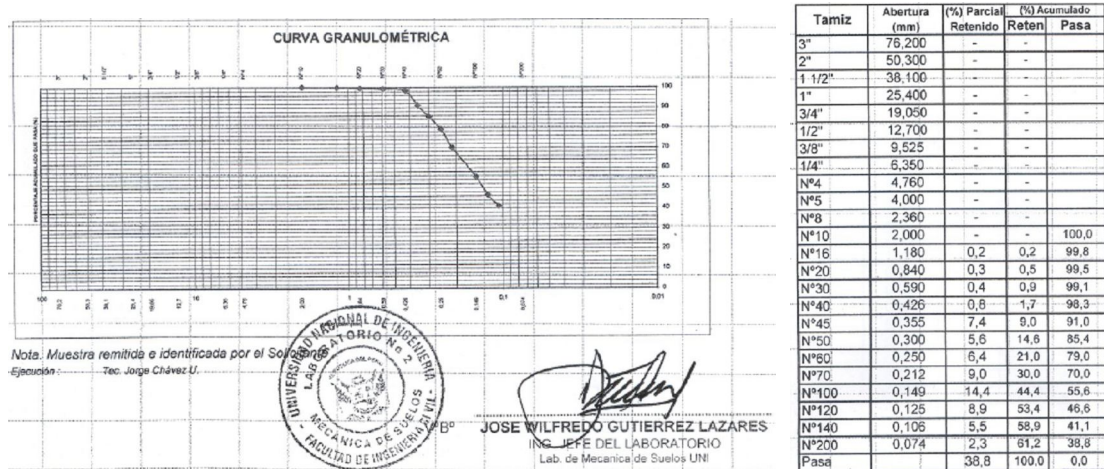


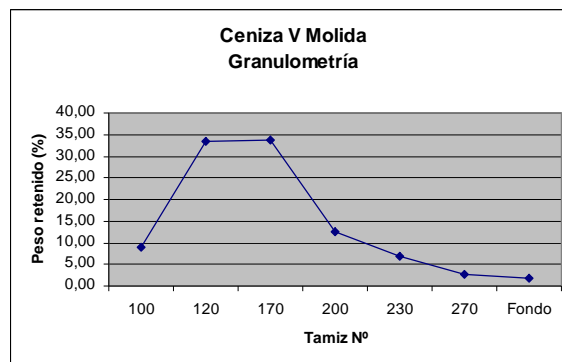
Fig. 3.6 – Ceniza horno Picota

Al igual que la anterior se utilizó antes y después de molida, y aquí se muestran sus datos granulométricos antes y después de dicho proceso.



Gráfica 3.6 – Granulometría ceniza horno Picota, sin moler

Antes de molida se aprecia que el mayor porcentaje parcial retenido corresponde al tamiz nº100, con una apertura de malla de 0.149mm.



Gráfica 3.7 – Granulometría ceniza horno Picota, molida

Sin embargo, después de molida se observa como ahora la mayor cantidad retenida se encuentra entre los tamices nº120 y nº170, con una abertura de malla de entre 0.125 y 0.09mm.

La microscopía óptica de nuevo muestra una mayoría de partículas blanquecinas o grises, y alguna más oscura correspondiente a inquemados. También se observan algunas impurezas, y además, al igual que las anteriores mantienen el esqueleto de la cascarilla.

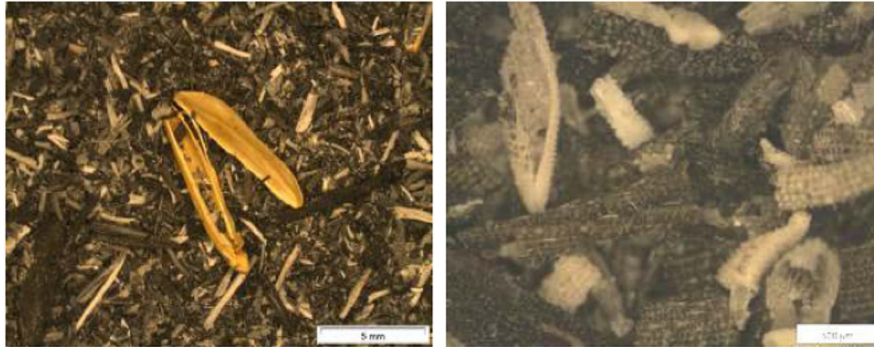


Fig. 3.7 – Micrografía óptica ceniza horno picota

Al observar al microscopio electrónico de barrido (SEM) nos damos cuenta de que en este caso las formas son un poco más redondeadas, y da la impresión de estar unas partículas unidas con otras, lo que podría significar que se ha producido un proceso de cristalización en mayor o menor grado, probablemente debido a una quema a elevadas temperaturas.

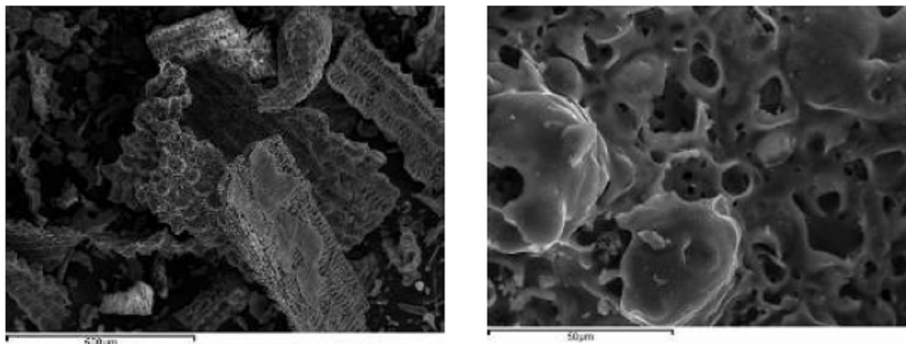
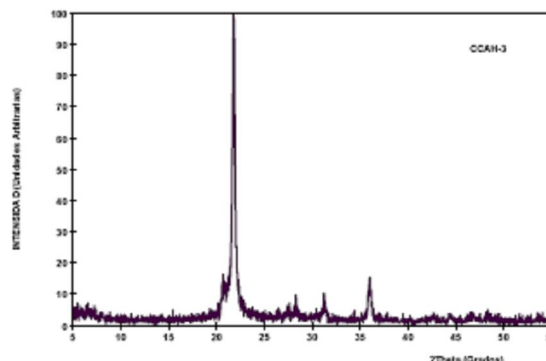


Fig. 3.8 – Micrografía electrónica ceniza horno Picota

El análisis por energías dispersivas de rayos X da como elemento más abundante el Si, y como elemento secundario el K, mientras que la difracción muestra la sílice en forma de Cristobalita como componente principal, pero también revela la presencia de Cuarzo y Tridimita, además de compuestos de Al y K.



Gráfica 3.8 – Difractograma ceniza horno Picota

Se puede observar como en este caso la línea base tiene una dispersión mucho menor, signo inequívoco de una mayor cristalización con respecto a las anteriores.

- Ceniza de cascarilla de arroz quemada al aire libre, procedente de Picota (Perú)

Esta ceniza proviene de la quema al aire libre, incontrolada, también de la Molinera Transamazónica, en el distrito de Picota, en el departamento de San Martín. Su color es blanco, con una textura bastante más basta que las anteriores, y al manipularla no deja partículas en suspensión. Presenta un grado de humedad considerable, formándose pequeñas bolas al compactar manualmente unas partículas con otras. Este efecto hizo necesario su secado en horno durante 24 horas para poder ser molida posteriormente, ya que sin este secado se adhería a las paredes del molino, imposibilitando así la molienda.

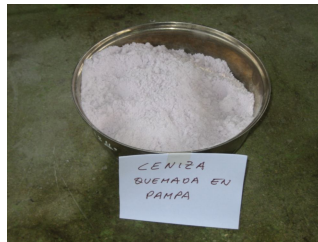
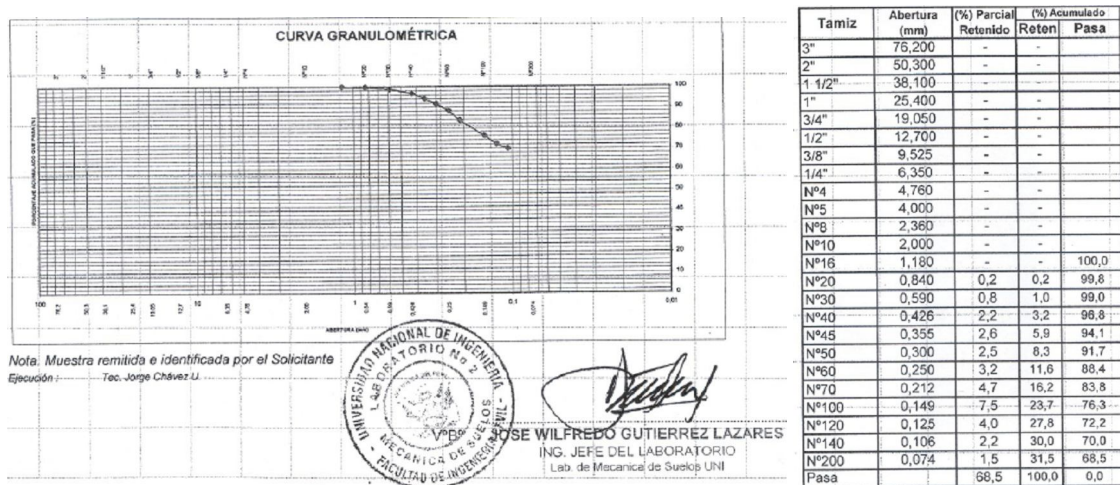


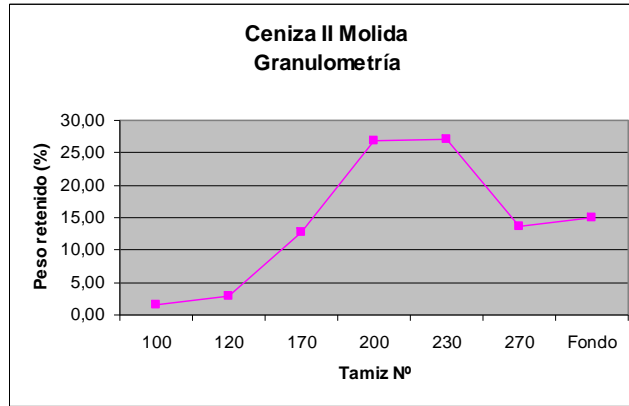
Fig. 3.9 – Ceniza pampa Picota

En este caso se puede observar una distribución granulométrica un poco más heterogénea, con porcentajes parciales retenidos similares, aunque de nuevo destacando el tamiz n°100 (0.149mm) con el 7.5% de las partículas retenidas.



Gráfica 3.9 – Granulometría ceniza pampa Picota, sin moler

Una vez molida vemos que estos valores máximos se han trasladado a los tamices n° 200 y 230, lo que implica una apertura de malla de entre 0.075 y 0.063mm, aumentando además considerablemente el porcentaje retenido.



Gráfica 3.10 – Granulometría ceniza pampa Picota, molida

En la siguiente imagen, que muestra las fotografías tomadas por microscopía óptica, se observa la presencia de inquemados, de color más oscuro, pero en menor cantidad que en las muestras anteriores.

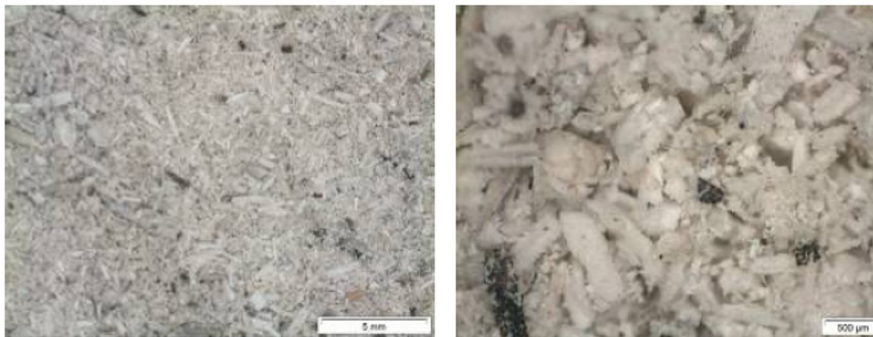


Fig. 3.10 – Micrografía óptica ceniza pampa Picota

En las micrografías por SEM se puede ver como las estructuras vuelven a ser angulosas e irregulares, por lo que se puede deducir que la temperatura de combustión ha sido más o menos baja, probablemente inferior a los 700°C.

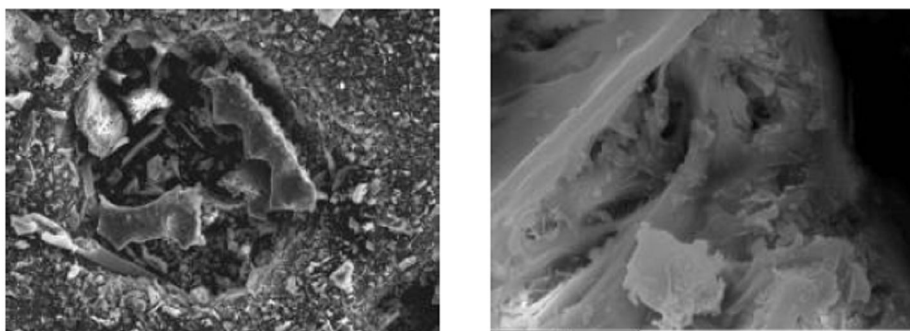
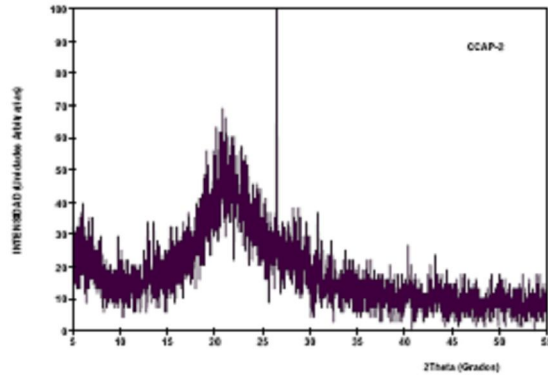


Fig. 3.11 – Micrografía electrónica ceniza pampa Picota

De nuevo el análisis por energías dispersivas de rayos X muestra los mismos elementos, Si como elemento principal y K como secundario. Como componentes principales se encuentran la sílice en forma de Cuarzo y Tridimita en menor medida, y hay una mayor variedad de componentes secundarios añadiendo a los habituales compuestos de Al y K una pequeña cantidad de óxidos de Fe (Hematites).



Gráfica 3.11 – Diffractograma ceniza pampa Picota

El carácter disperso de la línea base del diffractograma vuelve a dar una idea de la presencia mayoritaria de estructuras amorfas.

- Ceniza de cascarilla de arroz quemada al aire libre, procedente de Tarapoto (Perú)

Procedente de la quema al aire libre de Industrias ANMY, en el distrito de Tarapoto en el departamento de San Martín, esta ceniza muestra un color grisáceo y una textura fibrosa con cierto grado de humedad. Presenta impurezas en menor cantidad que las anteriores.

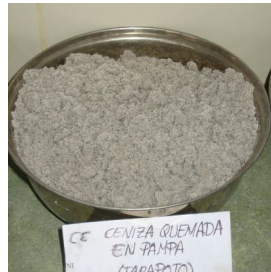
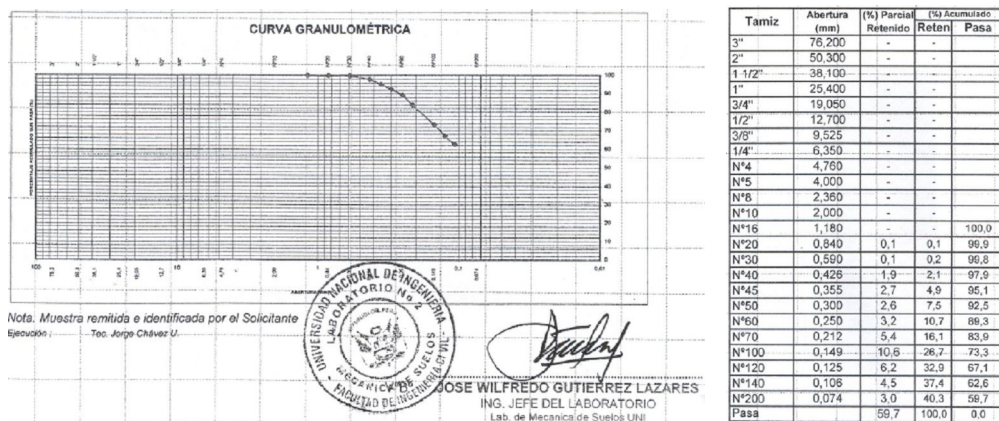


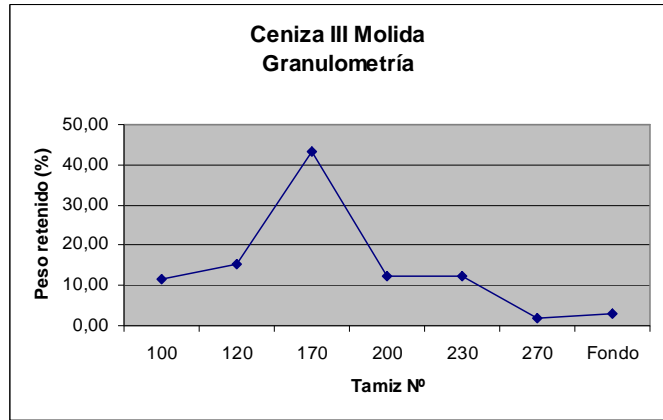
Fig. 3.12 – Ceniza pampa Tarapoto

Del mismo modo que la anterior fue necesario su secado en horno durante 24 horas para poder efectuar su molienda.



Gráfica 3.12 – Granulometría ceniza pampa Tarapoto, sin moler

Su distribución granulométrica antes de ser molida presenta, al igual que las anteriores, un máximo de retención en el tamiz nº 100 (0.149mm) con un porcentaje del 10.6%.



Gráfica 3.13 – Granulometría ceniza pampa Tarapoto, molida

Después de la molienda este máximo se encuentra en el tamiz n° 170 (0,09mm) con un porcentaje superior al 40%.

De nuevo se observa el color blanco grisáceo característico de las cenizas quemadas en pampa, o al aire libre, con pequeñas cantidades de inquemados y manteniendo una vez más la estructura típica de la cascarilla.

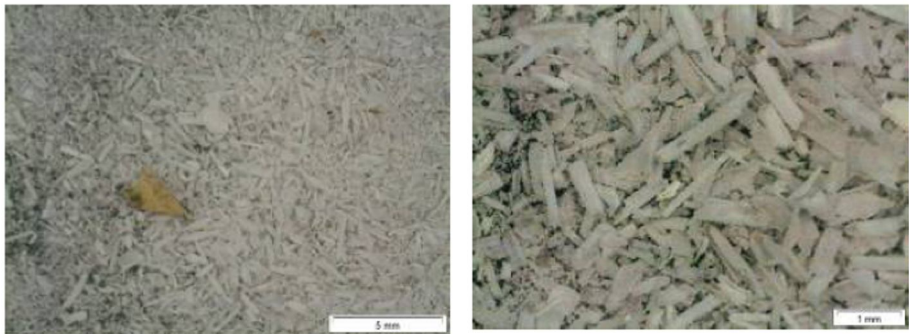


Fig. 3.13 – Micrografía óptica ceniza pampa Tarapoto

En la foto SEM se aprecia claramente como la estructura ha empezado a suavizar sus formas redondeando sus aristas en lo que podría ser el inicio de un proceso de sinterización. Esto podría dar a entender que la quema se ha realizado a temperaturas suficientemente altas como para comenzar a cristalizar su estructura, probablemente por encima de 900°C.

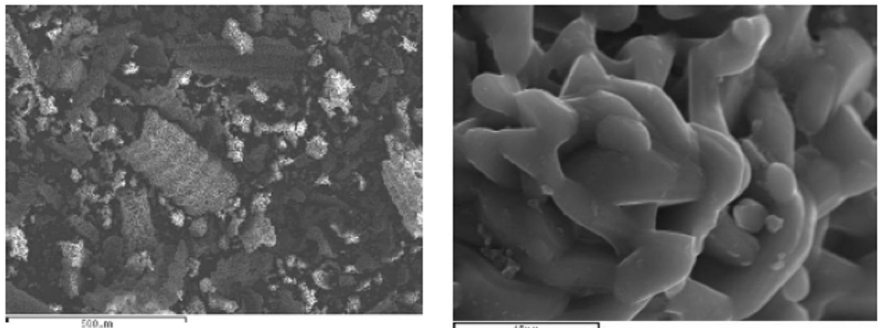
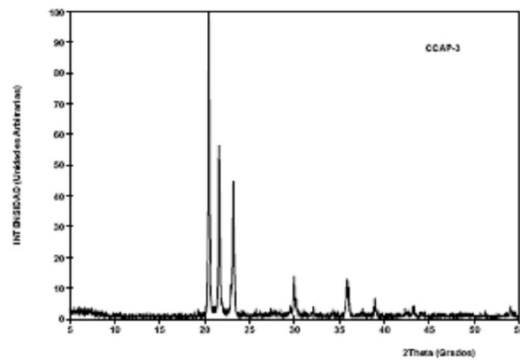


Fig. 3.14 – Micrografía electrónica ceniza pampa Tarapoto

Mediante el análisis por energías dispersivas sólo puede confirmarse la presencia de Si como elemento principal, mientras que la difracción de rayos X tan solo muestra la sílice como componente principal, en forma de Tridimita y Cristobalita.



Gráfica 3.14 – Diffractograma ceniza pampa Tarapoto

La regularidad de la línea base del difractograma habla claramente del proceso de cristalización referido más arriba.

- Ceniza de cascarilla de arroz quemada al aire libre, procedente de Arequipa (Perú)

Esta muestra procede de la quema en pampa en el departamento de Arequipa, y presenta un color entre blanco y rosáceo, con una textura de polvo, aunque no tan fino como el observado en las muestras quemadas en horno.

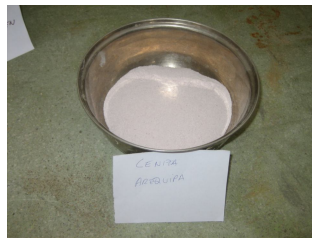
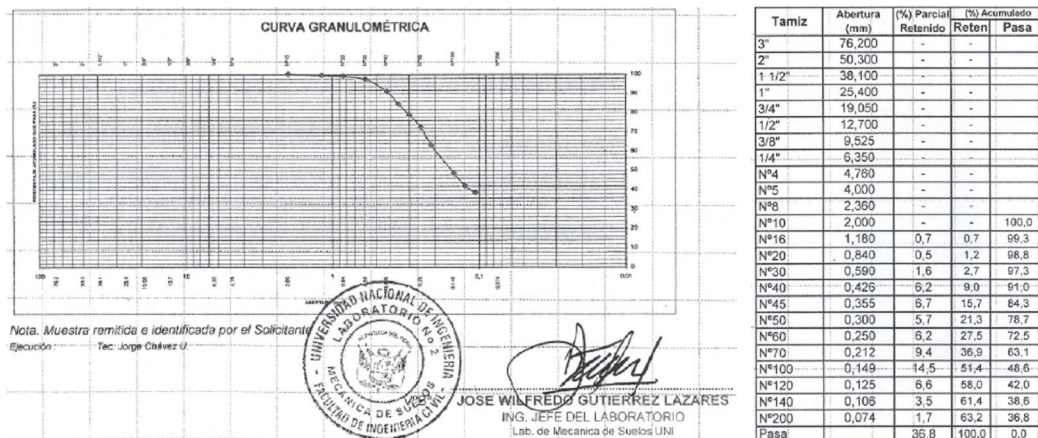


Fig. 3.15 – Ceniza pampa Arequipa

Esta puzolana sólo fue utilizada en su estado natural, sin moler, ya que fue excluida de la última de las series de ensayos. Su análisis granulométrico vuelve a señalar los 0.149mm de apertura de malla como el tamiz con mayor porcentaje de peso retenido, con un valor del 14.5%.



Gráfica 3.15 – Granulometría ceniza pampa Arequipa, sin moler

La microscopía óptica vuelve a repetir las características mostradas en las dos anteriores, también quemadas al aire libre. Aspecto blancuzco, presencia de impurezas y mantenimiento del esqueleto de la cascarilla.

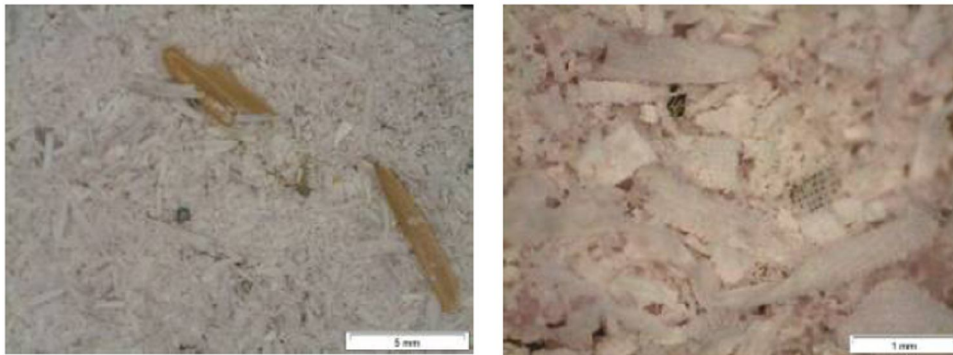


Fig. 3.16 – Micrografía óptica ceniza pampa Arequipa

En su imagen por SEM revela más similitudes con la segunda de las dos anteriores, sobre todo en el redondeamiento de sus aristas, lo que de nuevo nos indica una quema a altas temperaturas y el comienzo de un proceso de cristalización de la sílice.

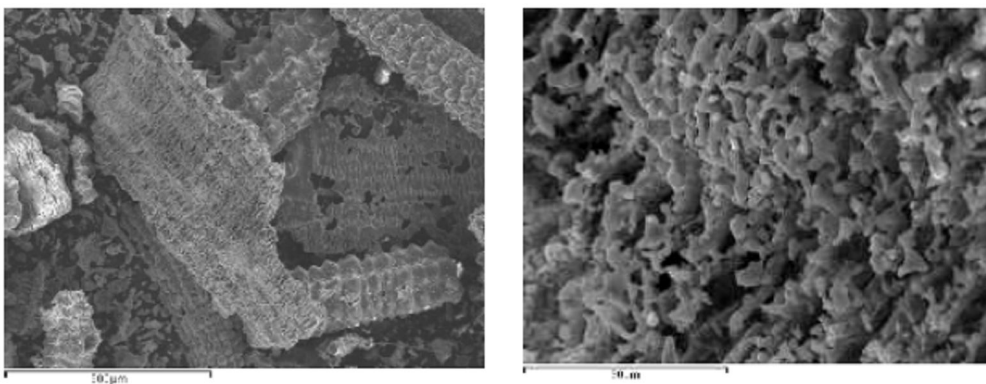
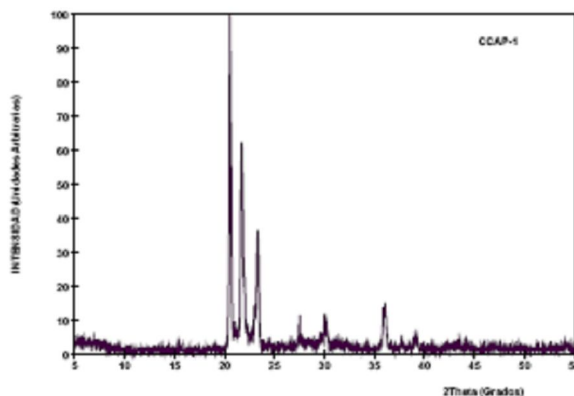


Fig. 3.17 – Micrografía electrónica ceniza pampa Arequipa

La EDX confirma la presencia de Si y K en menores proporciones, y la difracción señala la Tridimita como componente principal y compuestos de K como secundarios.



Gráfica 3.16 – Difractograma ceniza pampa Arequipa

El difractograma confirma la similitud entre las dos últimas muestras, mostrando también cierta regularidad en la línea base, símbolo de cristalización.

3.1.3.2. Ceniza volante

La ceniza volante se obtuvo de la central térmica de Andorra, en Teruel, y al no formar parte en un principio del proyecto principal no pudo ser sometida a los mismos ensayos que el resto de puzolanas.

Solamente se puede mostrar la siguiente imagen de microscopía electrónica que nos da una idea muy clara de por qué esta ceniza mejora la trabajabilidad de la mezcla. La minúsculas partículas esféricas se introducen en la red haciendo la masa más fluida.

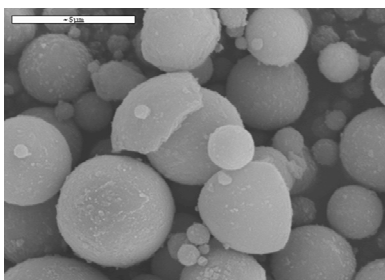


Fig. 3.18 – Micrografía electrónica ceniza volante

3.1.3.3. Ceniza volcánica

La ceniza volcánica, o puzolana natural, sólo fue utilizada en la parte del proyecto desarrollada en Lima, aunque como en el caso anterior, algunos de los ensayos de los que se muestran los resultados a continuación fueron realizados por ICITECH, cediendo los datos a este PFC como se ha indicado anteriormente.

- Roca volcánica procedente de Conchupata (Perú)

Esta puzolana procede de una cantera en el término de Conchupata, distrito de Pacaysasa, departamento de Ayacucho. Es de color marrón claro, y está formada por partículas más o menos pequeñas.

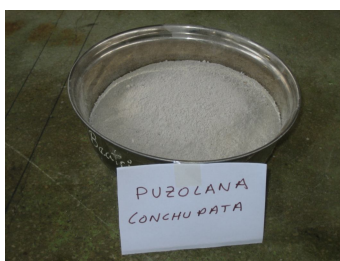
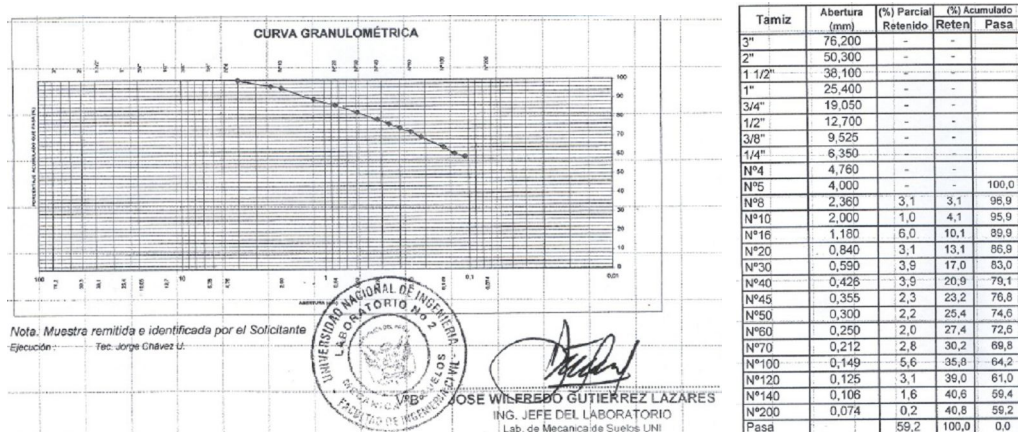


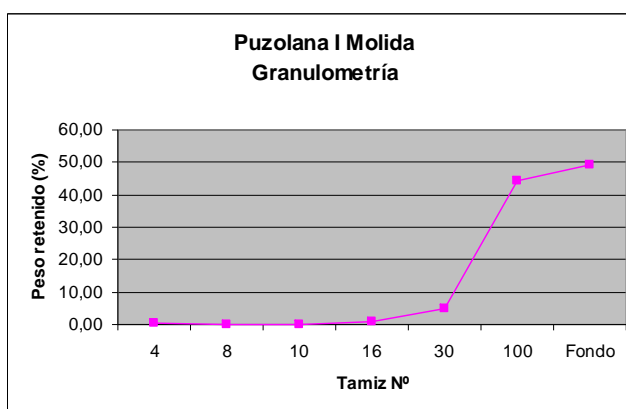
Fig. 3.19 – Puzolana Conchupata

Su granulometría antes de ser molida muestra una distribución de tamaños de partículas bastante amplia, destacando solamente el tamiz nº 16 (1.18mm) con un 6% y el nº 100 (0.149mm) con el 5.6%.



Gráfica 3.17 – Granulometría puzolana Conchupata, sin moler

Una vez secada en horno y molida vemos como la práctica totalidad de las partículas se encuentran entre el tamiz nº 100 (0.149mm) y el fondo.



Gráfica 3.18 – Granulometría puzolana Conchupata, molida

Como puede observarse la microscopía óptica no revela grandes datos acerca de las características de esta puzolana, y como se verá a continuación ocurre algo parecido con el resto de cenizas volcánicas.

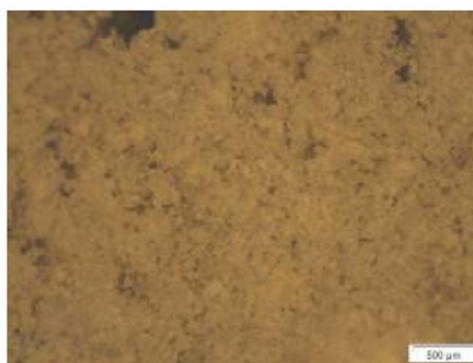


Fig. 3.20 – Micrografía óptica puzolana Conchupata

En cambio la micrografía SEM sí que nos da información interesante, al observar las partículas irregulares, con bordes angulosos y aspecto vitrificado, por lo que se puede deducir que se trata de una muestra con mayoría de estructura amorfa.

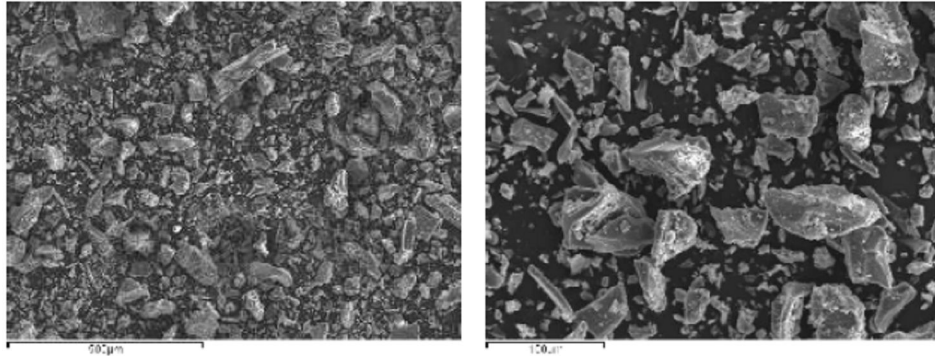
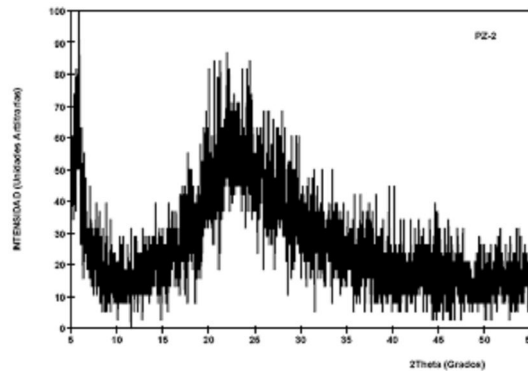


Fig. 3.21 – Micrografía electrónica puzolana Conchupata

El EDX habla de la presencia de Si y Al como elementos principales, y K, Na y Ca como elementos minoritarios. Los compuestos principales son base aluminio en forma de Ortoclasa y Sanidina, con presencia minoritaria de Cuarzo.



Gráfica 3.19 – Difractograma puzolana Conchupata

La dispersión de la línea base del difractograma da de nuevo una muestra muy clara de la predominancia de estructuras amorfas.

- Roca volcánica procedente de Totorillas (Perú)

Esta puzolana procede del distrito de Totorillas, en el departamento de Ayacucho y la muestra ha sido tomada de una cantera natural. Muestra una coloración marrón claro, y con agregados algo mayores que la anterior.

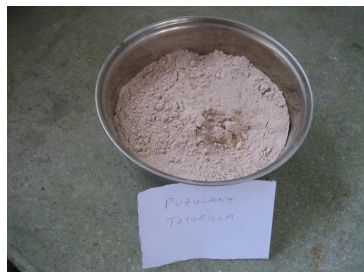
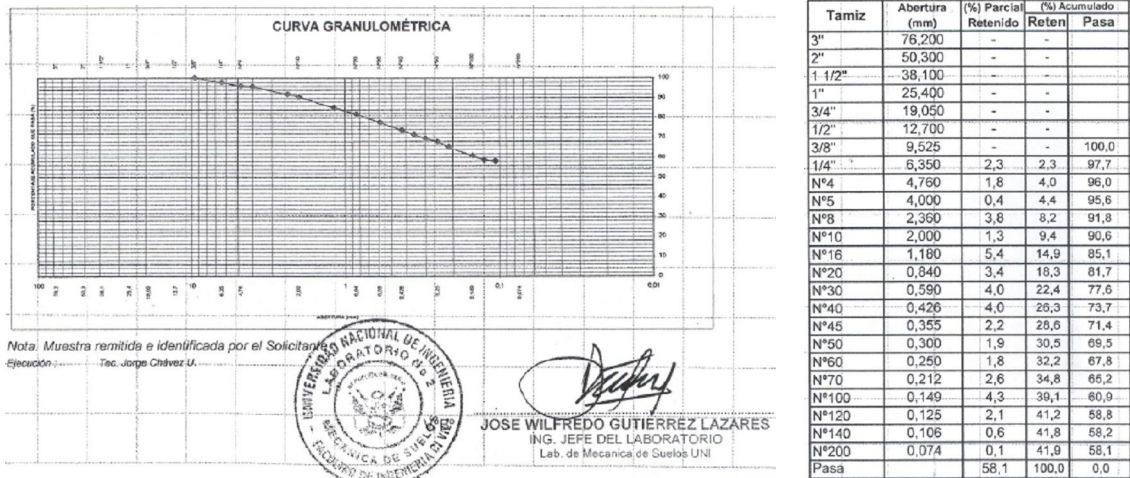


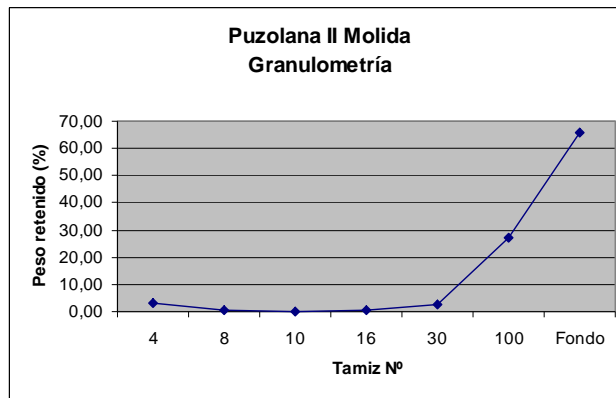
Fig. 3.22 – Puzolana Totorillas

El análisis granulométrico previo a la molienda muestra una distribución de tamaños de partícula bastante regular y con una gran amplitud de campo. No se puede destacar ningún tamaño predominante estando todas las partículas repartidas entre los 7mm y los 0.07mm.



Gráfica 3.20 – Granulometría puzolana Totorillas, sin moler

Después de secado y molienda se aprecia una reducción de la variedad de tamaños de grano, concentrándose la mayoría entre los tamices nº 100 (0.149) y el fondo.



Gráfica 3.21 – Granulometría puzolana Totorillas, molida

Presenta un aspecto muy similar a la anterior al ser observada al microscopio óptico, por lo que seguimos sin sacar grandes conclusiones de este análisis.

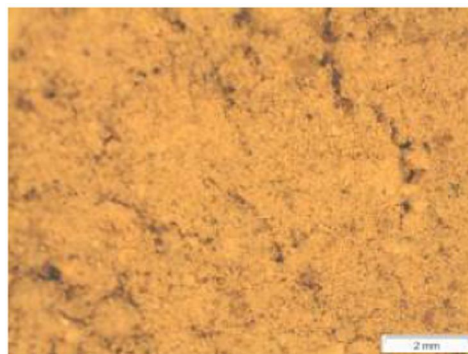


Fig. 3.23 – Micrografía óptica puzolana Totorillas

También muy parecida a la anterior, la micrografía SEM muestra formas irregulares y angulosas, con signos de vitrificación.

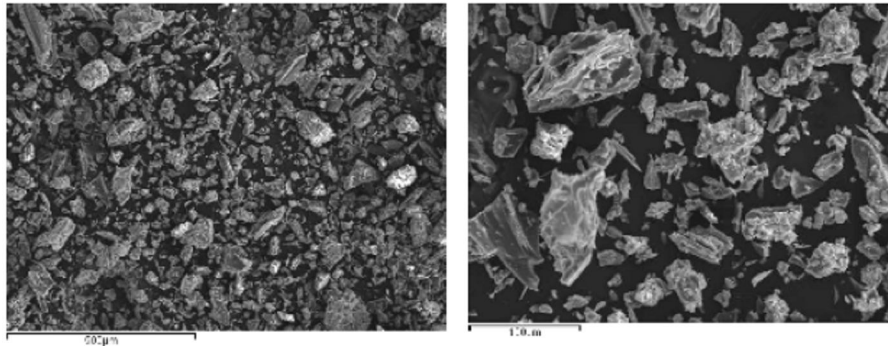
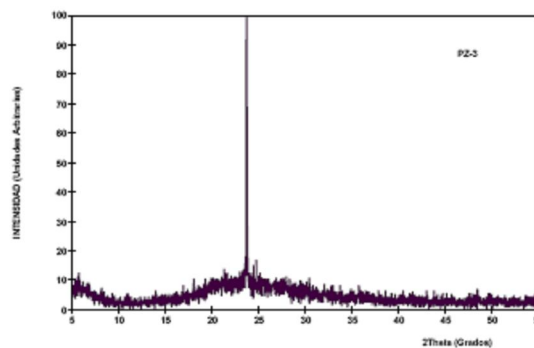


Fig. 3.24 – Micrografía electrónica puzolana Totorillas

El ensayo por EDX muestra también los mismos elementos presentes que la puzolana anterior, siendo el Si y el Al los mayoritarios y Na, K y Ca los minoritarios. Sin embargo, los componentes obtenidos por difracción son ligeramente distintos a los del caso anterior. Aquí también es un compuesto de Al el componente principal, pero en una fase distinta, esta vez en forma de Faujasita. Además presenta óxidos de hierro (Hematites), y es particularmente significativo que no aparezcan señales de sílice en ninguna de sus formas.

El difractograma presenta una línea base bastante regular, aunque no tanto como alguna de las vistas con anterioridad, por lo que las fases amorfas no serían las más abundantes.



PZ-3

Gráfica 3.22 – Difractograma puzolana Totorillas

- Roca volcánica procedente de Tantarjo (Perú)

Esta muestra se extrajo de una cantera natural en el término de Tantarjo, distrito de Pacaysasa, departamento de Ayacucho, y también presenta color marrón claro, pero esta vez los agregados son de menor tamaño, dando al conjunto una apariencia más homogénea.

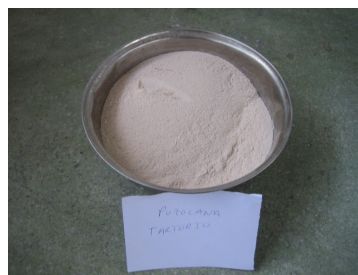
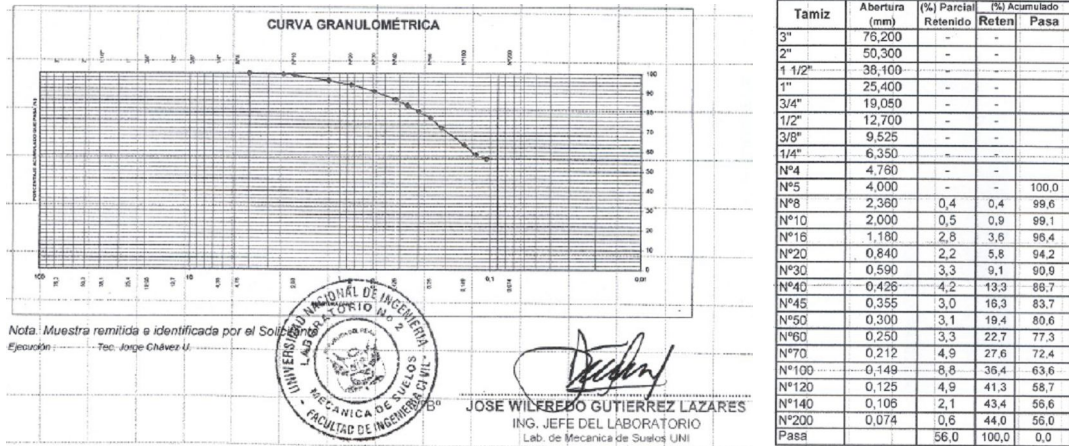


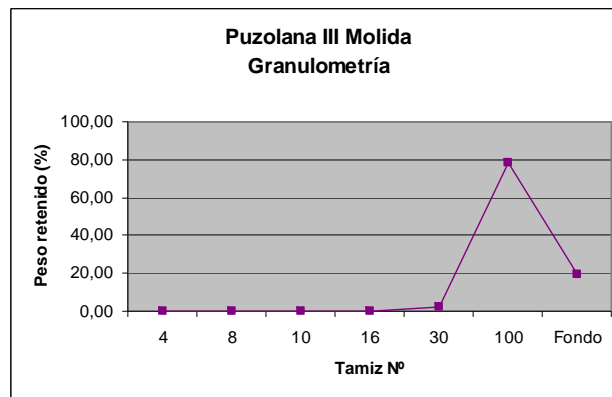
Fig. 3.25 – Puzolana Tantarjo

La mayoría de partículas antes de ser molida quedan retenidas en el tamiz nº 100 (0.149mm) con un 8.8%, pero se observa una diversidad de tamaños bastante menor.



Gráfica 3.23 – Granulometría puzolana Tantarjo, sin moler

Después de molida la mayoría de las partículas siguen en el tamiz nº 100, pero en este caso el porcentaje ha aumentado considerablemente, hasta prácticamente el 80%.



Gráfica 3.24 – Granulometría puzolana Tantarjo, molida

La imagen por microscopía óptica no aporta nada nuevo, repitiéndose el caso de las dos anteriores.

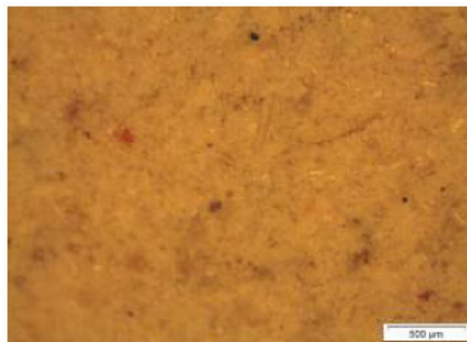


Fig. 3.26 – Micrografía óptica puzolana Tantarjo

La imagen SEM es también muy parecida a las anteriores, de nuevo formas irregulares, aristas vivas y aspecto vitrificado.

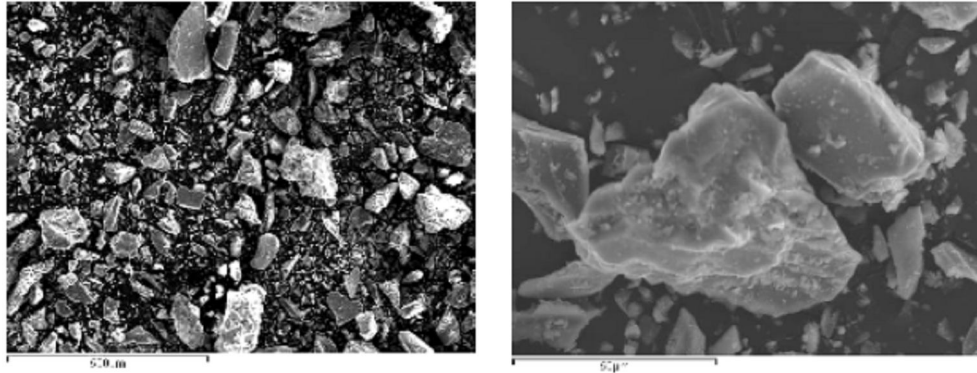
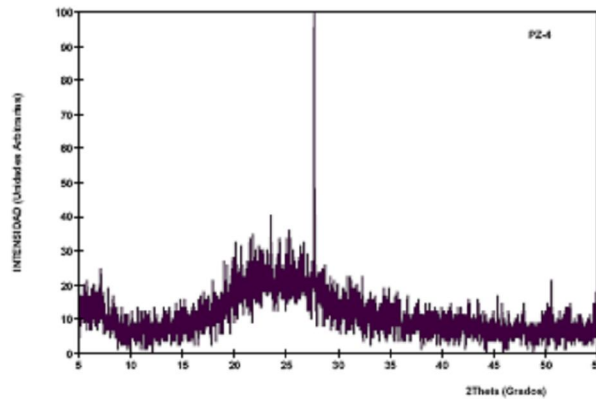


Fig. 3.27 – Micrografía electrónica puzolana Tantarjo

Los resultados de la EDX son también similares, aunque en este caso el K pasa a ser elemento mayoritario, acompañando al Si y al Al, y se encuentran restos de Fe entre los minoritarios (Ca y Na). La difracción de rayos X señala dos compuestos de Al como componentes mayoritarios (Albita y Sanidina), y presencia también de Al entre los minoritarios, junto al Cuarzo y al óxido de Fe. La línea base muestra de nuevo tendencia a estructuras amorfas, aunque sólo parcialmente.



Gráfica 3.25 – Difractograma puzolana Tantarjo

3.2. MORTEROS. DISEÑO DE MEZCLAS

Las dosificaciones empleadas para los morteros de ensayo se decidieron en coordinación con los equipos de trabajo del proyecto en las distintas localizaciones. Su experiencia previa en este campo fue de gran ayuda, debido a la inicial falta de conocimientos en profundidad sobre el tema. Cabe señalar que en el momento de desarrollar estos diseños en Lima ya se contaba con la experiencia previa de Valencia, por lo que se pudo participar con mayores aportaciones.

3.2.1. Valencia

El primer factor de decisión que se tuvo en cuenta fueron los límites impuestos por las diferentes normativas. La norma ASTM C618 limita a un 30% la cantidad de estos materiales que pueden ser añadidos a la mezcla de mortero. Como hemos dicho antes esta limitación es común en la mayoría de normas de construcción que lo plantean, y aunque no se especifica en sus textos es probable que sea debido al fenómeno de autoneutralización.

Con este valor fijado como máximo se decidió evaluar todas las muestras al 10, 20 y 30% para estudiar la progresión de la reacción puzolánica y de los resultados de resistencia mecánica. Las

combinaciones entre las distintas puzolanas se detallan más adelante, pero la suma de sus pesos siempre correspondió al alguno de estos porcentajes en relación a la cantidad de cemento en peso.

Con respecto a la relación cemento:arena se pensó en una aplicación en prefabricados por lo que la cantidad de cemento se aumentó en relación a lo que sería en un mortero normal de recubrimiento o junta. Así se utilizó una proporción de 1:3.

Una de la medidas claves de la mezcla es la cantidad de agua añadida, o más bien, la relación agua:conglomerante, que como es bien sabido representa un factor crítico en la resistencia final del mortero. Se adoptó un valor de 0.5, que quizá no sea el de máximo rendimiento de un mortero convencional, pero se tuvo en cuenta el hecho de que las puzolanas son materiales altamente higroscópicos, por lo que la trabajabilidad de las muestras podría verse afectada.

De este modo se establecieron las siguientes cantidades, en gramos, de cada componente para la fabricación de los prismas y las tejas en cada caso.

	Teja	Prisma
Conglomerante (cemento+puzolana)	720gr	450gr
Agua	360gr	225gr
Árido Grueso	1685gr	1053gr
Árido fino	475gr	297gr

Tabla 3.3 – Dosificación mezclas Valencia

Señalar que estas cantidades corresponden, en el caso de las tejas a una unidad y en el caso de los prismas a tres unidades. Además es importante saber que se utilizaron exactamente las mismas proporciones para la elaboración de ambos.

3.2.2. Lima

En el caso de Lima se realizaron tres series de ensayos, intentando paliar de alguna manera las deficiencias mostradas por la serie anterior, y buscando una mayor amplitud de resultados. El porcentaje de sustitución de cemento por puzolana se repartió, al igual que en Valencia, entre los valores del 10, 20 y 30%, aunque como se explica más adelante no en todas las series se evaluaron los tres porcentajes.

En la primera de las series las muestras se elaboraron con la puzolana en estado natural, simplemente tamizada para eliminar las impurezas o sometida a una molienda manual para dividir las partículas más grandes.

Para la relación cemento:arena de esta serie se pensó en una aplicación intermedia entre lo que podría ser un mortero de recubrimiento (1:5 ó 1:6) y uno para prefabricados (1:3) debido a que las aplicaciones previstas para el futuro entran en ambos campos. Así se utilizó una relación de 1:4.

Por su parte para la relación agua:cemento se optó por no establecer un valor fijo, sino añadir la cantidad necesaria en cada caso para obtener una trabajabilidad adecuada. Se era consciente de lo que esta decisión implicaba a la hora de comparar unos valores con otros, pero con perspectivas de hacer nuevas series se decidió trabajar con esta condición. Lo que se buscaba

con esta medida era el simplificar al máximo el proceso de fabricación para su futura aplicación práctica en manos de personas de escasos recursos y escasa formación.

Para la segunda de las series se repitieron exactamente las mismas dosificaciones, y solamente se ha variado la edad de curado, como se explica más adelante.

La última de las series se realizó siguiendo las indicaciones de la norma peruana NTP 334.051, que además de las indicaciones para la realización de las probetas incluye un apartado sobre la dosificación de mezclas. En él se establece que la relación cemento:arena debe de ser de 1:2.75, e indica que la cantidad de agua debe ser tal que se garantice una trabajabilidad entre ciertos valores, pero en este caso sí que se ha optado por mantener constante esta relación y así poder comparar unas puzolanas con otras de manera más fiable.

En esta última las puzolanas han sido sometidas a procesos de secado y molienda que se describen más adelante.

Las cantidades utilizadas de cada componente, en gramos, se detallan a continuación. Hay que tener en cuenta el hecho de que la cantidad de agua sólo fue constante en la tercera de las series, mientras que en las otras dos se añadió la cantidad necesaria para obtener una trabajabilidad apropiada mediante análisis visual.

	Cemento	Puzolana	Arena	Agua
P	266	0	734	133
CI-2	212.8	53.2	734	133
CII-2	212.9	53.3	734	133
CIII-2	212.10	53.4	734	133
CV-2	212.11	53.5	734	133
PI-2	212.12	53.6	734	133
PII-2	212.13	53.7	734	133
PIII-2	212.14	53.8	734	133

Tabla 3.4 – Dosificación mezclas Lima. Serie III

	Cemento	Puzolana	Arena	Agua
P-C	200	0	800	150
CIII-2-C	160	40	800	190
CV-2-C	160	40	800	200
PI-2-C	160	40	800	155
PIII-2-C	160	40	800	155

Tabla 3.5 – Dosificación mezclas Lima. Serie II

Serie I

	Cemento	Puzolana	Arena	Agua
P-A	200	0	800	145
P-B	200	0	800	125
CI-1-A	180	20	800	170
CI-1-B	180	20	800	155
CII-1-A	180	20	800	175
CII-1-B	180	20	800	165
CIII-1-A	180	20	800	145
CIII-1-B	180	20	800	150
CIV-1-A	180	20	800	170
CIV-1-B	180	20	800	170
CV-1-A	180	20	800	180
CV-1-B	180	20	800	165
PI-1-A	180	20	800	145
PI-1-B	180	20	800	140
PII-1-A	180	20	800	145
PII-1-B	180	20	800	145
PIII-1-A	180	20	800	145
PIII-1-B	180	20	800	145
CI-2-A	160	40	800	190
CI-2-B	160	40	800	200
CII-2-A	160	40	800	175
CII-2-B	160	40	800	183
CIII-2-A	160	40	800	160
CIII-2-B	160	40	800	160
CIV-2-A	160	40	800	195
CIV-2-B	160	40	800	195
CV-2-A	160	40	800	195
CV-2-B	160	40	800	185
PI-2-A	160	40	800	155
PI-2-B	160	40	800	150
PII-2-A	160	40	800	165
PII-2-B	160	40	800	145
PIII-2-A	160	40	800	165
PIII-2-B	160	40	800	155
CI-3-A	140	60	800	225
CI-3-B	140	60	800	220
CII-3-A	140	60	800	180
CII-3-B	140	60	800	200
CIII-3-A	140	60	800	165
CIII-3-B	140	60	800	165
CIV-3-A	140	60	800	210
CIV-3-B	140	60	800	230
CV-3-A	140	60	800	215
CV-3-B	140	60	800	215
PI-3-A	140	60	800	160
PI-3-B	140	60	800	145
PII-3-A	140	60	800	165
PII-3-B	140	60	800	150
PIII-3-A	140	60	800	150
PIII-3-B	140	60	800	155

Tabla 3.6 – Dosificación mezclas Lima – Serie I

3.3. ENSAYOS REALIZADOS

Los ensayos realizados se llevaron a cabo entre los meses de marzo y agosto del año 2008, en el Laboratorio de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Valencia (España), y entre los meses de septiembre y diciembre del año 2008 en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería de Lima (Perú).

Se pueden dividir en dos grandes grupos, los ensayos realizados sobre las tejas, y aquellos realizados sobre los morteros.

Antes de comenzar con la descripción se quiere hacer notar que probablemente aparezcan ciertas "incoherencias" en la realización de los ensayos, como la de no repetir las mismas pruebas para los morteros en ambas ciudades. Se es consciente de ello y para su explicación existen dos razones que se consideran importantes y a nuestro modo de ver comprensibles. La primera es el ya mencionado desarrollo de este proyecto final de carrera dentro del marco de un proyecto de investigación mucho mayor, subvencionado por la Agencia Española de Cooperación Internacional y Desarrollo (AECID) y que comprende la participación de dos universidades. Las pruebas realizadas en ambas fueron desarrolladas bajo la supervisión de sus responsables directos, por lo que no se trabajó con la "libertad" que supondría la realización de un PFC por cuenta propia, sino que fue supeditado a las necesidades del proyecto principal en cada momento.

La segunda razón fue la falta de tiempo y medios materiales, ya que el proyecto debía ajustarse a un cronograma establecido, y a un presupuesto determinado.

Dicho esto, destacar la total predisposición por parte de los responsables para prestar la ayuda y medios disponibles para la realización de este PFC, muchas veces incluso apartándose de las pautas marcadas por el, llamémosle, proyecto principal. Con esto se quiere aclarar que la falta de "libertad" de la que se habló anteriormente fue producto de la necesidad y para nada de una actitud arbitraria y desinteresada hacia este trabajo.

Se quiere hacer extensible esta aclaración a toda la descripción de los ensayos, señalando que el análisis de resultados y redacción de conclusiones posterior fueron realizados con el total conocimiento de estos condicionantes. Aún así se considera que esta experiencia ha resultado ser un gran aprendizaje, mucho mayor que si se hubiera realizado de forma aislada, y que de los resultados finales pueden extraerse muy buenas conclusiones científicas y tecnológicas, además de las de carácter humano y social que quizá no queden reflejadas en toda su dimensión.

3.3.1. Ensayos realizados sobre los morteros

En el caso de los morteros hay que distinguir entre los ensayos realizados en Valencia y los realizados en Lima. En ambos casos el ensayo de compresión fue el que marcó las pautas, pero hubo diferencias en el resto de ensayos realizados. También existen diferencias entre el tipo y la cantidad de probetas preparadas en ambos casos.

a) Valencia

En Valencia se realizaron los ensayos de fluidez, flexión, absorción y compresión, todos ellos según la norma UNE-EN 1015.

Para el ensayo de fluidez se utilizó mortero fresco, mientras que para los otros tres ensayos la probeta utilizada fue un prisma de 4x4x16 cm.

La serie de probetas fabricadas fue la misma que la utilizada para las tejas, con las mismas mezclas y las mismas edades de curado, y se detalla más adelante. La mezcla producida para estas probetas fue utilizada para comprobar la fluidez antes de ser introducidas en el molde.

b) Lima

Lamentablemente en Lima sólo pudieron realizarse los ensayos de fluidez y compresión. De la misma manera que en Valencia se utilizó mortero fresco para el ensayo de fluidez, mientras que para la compresión se utilizaron cubos de 5 cm de arista.

Como hemos indicado anteriormente, en Lima se trabajó con 8 tipos de puzolana distintos, 5 cenizas de cascarilla de arroz y 3 puzolanas naturales. Al igual que en Valencia se analizaron tres porcentajes de sustitución (10, 20 y 30%) y tres edades de curado (7, 28 y 45 días). La selección de 45 días en lugar de 91 de nuevo fue debida a la falta de tiempo, al igual que la decisión de no aplicar las tres edades a todas las puzolanas, sino solo a aquellas muestras que mostraran mejor comportamiento a 28 días. En esta decisión también influyó la falta de fondos que dificultaban la compra de materiales para realizar todos los ensayos deseados.

Al igual que en Valencia se observó un marcado descenso de la maniobrabilidad de las mezclas con el aumento de la adición de puzolanas, pero en este caso no se optó por la introducción de cenizas volantes, ya que no se consideró como un material disponible en los posibles lugares de aplicación del proyecto. En cambio, se optó por un aumento de la cantidad de agua, a sabiendas de que supondría un descenso en la resistencia, que se consideró aceptable a favor de otros benéficos.

Así se realizó una primera tanda de probetas, utilizando todas las puzolanas, a tres porcentajes distintos, a dos edades distintas y a tres probetas por mezcla y edad dando como resultado un total de 150 probetas. De estas primeras se seleccionaron las 4 puzolanas con mejor comportamiento y se realizó una nueva tanda de ensayos, fabricando ahora probetas solamente a una proporción (la observada como más adecuada) y a una edad (45 días), sumando un total de 15 probetas nuevas.

Evidentemente se es consciente de que esta no es la forma más adecuada de realizar un análisis completo de las muestras propuestas, pero se quiere incidir una vez más en que todos los trabajos realizados en Lima fueron condicionados por la escasez de tiempo y medios, y que se trataron de tomar las decisiones más coherentes bajo las circunstancias descritas.

3.3.2. Ensayos realizados sobre las tejas

Siguiendo las indicaciones de la norma española UNE-EN 491: "Tejas y piezas de hormigón para tejados y revestimiento de muros. Métodos de ensayo", se realizaron los siguientes ensayos:

- Resistencia mecánica a flexión transversal
- Impermeabilidad al agua
- Resistencia al impacto

Cabe señalar que la citada norma recomienda la ejecución de varios ensayos más, tales como resistencia del taco o soporte, planeidad, masa, longitud de cuelgue o anchura efectiva, que no fueron realizados por no considerarse objeto del presente estudio.

Un ensayo más no fue realizado, aún considerándose de notable importancia, debido a la no disponibilidad de medios y equipamiento adecuados. Es el caso del ensayo de resistencia al hielo-deshielo.

La probeta utilizada para estos ensayos fue directamente la teja de microhormigón, elaborada con el equipo proporcionado por TEVI, que se describe más adelante.

En un principio la idea era la de fabricar una serie de tejas sustituyendo un porcentaje del cemento de la mezcla por ceniza de cascarilla de arroz. Después de algunas pruebas se observó que la ceniza reducía considerablemente la trabajabilidad de la mezcla, exigiendo mayores cantidades de agua, y por tanto reduciendo la resistencia. Esto es debido a la estructura netamente amorfa de la ceniza, con gran cantidad de ramificaciones y poros que la convierten en un compuesto altamente higroscópico. Ante estas perspectivas se trató de encontrar otra solución, y se decidió añadir a las mezclas distintas cantidades de cenizas volantes, de las que se conocía su capacidad para hacer la mezcla más fluida, gracias a las características morfológicas de sus partículas. Su finísimo tamaño de grano y la forma redondeada de sus partículas contribuyen a mejorar la trabajabilidad al actuar como lubricante sólido, además de tratarse de un material puzolánico como hemos explicado anteriormente.

Así que al introducirse una nueva variable en los ensayos estos aumentaron en número sobre lo previsto en un principio, pero se consideró que podría tratarse de un factor positivo para la investigación. Además de solucionar en parte el problema de la trabajabilidad se obtendrían resultados de un nuevo tipo de puzolana.

Además de la naturaleza de la adición, el otro factor relacionado con ésta fue su proporción. La gran mayoría de las normas señalan el 30% como el máximo de adición activa permitido, por lo que se decidió realizar tres adiciones distintas, al 10, 20 y 30%, lo que daría la oportunidad de observar su evolución. Cabe señalar que este porcentaje de sustitución se aplicó sobre el porcentaje de cemento contenido en la mezcla, y no sobre el total de ésta.

Y un tercer factor que se consideró fue el tiempo de curado. Como hemos explicado la reacción puzolánica es más lenta que la producida por la hidratación del cemento portland, por lo que exigía una consideración de edad de curado mayor a la habitual en estos casos, de 7 y 28 días, por lo que también se fabricaron probetas para ser curadas durante 91 días.

De este modo, conjugando estos tres factores, naturaleza y cantidad de adición y tiempo de curado, se estableció una programación de preparación de tejas como la que muestra la siguiente tabla:

7 días			28 días			91 días		
% ADICIÓN			% ADICIÓN			% ADICIÓN		
cemento	CV	CCA	cemento	CV	CCA	cemento	CV	CCA
100	0	0	100	0	0	100	0	0
90	10	0	90	10	0	90	10	0
90	0	10	90	0	10	90	0	10
80	20	0	80	20	0	80	20	0
80	10	10	80	10	10	80	10	10
80	0	20	80	0	20	80	0	20
70	30	0	70	30	0	70	30	0
70	20	10	70	20	10	70	20	10
70	10	20	70	10	20	70	10	20
70	0	30	70	0	30	70	0	30

Tabla 3.7 – Proporciones sustitución tejas

Como puede verse se prepararon diez mezclas distintas, a tres edades distintas, y a tres probetas (o tejas) por mezcla y edad, obteniendo de esta manera un total de 90 tejas.

3.4. EQUIPOS UTILIZADOS

3.4.1. Molino

Se utilizaron dos tipos de molino distintos, uno en cada una de las localizaciones. En Valencia se usó un molino de bolas de alúmina de 18mm de diámetro con un recipiente cerámico de unos 80-100gr de muestra de capacidad, modelo Gabrielli Mill-2.



Fig. 3.28 – Molino de bolas de alúmina

En Lima, por el contrario, se usó un molino de bolas de acero de 2^{1/2}" y 1^{1/2}" de diámetro sobre un recipiente también de acero, con una capacidad bastante mayor, llegando a moler hasta un volumen de 6 litros.



Fig. 3.29 – Molino de bolas de acero

3.4.2. Trituradora

Se utilizó una trituradora, o chancadora, modelo Braun Chipmunk VD67, accionada por un motor de 1cv. Solamente fue utilizada en Lima para reducir a gravilla los pedazos más grandes de roca volcánica



Fig. 3.30 - Trituradora

3.4.3. Tamizadora

Se utilizaron dos modelos distintos de tamizadoras para realizar los análisis granulométricos, aunque ambas muy similares y con el mismo funcionamiento. La primera imagen corresponde al modelo Ele Internacional, mientras que la segunda a un Tyler Ro-Tap.



Fig. 3.31 – Tamizadoras

Evidentemente, junto con las tamizadoras se utilizaron los tamices correspondientes en cada caso.

3.4.4. Balanza

En Valencia se utilizaron distintos modelos de balanzas electrónicas, en la imagen se muestran dos de ellas.



Fig. 3.32 – Balanza electrónica

En Lima se utilizó una balanza electrónica modelo Adam CBW-35a, con un fondo de escala de 35lb, y una división de escala de 0.001lb



Fig. 3.33 – Balanza electrónica

3.4.5. Amasadora

En Valencia se utilizó una amasadora del fabricante Ibertest, modelo IB32-040E, con dos posiciones de velocidad y una potencia de 0.25kW.



Fig. 3.34 - Amasadora

En Lima se utilizó una amasadora modelo Hobart N50, con tres posiciones de velocidad y un máximo de 1725rpm



Fig. 3.35 - Amasadora

3.4.6. Compactadora



Fig. 3.36 - Compactadora

3.4.7. Mesa de sacudidas

En ambas localizaciones se utilizaron mesas de sacudidas estandarizadas para realizar el ensayo de fluidez.

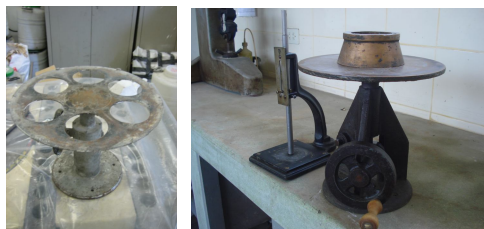


Fig. 3.36 – Mesa de sacudidas

3.4.8. Mesa vibradora

Para el vibrado y el primer moldeado de la teja se utilizó una mesa vibradora suministrada por Tevi, y que puede funcionar mediante una batería eléctrica de 12v.



Fig. 3.37 – Mesa vibradora

3.4.9. Moldes

Se utilizaron varios tipos de moldes en cada localización. Mientras que en Valencia se usaron los moldes para tejas suministrados por Tevi y otros de acero con forma prismática para las probetas, en Lima se usaron dos moldes distintos para los cubos, con alguna diferencia estructural, pero manteniendo la forma de receptáculo.



Fig. 3.38 - Moldes

3.4.10. Regla, llana y paleta

Como elementos de albañilería básica se utilizaron una regla, una llana y una paleta estandarizadas, como las que pueden encontrarse en cualquier ferretería.

3.4.11. Máquina de ensayo de compresión

En Valencia se utilizó una máquina universal de ensayos hidráulica del fabricante IBERTEST con capacidad para 6, 12, 30 y 60 toneladas.

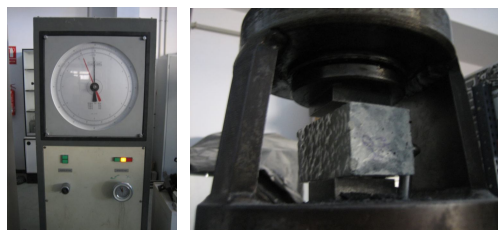


Fig. 3.39 – Máquina universal de ensayos

En lima se utilizó una máquina universal de ensayos hidráulica modelo Amsler Testing Machina, con capacidad para 5, 10, 25 y 50 toneladas, y apta para realizar ensayos de tracción, flexión y compresión.



Fig. 3.40 – Máquina universal de ensayos

3.4.12. Máquina de ensayo de flexión

Se utilizó una máquina universal de ensayos del fabricante INSTRON, modelo 3382, dirigida a través de un equipo informático.

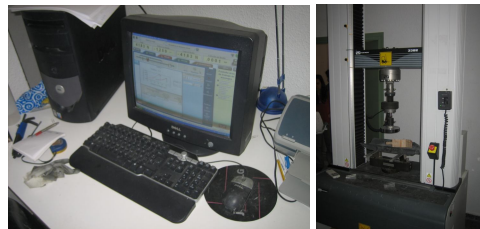


Fig. 3.41 – Instrumental ensayo de flexión

3.4.13. Depósito estanco

El depósito estanco fue diseñado conforme a la forma de la teja, y construido con láminas de plexiglás unidas con acetona.

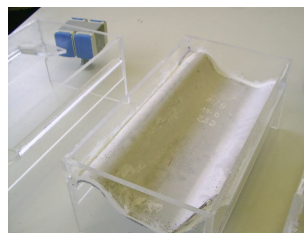


Fig. 3.42 – Depósito estanco

3.4.14. Horno

En Valencia se utilizó un horno eléctrico del fabricante Memmert.



Fig. 3.43 – Horno eléctrico

En Lima se utilizó un horno eléctrico del mismo fabricante, Memmert, con una temperatura máxima de 250°C.



Fig. 3.44 – Horno eléctrico

3.5. METODOLOGÍA

La metodología seguida depende lógicamente del tipo de ensayo, e incluso dentro de un mismo ensayo se observan diferencias entre los pasos seguidos en Valencia y en Lima. Esto es debido principalmente a dos razones, la normativa y la orientación de los ensayos.

Con respecto a la normativa, a pesar de tener en común la mayor parte de su contenido se aprecian algunos matices que hacen que el proceso sea ligeramente distinto. Siendo estrictos estos matices podrían hacer que la comparación entre los resultados obtenidos en uno y otro lugar no resultara fiable al 100%.

En este sentido también cobra importancia la distinta orientación de la investigación en ambos lugares. Mientras que en Valencia se trabajó en la búsqueda de las mejores resistencias, optimizando el proceso en todo lo posible, en Lima se buscó simplificarlo al máximo de modo que su aplicación en zonas de escasos recursos resultara viable, asumiendo por ello un descenso en las propiedades físicas de las muestras.

Aunque estas decisiones puedan parecer incoherentes analizando el proyecto desde un punto de vista único, tiene su explicación. A pesar de que se presente como un texto único, esta investigación ha sido enfocada desde dos puntos de vista distintos, el puramente científico, desarrollado en Valencia, y aquel que sin olvidar su implicación tecnológica se orientó hacia su posible aplicación en estas zonas más desfavorecidas, y para el cuál se trató de trabajar con los medios accesibles para su población. Evidentemente esta segunda parte es la que se desarrolló en Lima.

Ambas orientaciones comparten un mismo fin, pero no por ello se considera como un factor crítico el que su desarrollo tuviera que seguir exactamente las mismas pautas. Se estima que de esta forma el conjunto de resultados finales abarcaría un campo mucho más amplio que el exclusivamente científico, a costa eso sí de una disminución en la precisión y homogeneidad de los resultados, que al fin y al cabo se considera asumible en favor de la amplitud de campo de las conclusiones finales.

Dicho esto resultará entendible que en la descripción de los ensayos se establezca una distinción entre ambas localizaciones. También indicar que todos ellos se dividen en dos fases, la preparación de las muestras y el desarrollo de la prueba.

3.5.1. Ensayos sobre los morteros

3.5.1.1 *Ensayo de Fluides o Consistencia*

a) Valencia

Para la realización de este ensayo se siguieron las indicaciones de la norma española UNE-EN 1015-3 de título "Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)"

- Preparación de las muestras

Como se ha indicado para la realización de este ensayo se utilizó la pasta de mortero fresca, producida según las dosificaciones descritas en un apartado anterior. Estos morteros no fueron elaborados exclusivamente para este ensayo, sino que las mismas mezclas preparadas para su posterior moldeado, ya fuera en forma de prismas o de tejas, fueron previamente sometidas a esta prueba.

Por tanto, el único proceso de preparación de muestras de este ensayo consistió precisamente en el mezclado de los componentes. Para ello se pesaron cada uno de ellos en la balanza y se depositaron en distintos recipientes antes de pasar a la mezcladora. Por cada mezcla se utilizaron un total de tres recipientes, uno para los finos (cementos y puzolanas), otro para los áridos (fino y grueso) y otro para el agua.



Fig. 3.45 – Pesado de materiales

Un paso importante después del pesado de los componentes consistió en el mezclado previo de los finos, ya que de no hacerlo podría formar fases independientes en la pasta final, dificultando la homogeneidad del conjunto. Para ello simplemente se utilizó una paleta para removerlos dentro del mismo recipiente.

Una vez listos todos los componentes se procedió a su vertido en el cazo de la mezcladora, pero con un orden y tiempos determinados. Primeramente se introdujeron el agua y el cemento (al decir cemento nos referimos a la mezcla de finos), siendo mezclados a velocidad lenta durante 30 segundos. A continuación se añadió el árido, dejando la mezcla a la misma velocidad durante un minuto. Pasado ese tiempo se realizó un parón de 1'5 minutos, durante el cual se separó la pasta pegada en las paredes del cazo juntándola con el resto. A continuación dos nuevas etapas de batido de 30 segundos cada una, la primera a velocidad lenta y la segunda a velocidad rápida.



Fig. 3.46 - Amasado

El proceso de mezclado descrito fue el mismo que se utilizó para la fabricación de todas las mezclas que se realizaron, evidentemente variando las cantidades en cada una de ellas. Es por ello extensible al resto de ensayos realizados en Valencia y se consideraría una redundancia el repetir la explicación en cada caso.

- Desarrollo del ensayo

Una vez preparada la mezcla se trasladó a la mesa de sacudidas. Previamente se limpió la superficie tanto del disco como del molde. Con el molde situado en el centro de la mesa se vertió la mezcla en dos etapas compactando cada una de ellas mediante diez golpes efectuados con un elemento cilíndrico de 40 mm de diámetro, enrasando posteriormente con la ayuda de una regla. Después de unos 15 segundos se sacó el molde.



Fig. 3.47 – Mortero antes de sacudidas

A continuación se accionó la manivela de la mesa imprimiendo 15 sacudidas a la mezcla a una velocidad aproximada de un golpe por segundo. Finalmente se midieron tres diámetros de la muestra, una vez extendida la mezcla, anotando sus valores con una precisión de 1 mm.



Fig. 3.48 – Mortero tras sacudidas y medida de diámetros

El valor medio de estas medidas es el valor de escurrimiento o fluidez de la mezcla.

b) Lima

La base teórica del ensayo realizado en Lima es la misma que la explicada en el punto anterior, pero el desarrollo, tanto de la preparación de las muestras como del procedimiento de ensayo muestra algunas diferencias. En este caso la norma utilizada como guía fue la NTP 334.057 “Cemento. Método de ensayo para determinar la fluidez de morteros de cemento portland”.

- Preparación de las muestras

La muestra utilizada, al igual que en Valencia, fue una pasta de mortero fresca, pero que fue elaborada con algunas diferencias no sólo en los materiales empleados, sino también en el proceso de amasado.

Evidentemente el primer paso también fue el pesado de los componentes, aunque en este caso solamente aquellos en estado sólido, ya que como se ha explicado anteriormente la cantidad de agua no siguió una dosificación exacta, sino que se dejó en manos del operario confiando en su pericia para conseguir una consistencia adecuada. Las motivaciones de esta decisión ya han sido suficientemente explicadas, y sus consecuencias serán analizadas en los apartados referentes a resultados y conclusiones, por lo que no se insistirá más en este punto.

Para el pesado se utilizaron dos recipientes, uno para los finos y otro para los áridos o arena, y una balanza digital. Para la medida del agua se utilizó una probeta graduada con divisiones cada 5 ml, anotándose en cada caso la cantidad de agua utilizada.

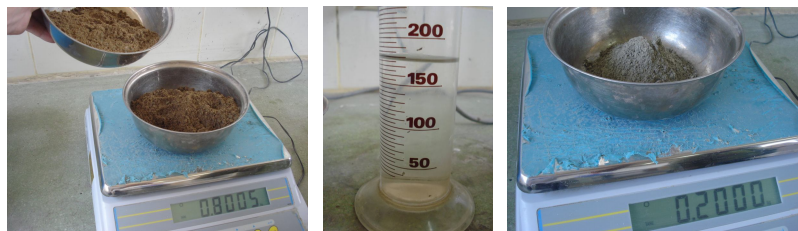


Fig. 3.49 – Medida de dosificaciones

Antes de introducir los componentes en la mezcladora de mezclaron bien los finos entre ellos, con la ayuda de una paleta.

El siguiente paso ya sí fue el mezclado propiamente dicho. Primeramente se añadió el agua, luego la arena y finalmente el cemento. Todo se mezcló en la posición de velocidad lenta de la mezcladora durante 30 segundos.



Fig. 3.50 – Mezclado

Después de comprobar visualmente la fluidez de la mezcla se añadió más agua y se aumentó la velocidad a la posición rápida, durante un minuto. La siguiente comprobación se realizó al tacto, añadiendo agua hasta considerar que la fluidez era la correcta.



Fig. 3.51 - Amasado

Puede observarse que existen diferencias sustanciales con el proceso de mezclado llevado a cabo en Valencia, y en realidad no son debidas exclusivamente a las diferencias normativas, ya que la norma peruana no especifica en detalle todos los pasos a seguir en el proceso, sino que únicamente indica que debe mezclarse al menos durante 15 segundos a la velocidad más baja. Estas diferencias fueron debidas principalmente a la forma habitual de trabajar en ambos laboratorios, sobre la que no se quiso influir.

En este caso también fue este el procedimiento seguido para la elaboración de los morteros en el resto de ensayos, por lo que no se repetirá la explicación en adelante.

- Desarrollo del ensayo

Las únicas diferencias entre el procedimiento empleado en Lima y el empleado en Valencia consistieron en el número de golpes sufridos por la mezcla en el molde, y el número de sacudidas de la mesa. En este caso el molde también se llenó en dos capas, pero se le aplicaron 20 golpes por capa con el pistón. Una vez enrasado y retirado el molde fueron 25 los giros de leva, provocando otras tantas sacudidas en un lapso de 15 segundos. En número de diámetros medidos fue 4, siempre en milímetros.



Fig. 3.52 – Medida de fluidez

En este caso la medida de fluidez no queda representada por la media entre estas medidas, sino que se le aplica una transformación mediante la siguiente fórmula:

$$Fluidez = \left(\frac{(D_1 + D_2 + D_3 + D_4)}{4} - 100 \right) \cdot \frac{100}{\phi_{Base\ molde}}$$

Resulta evidente la imposibilidad de comparación entre los resultados de uno y otro ensayo, ya que las diferencias en la ejecución son demasiado significativas. De manera que lo más conveniente sería el analizar sus resultados por separado, comparándolos con los valores de fluidez recomendados en cada país.

3.5.1.2. Ensayo de flexión

Este ensayo solamente fue realizado en Valencia, ya que los responsables del proyecto principal en Lima no lo consideraron prioritario, y decidieron la realización de otras pruebas teniendo en cuenta el tiempo disponible.

Todo su desarrollo se guió por las indicaciones dictadas por la norma española UNE-EN 1015-11 "Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido".

- Preparación de las probetas

Se prepararon probetas prismáticas de 4x4x16, en moldes metálicos divididos en tres compartimentos separados y de las mismas dimensiones, que fueron limpiados y cubiertos con una fina capa de líquido desencofrante para facilitar su extracción.



Fig. 3.53 – Molde prismas

La preparación de la mezcla se realizó como se ha explicado anteriormente, y su vaciado en el molde se produjo en dos capas de la misma altura aproximadamente, colocando el molde en la mesa de sacudidas y aplicando 25 golpes de pistón por capa. Una vez compactado el mortero se enrasó con la ayuda de una regla intentado dejar la cara superior lo más lisa posible, y se introdujo el molde en la cámara húmeda a 20°C y 95% de humedad durante 24 horas. Una vez en la cámara se cubrió el molde con una lámina de vidrio. Después de transcurridas las 24 horas se desmoldaron las probetas y se introdujeron en un recipiente completamente cubiertas de agua hasta el momento de su ensayo.



Fig. 3.54 – Compactado y almacenado de probetas

- Desarrollo del ensayo

Según indica la norma, la probeta simplemente se limpió para eliminar partículas no adheridas, y se apoyó una de las caras que ha estado en contacto con las paredes del molde sobre los rodillos inferiores de la máquina.

La carga se aplicó con el rodillo superior sin aceleraciones bruscas y a velocidad constante de modo que la duración del ensayo estuviera comprendida entre los 30 y los 90 segundos.

La resistencia a flexión se calcula mediante la siguiente expresión:

$$f = 1.5 \cdot \frac{Fl}{bd^2}$$

3.5.1.3. Ensayo de compresión

a) Valencia

El desarrollo del ensayo fue llevado a cabo según la norma española UNE-EN 1015-11 "Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido"

- Preparación de las probetas

Las probetas utilizadas fueron las mismas que se utilizaron en el ensayo anterior, una vez rotas en la máquina de flexión, por lo que para este ensayo se dispone de una familia del doble de muestras (dos mitades por probeta)

- Desarrollo del ensayo

Para el desarrollo del ensayo simplemente se colocó la probeta lo más centrada posible entre los dos platos de 4x4 cm de la máquina de compresión, y se aplicó la carga a una velocidad tal que permitiera que el ensayo tuviera una duración de entre 30 y 90 segundos, según lo indicado por la norma.



Fig. 3.55 – Ensayo de compresión

Se efectuó el registro de la carga máxima soportada, calculando la resistencia a compresión simplemente dividiendo esta por la sección transversal de la probeta.

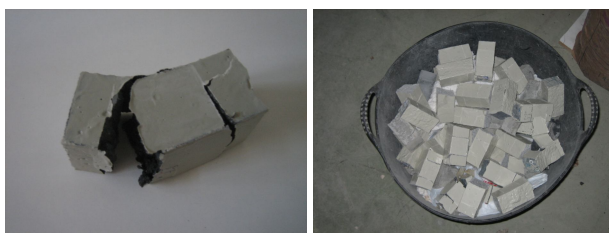


Fig. 3.56 – Probetas rotas a compresión

b) Lima

En este caso se utilizó como guía la norma peruana NTP 334.051 "Cementos. Método para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento portland usando cubos de 50 mm de lado".

- Preparación de las probetas

Después de la preparación de las mezclas como se indicó en puntos anteriores se procedió al llenado de los moldes que se realizó según establece la norma, colocando el mortero en dos capas en cada uno de los tres compartimentos del molde. Cada capa fue golpeada 32 veces, en

cuatro etapas de 8 golpes cada una, completando la primera capa en los tres compartimentos antes de añadir la segunda. También se indica que al finalizar el llenado las caras superiores de los cubos deben quedar ligeramente por encima de los bordes superiores del molde.



Fig. 3.57 – Compactado probetas

Se utilizaron dos tipos distintos de molde, ambos en concordancia con las indicaciones normativas.



Fig. 3. 58 – Moldes cubos

Según se establece en la norma, las probetas deben ser almacenadas en cámara húmeda durante 20 a 24 horas a una temperatura de 23°C y una humedad de un mínimo del 90%. Sin embargo, no se siguió lo indicado en la normas y se decidió guardar las probetas en el laboratorio durante 36 a 48 horas, a temperatura ambiente, antes de su desmoldado, debido a la ausencia de dicha cámara.

Una vez extraídas de los moldes se almacenaron en un recipiente, completamente cubiertas de agua, donde permanecieron durante toda su etapa de curado y hasta su ensayo en la máquina de compresión.



Fig. 3.59 – Almacenamiento probetas

- Desarrollo del ensayo

La máquina utilizada para realizar las pruebas fue una máquina hidráulica estándar de compresión, con sistema de rótula simple, quedando el cabezal superior libre para orientarse en cualquier dirección, tal y como establece la norma ITINTEC 334.051, utilizada para guiar el proceso.



Fig. 3.60 – Ensayo de compresión

Las probetas fueron sacadas del estanque en el que estaban sumergidas justo en el momento de ser ensayadas, y se prepararon para su colocación en la máquina simplemente secando sus caras con un paño y eliminando los granos de arena que pudieran estar sueltos en su superficie. Todo siguiendo las indicaciones de la norma.

Una vez colocada la probeta se procedió a la aplicación de la carga. La norma no establece una velocidad concreta de aplicación, sino que simplemente apunta unas indicaciones, como aplicar una carga inicial en caso de que se espere una carga soportada inferior a 1360 kg, no siendo el caso, y que la velocidad de ensayo debe ser constante y tal que su duración esté comprendida entre los 20 y 80 segundos.

Por tanto, lo que se hizo fue establecer una velocidad de subida del pistón en la posición 6 de la máquina hasta el punto de contacto de la probeta con la rótula, reduciéndola posteriormente a la posición 2 durante todo el ensayo, de forma que se cumpliera con las especificaciones normativas.

Los resultados obtenidos de la máquina son en concepto de carga máxima soportada en kilogramos fuerza, que aplicados sobre una sección de 25 cm² nos dio los valores de resistencia.

3.5.1.4. Ensayo de absorción

Este ensayo solamente se realizó en Valencia, y para su desarrollo se utilizó la norma UNE-EN 1015-18 "Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido"

- Preparación de las probetas

Solamente dos aspectos a mencionar que hacen la preparación de estas probetas diferente a la de los ensayos de flexión y compresión. Una vez desmoldadas fueron selladas en sus cuatro caras laterales mediante una pintura plástica aislante, y una vez rotas en dos fueron introducidas en un horno con ventilación a una temperatura de 60°C para proceder a su secado.



Fig. 3.61 – Preparación probetas

- Desarrollo del ensayo

Una vez secas las probetas se pesaron y se colocaron en una bandeja con agua de forma que las superficies de rotura de los prismas quedaran sumergidas entre 5 y 10 mm. Para su soporte se utilizaron tacos de goma, de modo que cada una quedara apoyada en sus cuatro esquinas.



Fig. 3.62 – Ensayo de absorción

Transcurridos 10 minutos se sacaron de la bandeja, se pesaron y se volvieron a sumergir durante otros 80 minutos (un total de 90 minutos) y de nuevo se pesaron. Con estos valores de pesos a los 10 y 90 minutos ya se pudo obtener el coeficiente de absorción de agua en $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ mediante la utilización de la siguiente fórmula, donde M1 y M2 son los pesos en gramos de la probeta a 10 y 90 minutos respectivamente:

$$C = 0.1(M2 - M1)$$

El coeficiente de absorción medio se obtiene de la media aritmética de las seis muestras ensayadas por cada dosificación.

3.5.2. Ensayos sobre las tejas

La teja de microhormigón fue el producto prefabricado seleccionado para la parte del proyecto desarrollado en Valencia, por lo que sólo fueron testadas en esta localización. Para todos los ensayos la probeta utilizada fue precisamente una teja de microhormigón, elaborada como se expone más adelante.

Para todos los ensayos se utilizó la norma UNE-EN 491: "Tejas y piezas de hormigón para tejados y revestimiento de muros. Métodos de ensayo".

3.5.2.1. Ensayo de impermeabilidad

- Preparación de las probetas

Para la fabricación de las tejas se utilizó la misma mezcla de mortero de cemento utilizada en los prismas elaborada siguiendo exactamente el mismo procedimiento, con la única diferencia de las cantidades añadidas, que evidentemente fueron mayores en este caso.

Una vez preparada la mezcla fue vertida sobre la mesa vibradora, donde se le dio la forma y se agitó la mezcla durante un minuto. Previamente la mesa fue limpiada y se colocó una lámina plástica para el posterior retirado de la teja. El exceso de masa se retiró con la ayuda de una regla y utilizando una llana se le dio un acabado uniforme y liso.

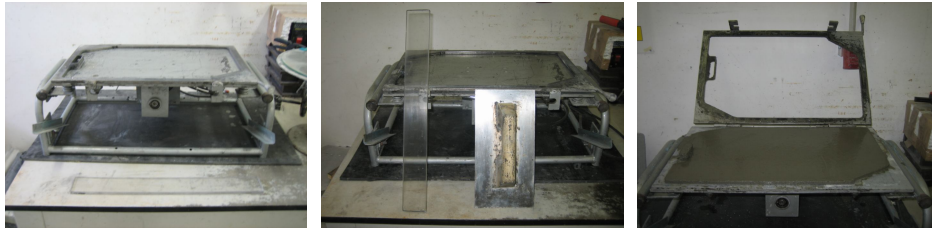


Fig. 3.63 – Preparación de la teja

Gracias a la lámina plástica sobre la que descansa la teja, esta se pudo sacar fácilmente de la vibradora para ser colocada sobre el molde que le dio la forma definitiva. Estos moldes están diseñados de tal forma que puedan colocarse unos sobre otros conteniendo a la teja en su interior con la doble función de facilitar su almacenamiento y crear una cámara entre ellas evitando una excesiva evaporación de agua.

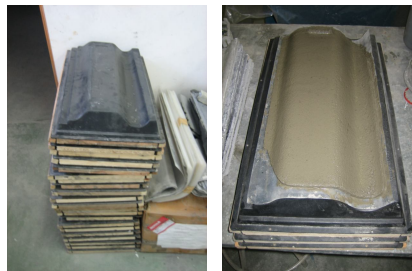


Fig. 3.64 – Moldeado de la teja

Con la teja colocada sobre el molde, y situados unos sobre otros se cubrió la última con un nuevo molde y se trasladaron a la cámara húmeda, donde permanecieron durante 24 horas. Transcurrido ese tiempo se desmoldaron y se sumergieron en agua durante todo el tiempo de fraguado previsto hasta el momento del ensayo.



Fig. 3.65 – Almacenado de las tejas

- Desarrollo del ensayo

El ensayo de impermeabilidad consiste en cubrir la teja de agua y comprobar si ésta es capaz de atravesar la sección en un periodo de 24 horas.

Para su desarrollo la teja debe de colocarse en una mesa o soporte con un marco estanco, que permita mantenerla en posición horizontal y cubrirla con agua. Al no disponerse de dicho estanque se diseñó y se fabricó en piezas de metacrilato, tal y como se indica en el ANEXO II.

La teja se situó en el estanque y se sellaron sus bordes con silicona, con la precaución de no cubrir más de 15 mm de su superficie en cada lateral. Una vez seco el sellante se cubrió con una altura de agua de entre 10 y 15 mm durante 24 horas, transcurridas las cuales se comprobó la presencia de humedad en su superficie inferior.



Fig. 3.66 – Ensayo de impermeabilidad

La norma indica que dicha comprobación debe hacerse mediante la utilización de un dispositivo detector de humedad, o bien mediante un espejo. Ante la no disponibilidad del primero, y el riesgo de evaporación de la gota del segundo se decidió que la presencia o no de humedad en la superficie inferior de la teja podría ser un indicador suficiente, e incluso más restrictivo.

3.5.2.2. Ensayo de flexión

- Preparación de las probetas

Para este ensayo se utilizaron exactamente las mismas probetas que para el ensayo de impermeabilidad, y fueron preparadas por tanto de la misma manera.

- Desarrollo del ensayo

La forma irregular de la teja hizo necesaria la fabricación de elementos adicionales para su adaptación a la máquina de ensayos. Por una parte fueron necesarias unas piezas metálicas semicirculares que cumplieran la función de apoyo inferior, y por otra una pieza contorneada de madera, con una almohadilla de material elastómero con la misión de adaptarse al contorno de la teja y transmitir uniformemente el esfuerzo. Para su construcción se siguieron las indicaciones normativas adaptando su geometría a la de las tejas producidas.



Fig. 3.67 – Indicaciones de la norma y adaptadores

En el ANEXO II se muestran los planos de diseño de los apoyos inferiores.

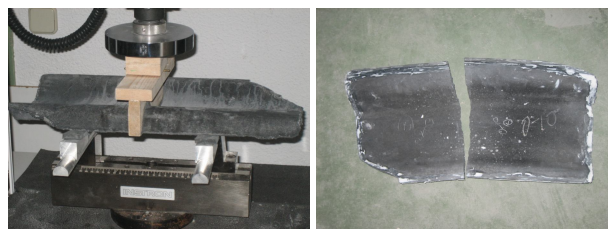


Fig. 3.68 – Ensayo de flexión

Con los adaptadores listos sobre la máquina se sujetó la teja y se aplicó la carga a una velocidad de 1mm/min, alcanzando la carga de rotura dentro del rango indicado por la norma. También se

registró en cada caso el espesor de la teja, debido a que por su elaboración manual se observaron ligeras variaciones en este valor.

3.5.2.3. Ensayo de impacto

Al no encontrarse este ensayo dentro de los estipulados por la normativa indicada anteriormente se recurrió al "Manual para el Control de Calidad de las TMC" editado por la red ECOSUR, y a las recomendaciones indicadas en su Ensayo L 4.7.20.

- Preparación de las probetas

Para este ensayo se utilizaron exactamente las mismas probetas que para los ensayos de impermeabilidad y flexión, y fueron preparadas por tanto de la misma manera.

- Desarrollo del ensayo

Al igual que para los ensayos anteriores fue necesaria la preparación de elementos adicionales que permitieran su desarrollo. En este caso se contó con una guía tubular con apoyos con tornillos ajustables para regular la verticalidad, y una esfera metálica de 220 gramos de peso.

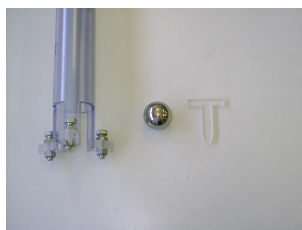


Fig. 3.69 – Elementos del ensayo

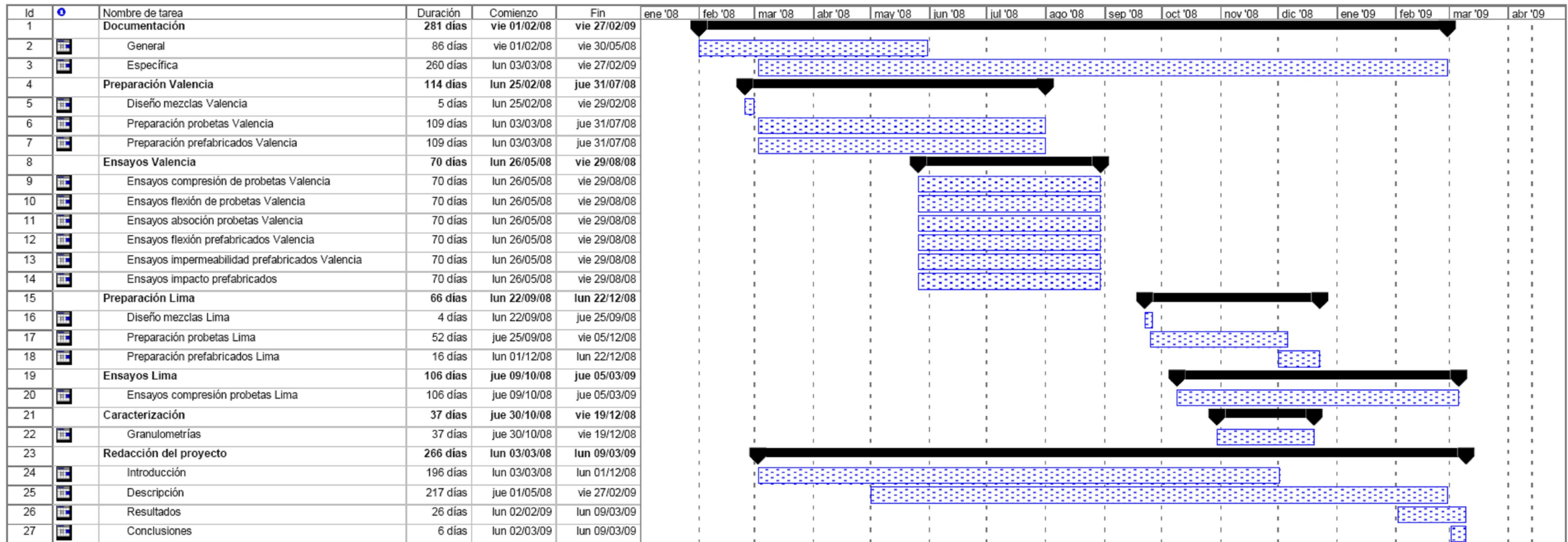
La teja a ensayar se apoyó sobre unos listones de madera, separados 350mm, procurando que la teja quedara en posición horizontal. Después se colocó la guía, ajustando su verticalidad con la ayuda de los tornillos y un nivel de burbuja, y por último se deja caer la bola desde una distancia de 300mm, comprobando simplemente si la teja se rompe o no.



Fig. 3.70 – Ensayo de impacto

3.6. CRONOGRAMA

A continuación se muestra la distribución en el tiempo de las tareas realizadas. Algunas de ellas tienen un inicio y fin aproximados, ya que no se conocen con exactitud, mientras que otras sí que tienen un principio y fin bien definidos. También destacar que muchas de ellas se solapan en el tiempo, y es por esto que algunas tareas tienen una duración más larga de lo que sería normal, ya que en el mismo tiempo se desarrollan varias.



CRONOGRAMA

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este punto se muestran y analizan los resultados correspondientes a los ensayos realizados sobre la mezcla, ya sea fresca o fraguada en forma de probetas o prefabricados. Del resto de ensayos realizados sobre las puzolanas ya se ha hablado con anterioridad.

4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

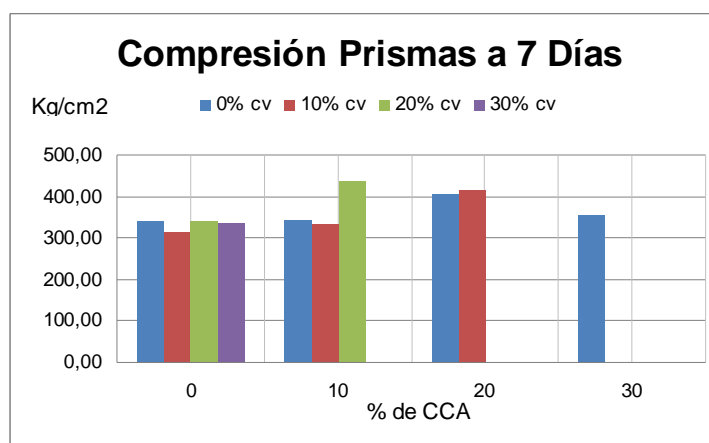
A la hora de presentar los resultados se plantea la misma división que se ha efectuado hasta ahora, entre la parte del proyecto desarrollada en Valencia y aquella desarrollada en Lima.

4.1.1. Valencia

A continuación se muestran y analizan los resultados de los ensayos realizados en Valencia. En cada tabla se muestran distintos valores según el caso, pero todas ellas comparten la misma nomenclatura en lo referente a la adición, que se puede encontrar en las tres primeras columnas de cada tabla. CV representa la ceniza volante y CCA la ceniza de cascarilla de arroz. Evidentemente cuando estos dos valores son cero estamos hablando de la probeta patrón realizada únicamente con cemento portland.

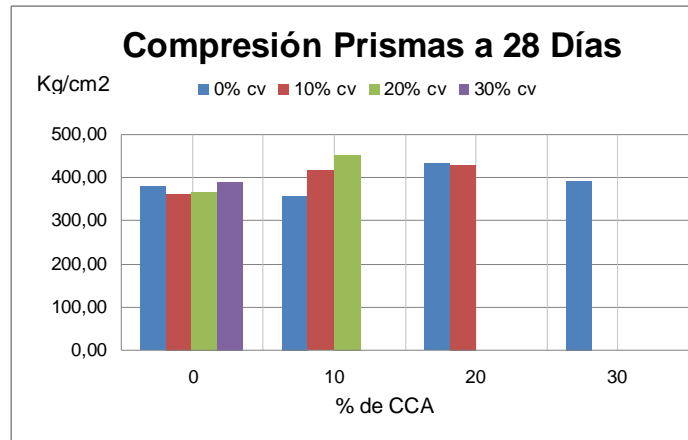
4.1.1.1. Prismas. Ensayo de compresión

Los resultados de los ensayos a compresión a los 7 días muestran un valor de referencia, sin adición, de 353 kg/cm², y se observa como la mayoría de las mezclas poseen una resistencia inferior, excepto tres de ellas que superan los 400 kg/cm², correspondiendo además a mezclas con el máximo porcentaje de adición. El valor máximo (438 kg/cm²) corresponde con un porcentaje de CCA del 10% y de CV del 20%. Las muestras que sólo contienen adición de CV presentan valores inferiores a aquellas realizadas con CCA como única adición.



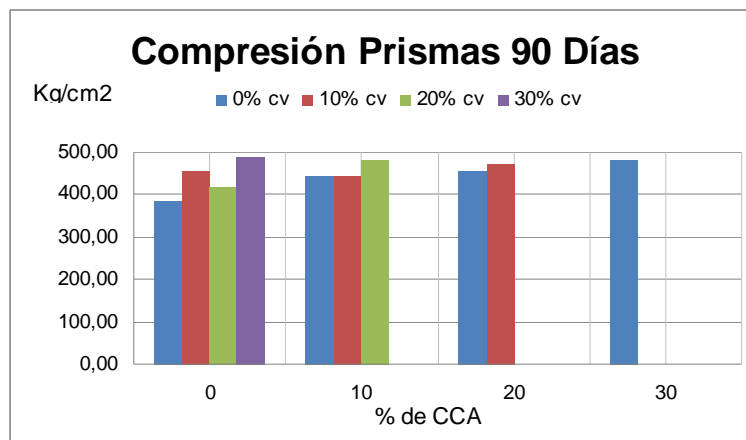
Gráfica 4.1 – Resistencia a compresión a los 7 días

A los 28 días vemos que el valor de referencia ha crecido hasta los 381kg/cm² mientras que ahora la gran mayoría del resto de muestras ya presenta valores superiores, en algunos casos bastante por encima. El máximo se repite con la misma mezcla que en el caso anterior, esta vez alcanzando un valor de 453 kg/cm².



Gráfica 4.2 – Resistencia a compresión a los 28 días

A 90 días vemos como los valores de las muestras que contienen puzolana se disparan bastante por encima de los 400 kg/cm², mientras que el valor de referencia permanece casi estancado rondando los 480 kg/cm². El máximo se alcanza en la mezcla que contiene 30% de CV, llegando a los 489 kg/cm², pero la mezcla que marcaba la pauta en los casos anteriores está muy cerca con 482 kg/cm².



Gráfica 4.3 – Resistencia a compresión a 90 días

A continuación se muestra la tabla con la comparativa entre las resistencias a distintas edades, que da una idea de la evolución de cada una de las muestras.

cemento	CV	CCA	7 días	28 días	90 días	Evolución 7-28	Evolución 28-90	Evolución 7-90
			Res. media (kg/cm ²)	Res. media (kg/cm ²)	Res. media (kg/cm ²)			
100	0	0	353,75	381,81	386,07	28,06	4,26	32,32
90	10	0	314,98	363,27	456,21	48,29	92,95	141,24
90	0	10	340,02	357,76	445,44	17,74	87,69	105,42
80	20	0	339,42	367,03	419,64	27,61	52,61	80,22
80	10	10	333,96	416,63	443,94	82,67	27,31	109,98
80	0	20	342,42	433,92	456,71	91,49	22,80	114,29
70	30	0	335,21	391,83	489,63	56,62	97,81	154,43
70	20	10	438,93	453,46	482,52	14,53	29,06	43,59
70	10	20	417,13	429,66	472,75	12,53	43,09	55,62
70	0	30	404,60	394,58	481,66	-10,02	87,07	77,05

Tabla 4.1 – Evolución resistencia a compresión con el tiempo de curado

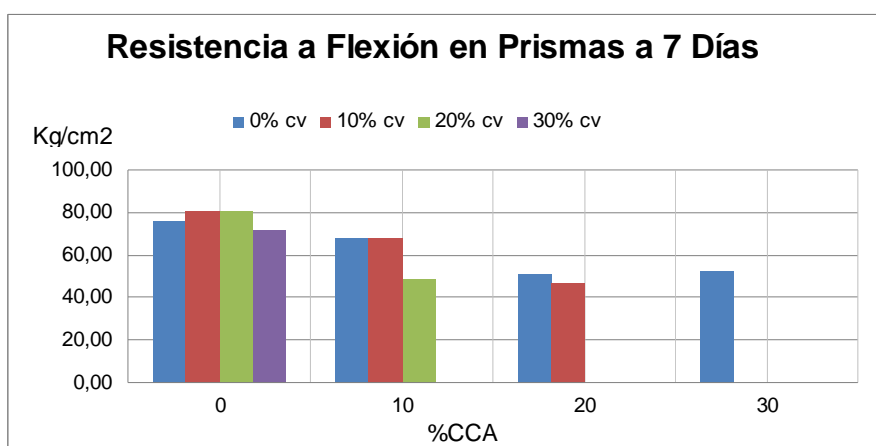
Si analizamos la resistencia de la probeta patrón vemos como ha sufrido un aumento de 28 kg/cm² de 7 a 28 días de curado, mientras que a los 90 días sólo ha crecido 4 kg/cm² más, por lo que se podría decir que la mayor parte del proceso de fraguado se desarrolla durante los primeros 28 días.

Por contra el resto de muestras presentan una progresión mucho más lenta siendo mayor la segunda de las fases en la mayoría de los casos, como cabía esperar teniendo en cuenta las características de la reacción puzolánica. Entre los que presentan una evolución global (de 7 a 90 días) más grande cabe destacar las mezclas 10-0, 0-10, 10-10, 0-20 y 30-0, todas ellas por encima de 100 kg/cm², y siendo la última de ellas la más destacada con 154 kg/cm², correspondiendo además con la mezcla con mayor valor de resistencia final. De entre las mezclas con CCA como única adición el tope de progresión se encuentra en el 20% (114 kg/cm²), si se aumenta este porcentaje al 30% avanza solamente 77 kg/cm², pero alcanza un valor final mayor.

4.1.1.2. Prismas. Ensayo de flexión

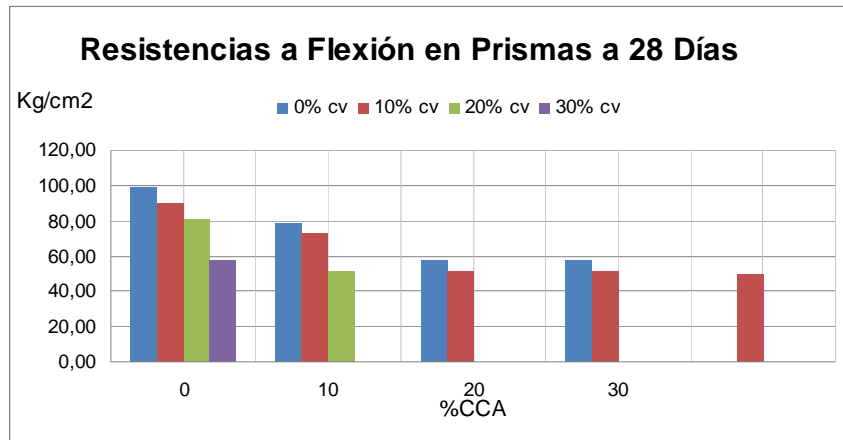
En este caso tenemos sólo tres probetas por muestra, pero a pesar de tener una fiabilidad menor a la del ensayo anterior, este es el número de probetas indicado por la norma, y que se repite en la práctica totalidad de los ensayos que se detallan más adelante.

Podemos observar que a los 7 días el valor de resistencia de la probeta patrón supera a todas las demás muestras, excepto a dos, alcanzando los 76 kg/cm². Las mezclas que quedan por encima son las correspondientes a una adición del 10 y del 20% de CV, llegando a los 80 kg/cm². Con un 30% de CV se acerca bastante, quedándose en los 71 kg/cm².



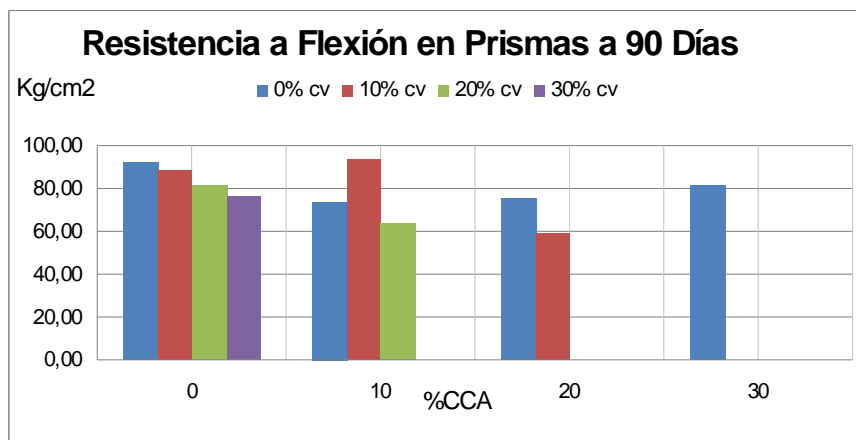
Gráfica 4.4 – Resistencia a flexión a 7 días

Sin embargo a los 28 días la resistencia patrón ha crecido hasta los 99 kg/cm², y el resto solamente llega hasta los 89 kg/cm², correspondiendo de nuevo estos valores con las mezclas que contienen exclusivamente CV.



Gráfica 4.5 – Resistencia a flexión a 28 días

A los 90 días se aprecia un notable aumento en las muestras con CCA, hasta el punto de marcar la resistencia más alta (93 kg/cm²) la mezcla que contiene 10% de CV y 10% de CCA. Además aquella que contiene un 30% de CCA se sitúa entre las de resistencia más elevada con 82 kg/cm², marcando el patrón 92 kg/cm². En general se repite la tendencia de mayores resistencias con adiciones de CV.



Gráfica 4.6 – Resistencia a flexión a 90 días

La siguiente tabla muestra la evolución de la resistencia a flexión de todas las muestras.

cemento	CV	CCA	7 días	28 días	90 días	Evolución 7-28	Evolución 28-90	Evolución 7-90
			Res. media (kg/cm ²)	Res. media (kg/cm ²)	Res. media (kg/cm ²)			
100	0	0	76,10	99,17	92,57	23,06	-6,60	16,46
90	10	0	80,87	89,86	88,37	8,99	-1,49	7,50
90	0	10	67,61	79,28	73,94	11,66	-5,34	6,32
80	20	0	80,91	80,60	81,40	-0,31	0,80	0,49
80	10	10	67,90	73,12	93,54	5,23	20,42	25,64
80	0	20	50,55	58,24	75,48	7,69	17,24	24,92
70	30	0	71,28	89,82	76,03	18,54	-13,79	4,75
70	20	10	48,24	50,84	63,77	2,61	12,93	15,54
70	10	20	46,99	49,67	59,47	2,68	9,79	12,48
70	0	30	52,00	57,83	81,25	5,82	23,43	29,25

Tabla 4.2 – Evolución resistencia a flexión con el tiempo de curado

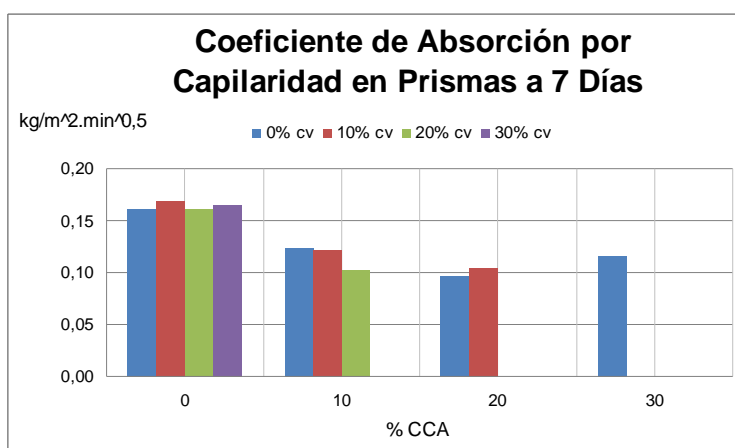
En este caso no es tan evidente la distinta progresión entre patrón y mezclas, de hecho aparecen algunos valores negativos, fruto seguramente de la variabilidad. Las mezclas que presentan resultados más coherentes son la 10-10, 0-20 y 0-30, con un máximo de 29 kg/cm²,

correspondiente precisamente a esta última. La mezcla 10-10 con 25 kg/cm² de avance presenta además el valor global de resistencia más alto (93 kg/cm²)

4.1.1.3. Prismas. Ensayo de absorción por capilaridad

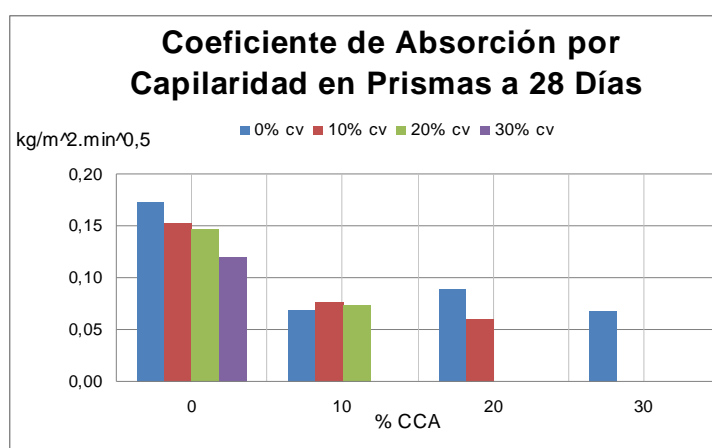
Para el ensayo de absorción volvemos a tener 6 probetas por muestra, ya que volvemos a utilizar las dos mitades de los prismas ensayados a flexión. A los 7 días muestra los siguientes resultados.

Podemos ver un valor de referencia de 0.16, estando tres de las mezclas muy cercanas a este valor, dos de ellas incluso lo superan (0.17). Las tres probetas corresponden a mezclas adicionadas únicamente con CV.



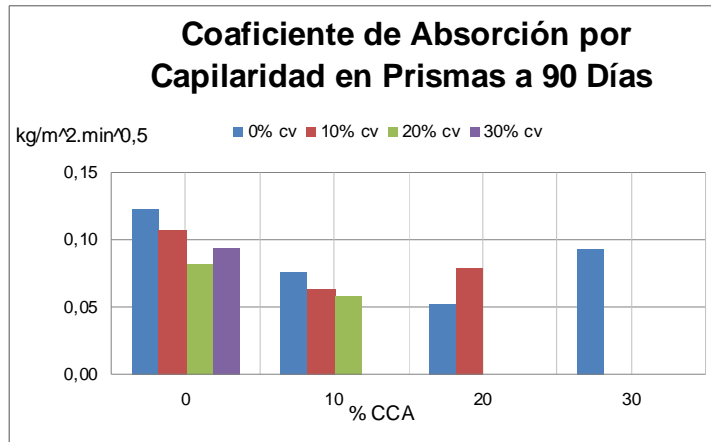
Gráfica 4.7 – Coeficiente de absorción a los 7 días

A los 28 días vemos como estos valores se han reducido considerablemente, exceptuando el patrón, que incluso ha aumentado. De nuevo las mezclas de CV exclusivamente marcan los valores más altos entre las demás.



Gráfica 4.8 – Coeficiente de absorción a los 28 días

Finalmente, a los 90 días, todas las muestras presentan valores bastante bajos, aunque algunos de ellos han crecido ligeramente.



Gráfica 4.9 – Coeficiente de absorción a los 90 días

La evolución del coeficiente de absorción de cada mezcla con el tiempo de curado se muestra en la siguiente tabla.

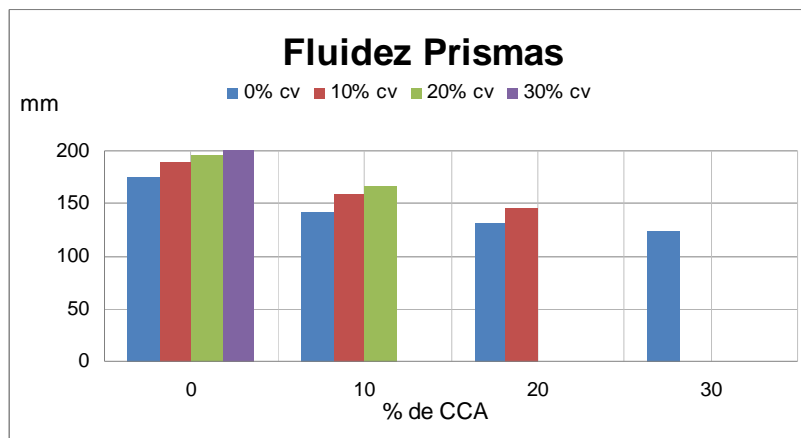
cemento	CV	CCA	7 días	28 días	90 días	Evolución 7-28	Evolución 28-90	Evolución 7-90
			promedio C kg/(m ² *min ^{0,5})	promedio C kg/(m ² *min ^{0,5})	promedio C kg/(m ² *min ^{0,5})			
100	0	0	0,16	0,17	0,12	0,01	-0,05	-0,04
90	10	0	0,17	0,15	0,11	-0,02	-0,05	-0,06
90	0	10	0,12	0,07	0,08	-0,05	0,01	-0,05
80	20	0	0,16	0,15	0,08	-0,01	-0,07	-0,08
80	10	10	0,12	0,08	0,06	-0,04	-0,01	-0,06
80	0	20	0,10	0,09	0,05	-0,01	-0,04	-0,04
70	30	0	0,17	0,12	0,09	-0,04	-0,03	-0,07
70	20	10	0,10	0,07	0,06	-0,03	-0,02	-0,05
70	10	20	0,10	0,06	0,08	-0,04	0,02	-0,03
70	0	30	0,12	0,07	0,09	-0,05	0,03	-0,02

Tabla 4.3 – Evolución coeficiente de absorción con el tiempo de curado

Analizando solamente la evolución global vemos como el patrón presenta uno de los valores más bajos, mientras que otras mezclas como la 20-0, 10-10 y 30-0 prácticamente doblan este valor. Las que presentan una evolución más pequeña son la 0-30 y la 10-0.

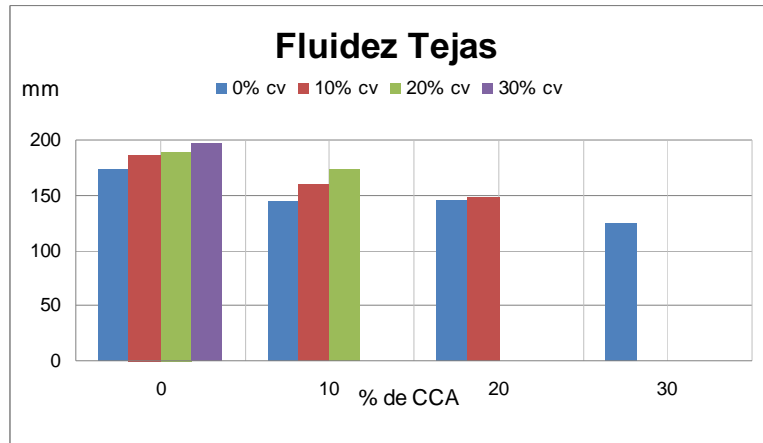
4.1.1.4. Ensayo de fluidez

A continuación se muestran los resultados del ensayo de fluidez, realizado sólo sobre una de las amasadas de cada mezcla.



Gráfica 4.10 – Fluidez prismas

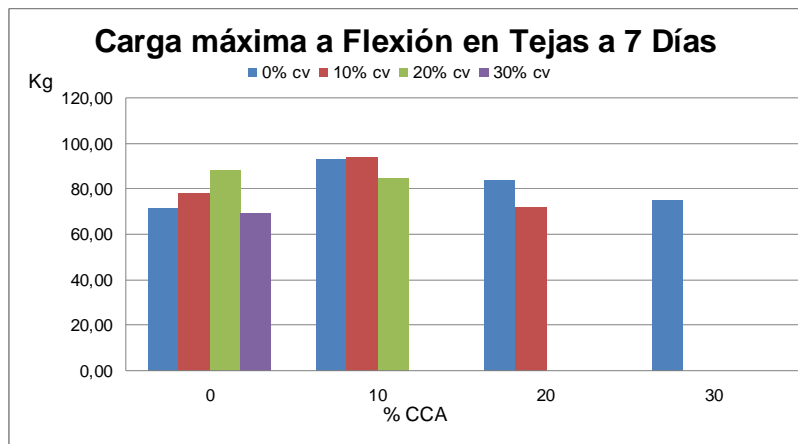
Vemos como sólo las mezclas que contienen CV muestran valores cercanos a los alcanzados con la probeta patrón. Las que sólo contienen este tipo de puzolana incluso la superan con cierta holgura.



Gráfica 4.11 – Fluidez tejas

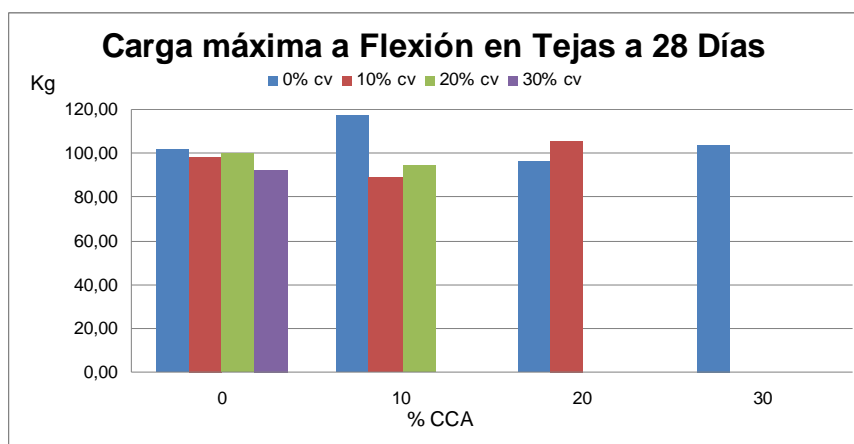
4.1.1.5. Tejas. Ensayo de flexión

Podemos observar como ya a los 7 días hay cuatro mezclas que superan el valor mostrado por el patrón. La referencia se encuentra en los 71 kg, y podemos ver mezclas alcanzando los 94 kg (10% CV y 10% CCA). Del resto destacar que la menos resistente muestra un valor de 69 kg, muy cercano al patrón.



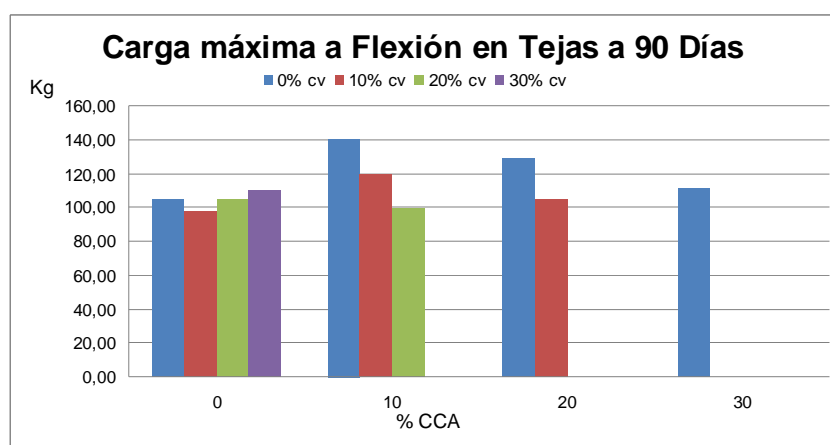
Gráfica 4.12 – Carga máxima a flexión tejas a 7 días

A los 28 días la carga de referencia llega hasta los 102 kg, superada por todas las demás mezclas excepto una, que se queda en los 98 kg. A esta edad la máxima carga se alcanza con 10% de CV y 20% de CCA, y tiene un valor de 105 kg. Sorprende el hecho de que la mezcla más resistente a 7 días ahora alcance un valor bastante más pequeño, lo que podría ser debido a algún error en la toma de valores.



Gráfica 4.13 – Carga máxima a flexión tejas a 28 días

Al observar los resultados a 90 días de curado de nuevo sorprende el hecho de que algunas de las muestras hayan reducido su resistencia. Las dos muestras que habían marcado el valor máximo en los ensayos anteriores ahora presentan valores más pequeños. En este caso el máximo lo marca la mezcla de 10% de CCA, con un valor de 140 kg (valor máximo general de todos los ensayos) y además mostrando una progresión coherente en los tres ensayos. La referencia se encuentra ahora en 104 kg.



Gráfica 4.14 – Carga máxima a flexión tejas a 90 días

En la tabla vemos el avance de la carga máxima a flexión de las tejas en función de las distintas edades de curado.

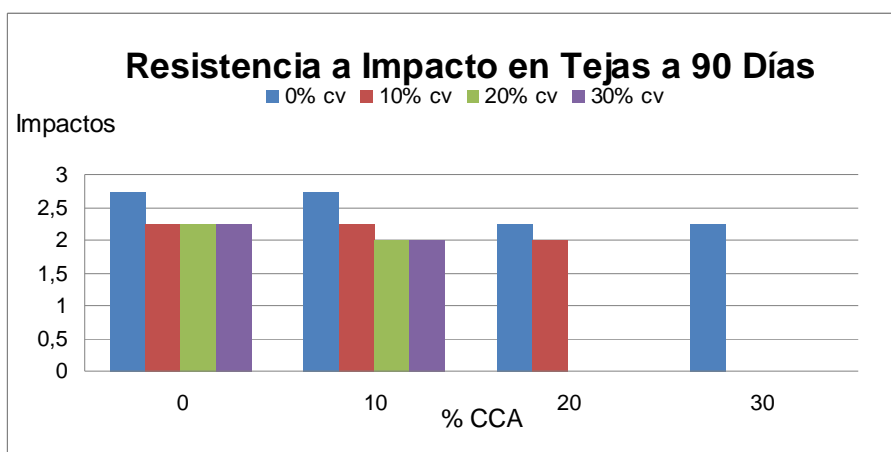
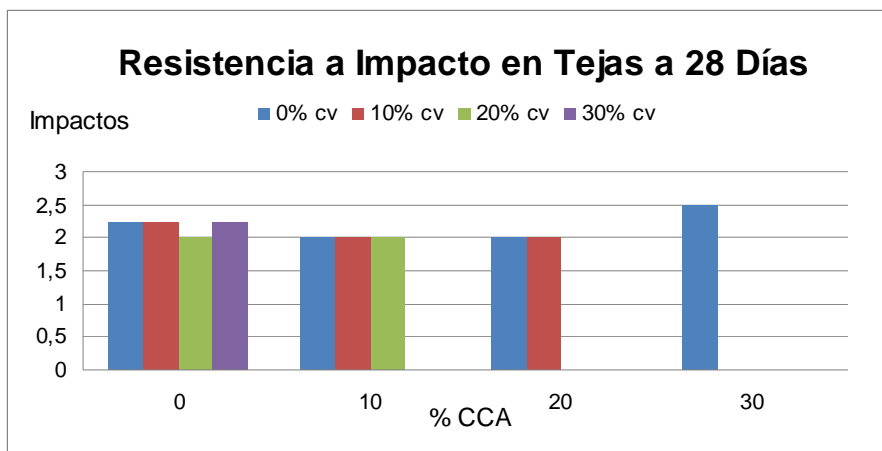
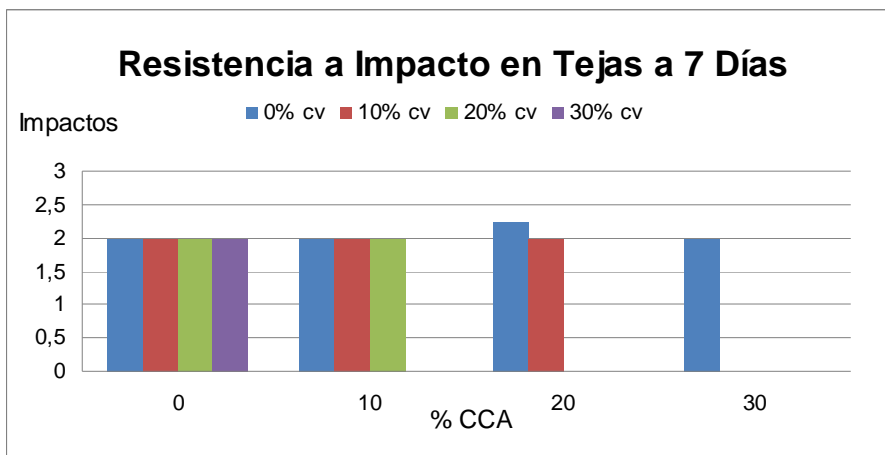
cemento	CV	CCA	7 días	28 días	90 días	evolución 7-28	evolución 28-90	evolución 7-90
			carga media (kg)	carga media (kg)	carga media (kg)			
100	0	0	71,48	102,24	104,54	30,77	2,30	33,07
90	10	0	78,44	98,13	97,66	19,69	-0,46	19,22
90	0	10	93,02	117,40	140,47	24,38	23,07	47,45
80	20	0	88,24	100,25	105,12	12,02	4,87	16,88
80	10	10	93,99	89,16	119,72	-4,83	30,56	25,74
80	0	20	83,69	96,31	129,20	12,63	32,89	45,52
70	30	0	69,04	92,42	110,02	23,38	17,60	40,98
70	20	10	84,62	94,62	99,77	10,00	5,15	15,15
70	10	20	71,90	105,74	104,65	33,84	-1,09	32,75
70	0	30	75,23	103,72	111,28	28,49	7,56	36,05

Tabla 4.4 – Evolución carga máxima a flexión tejas con tiempo de curado

Sorprende el crecimiento tan grande experimentado por la teja patrón en el periodo de tiempo entre los 28 y los 90 días, siendo el segundo más alto, por detrás de la mezcla 0-20. Los

crecimientos negativos sin duda corresponden a errores en las medidas o en la fabricación de la teja. La mayor progresión global corresponde a la mezcla 0-10 (47 kg), estando la 0-20 y la 30-0 muy cerca.

4.1.1.6. Tejas. Ensayo de impacto



Gráfica 4.17 – Resistencia a impacto tejas a 7,28 y 90 días

En lo referente a la resistencia al impacto no se aprecia gran diferencia entre unas mezclas y otras. Es de destacar que ninguna de ellas supera la resistencia de la probeta patrón, pero sí hay una que la iguala (10% de CCA) y el resto no muestra valores muy inferiores.

No se observa tampoco gran evolución de la resistencia al impacto con el tiempo de curado, aunque sí es cierto que muestran un pequeño progreso a los 90 días.

4.1.1.7. *Tejas. Ensayo de impermeabilidad*

El ensayo de impermeabilidad no presenta unos valores numéricos como los anteriores, sino que se trata de una prueba pasa-no pasa contemplando sólo dos posibles resultados, que gotee o que no lo haga.

Todas las tejas analizadas, una por mezcla, pasaron correctamente la prueba, no presentando pérdidas de agua a las 24 horas ninguna de ellas.

4.1.2. Lima

Los ensayos realizados en Lima, como hemos visto, sólo comprenden las pruebas a compresión sobre cubos de mortero, realizadas en tres series con distintas características que se explicaron anteriormente.

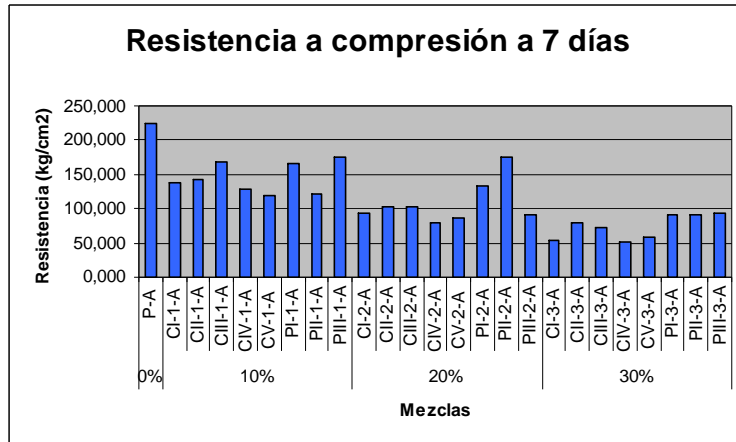
La nomenclatura utilizada se resume en la siguiente lista:

- CI: ceniza quemada en horno procedente de Tarapoto
- CII: ceniza quemada en pampa procedente de Picota
- CIII: ceniza quemada en pampa procedente de Tarapoto
- CIV: ceniza quemada en pampa procedente de Arequipa
- CV: ceniza quemada en horno procedente de Picota
- PI: puzolana natural procedente de Conchupata
- PII: puzolana natural procedente de Totorillas
- PIII: puzolana natural procedente de Tantarjo

El número (1, 2 ó 3) indica la cantidad de adición que contiene la mezcla (10, 20 ó 30%), mientras que las letras (A, B o C) representan la edad de curado (7, 28 ó 45 ó 90 días).

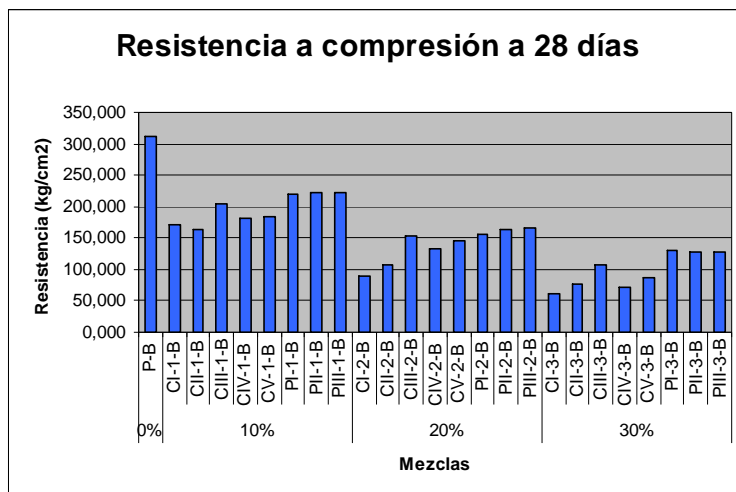
4.1.2.1. *Serie I. Ensayo de compresión*

La primera serie de ensayos de compresión realizada en Lima mostró, a los 7 días, un valor de referencia de 224 kg/cm², estando todas las demás muestras bastante por debajo. Sólo tres adiciones al 10% (CIII, PI y PIII) destacan un poco por encima del resto pero sin acercarse al patrón (175 kg/cm²). Al 20% es PII la que alcanza un valor más elevado, y al 30% todas reducen considerablemente su resistencia.



Gráfica 4.18 – Resistencia a compresión a 7 días

A los 28 días la situación es similar, pero con valores más altos en todas las mezclas. El patrón alcanza los 312 kg/cm², mientras que son las mismas mezclas que a los 7 días las que más se acercan a este valor, con un máximo de 222 kg/cm² alcanzado por PII al 10%.



Gráfica 4.19 – Resistencia a compresión a 28 días

Respecto a la progresión de la resistencia vemos como el patrón experimenta un crecimiento de 88 kg/cm² a los 28 días. Del resto de muestras sólo PII al 10% presenta una evolución mayor (101 kg/cm²) y PIII al 20% se le acerca bastante con 74 kg/cm². Todas las demás se quedan bastante por debajo de estos valores, e incluso algunas de ellas se encuentran en valores negativos, probablemente debido a errores en la elaboración de las probetas o a fallos en la toma de resultados.

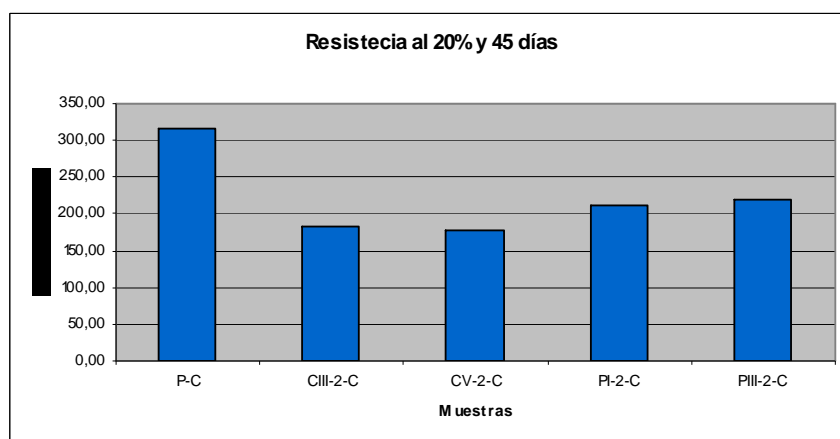
Probeta	7 días	28 días	evolución
	Res. (Kg/cm ²)	Res. (Kg/cm ²)	Res. (Kg/cm ²)
P	224,27	312,47	88,20
CI-1	138,07	171,87	33,80
CII-1	143,13	164,47	21,33
CIII-1	167,13	204,93	37,80
CIV-1	127,60	181,73	54,13
CV-1	119,13	184,53	65,40
PI-1	166,67	220,53	53,87
PII-1	120,73	222,40	101,67
PIII-1	175,80	221,60	45,80
CI-2	93,50	89,33	-4,17
CII-2	103,53	108,40	4,87
CIII-2	102,00	154,27	52,27
CIV-2	80,13	133,20	53,07
CV-2	86,53	146,40	59,87
PI-2	132,67	155,60	22,93
PII-2	175,80	163,33	-12,47
PIII-2	92,00	166,13	74,13
CI-3	54,20	61,53	7,33
CII-3	78,53	75,47	-3,07
CIII-3	73,27	107,20	33,93
CIV-3	50,60	70,53	19,93
CV-3	57,67	86,53	28,87
PI-3	91,73	131,33	39,60
PII-3	92,07	128,53	36,47
PIII-3	93,00	127,47	34,47

Tabla 4.5 – Evolución resistencia a compresión con el tiempo de curado

4.1.2.2. Serie II. Ensayo de compresión

La segunda de las series, elaborada con menos muestras al ser seleccionadas sólo cuatro de entre todas y sólo al 20% de adición, sólo se efectuó para una edad de 45 días. En ella se puede observar la evolución de la resistencia de las mezclas seleccionadas, y notar de nuevo como ninguna de ellas se acerca si quiera al valor del patrón. Mientras éste llega hasta los 315 kg/cm², el máximo mostrado por las mezclas se queda en los 219 kg/cm², y corresponde a PIII.

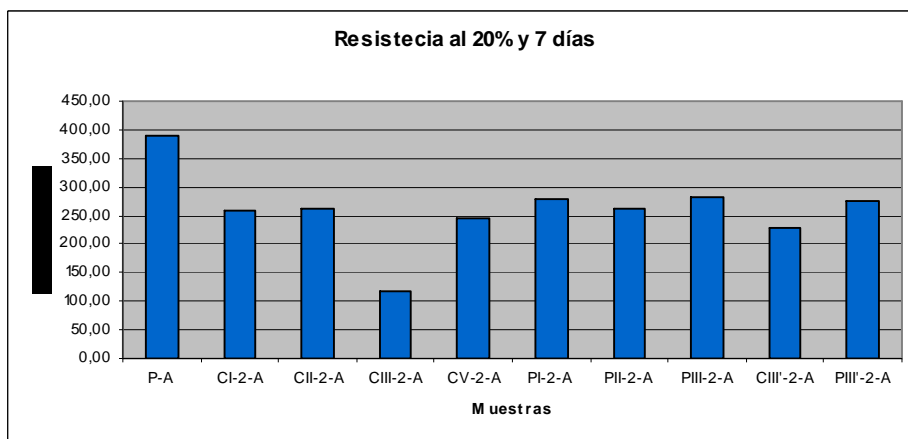
A los 45 días el patrón parece haber detenido el aumento de la resistencia, mientras que el resto de muestras sigue creciendo, aunque no de manera demasiado destacada. La que presenta el mayor crecimiento es la PIII, con 55 kg/cm².



Gráfica 4.20 – Resistencia a compresión a 45 días

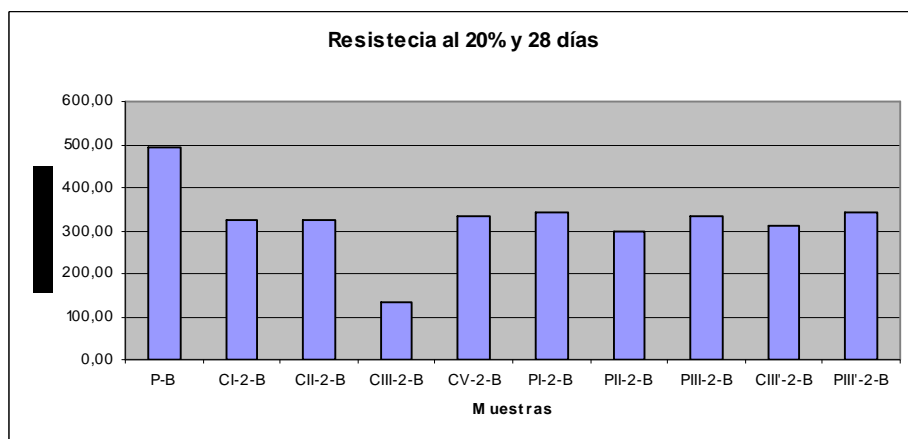
4.1.2.3. Serie III. Ensayo de compresión

A los 7 días observamos un valor de referencia de 389 kg/cm², estando todos los demás resultados bastante por debajo. El valor máximo de las mezclas adicionadas a esta edad es de 282 kg/cm² correspondiente a PIII, y el mínimo lo registra CIII (116 kg/cm²). El resto se mantiene siempre por encima de los 220 kg/cm².



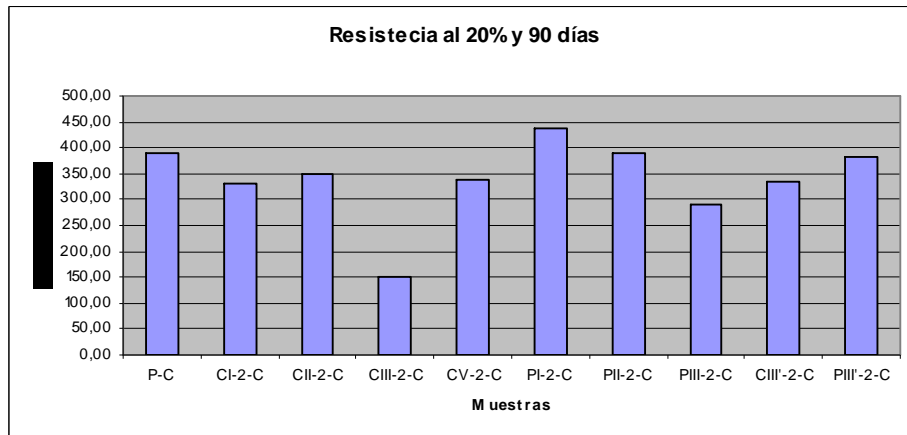
Gráfica 4.21 – Resistencia a compresión a 7 días

Los valores a los 28 días experimentan un crecimiento notable, pero el patrón sigue estando bastante por encima del resto con un valor de 491 kg/cm². Ahora es PI la que marca el máximo de las adiciones, llegando hasta los 343 kg/cm², seguida muy d cerca por PIII (334 kg/cm²) y CV (331 kg/cm²). CIII sigue mostrando el mínimo (134 kg/cm²).



Gráfica 4.22 – Resistencia a compresión a 28 días

Finalmente a 90 días ya encontramos algunos valores superiores al patrón dentro de las mezclas. En este caso resulta engañoso, ya que el valor de referencia que se obtiene en este caso es bastante inferior al obtenido a los 28 días, lo que hace pensar que se hayan producido errores en la ejecución del ensayo, o en la elaboración de la probeta. Si tomamos el valor de referencia de la experiencia anterior de nuevo encontraríamos a la totalidad de las mezclas por debajo de él.



Gráfica 4. 23 – Resistencia a compresión a 90 días

PI repite como valor máximo (436 kg/cm²) y CIII como mínimo (150 kg/cm²). PII y CV que habían mostrado buenos resultados en a 28 días se quedan ahora en valores bastante bajos.

Probeta	7 días	28 días	90 días	evolución 7-28	evolución 28-90	evolución 7-90
	Res. (Kg/cm ²)	Res. (Kg/cm ²)	Res. (Kg/cm ²)	Res. (Kg/cm ²)	Res. (Kg/cm ²)	Res. (Kg/cm ²)
P	389,47	491,33	390,67	101,87	-100,67	1,20
CI-2	256,93	324,53	332,00	67,60	7,47	75,07
CII-2	262,53	325,07	350,00	62,53	24,93	87,47
CIII-2	116,27	134,13	150,67	17,87	16,53	34,40
CV-2	244,13	331,87	340,00	87,73	8,13	95,87
PI-2	278,40	343,60	436,67	65,20	93,07	158,27
PII-2	262,53	296,53	390,00	34,00	93,47	127,47
PIII-2	282,93	334,40	292,00	51,47	-42,40	9,07

Tabla 4.6 – Evolución de la resistencia a compresión con el tiempo de curado

No resulta muy fiable comparar la evolución de la resistencia patrón con la del resto de muestras, debido a ese último valor en negativo, aunque por experiencias anteriores sería de esperar que no hubiera crecido demasiado a los 90 días. Del resto son PI y PII las que muestran un crecimiento mayor, llamando de nuevo la atención la presencia de un valor negativo (PIII), que se achaca una vez más a un error en la ejecución.

4.1.2.4. Ensayo de fluidez

Como hemos dicho anteriormente, el ensayo de fluidez en Lima sólo se realizó sobre las dos segundas series, en la serie II con muestras realizadas sin control en la cantidad de agua y en la serie III con una cantidad constante.

	Diámetros				Fluidez
	210	210	210	210	
P-C	210	210	210	210	110,00
CIII-2-C	210	210	210	210	110,00
CV-2-C	212	212	212	212	112,00
PI-2-C	190	185	190	185	87,50
PIII-2-C	195	195	190	190	92,50

Tabla 4.7 – Fluidez serie II

Como vemos en la tabla correspondiente a la serie II, las mezclas con cenizas muestran una fluidez muy cercana a la del patrón, mientras que aquellas con puzolanas naturales resultan algo más secas.

	Diámetros				Fluidez
P-C	135	130	130	135	32,5
CI-2-C	125	125	113	110	18,25
CII-2-C	120	120	118	118	19
CIII-2-C	0	0	0	0	-100
CV-2-C	0	0	0	0	-100
PI-2-C	130	130	129	130	29,75
PII-2-C	112	112	115	110	12,25
PIII-2-C	125	125	125	125	25

Tabla 4.8 – Fluidez serie III

En la serie III por el contrario las puzolanas naturales parecen mostrar un mejor comportamiento, aunque siempre por debajo de la mezcla patrón. Destacar que en dos de las muestras de ceniza ni siquiera fue posible realizar el ensayo al encontrarse la mezcla demasiado seca.

4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de resultados se realiza la misma división que se ha realizado hasta ahora, pero teniendo en cuenta que no se trata de valores aislados, sino que muchos de ellos están íntimamente relacionados.

4.2.1. Valencia

4.2.1.1. Prismas. Ensayo de compresión

Lo primero que llama la atención del ensayo a compresión de los prismas es el hecho de que ya a los 7 días de curado existen mezclas que superan el valor de resistencia del patrón, correspondiendo además con el máximo porcentaje de sustitución (30%). Esto podría indicar en un principio que se trata de puzolanas altamente reactivas, considerando además que el resto de mezclas, con menor porcentaje de adición, alcanzan un valor bastante cercano al de referencia.

A los 28 días se aprecia un crecimiento bastante coherente en la resistencia del patrón, pero ahora es mayor el número de mezclas que superan este valor, y de nuevo corresponden con los porcentajes más altos de adición, quedando sólo por debajo las que contienen un 10%. Todo parece indicar que se está produciendo la reacción puzolánica, al menos en la parte de resistencia.

Esta tendencia se confirma con los resultados a 90 días, donde se aprecia un crecimiento simbólico de la resistencia de la probeta patrón mientras que el resto de muestras experimenta incrementos bastante mayores.

No se puede establecer un patrón de comportamiento dependiendo de la adición, ya que las resistencias más altas y los crecimientos mayores se obtienen con adiciones bastante diversas. Sin embargo coinciden los valores máximos de ambos aspectos en una mezcla común, la 30-0,

o lo que es lo mismo con un contenido del 30% de ceniza volante. Si sólo nos fijáramos en los resultados de este ensayo esta sería sin duda la mezcla con mejores propiedades.

En el caso de las adiciones con ceniza de cascarilla de arroz el valor máximo alcanzado se encuentra muy cerca del máximo global, y también corresponde al máximo porcentaje de adición (30%). Según estos resultados podríamos decir que ambas puzolanas alcanzan valores de resistencia similares, al menos hasta los 90 días, pero la ceniza volante muestra una progresión mayor, y por tanto hace pensar en que podría continuar su evolución con el tiempo hasta valores bastante superiores.

Por tanto se puede decir que los resultados muestran bastante a las claras los beneficios de la adición puzolánica en cuanto a la resistencia a la compresión, y confirman la mayor lentitud de la reacción en comparación al cemento portland.

cemento	CV	CCA	7 días	28 días	90 días	Evolución 7-28	Evolución 28-90	Evolución 7-90
			Res. media (kg/cm ²)	Res. media (kg/cm ²)	Res. media (kg/cm ²)			
100	0	0	353,75	381,81	386,07	28,06	4,26	32,32
90	10	0	314,98	363,27	456,21	48,29	92,95	141,24
90	0	10	340,02	357,76	445,44	17,74	87,69	105,42
80	20	0	339,42	367,03	419,64	27,61	52,61	80,22
80	10	10	333,96	416,63	443,94	82,67	27,31	109,98
80	0	20	342,42	433,92	456,71	91,49	22,80	114,29
70	30	0	335,21	391,83	489,63	56,62	97,81	154,43
70	20	10	438,93	453,46	482,52	14,53	29,06	43,59
70	10	20	417,13	429,66	472,75	12,53	43,09	55,62
70	0	30	404,60	394,58	481,66	-10,02	87,07	77,05

Tabla 4.9 – Resumen resistencia a compresión prismas

4.2.1.2. Prismas. Ensayo de flexión

En el caso del ensayo de flexión no es tan evidente el aumento de la resistencia, de hecho la mayoría de las mezclas presentan valores inferiores al patrón, alguno de ellos bastante inferiores, aunque podría decirse que todos muestran valores aceptables.

De nuevo se observan algunos valores con evolución negativa, probablemente a causa de algún error en la ejecución o en la toma de valores. Concretamente el valor de referencia a los 90 días es inferior al de 28 días, aunque es una diferencia tan pequeña que podría achacarse simplemente a la variabilidad propia de los materiales.

Tampoco aquí resulta fácil establecer una relación entre mezclas y propiedades. Quizá destacar el hecho de que las probetas con adición única presentan mejores resultados que aquellas con adición de ambas puzolanas, lo que quizá podría indicar una incompatibilidad de ambas muestras en lo referente a la resistencia a flexión.

Si se analizan ambos factores conjuntamente se podría decir que la mezcla 10-10 es la que presenta mejor comportamiento, ya que alcanza el valor global más alto y presenta una evolución bastante notable, sólo superada por la mezcla 0-30 y que además muestra un valor final de resistencia bastante elevado.

cemento	CV	CCA	7 días	28 días	90 días	Evolución 7-28	Evolución 28-90	Evolución 7-90
			Res. media (kg/cm ²)	Res. media (kg/cm ²)	Res. media (kg/cm ²)			
100	0	0	76,10	99,17	92,57	23,06	-6,60	16,46
90	10	0	80,87	89,86	88,37	8,99	-1,49	7,50
90	0	10	67,61	79,28	73,94	11,66	-5,34	6,32
80	20	0	80,91	80,60	81,40	-0,31	0,80	0,49
80	10	10	67,90	73,12	93,54	5,23	20,42	25,64
80	0	20	50,55	58,24	75,48	7,69	17,24	24,92
70	30	0	71,28	89,82	76,03	18,54	-13,79	4,75
70	20	10	48,24	50,84	63,77	2,61	12,93	15,54
70	10	20	46,99	49,67	59,47	2,68	9,79	12,48
70	0	30	52,00	57,83	81,25	5,82	23,43	29,25

Tabla 4.10 – Resumen resistencia a flexión prismas

4.2.1.3. Prismas. Ensayo de absorción por capilaridad

En este caso llama la atención el hecho de que la probeta patrón prácticamente mantiene el mismo valor a los 28 días y presenta una evolución considerable a los 90 días. A pesar de esto muestra el valor final más alto, teniendo en cuenta que en un principio es deseable lograr el valor más bajo posible.

Todas las demás mezclas presentan un mejor comportamiento, sobre todo a los 90 días, lo que podría tomarse como un síntoma de que se produce una reducción de poros como efecto del desarrollo de la reacción puzolánica.

El mejor valor final corresponde a la mezcla 0-20, pero no presenta una evolución tan grande como algunas otras muestras. La 10-10 con un valor bastante cercano tiene un crecimiento mayor, así que entre estas dos podría estar la mezcla con mejores propiedades.

Si no fuera por la respuesta de la mezcla 0-30 podríamos decir que la CCA favorece en mayor medida la reducción de poros en el mortero endurecido. Aún así, el último de sus valores (a 90 días) resulta un poco sospechoso al ser mayor que anterior, por lo que no podemos descartar esta tendencia.

cemento	CV	CCA	7 días	28 días	90 días	Evolución 7-28	Evolución 28-90	Evolución 7-90
			promedio C kg/(m ² *min ^{0,5})	promedio C kg/(m ² *min ^{0,5})	promedio C kg/(m ² *min ^{0,5})			
100	0	0	0,16	0,17	0,12	0,01	-0,05	-0,04
90	10	0	0,17	0,15	0,11	-0,02	-0,05	-0,06
90	0	10	0,12	0,07	0,08	-0,05	0,01	-0,05
80	20	0	0,16	0,15	0,08	-0,01	-0,07	-0,08
80	10	10	0,12	0,08	0,06	-0,04	-0,01	-0,06
80	0	20	0,10	0,09	0,05	-0,01	-0,04	-0,04
70	30	0	0,17	0,12	0,09	-0,04	-0,03	-0,07
70	20	10	0,10	0,07	0,06	-0,03	-0,02	-0,05
70	10	20	0,10	0,06	0,08	-0,04	0,02	-0,03
70	0	30	0,12	0,07	0,09	-0,05	0,03	-0,02

Tabla 4.11 – Resumen coeficiente de absorción por capilaridad

4.2.1.4. Ensayo de fluidez

En este ensayo es evidente la gran mejoría que muestran las mezclas con contenido de ceniza volante con respecto a aquellas adicionadas con ceniza de cascarilla de arroz, en incluso con la mezcla patrón.

Como hemos explicado anteriormente este fenómeno es debido a la microestructura de cada una de las puzolanas. Mientras la CV presenta partículas muy finas y redondeadas, favoreciendo así el desplazamiento y actuando como lubricante sólido, la CCA posee una estructura muy amorfa y llena de poros que absorbe grandes cantidades de agua. Evidentemente los valores

máximo y mínimo corresponden con las mezclas 30-0 y 0-30 respectivamente, quedando el resto en valores intermedios dependiendo de la adición.

4.2.1.5. Tejas. Ensayo de flexión

Lo primero que llama la atención al analizar los resultados del ensayo a flexión de las tejas es que se observa una mejoría mucho mayor que la que mostraron los prismas en el mismo ensayo. Mientras que en estos últimos muy pocas probetas mejoraron el patrón en las primeras ya a los 7 días se observan mejorías importantes.

Tampoco era de esperar viendo los ensayos anteriores el hecho de que la teja patrón presente una evolución tan grande en la última fase, de 28 a 90 días de curado, superando a muchas otras que supuestamente experimentan una reacción mucho más lenta.

Al no tratarse de un ensayo a flexión convencional debido al adaptador que se instala en la máquina para repartir uniformemente el esfuerzo, puede ser que exista algún factor que no se haya tenido en cuenta.

El valor de resistencia máximo lo alcanza la muestra 0-10, pero y su evolución es de la más grande. Un gran comportamiento en conjunto lo presenta también la mezcla 0-20, con un crecimiento muy alto y un valor final casi a la altura del máximo.

Tratando de establecer una relación entre tipo de adición y comportamiento se observa una tendencia hacia mayores valores tanto de resistencia final como de crecimiento con mezclas de CCA.

cemento	CV	CCA	7 días	28 días	90 días	evolución 7-28	evolución 28-90	evolución 7-90
			carga media (kg)	carga media (kg)	carga media (kg)			
100	0	0	71,48	102,24	104,54	30,77	2,30	33,07
90	10	0	78,44	98,13	97,66	19,69	-0,46	19,22
90	0	10	93,02	117,40	140,47	24,38	23,07	47,45
80	20	0	88,24	100,25	105,12	12,02	4,87	16,88
80	10	10	93,99	89,16	119,72	-4,83	30,56	25,74
80	0	20	83,69	96,31	129,20	12,63	32,89	45,52
70	30	0	69,04	92,42	110,02	23,38	17,60	40,98
70	20	10	84,62	94,62	99,77	10,00	5,15	15,15
70	10	20	71,90	105,74	104,65	33,84	-1,09	32,75
70	0	30	75,23	103,72	111,28	28,49	7,56	36,05

Tabla 4.12 – Resumen carga a flexión tejas

4.2.1.6. Tejas. Ensayo de impacto

Este ensayo no aporta datos significativos acerca de los efectos de la reacción puzolánica. Todos los resultados obtenidos son bastante similares, por lo que la única conclusión que se puede sacar es que las adiciones no afectan a la resistencia al impacto, ni positiva ni negativamente.

4.2.1.7. Tejas. Ensayo de impermeabilidad

Sucede exactamente lo mismo que en caso anterior, este ensayo por si solo no aporta información numérica, simplemente confirma la aptitud de las tejas para su aplicación como impermeabilizador.

4.2.2. Lima

4.2.2.1. Serie I. Ensayo de compresión

La impresión general de esta serie de ensayos es que la adición de puzolanas disminuye la resistencia de manera notable, y en mayor medida cuanto mayor es el porcentaje de adición. Además ni siquiera presentan una evolución de su resistencia notable que haga esperar un crecimiento mayor con el tiempo, si bien es cierto que en esta serie sólo se han evaluado dos edades (7 y 28 días) y la mayor evolución se presenta generalmente después de esa edad.

Realmente no vale la pena hacer comparaciones entre mezclas, ya que todos los datos hacen pensar que no se ha producido la reacción puzolánica, o de haberse producido lo ha hecho en un nivel muy pequeño, probablemente debido a las altas relaciones agua:conglomerante.

Lo que si parece evidente es las mezclas con puzolana natural presentan mejor comportamiento que aquellas que contienen cenizas de cascarilla de arroz. Y si analizamos ambas por separado CIII y CV destacan entre las cenizas y PI y PIII entre las puzolanas, lo que se ve reflejado en la segunda de las series, donde sólo se evalúan estas adiciones por su mejor comportamiento con respecto al resto.

Probeta	7 días	28 días	evolución
	Res. (Kg/cm ²)	Res. (Kg/cm ²)	Res. (Kg/cm ²)
P	224,27	312,47	88,20
CI-1	138,07	171,87	33,80
CII-1	143,13	164,47	21,33
CIII-1	167,13	204,93	37,80
CIV-1	127,60	181,73	54,13
CV-1	119,13	184,53	65,40
PI-1	166,67	220,53	53,87
PII-1	120,73	222,40	101,67
PIII-1	175,80	221,60	45,80
CI-2	93,50	89,33	-4,17
CII-2	103,53	108,40	4,87
CIII-2	102,00	154,27	52,27
CIV-2	80,13	133,20	53,07
CV-2	86,53	146,40	59,87
PI-2	132,67	155,60	22,93
PII-2	175,80	163,33	-12,47
PIII-2	92,00	166,13	74,13
CI-3	54,20	61,53	7,33
CII-3	78,53	75,47	-3,07
CIII-3	73,27	107,20	33,93
CIV-3	50,60	70,53	19,93
CV-3	57,67	86,53	28,87
PI-3	91,73	131,33	39,60
PII-3	92,07	128,53	36,47
PIII-3	93,00	127,47	34,47

Tabla 4.13 – Resumen resistencia a compresión serie I

4.2.2.2. Serie II. Ensayo de compresión

A los 45 días se observa una evolución más marcada que antes, pero aún sin acercarse ni de lejos a los valores patrón, si bien es cierto que éste parece haber detenido su progresión mientras que el resto muestra una tendencia al alza.

Parece ser que la reacción puzolánica sí se produce, pero no en toda su dimensión, y ni mucho menos en las condiciones que parecen mostrar los ensayos realizados en Valencia. Aún así se

considera un resultado positivo y esperanzador después de la mala impresión de la primera serie.

% Puzolana	Probeta	Fecha amasado	Fecha desmoldo	Fecha ensayo	Ensayado	Carga soportada				Res. (Kg/cm ²)	Res. (Mpa)
						Probeta I	Probeta II	Probeta III	Promedio		
0%	P-C	28/10/2008	30/10/2008	12/12/2008	si	7330	8070	8230	7876,67	315,07	30,91
	CIII-2-C	28/10/2008	30/10/2008	12/12/2008	si	4200	4650	4880	4576,67	183,07	17,96
	CV-2-C	28/10/2008	30/10/2008	12/12/2008	si	4380	4490	4400	4423,33	176,93	17,36
	PI-2-C	28/10/2008	30/10/2008	12/12/2008	si	5310	5070	5420	5266,67	210,67	20,67
20%	PIII-2-C	28/10/2008	30/10/2008	12/12/2008	si	5420	5400	5630	5483,33	219,33	21,52

Tabla 4.14 – Resumen resistencia a compresión serie II

4.2.2.3. Serie III. Ensayo de compresión

La molienda efectuada en esta serie muestra claramente los beneficios que aporta a la mezcla, pero siguen sin verse los resultados obtenidos en Valencia. Mejoran bastante todos los resultados con respecto a la primera serie, y muestran una evolución a los 90 días que hace creer que podrían llegar a ser bastante mayores a edades más grandes.

Puede decirse que la reacción puzolánica se produce, pero no en toda su dimensión y a una velocidad muy pequeña. Queda la duda de saber dónde está el límite de estas adiciones y si a edades mayores podría dar resultados tan satisfactorios como los mencionados de Valencia.

De nuevo parece ser que las puzolanas naturales se comportan mejor que las cenizas, pero la diferencia ya no es tan significativa como en casos anteriores. Esto puede deberse al hecho de que la molienda haya resultado más determinante en las cenizas, por presentar un tamaño de grano inicial más grande.

PI sería la mejor adición globalmente mientras que en las cenizas estaríamos entre CII y CV, aunque al haberse realizado solamente mezclas al 20% no se tienen todos los datos necesarios para descartar el resto.

Probeta	7 días	28 días	90 días	evolución 7-28	evolución 28-90	evolución 7-90
	Res. (Kg/cm ²)	Res. (Kg/cm ²)	Res. (Kg/cm ²)	Res. (Kg/cm ²)	Res. (Kg/cm ²)	Res. (Kg/cm ²)
P	389,47	491,33	390,67	101,87	-100,67	1,20
CI-2	256,93	324,53	332,00	67,60	7,47	75,07
CII-2	262,53	325,07	350,00	62,53	24,93	87,47
CIII-2	116,27	134,13	150,67	17,87	16,53	34,40
CV-2	244,13	331,87	340,00	87,73	8,13	95,87
PI-2	278,40	343,60	436,67	65,20	93,07	158,27
PII-2	262,53	296,53	390,00	34,00	93,47	127,47
PIII-2	282,93	334,40	292,00	51,47	-42,40	9,07

Tabla 4.15 – Resumen resistencia a compresión serie III

4.2.2.4. Ensayo de fluidez

Del ensayo realizado sobre las muestras de la serie II no se pueden extraer datos muy valiosos, ya que cada una de las mezclas contiene una cantidad distinta de agua. Lo que en un principio podría parecer un mejor comportamiento de las cenizas pierde credibilidad si se analiza la cantidad de agua que contiene cada mezcla, que es bastante mayor en éstas.

La serie III si que se realizó con la misma cantidad de agua para todas las muestras por lo que sí se pueden comparar los resultados. Las puzolanas naturales se comportan mejor, sobre todo PI, con un valor muy cercano al del patrón, mientras que dos de las cenizas absorben tal cantidad de agua que no es posible compactar la mezcla para realizar el ensayo.

5. CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

Al comienzo de este texto se citaba como objetivo general de este proyecto "la evaluación de algunas puzolanas locales como materiales susceptibles de ser utilizados como adición mineral activa en la elaboración de elementos prefabricados para la construcción de viviendas de bajo coste", y en ese sentido deben ir enfocadas las conclusiones a las que se tratará de llegar en este punto. Pero lo cierto es que si se analiza todo desde este punto de vista el resultado final podría quedar un poco difuso, por lo que se tratará primeramente de desglosar estas conclusiones en distintas orientaciones para poder llegar a unas ideas finales que puedan dar un visión general de todo el proyecto.

5.1. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

5.1.1. Respecto a las puzolanas utilizadas

- No se puede establecer una relación clara entre el tipo de incineración y la microestructura resultante, ya que tanto las quemadas al aire libre como aquellas que lo son en horno presentan variedad en este sentido.
- Parece ser que lo que realmente resulta determinante es la temperatura de quemado, pero al no poseer estos datos no se puede afirmar a ciencia cierta.
- Las quemadas al aire libre presentan mayor contenido de humedad. Esto podría ser representativo, pero tampoco conocemos las condiciones de almacenado, por lo que esta humedad podría haberse adquirido durante este periodo.
- Todas las cenizas contienen SiO_2 como componente principal.
- Las puzolanas naturales Al, además de Si, como elemento principal.
- Todas ellas, excepto CIV, se encuentran disponibles en cantidades y precios asequibles.

5.1.2. Respecto a la molienda

- Resulta mucho más efectiva la molienda en molino de recipiente cerámico con bolas de alúmina que la realizada con molino y bolas de acero.
- La ceniza volante presenta el tamaño de partícula más pequeño con bastante diferencia, incluso sin sufrir proceso de molienda.
- La molienda afecta más al tamaño de partícula de la ceniza que al de la puzolana natural, por lo que podría decirse que se trata de un material más blando.

5.1.3. Respecto a la trabajabilidad de las mezclas y la absorción de agua

- Las puzolanas, en general, reducen claramente la trabajabilidad de las mezclas debido a que son materiales altamente higroscópicos, exceptuando las cenizas volantes.
- La ceniza volante actúa como lubricante sólido, mejorando la fluidez de los morteros debido a su microestructura en forma de esferas minúsculas.
- El fenómeno de absorción de agua alto se da durante el proceso de fraguado, ya que una vez endurecida la mezcla la puzolana contribuye a cerrar los poros capilares y a formar una estructura impermeable y por lo tanto más resistente a las heladas.
- La combinación de CCA y CV resulta beneficiosa en este sentido, ya que la CV aporta la fluidez necesaria a la mezcla y la CCA contribuye en mayor medida a la reducción de

poros. Habría que realizar ensayos con edades mayores para evaluar la CV en su justa medida.

- Al no haber realizado los ensayos de absorción en las mezclas utilizadas en Lima no podemos generalizar estas afirmaciones, teniendo en cuenta además que el tamaño de partícula mayor dificultaría bastante un buen comportamiento en este sentido.
- Sin tener en cuenta la ceniza valenciana se puede afirmar que las puzolanas naturales permiten conseguir una mejor trabajabilidad con la misma cantidad de agua.

5.1.4. Respecto a la resistencia a la compresión

- Es posible alcanzar resistencias más altas que la del cemento portland con adiciones controladas de puzolanas en determinadas condiciones.
- El tamaño de partícula pequeño y la microestructura amorfa resultan factores determinantes para lograr estos valores.
- Comparando una puzolana natural con una ceniza de cascarilla de arroz se puede decir que una estructura amorfa con mayor tamaño de partícula da mejores resultados que una estructura cristalina con tamaño de partícula más pequeño.
- La ceniza volante por si sola también aporta resistencia a la mezcla. Contempla el valor de resistencia más alto y el tamaño de partícula más pequeño.
- El tamaño de partícula afecta a la velocidad de fraguado, alcanzando algunos valores muy altos a los 7 días con tamaños muy pequeños.
- Las series de probetas elaboradas en Lima demuestran claramente la importancia del control de la cantidad de agua sobre el valor de resistencia final.
- El valor máximo de resistencia a la compresión se obtiene con una proporción del 30% de CV (489 kg/cm²), pero al no tratarse de una de las adiciones principales del proyecto nos quedamos con el 30% de CCA (481 kg/cm²) como adición ideal a compresión.
- Comparando las puzolanas utilizadas en Lima la puzolana natural muestra mejor comportamiento que la ceniza de cascarilla de arroz.
- El valor máximo obtenido en lima corresponde al 20% de PI (Conchupata) (436 kg/cm²), además de la mayor progresión con el tiempo, por lo que sería la mezcla ideal a compresión.
- A pesar de mostrar el valor más alto dentro de las cenizas Peruanas, globalmente las cenizas quemadas al aire libre presentan un comportamiento inferior a compresión.
- Los valores más altos obtenidos con puzolanas peruanas corresponden a las microestructuras más amorfas, pero no a los tamaños de partícula más pequeños.

5.1.5. Respecto a la resistencia a flexión

- En general, las mezclas ensayadas a flexión (sólo con puzolanas valencianas) muestran resistencias más bajas que la probeta patrón, por lo que podría decirse que la puzolana no es beneficiosa en este sentido.
- La combinación de CCA y CV da los mejores resultados. La mezcla 10-10 alcanza el valor máximo (93 kg/cm²)
- La elegida antes como valor máximo (0-30) tiene un valor muy cercano al patrón (81 kg/cm²), lo que unido a su gran progresión con el tiempo hace que también aquí la seleccionemos como mezcla ideal a flexión.

5.1.6. Respecto a su aplicación en tejas de microconcreto

- Se pueden alcanzar valores de resistencia a la flexión en tejas mayores con la adición controlada de puzolanas.
- A pesar de que las puzolanas parecían reducir la resistencia a flexión en los prismas se confirma que para determinadas aplicaciones se puede revertir esta tendencia.
- Los valores más altos corresponden a mezclas de CCA como única adición, aunque se van reduciendo al aumentar el porcentaje de adición.
- Analizando resistencia máxima y evolución con el tiempo conjuntamente aparece la mezcla 0-20 como la de mejores características.
- La resistencia al impacto de las tejas no se ve afectada significativamente por la adición de puzolanas.
- La adición de puzolanas no afecta a la impermeabilidad de las tejas, y sin datos suficientes para emitir juicios definitivos, se puede entrever que mejora esta característica, a la vista de los resultados obtenidos en el ensayo de absorción.

5.1.7. Respecto a la viabilidad tecnológica

- Parece que hay demasiada influencia en los resultados finales dependiendo de la calidad de las técnicas utilizadas.
- Dejando a parte los procesos de obtención de las puzolanas, la molienda es sin duda el proceso clave, marcando diferencias muy significativas. Es además la parte del proceso que más dificultades presenta a la hora de su aplicación en comunidades de escasos recurso, debido al gran coste económico que supondría.
- El control de la cantidad de agua también resulta determinante, aunque es algo que se puede regular fácilmente.
- Se debe ser cuidadoso en la selección de materiales y en la ejecución de procesos para lograr reproducir los mismos resultados en todas las muestras, ya que pequeños cambios en estos factores generan grandes cambios en los resultados.
- La producción de tejas con la tecnología indicada resulta muy adecuada, fácil de transmitir y con equipamiento económico.

5.2. CONCLUSIONES GENERALES

- Se pueden alcanzar mejores resultados en prácticamente todos los aspectos analizados al añadir una adición de puzolana al cemento portland.
- La obtención de estos resultados requiere por un lado unos materiales de determinadas características y por otro un procedimiento más o menos costoso, siempre visto desde el punto de vista de personas de escasos recursos.
- La aplicación de estas adiciones a componentes prefabricados para construcciones de bajo coste resulta viable en la mayoría de los aspectos, y cuando menos resulta susceptible de una investigación más profunda con visos de alcanzar grandes resultados.
- La participación de estos prefabricados en el fomento de la creación de microempresas podría resultar aconsejable siempre que se adaptara el proceso de molienda a las necesidades y posibilidades de las regiones más desfavorecidas.

- Dependiendo de la trabajabilidad y resistencia necesarias en la mezcla se podrían elegir distintas proporciones ideales, en general combinando pequeñas cantidades de CV con grandes cantidades de CCA.
- Las puzolanas naturales resultan aconsejables por su mayor resistencia, mejor trabajabilidad y disponibilidad en la naturaleza sin necesidad de tratamiento (sólo molienda).
- Las cenizas de cascarilla de arroz resultan aconsejables por suponer un residuo que se desea eliminar, la generación de energía primaria (calor) en su procesamiento, su disponibilidad en puntos más repartidos de la geografía y la no repercusión en el medio ambiente en forma de canteras.
- Las cenizas volantes resultan aconsejables por su gran aportación a la trabajabilidad y a la resistencia y por ser un residuo que se desea eliminar.

Como punto final dejar constancia de las buenas sensaciones generadas a lo largo de la realización de este proyecto, tanto en el sentido puramente técnico como en el humano. Técnicamente queda la sensación de que sin haber llegado a resultados concluyentes y aplicables inmediatamente, sí se ha avanzado bastante en la determinación de las características deseadas, en la elección de unas puzolanas sobre otras, en su aplicación sobre un prefabricado que lleva bastante tiempo funcionando muy bien, y en general en el mayor conocimiento de estos materiales que ya hace tiempo que están demostrando ser una gran alternativa al cemento portland, pero a los que aún no se ha dado el impulso suficiente para establecerse como material "noble".

En el apartado humano queda la sensación de que hay ya mucha gente preocupada por temas de habitabilidad básica, de aprovechamiento de recursos locales, de reducción del impacto sobre el medio ambiente, de impulso del crecimiento y desarrollo de las potencialidades de las personas con menos recursos, y lo que es más importante y lo resume todo, cada día hay más gente preocupada por mejorar la calidad de vida de las personas, independientemente de su procedencia, condición social, o nivel económico.

6. BIBLIOGRAFÍA

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Salas Serrano, J., "Latinoamérica: Hambre de vivienda", Boletín del Instituto de la Vivienda, Universidad de Chile, mayo 2002, vol.17, número 045, pp 58-69
2. Martirena, J.F., "Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerantes de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa", Tesis Doctoral, Universidad Central Marta Abreu de las Villas (UCLV), Cuba
3. Quiñónez De la Cruz, F. J., "Estado actual de la investigación de las puzolanas en Guatemala como material de construcción", Febrero de 2001, Asesoría y Consultoría en Ingeniería
4. Day R. L., "Pozzolans for use in low- cost housing: a state of the art report", Research Report CE92-1, University of Calgary, enero 1992
5. Jaubertheia, F., Rendella, S., Tambab, I., Cisseb, R., "Origin of the pozzolanic effect of rice husks", Construction and Building Materials, número 14, año 2000, pp 419-423
6. Andrea Arcos, C., Macíaz Pinto, D., Rodríguez, J.E., "Husk of rice as source of SiO₂" Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, número 41, septiembre 2007 pp 7-20
7. Payá, J., Borrachero, M.V., Monzó, J., Ordóñez, L.M., Bonilla, M., Mellado, A., "Cenizas de cáscara de arroz obtenidas en condiciones de combustión no controladas: posibilidad de uso en hormigones", Materiales Compuestos, número 99, pp 501-508
8. CEMBUREAU (European Cement Association), página web oficial
9. "U.S. Geological Survey", Mineral Commodity Summaries, enero 2008
10. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación), "El estado mundial de la agricultura y la alimentación", página web oficial
11. Salcedo Llorente A. J., "Hormigón con adición de cenizas volantes en cuantía elevada e influencia de los aditivos sobre el mismo", Revista de obras publicas, diciembre 1986, pp 945-971
12. "Fly ash for concretes", Headwater resources
13. Adamiec, P., Benezet, J. C., Benhassaine, A., "Pozzolanic reactivity of silico-aluminous fly ash", Particuology, número 6, año 2008, pp 93-98
14. Nair, D. G., Fraaij, A., Klaassen, A., K. Kentgens, A.P., "A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes", Cement and Concrete Research, número 38, año 2008, pp 861-869
15. Charca, G., Guzmán, R., Barba, F., "Estudio para la obtención de sílice amorfa a partir de la cáscara de arroz", Acta Microscópica, volumen 16, número 1-2, año 2007, pp 212-213

16. Quintana Crespo, E., "Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos" Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina
17. Norma UNE-EN 1015 "Métodos de ensayo de los morteros para albañilería"
18. Norma UNE-EN 490 "Tejas y piezas de hormigón para tejados y revestimiento de muros. Especificaciones de producto"
19. Norma UNE-EN 491 "Tejas y piezas de hormigón para tejados y revestimiento de muros. Métodos de ensayo"
20. Norma NTP 334.057 "Cementos. Método de ensayo para determinar la fluidez de morteros de cemento portland".
21. Norma NTP 334.051 "Cementos. Método para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento portland usando cubos de 50 mm de lado"
22. Norma ASTM C 618 "Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete"
23. Norma ASTM C 311 "Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in portland cement concrete"
24. Meléndez, M., Espinosa, O., Rhyner, K., Novoa, M., "Un techo que cubre al mundo: La Teja de MicroConcreto", editado por Red ECOSUR, año 2004
25. Ospina, M. A., Monzó, J., Borrachero, V., Payá, J., Barrionuevo, R., "Utilización de mezclas ternarias cemento-ceniza de cáscara de arroz-ceniza volante de central térmica en la preparación de tejas de microhormigón" Tenth international conference on Non-Conventional Materials and Technologies, NOCMAT 2008, Cali, Colombia
26. Instituto Nacional de Estadística (INE), página web oficial
27. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, página web oficial
28. Escalante García, J. I., "Materiales alternativos al cemento portland", Avance y Perspectiva, volumen 21, marzo-abril 2002, pp 79-88
29. Khandaker, M., Anwar, H., "Blended cement using volcanic ash and pumice", Cement and Concrete Research, número 33, año 2003, pp 1601-1605
30. Agarwal, S. K., "Pozzolanic activity of various siliceous materials", Cement and Concrete Research, número 36, año 2006, pp 1735-1739
31. Salas Serrano, J., "La industrialización posible de la vivienda latinoamericana" Tecnologías para la vivienda de interés social", ESCALA
32. Salas Serrano, J., "Tugurización y necesidad de habitabilidad básica, rémoras a la cohesión social en Latinoamérica", Pensamiento iberoamericano, número 1, pp 207-230

7. ANEXOS

7. ANEXOS

7.1. ANEXO I. TABLAS DE VALORES

7.1.1. Valencia

7.1.1.1. Prismas. Ensayo de compresión

% ADICIÓN			7 días					
cemento	CV	CCA	carga (kg)	Res. (kg/cm2)	Res. (Mpa)	carga media (kg)	Res. media (kg/cm2)	Res. media (Mpa)
100	0	0	6000,00	360,76	36,77	5883,33	353,75	36,06
			6000,00	360,76	36,77			
			6075,00	365,27	37,23			
			5700,00	342,72	34,94			
			5600,00	336,71	34,32			
			5925,00	356,25	36,32			
90	10	0	5975,00	359,26	36,62	5238,50	314,98	32,11
			4975,00	299,13	30,49			
			5606,00	337,07	34,36			
			4600,00	276,58	28,19			
			5175,00	311,16	31,72			
			5100,00	306,65	31,26			
90	0	10	5325,00	320,18	32,64	5655,00	340,02	34,66
			4900,00	294,62	30,03			
			6500,00	390,83	39,84			
			5475,00	329,20	33,56			
			6075,00	365,27	37,23			
80	20	0	5625,00	338,21	34,48	5645,00	339,42	34,60
			6000,00	360,76	36,77			
			6000,00	360,76	36,77			
			4900,00	294,62	30,03			
			5700,00	342,72	34,94			
80	10	10	5325,00	320,18	32,64	5554,17	333,96	34,04
			5400,00	324,69	33,10			
			6900,00	414,88	42,29			
			4800,00	288,61	29,42			
			5700,00	342,72	34,94			
			5200,00	312,66	31,87			
80	0	20	4825,00	290,11	29,57	5695,00	342,42	34,91
			6200,00	372,79	38,00			
			4875,00	293,12	29,88			
			6000,00	360,76	36,77			
			6575,00	395,34	40,30			
70	30	0	5775,00	347,23	35,40	5575,00	335,21	34,17
			5950,00	357,76	36,47			
			5450,00	327,69	33,40			
			4800,00	288,61	29,42			
			5525,00	332,20	33,86			
			5950,00	357,76	36,47			
70	20	10	8050,00	484,02	49,34	7300,00	438,93	44,74
			7250,00	435,92	44,44			
			6500,00	390,83	39,84			
			8050,00	484,02	49,34			
			7525,00	452,46	46,12			
			6425,00	386,32	39,38			
70	10	20	7025,00	422,39	43,06	6937,50	417,13	42,52
			6975,00	419,39	42,75			
			7100,00	426,90	43,52			
			6750,00	405,86	41,37			
			6825,00	410,37	41,83			
			6950,00	417,88	42,60			
70	0	30	6650,00	399,84	40,76	6729,17	404,60	41,24
			6725,00	404,35	41,22			
			5975,00	359,26	36,62			
			7125,00	428,41	43,67			
			7150,00	429,91	43,82			
			6750,00	405,86	41,37			

Tabla 7.1 – Resistencia a compresión prisma a 7 días

% ADICIÓN			28 días					
cemento	CV	CCA	carga (kg)	Res. (kg/cm2)	Res. (Mpa)	carga media (N)	Res. media (kg/cm2)	Res. media (Mpa)
100	0	0	5800,00	348,74	35,55	6350,00	381,81	38,92
			7500,00	450,95	45,97			
			6600,00	396,84	40,45			
			5500,00	330,70	33,71			
90	10	0	5925,00	356,25	36,32	6041,67	363,27	37,03
			7325,00	440,43	44,90			
			4925,00	296,13	30,19			
			6025,00	362,27	36,93			
			5150,00	309,65	31,57			
90	0	10	6900,00	414,88	42,29	5950,00	357,76	36,47
			5650,00	339,72	34,63			
			6325,00	380,30	38,77			
			5975,00	359,26	36,62			
			5975,00	359,26	36,62			
			5425,00	326,19	33,25			
80	20	0	6350,00	381,81	38,92	6104,17	367,03	37,41
			6400,00	384,81	39,23			
			6025,00	362,27	36,93			
			6075,00	365,27	37,23			
			5800,00	348,74	35,55			
80	10	10	6250,00	375,79	38,31	6929,17	416,63	42,47
			6075,00	365,27	37,23			
			7600,00	456,97	46,58			
			6725,00	404,35	41,22			
			6900,00	414,88	42,29			
			7225,00	434,42	44,28			
80	0	20	6800,00	408,86	41,68	7216,67	433,92	44,23
			6325,00	380,30	38,77			
			7225,00	434,42	44,28			
			7200,00	432,91	44,13			
			7325,00	440,43	44,90			
70	30	0	8150,00	490,04	49,95	6516,67	391,83	39,94
			7000,00	420,89	42,90			
			6400,00	384,81	39,23			
			6375,00	383,31	39,07			
			6050,00	363,77	37,08			
			6450,00	387,82	39,53			
70	20	10	7400,00	444,94	45,36	7541,67	453,46	46,22
			6100,00	366,77	37,39			
			6725,00	404,35	41,22			
			6925,00	416,38	42,44			
			7750,00	465,98	47,50			
			8925,00	536,63	54,70			
70	10	20	6225,00	374,29	38,15	7145,83	429,66	43,80
			6600,00	396,84	40,45			
			8825,00	530,62	54,09			
			5725,00	344,23	35,09			
			7200,00	432,91	44,13			
			8225,00	494,54	50,41			
70	0	30	7850,00	472,00	48,11	6562,50	394,58	40,22
			6675,00	401,35	40,91			
			7200,00	432,91	44,13			
			6575,00	395,34	40,30			
			5800,00	348,74	35,55			
			7825,00	470,49	47,96			

Tabla 7.2 – Resistencia a compresión prismas a 28 días

% ADICIÓN			90 días					
cemento	CV	CCA	carga (kg)	Res. (kg/cm2)	Res. (Mpa)	carga media (N)	Res. media (kg/cm2))	Res. media (Mpa)
100	0	0	6050,00	363,77	37,08	6420,83	386,07	39,35
			5975,00	359,26	36,62			
			6225,00	374,29	38,15			
			7500,00	450,95	45,97			
			6350,00	381,81	38,92			
			6425,00	386,32	39,38			
90	10	0	7350,00	441,93	45,05	7587,50	456,21	46,50
			7075,00	425,40	43,36			
			8450,00	508,07	51,79			
			8250,00	496,05	50,57			
			8000,00	481,02	49,03			
			6400,00	384,81	39,23			
90	0	10	7300,00	438,93	44,74	7408,33	445,44	45,41
			7000,00	420,89	42,90			
			7650,00	459,97	46,89			
			7975,00	479,51	48,88			
			7425,00	446,44	45,51			
			7100,00	426,90	43,52			
80	20	0	7275,00	437,42	44,59	6979,17	419,64	42,78
			6400,00	384,81	39,23			
			7250,00	435,92	44,44			
			7025,00	422,39	43,06			
			6925,00	416,38	42,44			
			7000,00	420,89	42,90			
80	10	10	6975,00	419,39	42,75	7383,33	443,94	45,25
			7200,00	432,91	44,13			
			7425,00	446,44	45,51			
			7375,00	443,44	45,20			
			7700,00	462,98	47,19			
			7625,00	458,47	46,73			
80	0	20	7925,00	476,51	48,57	7595,83	456,71	46,56
			7075,00	425,40	43,36			
			8925,00	536,63	54,70			
			6225,00	374,29	38,15			
			6600,00	396,84	40,45			
			8825,00	530,62	54,09			
70	30	0	9500,00	571,21	58,23	8143,33	489,63	49,91
			7925,00	476,51	48,57			
			7856,00	472,36	48,15			
			8075,00	485,53	49,49			
			7850,00	472,00	48,11			
			7654,00	460,21	46,91			
70	20	10	8150,00	490,04	49,95	8025,00	482,52	49,19
			8025,00	482,52	49,19			
			8375,00	503,56	51,33			
			7525,00	452,46	46,12			
			7500,00	450,95	45,97			
			8575,00	515,59	52,56			
70	10	20	7825,00	470,49	47,96	7862,50	472,75	48,19
			7300,00	438,93	44,74			
			6875,00	413,37	42,14			
			8475,00	509,58	51,94			
			8275,00	497,55	50,72			
			8425,00	506,57	51,64			
70	0	30	6225,00	374,29	38,15	8010,67	481,66	49,10
			7725,00	464,48	47,35			
			7893,00	474,58	48,38			
			8765,00	527,01	53,72			
			9800,00	589,24	60,07			
			7656,00	460,33	46,92			

Tabla 7.3 – Resistencia a compresión prismas a 90 días

7.1.1.2. Prismas. Ensayo de flexión

% ADICIÓN			7 días					
cemento	CV	CCA	carga (N)	Res. (kg/cm ²)	Res. (Mpa)	carga media (N)	Res. media (kg/cm ²)	Res. media (Mpa)
100	0	0	2859,00	65,73	6,70	3310,00	76,10	7,76
			3349,00	77,00	7,85			
			3722,00	85,58	8,72			
90	10	0	3462,00	79,60	8,11	3517,33	80,87	8,24
			3540,00	81,39	8,30			
			3550,00	81,62	8,32			
90	0	10	2609,00	59,99	6,11	2940,67	67,61	6,89
			3140,00	72,20	7,36			
			3073,00	70,65	7,20			
80	20	0	3434,00	78,96	8,05	3519,00	80,91	8,25
			3391,00	77,97	7,95			
			3732,00	85,81	8,75			
80	10	10	2440,00	56,10	5,72	2953,00	67,90	6,92
			3263,00	75,02	7,65			
			3156,00	72,56	7,40			
80	0	20	2066,00	47,50	4,84	2198,67	50,55	5,15
			2371,00	54,51	5,56			
			2159,00	49,64	5,06			
70	30	0	3369,00	77,46	7,90	3100,00	71,28	7,27
			2863,00	65,83	6,71			
			3068,00	70,54	7,19			
70	20	10	1784,00	41,02	4,18	2098,00	48,24	4,92
			2184,00	50,21	5,12			
			2326,00	53,48	5,45			
70	10	20	1879,00	43,20	4,40	2043,67	46,99	4,79
			1987,00	45,69	4,66			
			2265,00	52,08	5,31			
70	0	30	2134,00	49,07	5,00	2261,67	52,00	5,30
			2254,00	51,82	5,28			
			2397,00	55,11	5,62			

Tabla 7.4 – Resistencia a flexión prismas a 7 días

% ADICIÓN			28 días					
cemento	CV	CCA	carga (N)	Res. (kg/cm ²)	Res. (Mpa)	carga media (N)	Res. media (kg/cm ²)	Res. media (Mpa)
100	0	0	4290,00	98,64	10,05	4313,00	99,17	10,11
			4542,00	104,43	10,65			
			4107,00	94,43	9,63			
90	10	0	3855,00	88,63	9,04	3908,33	89,86	9,16
			3926,00	90,27	9,20			
			3944,00	90,68	9,24			
90	0	10	3541,00	81,42	8,30	3448,00	79,28	8,08
			3227,00	74,20	7,56			
			3576,00	82,22	8,38			
80	20	0	3346,00	76,93	7,84	3505,59	80,60	8,22
			3626,00	83,37	8,50			
			3544,76	81,50	8,31			
80	10	10	3429,00	78,84	8,04	3180,33	73,12	7,45
			2912,00	66,95	6,83			
			3200,00	73,58	7,50			
80	0	20	2543,00	58,47	5,96	2533,00	58,24	5,94
			2128,00	48,93	4,99			
			2928,00	67,32	6,86			
70	30	0	4230,00	97,26	9,91	3906,33	89,82	9,16
			3931,00	90,38	9,21			
			3558,00	81,81	8,34			
70	20	10	2365,00	54,38	5,54	2211,33	50,84	5,18
			2174,00	49,99	5,10			
			2095,00	48,17	4,91			
70	10	20	2320,00	53,34	5,44	2160,33	49,67	5,06
			2214,00	50,90	5,19			
			1947,00	44,77	4,56			
70	0	30	2462,00	56,61	5,77	2515,00	57,83	5,89
			2735,00	62,88	6,41			
			2348,00	53,99	5,50			

Tabla 7.5 – Resistencia a flexión prismas a 28 días

% ADICIÓN			90 días					
cemento	CV	CCA	carga (N)	Res. (kg/cm ²)	Res. (Mpa)	carga media (N)	Res. media (kg/cm ²)	Res. media (Mpa)
100	0	0	3708,00	85,26	8,69	4026,00	92,57	9,44
			4152,00	95,46	9,73			
			4218,00	96,98	9,89			
90	10	0	4320,00	99,33	10,13	3843,33	88,37	9,01
			3798,00	87,32	8,90			
			3412,00	78,45	8,00			
90	0	10	3140,00	72,20	7,36	3215,67	73,94	7,54
			3584,00	82,40	8,40			
			2923,00	67,21	6,85			
80	20	0	3282,00	75,46	7,69	3540,33	81,40	8,30
			3799,00	87,35	8,90			
			3540,00	81,39	8,30			
80	10	10	4043,00	92,96	9,48	4068,33	93,54	9,54
			4046,00	93,03	9,48			
			4116,00	94,64	9,65			
80	0	20	3790,00	87,14	8,88	3282,67	75,48	7,69
			3450,00	79,32	8,09			
			2608,00	59,96	6,11			
70	30	0	3370,00	77,48	7,90	3306,67	76,03	7,75
			3125,00	71,85	7,32			
			3425,00	78,75	8,03			
70	20	10	2450,00	56,33	5,74	2773,67	63,77	6,50
			3244,00	74,59	7,60			
			2627,00	60,40	6,16			
70	10	20	2574,00	59,18	6,03	2586,33	59,47	6,06
			2756,00	63,37	6,46			
			2429,00	55,85	5,69			
70	0	30	3457,00	79,48	8,10	3534,00	81,25	8,28
			3245,00	74,61	7,61			
			3900,00	89,67	9,14			

Tabla 7.6 – Resistencia a flexión prismas a 90 días

7.1.1.3. Prismas. Ensayo de absorción por capilaridad

% ADICIÓN			7 días			
cemento	CV	CCA	M1	M2	C kg/(m ² *min ^{0,5})	promedio C kg/(m ² *min ^{0,5})
100	0	0	271,05	272,73	0,168	0,16
			268,96	270,56	0,16	
			275,18	276,86	0,168	
			280,9	282,48	0,158	
			278,9	280,45	0,155	
			274,04	275,61	0,157	
90	10	0	245,46	247,17	0,171	0,17
			262,54	264,3	0,176	
			271,34	272,92	0,158	
			283,12	284,81	0,169	
			270,3	272	0,17	
			260,54	262,23	0,169	
90	0	10	288,7	289,95	0,125	0,12
			268,32	269,52	0,12	
			217,11	218,42	0,131	
			336,13	337,4	0,127	
			266,28	267,52	0,124	
			297,05	298,18	0,113	
80	20	0	284,33	286,08	0,175	0,16
			269,9	271,5	0,16	
			283,44	285,05	0,161	
			293,23	294,8	0,157	
			296,96	298,53	0,157	
			266,94	268,5	0,156	
80	10	10	258,05	259,32	0,127	0,12
			293,79	295,1	0,131	
			286,23	287,49	0,126	
			263,97	265,14	0,117	
			267,86	268,95	0,109	
			301,19	302,37	0,118	
80	0	20	275,16	276,04	0,088	0,10
			303,18	304,14	0,096	
			295,16	296,05	0,089	
			304,63	305,5	0,087	
			279,73	280,79	0,106	
			287,91	288,99	0,108	
70	30	0	280,79	282,51	0,172	0,17
			277,62	279,22	0,16	
			290,87	292,55	0,168	
			272,78	274,52	0,174	
			283,44	284,96	0,152	
			277,46	279,12	0,166	
70	20	10	288,35	289,16	0,081	0,10
			286,07	286,91	0,084	
			282,5	283,28	0,078	
			285,53	287,71	0,218	
			303,71	304,54	0,083	
			265,23	265,97	0,074	
70	10	20	278,99	280,05	0,106	0,10
			290,49	291,63	0,114	
			285,52	286,45	0,093	
			253,17	254,27	0,11	
			314,1	315,09	0,099	
			271,39	272,43	0,104	
70	0	30	281,87	282,98	0,111	0,12
			278,89	279,97	0,108	
			294,56	295,93	0,137	
			278,56	279,61	0,105	
			297,56	298,63	0,107	
			293,67	294,96	0,129	

Tabla 7.7 – Coeficiente de absorción a 7 días

% ADICIÓN			28 días			
cemento	CV	CCA	M1	M2	C kg/(m ² *min ^{0,5})	promedio C kg/(m ² *min ^{0,5})
100	0	0	272,62	274,28	0,166	0,17
			294,02	295,78	0,176	
			270,86	272,64	0,178	
			275,58	277,27	0,169	
			287,84	289,6	0,176	
			260,12	261,8	0,168	
90	10	0	281,73	283,31	0,158	0,15
			247,07	248,68	0,161	
			301,98	303,6	0,162	
			268,43	269,89	0,146	
			255,42	256,84	0,142	
			286,08	287,55	0,147	
90	0	10	295,45	296,11	0,066	0,07
			281,44	282,16	0,072	
			301,53	302,28	0,075	
			276,46	277,15	0,069	
			294,7	295,34	0,064	
			279,54	280,22	0,068	
80	20	0	297,53	299,28	0,175	0,15
			319,03	320,45	0,142	
			267,74	269,07	0,133	
			253,59	255,19	0,16	
			238,13	239,52	0,139	
			285,28	286,64	0,136	
80	10	10	298,19	299,01	0,082	0,08
			279,14	279,87	0,073	
			275,97	276,73	0,076	
			305,1	305,92	0,082	
			274,38	275,15	0,077	
			304,46	305,17	0,071	
80	0	20	286,83	287,72	0,089	0,09
			282,18	283,08	0,09	
			277,06	277,98	0,092	
			295,28	296,15	0,087	
			290,08	290,96	0,088	
			279,46	280,36	0,09	
70	30	0	293,47	294,73	0,126	0,12
			293,64	294,87	0,123	
			297,52	298,72	0,12	
			274,65	275,82	0,117	
			279,42	280,6	0,118	
			270,2	271,39	0,119	
70	20	10	288,35	289,1	0,075	0,07
			236,54	237,34	0,08	
			320,08	320,85	0,077	
			278,33	279,08	0,075	
			269,48	270,16	0,068	
			283,08	283,79	0,071	
70	10	20	291,3	291,91	0,061	0,06
			298,59	299,16	0,057	
			289,7	290,3	0,06	
			252,18	252,79	0,061	
			255,39	255,97	0,058	
			258,17	258,82	0,065	
70	0	30	273,31	274	0,069	0,07
			260,48	261,18	0,07	
			268,81	269,46	0,065	
			289,05	289,74	0,069	
			301,72	302,4	0,068	
			290,94	291,56	0,062	

Tabla 7.8 – Coeficiente de absorción a 28 días

% ADICIÓN			90 días			
cemento	CV	CCA	M1	M2	C kg/(m ² *min ^{0,5})	promedio C kg/(m ² *min ^{0,5})
100	0	0	317,17	318,34	0,117	0,12
			246,43	247,57	0,114	
			268,07	269,32	0,125	
			299,54	300,77	0,123	
			276,6	277,88	0,128	
			287,62	288,93	0,131	
90	10	0	323,49	324,54	0,105	0,11
			244,59	245,65	0,106	
			290,75	291,83	0,108	
			277,11	278,21	0,11	
			279,85	280,91	0,106	
			287,94	289,03	0,109	
90	0	10	284,64	285,42	0,078	0,08
			310,94	311,69	0,075	
			323,71	324,46	0,075	
			267,67	268,38	0,071	
			292,82	293,65	0,083	
			258,54	259,26	0,072	
80	20	0	297,65	298,54	0,089	0,08
			281,52	282,29	0,077	
			322,14	322,98	0,084	
			257,54	258,23	0,069	
			304,77	305,63	0,086	
			280,1	280,95	0,085	
80	10	10	277,56	278,21	0,065	0,06
			295,29	295,92	0,063	
			293,81	294,43	0,062	
			274,83	275,47	0,064	
			300,84	301,46	0,062	
			281,54	282,14	0,06	
80	0	20	299,16	299,67	0,051	0,05
			302,23	302,74	0,051	
			273,02	273,64	0,062	
			291,09	291,7	0,061	
			282,83	283,29	0,046	
			271,74	272,17	0,043	
70	30	0	279,31	280,39	0,108	0,09
			281,78	282,43	0,065	
			294,53	295,46	0,093	
			296,54	297,45	0,091	
			278,53	279,53	0,1	
			286,87	287,91	0,104	
70	20	10	291,19	291,8	0,061	0,06
			285,57	286,15	0,058	
			281,74	282,29	0,055	
			307,71	308,29	0,058	
			260,02	260,61	0,059	
			292,98	293,52	0,054	
70	10	20	254,17	254,78	0,061	0,08
			307,1	308,09	0,099	
			272,39	273,11	0,072	
			277,99	278,65	0,066	
			289,49	290,3	0,081	
			285,52	286,45	0,093	
70	0	30	283,91	284,78	0,087	0,09
			284,97	285,28	0,031	
			282,35	283,27	0,092	
			291,21	292,87	0,166	
			278,61	279,56	0,095	
			283,09	283,96	0,087	

Tabla 7.9 – Coeficiente de absorción a 90 días

7.1.1.4. Ensayo de fluidez

% ADICIÓN			prismas				tejas					
cemento	CV	CCA	resultado			promedio	fluidez (mm)	resultado			promedio	fluidez (mm)
100	0	0	167	169	166	167,33	175	172	176	175	174,33	174
			165	179	169	171,00		187	188	186	187,00	
						186,70		179	180	180	179,67	
90	10	0	160	155	159	160,00	190	164	165	163	164,00	187
			163	167	160	167,00		155	157	155	155,67	
			166	167	168	167,00						
90	0	10	143	144	140	142,33	142	154	156	153	154,33	145
			128	131	131	130,00		144	146	145	145,00	
			133	131	132	132,00						
80	20	0	185	192	190	189,00	195	192	192	200	194,67	189
			192	193	191	192,00		183	182	184	183,00	
80	10	10	173	175	175	174,33	159	163	167	162	164,00	160
			147	144	148	146,33		148	149	147	148,00	
			157	156	158	157,00		167	168	166	167,00	
80	0	20	131	131	134	132,00	132	145	146	147	146,00	146
			140	139	142	140,33						
			146	145	147	146,00						
70	30	0	200	200	200	200,00	202	198	195	197	196,67	198
			169	168	168	199,00		198	195	197	200,00	
			196	195	197	196,00		181	185	193	186,33	
70	20	10	190	189	196	191,67	167	181	190	188	186,33	173
			154	154	152	153,33		164	164	168	165,33	
			155	153	159	155,67		175	168	178	173,67	
70	10	20	134	137	133	135	145	143	150	151	148,00	148
			156	158	157	156,00						
70	0	30					124	124	125	123	124,00	124
			124	120	120	121,33						

Tabla 7.10 – Fluidez mezclas

7.1.1.5. Tejas. Ensayo de flexión

% ADICIÓN			7 días			
cemento	CV	CCA	carga(N)	espesor (mm)	carga media (kg)	carga media (N)
100	0	0	670,38	8,80	71,48	701,18
			717,33	8,48		
			715,82	8,29		
90	10	0	743,39	8,87	78,44	769,52
			795,65	9,02		
90	0	10	834,00	8,78	93,02	912,50
			991,00	9,12		
80	20	0	844,10	8,62	88,24	865,60
			887,09	9,04		
80	10	10	970,00	8,20	93,99	922,00
			874,00	8,32		
80	0	20	749,00	8,78	83,69	820,98
			892,96	9,08		
70	30	0	707,00	8,73	69,04	677,25
			647,50	9,06		
70	20	10	635,80	8,56	84,62	830,10
			1024,40	10,33		
70	10	20	698,00	8,34	71,90	705,33
			715,00	8,63		
			703,00	8,90		
70	0	30	734,00	9,10	75,23	738,00
			715,00	9,00		
			765,00	8,80		

Tabla 7.11 – Carga soportada a flexión tejas a 7 días

% ADICIÓN			28 días			
cemento	CV	CCA	carga(N)	espesor (mm)	carga media (kg)	carga media (N)
100	0	0	1078,00	10,60	102,24	1003,00
			928,00	9,50		
90	10	0	1054,00	10,82	98,13	962,64
			871,28	9,50		
90	0	10	1140,00	9,78	117,40	1151,67
			1141,00	8,63		
			1174,00	9,20		
80	20	0	978,00	8,70	100,25	983,50
			989,00	8,90		
80	10	10	808,00	8,30	89,16	874,67
			832,00	9,20		
			984,00			
80	0	20	1082,00	9,76	96,31	944,84
			807,68	8,37		
70	30	0	825,70	8,90	92,42	906,65
			987,60	9,46		
70	20	10	902,00	7,60	94,62	928,20
			954,40	9,70		
70	10	20	1039,40	8,82	105,74	1037,30
			1035,20	8,38		
70	0	30	1034,00	9,10	103,72	1017,50
			1001,00	9,54		

Tabla 7.12 – Carga soportada a flexión tejas a 28 días

% ADICIÓN			91 días			
cemento	CV	CCA	carga(N)	espesor (mm)	carga media (kg)	carga media (N)
100	0	0	1296,00	9,50	104,54	1025,57
			874,00	8,70		
			906,70	9,00		
90	10	0	892,45	9,70	97,66	958,09
			862,82	9,30		
			1119,00	9,30		
90	0	10	1339,97	9,40	140,47	1377,99
			1416,00	10,23		
80	20	0	1031,72	10,08	105,12	1031,23
			1030,74	9,50		
80	10	10	1209,00	9,70	119,72	1174,50
			1140,00	9,52		
80	0	20	1179,00	9,34	129,20	1267,50
			1356,00	9,60		
70	30	0	966,93		110,02	1079,31
			1269,00	10,00		
			1002,00	9,00		
70	20	10	935,04	8,90	99,77	978,72
			1022,40	8,70		
70	10	20	981,15	8,80	104,65	1026,58
			1072,00	9,02		
70	0	30	884,93	8,20	111,28	1091,64
			1200,00	10,00		
			1190,00	9,50		

Tabla 7.13 – Carga soportada a flexión tejas a 90 días

7.1.1.6. Tejas. Ensayo de impacto

% ADICIÓN			7 días		28 días		90 días	
cemento	CV	CCA	Impactos	promedio	Impactos	promedio	Impactos	promedio
100	0	0	2	2	2	2,25	2	2,75
			2		2		3	
			2		2		3	
			2		3		3	
90	10	0	2	2	3	2,25	3	2,25
			2		2		2	
			2		2		2	
			2		2		2	
90	0	10	2	2	2	2	4	2,75
			2		2		3	
			2		2		2	
			2		2		2	
80	20	0	2	2	2	2	2	2,25
			2		2		2	
			2		2		2	
			2		2		3	
80	10	10	2	2	2	2	2	2,25
			2		2		2	
			2		2		3	
			2		2		2	
80	0	20	3	2,25	2	2	2	2,25
			2		2		2	
			2		2		3	
			2		2		2	
70	30	0	2	2	2	2,25	2	2
			2		3		2	
			2		2		2	
			2		2		2	
70	20	10	2	2	2	2	2	2
			2		2		2	
			2		2		2	
			2		2		2	
70	10	20	2	2	2	2	2	2
			2		2		2	
			2		2		2	
			2		2		2	
70	0	30	2	2	2	2,5	2	2,25
			2		3		3	
			2		3		2	
			2		2		2	

Tabla 7.14 – Resistencia a impacto tejas a 7, 28 y 90 días

7.1.2. Lima

7.1.2.1. Serie I. Ensayo de compresión

% Puzolana	Probeta	Carga soportada (Kg)				Res. (Kg/cm ²)	Res. (Mpa)
		Probeta I	Probeta II	Probeta III	Promedio		
0%	P-B	7600	7390	8445	7811,67	312,47	30,65
10%	CI-1-B	4300	4040	4550	4296,67	171,87	16,86
	CII-1-B	3945	4260	4130	4111,67	164,47	16,13
	CIII-1-B	5380	5030	4960	5123,33	204,93	20,10
	CIV-1-B	4390	4750	4490	4543,33	181,73	17,83
	CV-1-B	4540	4740	4560	4613,33	184,53	18,10
	PI-1-B	5640	5330	5570	5513,33	220,53	21,63
	PII-1-B	5530	5490	5660	5560,00	222,40	21,82
10%	PIII-1-B	5530	5450	5640	5540,00	221,60	21,74
20%	CI-2-B	2315	2165	2220	2233,33	89,33	8,76
	CII-2-B	2715	2750	2665	2710,00	108,40	10,63
	CIII-2-B	3980	3650	3940	3856,67	154,27	15,13
	CIV-2-B	3300	3330	3360	3330,00	133,20	13,07
	CV-2-B	3700	3690	3590	3660,00	146,40	14,36
	PI-2-B	4100	3760	3810	3890,00	155,60	15,26
	PII-2-B	4230	3940	4080	4083,33	163,33	16,02
20%	PIII-2-B	4450	4050	3960	4153,33	166,13	16,30
30%	CI-3-B	1460	1590	1565	1538,33	61,53	6,04
	CII-3-B	1880	1830	1950	1886,67	75,47	7,40
	CIII-3-B	2530	2760	2750	2680,00	107,20	10,52
	CIV-3-B	1830	1660	1800	1763,33	70,53	6,92
	CV-3-B	2110	2210	2170	2163,33	86,53	8,49
	PI-3-B	3210	3300	3340	3283,33	131,33	12,88
	PII-3-B	3290	3190	3160	3213,33	128,53	12,61
30%	PIII-3-B	3150	2980	3430	3186,67	127,47	12,50
0%	P-A	5430	5805	5585	5606,67	224,27	22,00
10%	CI-1-A	3415	3490	3450	3451,67	138,07	13,54
	CII-1-A	3300	3395	4040	3578,33	143,13	14,04
	CIII-1-A	4005	4210	4320	4178,33	167,13	16,40
	CIV-1-A	3120	3210	3240	3190,00	127,60	12,52
	CV-1-A	2975	2990	2970	2978,33	119,13	11,69
	PI-1-A	4015	4195	4290	4166,67	166,67	16,35
	PII-1-A	3050	2960	3045	3018,33	120,73	11,84
10%	PIII-1-A	4315	4605	4265	4395,00	175,80	17,25
20%	CI-2-A	rota	2430	2245	2337,50	93,50	9,17
	CII-2-A	2620	2590	2555	2588,33	103,53	10,16
	CIII-2-A	2480	2530	2640	2550,00	102,00	10,01
	CIV-2-A	2040	2010	1960	2003,33	80,13	7,86
	CV-2-A	2065	2150	2275	2163,33	86,53	8,49
	PI-2-A	3355	3450	3145	3316,67	132,67	13,01
	PII-2-A	4520	4045	4620	4395,00	175,80	17,25
20%	PIII-2-A	2195	2445	2260	2300,00	92,00	9,03
30%	CI-3-A	1305	1250	1510	1355,00	54,20	5,32
	CII-3-A	1965	2010	1915	1963,33	78,53	7,70
	CIII-3-A	1870	1780	1845	1831,67	73,27	7,19
	CIV-3-A	1270	1265	1260	1265,00	50,60	4,96
	CV-3-A	1435	1430	1460	1441,67	57,67	5,66
	PI-3-A	2240	2350	2290	2293,33	91,73	9,00
	PII-3-A	2170	2390	2345	2301,67	92,07	9,03
30%	PIII-3-A	2215	2330	2430	2325,00	93,00	9,12

Tabla 7.15 – Resistencia a compresión serie I

7.1.2.2. Serie II. Ensayo de compresión

% Puzolana	Probeta	Carga soportada (kg)				Promedio	Res. (Kg/cm ²)	Res. (Mpa)
		Probeta I	Probeta II	Probeta III				
0%	P-C	7330	8070	8230	7876,67	315,07	30,91	
20%	CIII-2-C	4200	4650	4880	4576,67	183,07	17,96	
	CV-2-C	4380	4490	4400	4423,33	176,93	17,36	
	PI-2-C	5310	5070	5420	5266,67	210,67	20,67	
	PIII-2-C	5420	5400	5630	5483,33	219,33	21,52	

Tabla 7.16 – Resistencia a compresión serie II

7.1.2.3. Serie III. Ensayo de compresión

% Puzolana	Probeta	Carga soportada (kg)				Promedio	Res. (Kg/cm ²)	Res. (Mpa)
		Probeta I	Probeta II	Probeta III				
0%	P-A	9300	9900	10010	9736,67	389,47	39,74	
20%	CI-2-A	6380	6850	6040	6423,33	256,93	26,22	
20%	CII-2-A	6800	6850	6040	6563,33	262,53	26,79	
20%	CIII-2-A	3190	3000	2530	2906,67	116,27	11,86	
20%	CV-2-A	6080	5580	6650	6103,33	244,13	24,91	
20%	PI-2-A	6640	7070	7170	6960,00	278,40	28,41	
20%	PII-2-A	6160	6660	6870	6563,33	262,53	26,79	
20%	PIII-2-A	7200	6960	7060	7073,33	282,93	28,87	
0%	P-B	12200	12400	12250	12283,33	491,33	50,14	
20%	CI-2-B	8260	8080	8000	8113,33	324,53	33,12	
20%	CII-2-B	8090	8150	8140	8126,67	325,07	33,17	
20%	CIII-2-B	3110	3540	3410	3353,33	134,13	13,69	
20%	CV-2-B	7990	8550	8350	8296,67	331,87	33,86	
20%	PI-2-B	8320	8350	9100	8590,00	343,60	35,06	
20%	PII-2-B	6750	7750	7740	7413,33	296,53	30,26	
20%	PIII-2-B	8460	8340	8280	8360,00	334,40	34,12	
0%	P-C	9000	9750	10550	9766,67	390,67	39,86	
20%	CI-2-C	7750	8350	8800	8300,00	332,00	33,88	
20%	CII-2-C	8250	9400	8600	8750,00	350,00	35,71	
20%	CIII-2-C	3650	4000	3650	3766,67	150,67	15,37	
20%	CV-2-C	9500	8200	7800	8500,00	340,00	34,69	
20%	PI-2-C	12050	11200	9500	10916,67	436,67	44,56	
20%	PII-2-C	8550	9850	10850	9750,00	390,00	39,80	
20%	PIII-2-C	5800	6700	9400	7300,00	292,00	29,80	

Tabla 7.17 – Resistencia a compresión serie III

PLANOS