

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Activación térmica de arcillas, relación entre las condiciones de obtención de los desechos cerámicos y la actividad puzolánica.

Autor: Elier Pérez Toledo.

Tutor: Dr.Ing. Iván Machado López.

Consultante: Dr.Ing. Yosvany Díaz Cárdenas

Santa Clara.

2017

Pensamiento

Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad.

Albert Einstein.

Dedicatoria

A mi madre por siempre inculcarme la necesidad de estudiar y superarme,

A mi abuela por siempre creer en mí y apoyarme incondicionalmente,

A mis hermanos, mi tía Susy y mi tío por su apoyo,

A Danitza por estar a mi lado y saber sacar lo mejor de mí,

A mis amigos que siempre han estado ahí, siempre...

Agradecimientos.

A mi mamá, mis hermanos, mi abuela y tíos por todo el apoyo en estos cinco años.

A mi novia Danitza y a mis suegros por estar pendientes de mí y apoyarme con mucho cariño.

A mis amigos que me han ayudado estos cinco años a ser mejor cada día.

A mi tutor, a Yosvany, Daíram, Adrián, Giselle y María B. por su gran ayuda y guía en la realización de este trabajo.

A Joel y Felipe que me brindaron todo su conocimiento y experiencia.

A todos los profesores que de una forma u otra contribuyeron a mi formación.

A todos muchas gracias.

RESUMEN

El presente trabajo evalúa el uso de los desechos cerámicos como un material puzolánico sustituto parcial del CPO. Este material puzolánico es la arcilla calcinada obtenida a partir de la molturación de piezas de cerámica roja, obtenidas estas a partir de la producción de ladrillos a distintas temperaturas, y utilizada en la producción a escala local de cementos de bajo carbono (CBC) LC3, para su posterior utilización en la fabricación de hormigones y morteros. Los aglomerantes fabricados presentan una sustitución del 50% del cemento P-35 por un 50% de LC2, el cual está constituido por un 60% de polvo de ladrillo, un 30% de caliza y un 10% de yeso. También son elaborados morteros (70-30) a partir de una sustitución del 30% del P-35 por arcilla calcinada. Los hormigones y morteros fueron utilizados en la elaboración de probetas cilíndricas de 200x100mm y probetas prismáticas de 160x40x40mm, respectivamente. Los ensayos realizados con presencia de CBC fueron: resistencia a compresión, calorimetría isotérmica, determinación del contenido de aire en la mezcla, asentamiento por el cono de Abrams y minicono. La arcilla calcinada fue evaluada por la calorimetría isotérmica, protocolo R³, y resistencia a compresión en probetas prismáticas (70-30). Estos ensayos son realizados con el objetivo de determinar la temperatura idónea a que debe ser calcinada la arcilla para obtener un mayor índice actividad puzolánica.

Palabras claves: Desechos cerámicos, cemento bajo carbono, actividad puzolánica.

SUMMARY

The present work evaluates the use of ceramic waste as a partial pozzolanic substitute material of the CPO. This pozzolanic material is the calcined clay obtained from the grinding of red ceramic pieces, obtained from the production of bricks at different temperatures, and used in the local scale production of low carbon cements (CBC) LC3, For its later use in the manufacture of concrete and mortars. The binders manufactured have a 50% substitution of the P-35 cement with 50% LC2, which is constituted by 60% of brick powder, 30% of limestone and 10% of gypsum. Mortars (70-30) are also made from a 30% substitution of P-35 for calcined clay. The concretes and mortars were used in the elaboration of cylindrical specimens of 200x100mm and prismatic specimens of 160x40x40mm, respectively. The tests with presence of CBC were: compressive strength, isothermal calorimetry, determination of the air occluded in the mixture, settlement by the cone of Abrams and minicono. The calcined clay was evaluated by isothermal calorimetry, R3 protocol, and compressive strength in prismatic specimens (70-30). These tests are performed with the objective of determining the ideal temperature at which the clay should be calcined to obtain a higher pozzolanic index. Key words: Ceramic debris, cement under carbon, pozzolanic activity.

Contenido

RESUMEN	5
Introducción.....	10
Situación problemática:	11
Problema Científico:	11
Hipótesis de investigación:.....	11
Objetivo General:	11
Objetivos específicos:	12
Tareas Científicas:	12
Capítulo 1: Fundamentos teóricos sobre la activación térmica de arcillas para su uso como material cementicios suplementario. Producción de Cemento de bajo carbono (CBC).	13
1.1 El Cemento Portland (CPO). Generalidades.....	13
1.2 Materiales Cementicios Suplementarios (MCS).	14
1.2.1 Puzolanas.....	15
1.2.2 Cemento de bajo carbono (CBC).	16
1.2.2.1 Yeso	17
1.2.2.2 Caliza	18
1.3 Arcillas. Generalidades.....	20
1.3.1 Composición de las arcillas.	21
1.3.2 Depósitos de arcilla en el mundo.	21
1.3.2.1 Depósitos de arcilla reportados en Cuba.....	22
1.3.3. Las arcillas como fuente de materia prima para la producción de cerámica.....	23
1.3.3.1. Producción de ladrillos y otras cerámicas rojas. Características térmicas de los procesos tecnológicos.....	23
1.4. Activación térmica de las arcillas.	24
1.4.1. El sistema ternario CP – AAT- Caliza. Reacciones puzolánicas, fundamento de la producción industrial y local del LC3.	26
1.4.2. Relación entre el tratamiento térmico, las características físico – mineralógicas de la arcilla y la reactividad puzolánica.	27
1.5. Métodos para la determinación de la reactividad puzolánica.....	27
1.5.1. Resistencia a la compresión e índice de reactividad puzolánica.	29

1.5.2. Método R3.....	30
1.6 Conclusiones parciales	32
Capítulo 2: Estudio experimental de la activación térmica de arcillas a partir de la producción local de cerámica roja. Determinación de la actividad puzolánica. 33	
2.1. Generalidades	33
2.2. Diseño experimental.	34
2.3. Producción de ladrillos en condiciones de laboratorio.....	35
2.4. Materias primas utilizadas. Caracterización.	36
2.4.1 Cemento P-35 de la fábrica de Cienfuegos.....	36
2.4.2 LC3-50.....	38
2.4.3 Arena sílice normalizada utilizada en la elaboración de los morteros.	38
2.4.4 Áridos procedentes del Purio. Informe de Ensayo. Áridos.	40
2.4.5 Aditivo Dynamon SX 32 utilizado en la producción de hormigón.	42
2.4.6 Caracterización del material arcilloso originario.	43
2.4.7 Caliza	48
2.4.8 Yeso	48
2.4.9 Agua.....	48
2.5. Características del proceso de producción de los ladrillos de cerámica roja en el combinado de Manicaragua.....	49
2.6. Determinación de la resistencia mecánica de probetas prismáticas. Amasado del Mortero. Moldeado de las Probetas. Resistencia a compresión.....	50
2.6.1 Amasado del Mortero.	51
2.6.2 Moldeado de las Probetas.....	52
2.6.3 Resistencia a compresión.	55
2.7. Proceso de producción de probetas cilíndricas 200x100mm.....	56
2.8 Chequeo de la consistencia.	57
2.9 Curado de las probetas.....	57
2.10. Minicono. Procedimiento para la determinación de la plasticidad.....	58
2.10.1 Diámetro medio de la pastilla.	59
2.11 Contenido de aire en la mezcla.....	60
2.12 Calorimetría	61
2.13 Dosificaciones.....	62
2.13.1 Mortero.....	62
2.13.1.2 Mortero LC3	62
2.13.1.3 Mortero P 35.....	63
2.13.2 Hormigón elaborado con LC3.....	63

2.13.2.1 LC3 (cemento CP 50% + LC2 50 % respectivamente).....	64
2.13.3 Minicono	65
2.13.4 Calorimetría	65
2.13.5 Contenido de aire en la mezcla	65
2.14 Conclusiones parciales	66
Capítulo 3: Análisis y discusión de los resultados de la evaluación de la reactividad puzolánica de los materiales cerámicos obtenidos en diferentes condiciones.	67
3.0. Introducción.	67
3.1.1 Probetas 70-30 (70% de cemento y 30% de arcilla) y patrón de P35.	67
3.1.1.1 Análisis estadísticos para las cuatro series más la referencia de P35 utilizando el programa Statgraphics Centurion.....	70
3.1.2 Probetas LC3 y patrón P35.	73
3.1.2.1 Análisis estadísticos para las dos series más la referencia de P35 utilizando el programa Statgraphics Centurion.....	75
3.2 Análisis de resultados de la resistencia mecánica de las probetas cilíndricas 200x100mm.....	78
3.2.1 Análisis estadísticos para las series de 800°C y Manicaragua utilizando el programa Statgraphics Centurion.....	79
3.3 Chequeo de la consistencia.	82
3.4 Análisis de resultados minicono.	82
3.5 Calorimetría.	83
3.5.1 Protocolo R3.....	84
3.5.2 Calorimetría isotérmica.....	85
3.6 Cálculo del contenido de aire en el hormigón.....	86
3.7 Conclusiones parciales	88
Conclusiones Generales	89
Bibliografía	90
Anexos	93

Introducción.

La construcción no es una actividad amigable con el medio ambiente, ya que genera efectos sobre la tierra, agotamiento de recursos naturales, generación de residuos y diversas formas de contaminación como son las emisiones antropogénicas de CO₂. El Cemento Portland Ordinario (CPO) es uno de los materiales más empleados a nivel mundial, se fabrica aproximadamente en 150 países, principalmente en Asia, Europa, y el Medio Oriente. Su volumen de producción para el 2020 aumentará entre el 120-180%, sin embargo, en los procesos de fabricación del cemento grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) son liberadas a la atmósfera, principalmente durante la elaboración del clínker, en este sentido la industria del cemento es responsable de entre el 5 y el 8 % de las emisiones globales de CO₂ al emplear alrededor del 6 % del consumo total de energía del sector industrial mundial. Por lo tanto, constituye un reto ingenieril la búsqueda de soluciones para disminuir el impacto ambiental negativo de esta producción sin afectar las propiedades y demanda de este producto. Debido a la importancia del cemento en la industria de la construcción, muchos estudios se han ocupado de sus perspectivas futuras: Mejoras en el horno del cemento, el uso de combustibles alternativos y adiciones minerales, entre otros, que permitirán a la industria del cemento reducir las emisiones de CO₂. (Hernández., 2014). Entre las vías para disminuir estas emisiones en la producción de CPO se encuentra la modernización tecnológica, el uso de combustibles alternativos y la disminución del contenido de clínker.

Entre las soluciones más extendidas a este problema se encuentra el empleo de adiciones minerales con carácter puzolánico, o puzolanas, al cemento Portland, con lo cual se incrementa en general su resistencia mecánica y durabilidad frente a un determinado número de agentes ambientales. Además, esta solución permite disminuir la cantidad de clínker a producir, por lo que también se minimiza el impacto ambiental negativo que se genera durante la producción del CPO a la vez que se obtienen beneficios en el ámbito económico, ambiental e ingenieril. (Machado, 2016).

El empleo de materiales puzolánicos como sustitutos parciales del CPO es una solución que ha alcanzado gran demanda a escala internacional principalmente en los países desarrollados en los que los desechos del sector industrial constituyen su fuente principal de materiales puzolánicos; llegando a surgir nuevas variantes del Portland como los cementos Puzolánicos y los cementos de mezcla. Sin embargo, en los países de menor desarrollo industrial aún constituye un reto el desarrollo de alternativas y

tecnologías para la obtención y empleo de materiales puzolánicos bajo sus propias condiciones. (Machado, 2016)

Situación problemática:

La fabricación de Cemento Portland constituye uno de los procesos industriales más contaminantes a escala global, por ello urge buscar soluciones a partir de nuevos materiales que mantengan las propiedades físico-mecánicas del mismo y que a su vez disminuyan los costos de producción y los niveles de contaminación, en este sentido la producción local de materiales de construcción cuenta en muchos casos con limitadas posibilidades en cuanto a materiales aglomerantes de ahí que resulte recomendable el uso de extensores para el cemento portland.

De ahí que los materiales cementicios suplementarios (MCS) se presenten como una adecuada alternativa, específicamente las arcillas activadas térmicamente procedentes de yacimientos con diversa composición químico – mineralógica y probable bajo contenido equivalente de uso común en la fabricación local de elementos de cerámica, de igual modo los desechos de la industria cerámica se convierten en un problema ambiental con posible solución al ser reutilizados como puzolanas.

Problema Científico:

¿Qué relación se establece entre el proceso tecnológico de producción de elementos cerámicos a diferentes temperaturas y las propiedades puzolánicas que adquiere este material?

Hipótesis de investigación:

Si la temperatura a la cual se obtienen productos de cerámica roja (ladrillos, rasillas, etc.) en talleres de producción no industrial provoca la deshidroxilación de la arcilla, entonces es posible la obtención de material con reactividad puzolánica para obtener cemento LC3 según su formulación para talleres locales.

Objetivo General:

Evaluar la activación térmica de arcillas al obtener material de la producción de cerámica roja (ladrillos y rasillas) procedentes de la producción semi - industrial y en condiciones de temperatura controlada en laboratorio para su utilización como puzolanas.

Objetivos específicos:

Evaluar el proceso de obtención de materiales cerámicos a diferentes escalas de producción (artesanal y semi-industrial), esclareciendo el régimen térmico a que es sometida la arcilla en cada caso.

Precisar el índice de actividad puzolánica para diferentes fuentes de material arcilloso sometido a activación térmica.

Tareas Científicas:

Establecer las características de los hornos de producción local de materiales cerámicos en la región central (Dimensiones, producción, consumo de energía, modelación del tratamiento térmico)

Determinar el índice de actividad puzolánica (IAP) de los desechos procedentes de la producción local de materiales cerámicos.

Determinar el índice de puzolanicidad de las arcillas activadas térmicamente.

Comparar los resultados obtenidos.

Capítulo 1: Fundamentos teóricos sobre la activación térmica de arcillas para su uso como material cementicios suplementario. Producción de Cemento de bajo carbono (CBC).

1.1 El Cemento Portland (CPO). Generalidades.

El Cemento Portland, es el producto resultante de la pulverización, muy fina, del clínker (o clínquer) obtenido calcinando a fusión incipiente una mezcla rigurosamente homogénea de materiales calcáreos y arcillosos. Al clínker no se le agrega ningún producto después de calcinado a excepción de agua y yeso (calcinado o no). Esencialmente es un clínker finamente pulverizado, producido por la cocción a elevadas temperaturas, de mezclas que contiene cal, alúmina, fierro y sílice en proporciones, previamente establecidas, para lograr las propiedades deseadas. El clínker se presenta en la forma de pequeñas esferas de hasta 2 cm de diámetro y de un color gris negruzco. El cemento Portland, es un polvo de color gris, más o menos verdoso, de gran valor como material estructural, a consecuencia de alcanzar dureza pétrea después de ser amasado con agua, es también un aglomerante hidráulico por excelencia. (Vera, 2013)

El endurecimiento hidráulico del cemento se debe principalmente a la hidratación de los silicatos de calcio, aunque también pueden participar en el proceso de endurecimiento otros compuestos químicos como, por ejemplo, los aluminatos

Las principales materias primas empleadas para la fabricación del cemento son:

Materiales calcáreos: calizas arcillosas, calizas, margas, creta o tiza

Materiales arcillosos: exfoliables, estratificadas, desagregadas, pizarras.

Productos industriales: escorias de altos hornos, álcalis residuales.

Al ser amasado el cemento con agua se produce su endurecimiento o petrificación, en un +- periodo de tiempo más o menos corto. Este endurecimiento es debido principalmente a la hidratación y consecuente cristalización de los componentes.

En el proceso de petrificación del cemento, se pueden distinguir dos etapas perfectamente marcadas, la primera se llama fragua y la segunda endurecimiento. La fragua es la pérdida de plasticidad o de fluidez que sufre la pasta de cemento con el transcurso del tiempo y que hace que este soporte, sin dejar huellas aparentes, la presión suave de un objeto exterior. El endurecimiento es la mayor resistencia

estructural que va adquiriendo el cemento con el transcurso del tiempo. (Rodríguez, 2015)

En el fraguado hay que distinguir dos periodos: el principio de la fragua y el final de la fragua o conclusión de la fragua. El principio de la fragua es el tiempo transcurrido desde el momento en que se vierte el agua del amasado, hasta aquel en que la pasta pierde parcialmente, la plasticidad.

El final del fraguado es el tiempo transcurrido desde que la pasta ha comenzado a perder plasticidad, hasta que adquiere suficiente consistencia para resistir determinada presión.

La finura de molido o de molturación en los materiales, se aprecia por medio de los análisis granulométricos, que consiste en hacerlos pasar a través de tamices, cribas o zarandas, apreciando los porcentajes en peso que atraviesan el material. El grado de finura es la de mayor importancia, porque se ha determinado que el agua no actúa sino en una profundidad de 0.1mm de los granos, y como el agua es indispensable para la cristalización o fragua, se comprende la necesidad de que el cemento posea la finura conveniente a fin de que la película de agua que rodea cada grano lo atraviese. (Vera, 2013)

1.2 Materiales Cementicios Suplementarios (MCS).

Los materiales cementicios suplementarios (MCS) son una alternativa a la disminución en el consumo energético y en las emisiones de gases de efecto invernadero por volumen del aglomerante, obteniéndose además ventajas desde puntos de vista ingenieril, económico y ecológico. Los Materiales Cementicios Suplementarios (MCS) se definen como materiales que contribuyen a las propiedades físico-químicas del hormigón endurecido. Se clasifican en aglomerantes hidráulicos y materiales puzolánicos. Los aglomerantes hidráulicos se caracterizan por reaccionar con agua formando productos de hidratación que aportan propiedades cementantes y aglomerantes puzolánicos.

En general, estas materias primas cerámicas se presentan originariamente en la naturaleza formando acumulaciones minerales o rocosas, a partir de las cuales se extraen los materiales útiles para la fabricación cerámica, bien en su estado natural o bien sometiendo los materiales brutos a un proceso de lavado y enriquecimiento en su contenido mineral. No obstante, debe destacarse que a largo plazo la existencia de

subproductos no satisface la creciente demanda de materiales cementicios suplementarios que estará asociada al aumento en la producción de cemento en los próximos años. Sin embargo, existen otras fuentes de reservas de materiales puzolánicos, como las puzolanas naturales y las arcillas, que presentan una alta reactividad puzolánica una vez activadas térmicamente. (Ruben Snellings, 2012)

1.2.1 Puzolanas.

La palabra puzolana se comenzó a utilizar en Italia y fue para describir las cenizas volcánicas de "Pozzouli", una villa cerca de Nápoles. Las cenizas provenían de las erupciones del volcán Vesubio.

Las puzolanas de origen natural son derivadas de erupciones volcánicas, excepto las tierras diatomáceas, las cuales están formadas por silicatos amorfos hidratados derivados de los esqueletos de microorganismos acuáticos. Los materiales de las erupciones volcánicas están compuestos principalmente de aluminosilicatos que, al enfriarse bruscamente, resultan en la formación de materiales con estructura desordenada o vítrea con minerales pobremente cristalinos.

El uso de las puzolanas en la industria del cemento se viene dando desde hace varias décadas, estas reaccionan con la cal que liberan las fases del cemento al hidratarse y forman el gel de tobermorita, responsable de darle las propiedades cementicias a los cementos. Existen dos tipos de puzolanas, las naturales y las artificiales: Las puzolanas naturales y las que se obtienen como subproducto de otros procesos se adicionan directamente al cemento, mientras que las artificiales que no se obtienen como subproductos de otros procesos necesitan de un proceso de activación adicional para poder ser agregadas al cemento. (CANTU, 2011)

Las puzolanas de origen natural se derivan de erupciones volcánicas, excepto las tierras diatomáceas, las cuales son formadas por silicatos amorfos hidratados, derivados de esqueletos de microorganismos acuáticos. El material de las erupciones volcánicas, compuesto principalmente de aluminosilicatos, es enfriado bruscamente, lo cual resulta en la formación de materiales con estructura desordenada o vítrea con materiales pobremente cristalinos. A la combinación de estructura pobremente cristalina o vítrea que puede poseer alta área superficial se le atribuye la reactividad de estos materiales. (Rivera, 2010)

El uso de materiales puzolánicos es una práctica bastante habitual en la preparación de morteros y hormigones. Una de las claves para el correcto uso de este tipo de materiales es conocer su capacidad de reacción frente a portlandita, Ca(OH)_2 , liberada por el cemento en su hidratación, es decir el desarrollo de la reacción puzolánica. Para caracterizar una puzolana desde el punto de vista de su reactividad se pueden aplicar diversos métodos, los cuales se clasifican químicos, físicos y mecánicos.

Al parecer los más conocidos desde el punto de vista de la ingeniería son los métodos mecánicos, a través de dichos métodos, se evalúa la contribución de la reacción puzolánica en el desarrollo de la resistencia mecánica a compresión de los morteros y hormigones de cemento que contienen la puzolana. A nivel general, se establecen una serie de parámetros para evaluar la actividad puzolánica de un material: tiempo de curado, temperatura de curado, relación agua/cemento, proporción de puzolana en el conglomerante, y tipo de cemento, entre otros. Al realizar evaluaciones de la actividad puzolánica de un material se deben fijar al menos estos parámetros, los antes mencionados, para poder interpretar los datos mecánicos obtenidos. (J. Payá, 2012).

Los materiales puzolánicos son una subcategoría dentro de los materiales cementicios suplementarios. La ASTM define como puzolanas a aquellos productos naturales o artificiales, silíceos o aluminosilíceos que, por sí mismos, poseen poca o ninguna propiedad aglomerante, pero que, finamente molidos y en presencia de agua, reaccionan químicamente con el Ca(OH)_2 a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes. Bajo esta definición se engloban materiales de muy diferente naturaleza, que van desde rocas y sedimentos a residuos industriales o agrícolas y arcillas calcinadas. (Díaz, 2010)

1.2.2 Cemento de bajo carbono (CBC).

A medida que la economía cubana cambia, la demanda de materiales de construcción crece de forma extremadamente rápida: la demanda de cemento se espera crezca más de un 70% en los próximos 3 años. Cuba no dispone en la actualidad de la capacidad productiva propia para mantener este crecimiento. Adicionalmente, la producción de cemento demanda un uso intensivo de recursos y genera emisiones de carbono. Uno de los retos de Cuba es encontrar formas de producir más cemento con el clínker que hoy día se produce en el país, para abastecer la demanda con un bajo impacto ambiental.

La respuesta viene en forma de una cooperación a largo plazo realizada entre la Escuela Politécnica Federal de Lausana en Suiza y la Universidad Central de las Villas en Cuba. Una combinación única entre investigación fundamental y aplicación directa en la práctica ha demostrado que las arcillas caoliníticas de bajo grado, de amplia abundancia, podrían ser utilizadas como un material alternativo de bajo carbono. Los resultados iniciales de las pruebas industriales realizados en Cuba han sido confirmados por un proyecto más amplio que involucra a un grupo de organizaciones académicas y de desarrollo en la India.

El nuevo producto o cemento conocido como LC3, permite casi duplicar la cantidad de cemento producido a partir de la misma cantidad de caliza al sustituir una gran parte del clínker (material intermedio producido a partir de calcinar caliza a temperaturas muy altas) por arcilla calcinada.

El cemento de arcilla calcinada y caliza (LC3) permite reducir entre un 20-30% de las emisiones de CO₂ en comparación con el cemento tradicional; una gran reducción si se considera que el cemento es responsable del 5-8% de las emisiones producidas por la actividad humana. LC3 es un cemento de bajo carbono y de bajo costo que alcanza propiedades similares o incluso superiores al cemento Portland. La mezcla puede ser producida fácilmente en las líneas de producción existentes, con el único requerimiento de pequeñas inversiones de capital.

LC3 puede convertirse en un material de construcción esencial, especialmente en las economías emergentes de rápido crecimiento, donde minimizar el impacto ambiental y el consumo excesivo de recursos son una primera prioridad. Se estima que usar LC3 en lugar del cemento tradicional puede contribuir a reducir hasta 500 millones de toneladas de CO₂ en el año 2050. (CEMENTO, 2013)

Proyectos de producción industrial han sido implementados en Cuba y la India y en ambos países se han construido varias estructuras usando el cemento. Cuba será el primer país donde el LC3 será producido a escala comercial. Esto permitirá abastecer la demanda creciente sin tener que realizar grandes inversiones de capital, y con un reducido impacto ambiental. (Matirena, 2015)

1.2.2.1 Yeso

El yeso es un mineral natural de pureza y composición variables, que introduce un amplio rango granulométrico. Cuando posee cantidades importantes de cloruros, magnesio, u otras sales solubles no debe emplearse para producir materiales de

construcción. Las impurezas de los yesos de mina, son generalmente arcillas, cuarzos, dolomitas y calcitas. Se obtiene también químicamente como un sulfato de calcio de alta pureza. Actualmente, se emplean con buenos resultados, los yesos derivados como subproductos de la Industria química de fertilizantes y cítricos, o de la desulfurización de los gases de chimenea, para la elaboración de yesos de alta calidad. Este sulfato de calcio difiere del natural, en su estado físico, con una finura uniforme, en el mínimo de impurezas que contiene y su alta pureza.

Para obtener un buen yeso aglomerante se requiere una pureza mínima en sulfato de calcio del 90%. Si el yeso contiene anhidritas, se puede admitir un límite mínimo del 80% de pureza. El grado de blancura nos indica su pureza y de ella depende la calidad de los productos obtenidos a partir del yeso.

El yeso en su estado natural se encuentra como un sulfato de calcio dihidratado, es decir, tiene dos moléculas de agua de hidratación. En el proceso de calcinación pierde parte de esa agua, dependiendo de la temperatura a que se someta. Idealmente se debe alcanzar la forma de hemidrato, en la cual el yeso ha perdido molécula y media de agua, a temperaturas mayores de 130°C el yeso puede continuar perdiendo agua, hasta llegar al estado de anhidrita.

Todas las formas de sulfato de calcio dihidratado son termodinámica y cristalográficamente equivalentes, dependiendo únicamente de su pureza. Su forma puede ser de agujas, de conchas o prismática. (Anon., 2005)

1.2.2.2 Caliza

Las calizas son rocas sedimentarias de origen fundamentalmente químico u organógeno, formadas al menos por un 50% de carbonato cálcico. Las de origen bioquímico se forman por la acción de los seres vivos. Estos fijan el calcio disueltos en el agua y lo utilizan para construir sus esqueletos en forma de calcita o aragonito, cuando estos mueren, sus esqueletos darán unas calizas formadas por calcita, siempre el aragonito es inestable y se transforma en calcita, también se depositan calizas en los fondos marinos como consecuencia indirecta del metabolismo de los seres vivos. Así las algas al realizar la fotosíntesis consumen bióxido de carbono (CO_2); este consumo de bióxido de carbono varía las características del medio con la consiguiente precipitación del carbonato cálcico.

La caliza tiene gran interés económico ya que constituye la materia prima del cemento; se utiliza fundamentalmente en la construcción y como fundente en la industria siderúrgica. Las rocas calizas a pesar de que frecuentemente están recristalizadas o han sufrido reemplazo en grado variable, son designadas con nombres basados siempre en las texturas tanto de superficie frescas como en superficies ligeramente atacadas por intemperismo.

Las rocas clasificadas como calizas comerciales contienen cantidades variables de carbonatos de magnesio; cuando éste se halla en cantidad inferior al 5%, se dice que la caliza es magnesiana. Una caliza que contenga entre 30% y 45% de carbonato de magnesio se clasifica como dolomítica. La verdadera caliza dolomítica está compuesta por mineral dolomita, que es un carbonato doble de magnesio y calcio ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), y que contiene un 46% de carbonato de magnesio, estas calizas se llaman cal rica en calcio, cal magnesiana y cal dolomítica.

La caliza puede formarse mecánicamente mediante la deposición de materia desmenuzada de conchas y arena de coral, que se cementan formando una caliza compacta. La mayor parte de las calizas se depositan en aguas poco profundas o de profundidad moderada en el mar, libre de sedimentos terrígenos.

La marga, que es una caliza pura, friable e incoherente, se deposita en los lagos a partir del carbonato de calcio suministrado por las corrientes de agua o los manantiales. Es corriente en los lagos glaciares, porque los glaciares que produjeron los lagos proporcionaron caliza desmenuzada y aportaron agua fría rica en anhídrido carbónico, y por lo tanto con carbonato en solución. Las aguas frías de los heladeros pierden su contenido en anhídrido carbónico al llegar a las aguas de los lagos, debido a que se encuentra más caliente y se precipita el carbonato cálcico. Sin embargo, la mayor parte de la marga es depositada por plantas acuáticas inferiores.

La coloración de las calizas ricas en calcio y las calizas dolomíticas son blancas cuando son puras, pero cambia de color entre el gris y el negro a consecuencia de las impurezas carbonosas que contienen; el óxido férrico da a la caliza color amarillento, rojo, pardo; los sulfuros tales como la pirita, la marcasita y la siderita alteran el color superficial de la roca al oxidarse bajo la influencia de los agentes atmosféricos, dando un color rojizo. Para la construcción de monumentos o la edificación, el color de la caliza es una propiedad importante. (Guerrero, 2001)

1.3 Arcillas. Generalidades.

En la búsqueda y desarrollo de nuevas fuentes de materiales puzolánicos, existe creciente interés en el empleo de las arcillas activadas. Por su amplia disponibilidad, relativa facilidad de tratamiento y demostradas propiedades puzolánicas una vez que son estructuralmente modificadas, estas representan una atractiva alternativa como fuente de puzolanas.

Las arcillas están ampliamente distribuidas como constituyente esencial de los suelos y sedimentos, debido a que son mayoritariamente los productos finales de los distintos procesos de degradación de los aluminosilicatos formados a mayores presiones y temperaturas y que constituyen más del 70% de la corteza terrestre. Cuando están presentes en gran cantidad se presentan bajo la forma de rocas arcillosas. (Díaz, 2010)

Las arcillas son, probablemente, los materiales geológicos más contradictorios desde el punto de vista de su utilidad en Ingeniería Civil. Son fuente inagotable de problemas de estabilidad en buen número de obras, pero constituyen por sí mismas un material de valiosas propiedades ingenieriles. Por otro lado, durante los últimos años, las arcillas han cobrado un interés especial en la medida que constituyen potenciales emplazamientos de repositorios de residuos nucleares de alta actividad o se considera su empleo en las barreras de ingeniería previstas para retardar o evitar la migración de radionucleidos y su interacción con la biosfera.

El término arcilla, que se considera y define de muchas maneras, es variable y difícil de precisar. Desde el punto de vista de su origen, la arcilla no tiene significado unitario ya que puede ser un depósito sedimentario, un producto de meteorización, un producto hidrotermal o ser el resultado de una síntesis. La imprecisión del término arcilla radica en que conceptualmente es diferente para el ceramista, el geólogo, el edafólogo o el fabricante de ladrillos.

En general, el término arcilla se aplica a un material natural, terroso, de tamaño de grano fino y que muestra plasticidad cuando es mezclado con una cierta proporción de agua. Su composición química está caracterizada por la presencia de Si, Al y H₂O, junto a cantidades variables de Mg, Mn, Fe, Ca, Na y K, principalmente.

La arcilla constituye un agregado de minerales y de sustancias coloidales que se han formado mediante la desintegración química de las rocas alúminas. Ésta ha sido obtenida por procesos geológicos de envejecimiento del planeta. Debido a que el proceso de envejecimiento es continuo y ocurre en cualquier punto del planeta, es

considerada un material corriente y bastante abundante. La gran mayoría de las rocas que conforman la corteza terrestre están formadas de feldespato ya que es el mineral más común de la Tierra. A este tipo de rocas formadas por feldespato se le conoce como rocas feldespáticas. Debido a la descomposición de estas rocas es que se da origen a la formación de arcilla. (LESCANO, 2014)

1.3.1 Composición de las arcillas.

Las arcillas (silicoaluminatos hidratados), en cuya estructura química participan principalmente Silicio (Si), Aluminio (Al), Oxígeno (O) e Hidrógeno (H), pertenecen a la familia de los filosilicatos, cuya unidad estructural básica es el tetraedro compuesto por Silicio y Oxígeno; dichos tetraedros se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas llamadas tetraédricas que constituyen la red fundamental de los filosilicatos. Aunque la caolinita se encuentra dentro del grupo de las arcillas, desde el punto de vista de su estructura, tiene diferencias, ya que, en vez de tener dos filas de tetraedros y una de octaedros, ella tiene una sola fila de tetraedros de sílice y una octaédrica de óxido de aluminio, de allí el elevado contenido de este óxido.

Las arcillas están formadas por distintas especies mineralógicas, que según su preponderancia le confieren sus peculiares características. Las arcillas además de los minerales de arcillas propiamente dichos, poseen sílice libre que generalmente es cuarzo cristalino de tamaño mayor a 10 micrones, carbonatos de diversos tamaños, feldespatos generalmente alcalinos y alcalinotérreos, compuestos de hierro y titanio, sales solubles, materia orgánica y residuos carbonosos. Así, por ejemplo, el término caolín designa una arcilla con un elevado porcentaje de Caolinita y un bajo contenido de impurezas en general, especialmente óxido férrico; una arcilla illítica tendrá el mayor porcentaje del mineral Illita y una arcilla esmectítica el mayor porcentaje de algunos de los minerales del grupo de las esmectitas, por ejemplo, montmorillonita. (TIRONI, 2013)

1.3.2 Depósitos de arcilla en el mundo.

El mercado mundial de arcillas caoliníticas posee tres áreas de producción de gran importancia: los caolines sedimentarios de Georgia y Carolina del Sur en los Estados Unidos; los caolines primarios en Cornwall, zona del suroeste de Inglaterra; los caolines sedimentarios en el bajo Amazonas, Brasil. Estas arcillas caoliníticas son de alta calidad

(elevado contenido de Caolinita y características físicas adecuadas) por lo que se las puede utilizar en la industria del papel. Otros depósitos de arcillas caoliníticas de importancia regional se encuentran en Australia, Argentina, República Checa, China, Francia, Alemania, Indonesia, Irán, México, Corea del Sur, España, Turquía y Ucrania. Las propiedades de este mineral han permitido su utilización en la industria de papel, materiales refractarios, cerámica, fibra de vidrio, cemento, caucho y plásticos, pinturas, catalizadores. (TIRONI, 2013)

1.3.2.1 Depósitos de arcilla reportados en Cuba.

En Cuba se localizan varios depósitos de arcillas caoliníticas con diferentes grados de pureza. La mayor cantidad de los que contienen caolín se encuentran en el occidente del país, particularmente en la Isla de la Juventud y Pinar del Río; se ubican también depósitos con diferentes grados de interés en Villa Clara, Ciego de Ávila, Sancti Spíritus y más al oriente, Camagüey, Las Tunas, Holguín y Santiago de Cuba. En el resto del territorio nacional, según la Oficina Nacional de Recursos Minerales, aparecen además puntos y manifestaciones de forma diseminada.

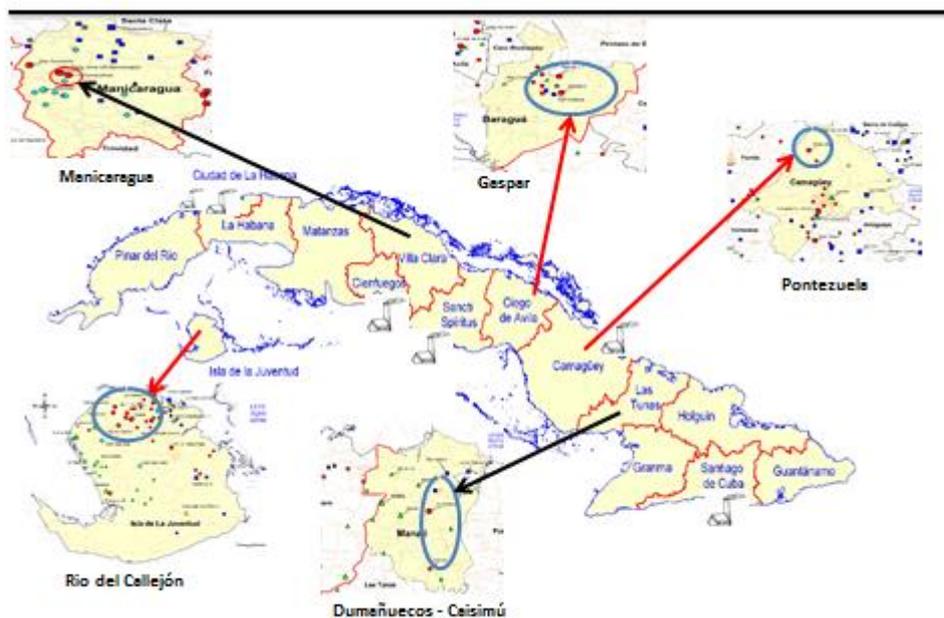


Fig.1.1 Depósitos de arcilla en Cuba

1.3.3. Las arcillas como fuente de materia prima para la producción de cerámica.

Dependiendo de las condiciones y factores que influyeron en la formación de las arcillas, éstas presentarán diferentes características propias de cada tipo que determinarán las propiedades que va a tener la mezcla de la cual formen parte, atendiendo a lo anterior, en el caso de la elaboración de ladrillos se tiene lo siguiente:

- En la fabricación de ladrillos los materiales utilizados son por lo general arcillas amarillas o rojas de composición heterogénea o relativamente impura (casi siempre secundarias).
- Las arcillas usadas en la mezcla deben ser plásticas al mezclarse con agua, de modo tal que puedan ser formadas en moldes o por el dado de las máquinas extrusoras que moldean y dan la forma definitiva a las unidades de arcilla.
- Sus partículas deben tener suficiente adhesión para mantener la estabilidad de la unidad después del moldeo y ser capaces de unirse fundiéndose cuando se calientan a temperaturas elevadas.

En correspondencia con las características expuestas, las arcillas superficiales satisfacen las condiciones para la fabricación de ladrillos. Este tipo de arcillas son las más fáciles de explotar porque corresponden a una formación sedimentaria reciente y, por lo tanto, son las más empleadas. Sin embargo, al estar más expuestas a la contaminación con sales por razones naturales y por el empleo agrícola del suelo, ellas producen las unidades más vulnerables a la eflorescencia. (LESCANO, 2014)

1.3.3.1. Producción de ladrillos y otras cerámicas rojas. Características térmicas de los procesos tecnológicos.

El ladrillo es el material de construcción más antiguo fabricado por el hombre. En los primeros tiempos se comenzó elaborándolo en su forma cruda, que es el adobe. Su difusión se debió a que el hombre le confirió un tamaño que se acomodaba a su mano y además el uso de materias primas accesibles. No puede menos que llamar la atención que con elementos tan comunes como la tierra, el agua, el aire (para el secado) y el fuego (para la cocción) el hombre logró fabricar un material de construcción que, con muy pocas variantes tecnológicas, sigue manteniendo plena vigencia y demanda hasta nuestros días. (BIANUCCI, 2009)

La fabricación de ladrillos de cerámica roja ha perdido competitividad en el mercado, debido a diferentes factores; primeramente, podemos mencionar la competencia en el mercado con infinidad de materiales utilizados hoy en día en la fabricación de muros, los mismos los superan en calidad y costos. Otro de los factores se relaciona con el consumo elevado de energía y del costo de los combustibles, además de la contaminación medioambiental que genera su fabricación en la industria. (Cárdenas, 2011)

1.4. Activación térmica de las arcillas.

Los minerales arcillosos no pueden ser empleados como puzolanas en su estado natural. La presencia de estructuras cristalinas estables impide la liberación de sílice y alúmina como especies químicas capaces de participar en la reacción puzolánica. Su estructura en forma de capas propensas al deslizamiento y al agrietamiento, y la capacidad para inmovilizar grandes cantidades de moléculas de agua en su superficie son factores que pueden afectar de forma negativa la resistencia mecánica y la reología en un material cementicio, mientras que su alta capacidad de adsorción de iones puede modificar la composición química de las soluciones acuosas, afectando las propiedades tecnológicas del hormigón. Por lo tanto, las arcillas deben modificarse estructuralmente para ser empleadas como materiales puzolánicos.

La activación de un mineral arcilloso se refiere al proceso de lograr, a partir de la remoción de los iones OH estructurales, la ruptura de los enlaces químicos y la desestabilización resultante de la estructura cristalina. El proceso de activación puede hacerse a través de medios mecánicos, químicos o térmicos, dentro de los cuales es la activación térmica la forma más efectiva y empleada para modificar la estructura cristalina de las arcillas y alcanzar el máximo potencial de reactividad puzolánica.

Durante la calcinación de las arcillas pueden distinguirse varias etapas. Con el calentamiento desde temperatura ambiente hasta 250 °C ocurre la pérdida (reversible en algunos casos) del agua adsorbida y absorbida en las superficies externas e internas de la arcilla (deshidratación).

Entre los 400 °C y los 950 °C ocurre la remoción de los OH estructurales (desoxhidrilación) acompañada por el desorden parcial de la estructura cristalina y la formación de fases meta estables, caracterizadas por una alta reactividad química. La pérdida de los OH desestabiliza eléctricamente la estructura, especialmente en la zona

de la capa octaédrica. Es por eso que en las arcillas calcinadas las fases de alúmina juegan un papel muy importante en la reactividad puzolánica, pues son estas zonas de la estructura las primeras en desestabilizarse estructuralmente durante el proceso de desoxhidrilación. La desestabilización de cargas eléctricas y la ruptura de los enlaces químicos por el calentamiento provocan el colapso parcial de la estructura, sobre todo en la dirección perpendicular a las láminas que forman la estructura. El intervalo de temperatura para el cual ocurre la desoxhidroxilación de la arcilla y el grado de desorden estructural resultante depende del tipo de arcilla, de su grado de cristalinidad, su distribución granulométrica y el alcance y tipo de las sustituciones isomórficas en su estructura.

Para fases con un bajo grado de orden estructural la reactividad puzolánica se alcanza más rápido y a menores temperaturas que para fases minerales del mismo tipo, pero con un alto grado de orden en su estructura. Independientemente del tipo de mineral arcilloso, se ha observado que alrededor de los 950 °C toma lugar la reorganización de la estructura para formar nuevas fases cristalinas estables a altas temperaturas y químicamente poco reactivas.

La presencia de impurezas de tipo no arcilloso como cuarzo y feldespatos tienden a reducir la temperatura a la cual ocurre este fenómeno, acortando el intervalo para el cual es posible la activación térmica de la arcilla. Por tanto, la temperatura de calcinación a la cual se obtiene la mayor reactividad puzolánica debe situarse dentro del intervalo que se extiende entre el final de la desoxhidrilación y el inicio de la recristalización, fenómenos que delimitan, desde el punto de vista estructural, el intervalo dentro del cual una fase arcillosa puede ser convertida en un material puzolánico mediante activación térmica.

Aunque importantes, los criterios de desorden estructural no son los únicos que determinan el potencial carácter puzolánico en una arcilla calcinada. Con el incremento de la temperatura también ocurren importantes cambios morfológicos en el sistema debido a los fenómenos de sinterización y crecimiento de grano, disminuyendo la capacidad de reacción por disminución de la superficie específica, incluso si la fase arcillosa presenta un bajo grado de desordenamiento estructural. La temperatura de calcinación a la que se alcanza el máximo grado de desorden estructural no siempre se corresponde con la mayor reactividad puzolánica, ya que a medida que aumenta la temperatura de calcinación se establece un compromiso entre el aumento del desorden estructural, el desplazamiento de la distribución granulométrica hacia tamaños de partícula superiores, y la disminución de la superficie específica.

La capacidad de retención de importantes cantidades de agua en las estructuras de los minerales arcillosos, que induce una más baja laborabilidad de la pasta para los morteros que contienen puzolanas basadas en arcillas calcinadas, es otro aspecto a tener en cuenta. Para las arcillas con potencial expansivo como las montmorillonitas y algunas arcillas estratificadas, la demanda de agua muestra un marcado decrecimiento solo cuando la arcilla es completamente deshidroxilada, por lo que este es un factor importante para las muestras que contienen fases arcillosas con potencial expansivo calcinadas a relativamente bajas temperaturas. (Díaz, 2010)

1.4.1. El sistema ternario CP – AAT- Caliza. Reacciones puzolánicas, fundamento de la producción industrial y local del LC3.

El uso de arcillas calcinadas provenientes de yacimientos con bajo contenido de caolín más la adición de piedra caliza molida y cemento portland, forman en la actualidad un sistema ternario combinado de gran interés.

Proyectos recientes han estudiado el contenido de esta mezcla con adiciones de 0-30% de arcilla calcinada y 0-10% de caliza molida mezclado con Cemento Portland. La puzolanidad del cemento mezclado se evaluó por las pruebas de Frattini a los 2, 7 y 28 días, así como la resistencia a compresión. El progreso de la hidratación fue determinado por el tipo y cantidad de compuestos hidratados a las edades de 2, 7 y 28 días usando el método de Rietveld. El cambio en la distribución de tamaño de poro fue determinado por el porosímetro de intrusión de mercurio (MIP por sus siglas en inglés). Las fases hidratadas obtenidas correspondientes a la reactividad puzolánica (debido a la contribución de la arcilla calcinada) y las fases estabilizadoras (contribución de la caliza molida) modifican la estructura de poro y todos los factores contribuyen para desarrollar las propiedades mecánicas aceptables con una reducción grande de consumo de energía y emisión de CO₂. (Irassar, 2015)

Otros estudios sustituyen el clínker hasta en un 50% por la mezcla de arcilla calcinada con caliza molida. El polvo de caliza acelera la hidratación temprana y la arcilla calcinada desarrolla la resistencia a compresión en edades tempranas debido a su reacción puzolánica. Más allá de esto, facilita la reología de la mezcla fresca sin comprometer la resistencia, siendo esto posible debido a la sinergia desarrollada entre la arcilla calcinada y la caliza. La laborabilidad de este sistema es fuertemente afectada por la distribución del tamaño de partícula y esta a su vez es afectada por el proceso de molienda, por consiguiente, debido a las diferentes durezas y tamaños de partículas de

los materiales que forman este cemento, el mismo debe ser definido bajo nuevos parámetros productivos. Si los diámetros de partículas tienden a ser similares, se produce un vacío que debe ser rellenado por agua para proporcionar una mezcla laborable. La calorimetría isotérmica puede ser una buena prueba para evaluar la influencia de la fineza de los materiales en el nuevo cemento. Parece ser el parámetro más importante con respecto al calor de hidratación durante las primeras 24 h. (A.A.Pérez, 2014)

1.4.2. Relación entre el tratamiento térmico, las características físico – mineralógicas de la arcilla y la reactividad puzolánica.

Algunos autores han revisado ampliamente este parámetro en estudios anteriores, resumiendo que la temperatura de activación óptima para el caso del caolín se encuentra en el rango de 630 - 800 °C. La calcinación por debajo de los 700 °C resulta en un metacaolín menos reactivo con más residuos de caolinita, mientras que por encima de 850 °C ocurre una cristalización y disminuye la reactividad.

La reactividad puzolánica de arcillas calcinadas depende del volumen de material potencialmente reactivo (directamente relacionado al contenido de Al_2O_3 y SiO_2 y la magnitud del desorden estructural alcanzado durante la activación térmica (directamente relacionado a la pérdida de grupos hidroxilos). Para arcillas con bajo grado caolinítico o para arcillas comunes donde la reactividad puzolánica podría ser considerada como la contribución combinada de todos los minerales de arcilla presente en la muestra, es difícil asignar el volumen de las fases reactivas o la pérdida de peso debido a la estructura de los grupos hidroxilo a un mineral arcilloso en particular. Estudios previos han mostrado que los minerales arcillosos provenientes del grupo de los caolines ($\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 39.50\%$; $\text{OH}^- \sim 13.95\%$), presentan una mayor reactividad puzolánica. Entonces, es razonable asumir que aun cuando la contribución de cada mineral de arcilla a la reactividad puzolánica no pudiera determinarse separadamente, el mayor contenido global y estructural de Al_2O_3 y OH^- en el material crudo, elevan potencialmente la reactividad puzolánica de los productos de calcinación. (Alujas, 2015)

1.5. Métodos para la determinación de la reactividad puzolánica.

Existen diversos métodos para evaluar la reactividad puzolánica, casi todos basados en la medición durante un intervalo de tiempo más o menos largo de distintas propiedades físicas o químicas directamente relacionadas con la reacción puzolánica. En dependencia de las propiedades a evaluar o de los tiempos de ensayo requeridos,

pueden ser empleados sistemas CPO-Puzolana, o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Puzolana, bajo la forma de pastas, morteros u hormigones.

Los ensayos de resistencia mecánica son insustituibles, en tanto aportan valiosos datos directamente relacionados con el desempeño del material en la práctica y representan el aporte de todos los factores relacionados con la reacción puzolánica, Sin embargo, por sí solos ofrecen poca información sobre los procesos responsables de la reactividad puzolánica y no pueden ser utilizados como única vía para entender el comportamiento de nuevos materiales puzolánicos. Con este propósito, modernas técnicas de caracterización han ido ganando creciente importancia en el estudio de la reacción puzolánica. (Díaz, 2010)

La Calorimetría Isotérmica es una técnica de análisis térmico que ha ganado creciente importancia en los estudios de la hidratación del CPO, se basa en la medición de la velocidad de liberación de calor en función del tiempo bajo un régimen isotérmico y aprovecha el carácter altamente exotérmico de las reacciones de hidratación del CPO y de las reacciones puzolánicas y su cinética relativamente lenta. De esta forma, la cantidad de calor total acumulado es directamente proporcional a la cantidad de productos de hidratación generados y puede tomarse como una medida del grado de reacción alcanzado por el sistema. La medida de la velocidad o flujo de liberación de calor provee información acerca de la cinética y los mecanismos de hidratación. (Díaz, 2010)

Una técnica más sencilla de implementar, pero que brinda una información semejante a la Calorimetría Isotérmica es la Contracción Química, cuya invención es atribuida al químico francés Le Chatelier en el siglo XIX, y tiene su fundamento en los cambios que ocurren en el volumen total del sistema durante las reacciones de hidratación. Teniendo en cuenta que el volumen específico del agua es menor cuando está enlazada químicamente que cuando está en estado no asociado, las reacciones de hidratación van acompañadas generalmente de una reducción en el volumen total del sistema. Como ejemplo del principio de esta técnica puede observarse cómo, durante la reacción de hidratación del CPO, el volumen del sólido aumenta por la formación de los productos de hidratación, pero el volumen total decrece. Los estudios por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) son muy útiles para identificar y evaluar la estructura de los hidratos formados en las pastas de CPO y de CPO con adiciones puzolánicas. Los recientes avances en el estudio de la microestructura de pastas y morteros mediante MEB en su modo de electrones de retro dispersión permiten no solo la identificación y descripción de los productos de hidratación, sino también su cuantificación, haciendo uso de

modernos software para el análisis y procesamiento estadísticos de las imágenes. (Díaz, 2010)

1.5.1. Resistencia a la compresión e índice de reactividad puzolánica.

El efecto de la reacción puzolánica en morteros y hormigones de cemento/puzolana consiste fundamentalmente en que la resistencia mecánica desarrollada por dicho conglomerado es superior a la esperada debido a la relación agua/cemento existente en la dosificación de dicho conglomerado. De ese modo, podemos decir que la presencia de puzolana realiza un papel equivalente a la reducción de la relación agua/cemento, que tiene como consecuencia el aumento en la resistencia mecánica.

La contribución a la resistencia mecánica con el incremento de la temperatura de calcinación en arcillas caoliníticas no solo puede estar relacionado a un incremento en el desorden estructural asociado con la deshidroxilación de la caolinita, sino también con los cambios de coordinación alrededor del aluminio, que produce un incremento del contenido de alúmina reactiva en el mineral arcilloso. (Díaz, 2010)

Para caracterizar una puzolana desde el punto de vista de su actividad puzolánica se pueden aplicar diversos métodos, los cuales se clasifican en métodos químicos, físicos y mecánicos, según se referencia en normas como ASTM y UNE.

Quizá, los más conocidos desde el punto de vista de la ingeniería son estos últimos, los métodos mecánicos. En general a través de los métodos mencionados, se evalúa la contribución de la reacción puzolánica en el desarrollo de la resistencia mecánica a compresión de los morteros y hormigones de cemento que contienen la puzolana.

Algunos métodos y normativas de amplio uso en la bibliografía referenciada son los siguientes:

- Método químico o de Frattini, ICONTEC 1512 (UNE 80280/88; EN 196-5).
- La evaluación del Índice de Actividad Puzolánica con Cemento, ASTM C-311
- La norma ASTM C618 establece un índice mínimo, (R muestra / R Patrón) del 75% para clasificar un material como de carácter puzolánico.
- La evaluación del Índice de Actividad Resistentes con Cementos Portland, UNE 83-451 86.
- El Índice de Actividad Puzolánica con Cal, ASTM C-311.

- Otros métodos mecánicos para evaluar la puzolanidad son los de Feret y Pauli (módulo de la efectividad de la puzolana).

Investigadores como Alujas han desarrollado métodos para la medición de la reactividad puzolánica, exponiendo los productos de calcinación de las materias primas a una disolución alcalina para medir la cantidad de silicio y aluminio capaz de disolverse en una solución básica de NaOH.

Se mezclaron 50 mL de una disolución de NaOH a un pH=13 con 0,1g de arcilla calcinada y se sometió la disolución a un baño de maría a temperatura (50 °C) y agitación (30 rpm) constantes durante 24 horas. Posteriormente se tomaron 25 mL de la mezcla y se añadió 2,5 mL de HCl concentrado para disminuir el pH por debajo de 1 y se prosiguió a centrifugar la disolución a 1500 rpm durante 20 minutos para separar el sólido remanente. La disolución fue recogida para determinar la cantidad de Si y Al soluble, utilizando la Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA). (Alujas, 2015)

1.5.2. Método R3.

Este método, caracterizado por ser rápido, pertinente y fiable, (R3 por sus siglas en inglés) es una prueba que caracteriza la reactividad puzolánica de las arcillas calcinadas. Usa calorimetría isotérmica para evaluar la reactividad monitoreando y modelando las emisiones de calor en el sistema ternario portlandita-arcilla-caliza.

Pruebas realizadas comienzan con una temperatura de 20 °C, encontrando relaciones entre la emisión de calor y la resistencia a compresión a los 6 días, en morteros que contenían arcilla calcinada y caliza. Otra serie de pruebas se llevó a cabo a una temperatura de 40 °C habilitando la prueba de calorimetría isotérmica con una reducción de 1 a 6 días, manteniendo positivos los resultados referidos a la relación con la resistencia a compresión.

La Universidad Central Marta Abreu de Las Villas también desarrolló este método por medio de investigaciones evidenciadas a continuación.

Se prepararon pastas $\text{Ca}(\text{OH})_2$ / Puzolana utilizando un 30 % de sustitución del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por arcilla calcinada y una relación agua / sólido = 1,2 para asegurar en cada sistema un exceso de agua para la reacción de hidratación, y obtener además una buena laborabilidad de las pastas. Alrededor de 47g de pasta fueron mezclados a 1600 rpm durante dos minutos utilizando una hélice de cuatro palas y 15g de cada mezcla se colocaron en frascos de vidrio, las cuales se cerraron y posteriormente fueron colocadas en el calorímetro. Se ajustaron los niveles de sulfato y álcalis para reproducir el ambiente

de la reacción de hidratación de la mezcla, la solución de poros del cemento y asegurar la formación de los productos de reacción y de las fases ettringita y Afm. Se empleó un calorímetro TAM AIR 3238 de la firma Thermometric. Primeramente, el equipo se calibró para una escala de 600 mW, a una temperatura de 30 °C. Agua destilada fue utilizada como referencia para cada una de las muestras y lecturas cada 60 segundos durante 6 días fueron tomadas usando un ordenador conectado al equipo. Las curvas de flujo de calor registradas fueron normalizadas a la masa de puzolana e integradas para convertirlas en curvas de calor total liberado en el tiempo. Se empleó nuevamente una referencia de metacaolín. (Alujas, 2015) (Reyes., 2016)

1.6 Conclusiones parciales

El proceso de fabricación de algunos materiales de la construcción como el cemento portland contribuye al aumento del efecto invernadero debido a la emisión de gases de efecto invernadero (CO_2) a la atmósfera provenientes de la quema del combustible y de los procesos de calcinación, de ahí que la disminución del factor de clínker con la adición de arcillas activadas térmicamente constituye una importante contribución desde el punto de vista económico y ambiental.

La producción de elementos de cerámica roja a niveles industriales y artesanales no está exenta de contribuir al deterioro del medio ambiente, debido fundamentalmente a las condiciones precarias y las escasas tecnologías con que se desarrolla el sector, sin embargo, de igual modo el reciclaje de desechos de cerámica para su empleo como material puzolánico supone una importante contribución al desarrollo local desde el punto de vista económico y ecológico.

Las nuevas formulaciones para la producción de cemento con el empleo de Materiales Cementicios Suplementarios provenientes de AAT como sustitutos del clínker en la producción de cementos mezclados, constituye una efectiva alternativa para disminuir el daño al medio ambiente que produce la industria del cemento en nuestro país y el resto del mundo.

El cemento LC3 es un cemento ternario de base clínker – arcilla calcinada – caliza que satisface los requisitos establecidos para cementos mezclados según la NC 96:2001, con su producción se reducen considerablemente las emisiones de CO_2 y resulta más económica con respecto a los cementos Portland fabricados en nuestro país.

La arcilla activada térmicamente puede provenir de los desechos cerámicos que produce la industria de los ladrillos y otras con lo que puede resultar una contribución para la producción local de cementos mezclados tipo LC3.

Capítulo 2: Estudio experimental de la activación térmica de arcillas a partir de la producción local de cerámica roja. Determinación de la actividad puzolánica.

2.1. Generalidades

La evaluación de las propiedades puzolánicas de desechos cerámicos obtenidos a partir de la molienda de ladrillos producidos en el taller artesanal de Manicaragua, en comparación con las propiedades puzolánicas de ladrillos producidos en condiciones de laboratorio, constituyen las temáticas fundamentales abordadas en este capítulo. Los ladrillos producidos en condiciones de laboratorio serán quemados a tres temperaturas diferentes (700,800 y 900 °C).

Se muestran los resultados de:

- ✓ Realización del protocolo de reactividad (1 serie para cada DCL, más la serie de referencia)
- Resistencia de morteros:

Ensayos físico - mecánicos realizados sobre muestras prismáticas (16 x 4 x 4 cm) de morteros elaborados con arena normalizada, tomando como base para las dosificaciones las investigaciones precedentes sobre el tema desarrolladas por investigadores del CIDEM y otros reportes de la literatura, en la elaboración de los morteros se reemplaza un 30% del peso del cemento por el material puzolánico. Se fabrican 28 briquetas al variar la temperatura de activación de la arcilla.

Las muestras fueron elaboradas a partir de desechos de cerámica de ladrillos (DCL) procedentes del taller artesanal de Manicaragua y DCL obtenidos en condiciones de laboratorio, de igual modo se elaboró la muestra patrón con el 100 % de P-35.

- Calorimetría, protocolo R3.

Ensayo para determinar la reactividad puzolánica, a partir de calor acumulado que presenta cada serie de arcilla en un período de 5 días.

- ✓ Formulación de LC2 con la mejor combinación más la serie de referencia.
- Resistencia de morteros:

Ensayos físico - mecánicos realizados sobre muestras prismáticas (16 x 4 x 4 cm) de morteros elaborados con arena normalizada. Para este fin se produce LC2 a partir de un 60% de arcilla calcinada, un 30% de caliza y un 10% de yeso, para la elaboración de los morteros se reemplaza un 50% del peso del cemento por LC2. Se fabricaron 18 briquetas al variar la temperatura de activación de la arcilla utilizada en la obtención del LC2. Las muestras fueron elaboradas a partir de DCL procedentes del taller artesanal de Manicaragua y DCL obtenidos en condiciones de laboratorio, de igual modo se elaboró la muestra patrón con el 100 % de P-35.

- Minicono. Este ensayo se realiza para determinar la plasticidad y la demanda de agua de las muestras a ensayar.
- Calorimetría. Ensayo para determinar la reactividad puzolánica, a partir de calor acumulado que presenta cada serie de LC3 en un período de 5 días.
- Fabricación de una serie de hormigón H3 (agresividad media), con la mejor combinación más la serie de referencia.
- Determinación del contenido de aire en la mezcla.
- Resistencia a compresión de probetas cilíndricas (h=200mm, r=100mm)

2.2. Diseño experimental.

La fase experimental comienza definiendo las temperaturas a las que serán producidos los ladrillos en condiciones de laboratorio. Se queman los ladrillos a tres temperaturas diferentes (700°C, 800°C y 900°C), ya que la serie de referencia fue producida en el taller artesanal de Manicaragua a una temperatura máxima del horno de 950°C (resaltar que esta es la temperatura que alcanza el horno, la cual no necesariamente es la que alcanzan todos y cada uno de los elementos producidos en el mismo). En este sentido se evalúa el comportamiento que puede tener la variación de la temperatura en la producción de ladrillos en condiciones de laboratorio en comparación con los producidos en el taller artesanal de Manicaragua, para ello se tomó la siguiente metodología:

- Quema de ladrillos verdes a 700°C, 800°C y 900°C respectivamente.
- Molienda de los ladrillos en molino de bolas.
- Fabricación de morteros atendiendo a la dosificación de la sustitución en un 30% del peso del cemento por material puzolánico y una relación a/c de 0.5
- Producción de briquetas prismáticas de 160 x 40 x 40 mm de morteros en estado endurecido para los ensayos siguientes:

- Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días.
- Evaluación de los resultados obtenidos en los ensayos.
- Fabricación de morteros de P-35 como patrón de comparación y una relación a/c de 0.5
- Producción de briquetas prismáticas de 160 x 40 x 40 mm de morteros en estado endurecido para los ensayos siguientes:
 - Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días.
- Fabricación de morteros atendiendo a la dosificación de la sustitución en un 50% del peso del cemento por LC2 y una relación a/c de 0.5
- Producción de briquetas prismáticas de 160 x 40 x 40 mm de morteros en estado endurecido para los ensayos siguientes:
 - Resistencia a la compresión a los 3,7 y 28 días.
 - Evaluación de los resultados obtenidos en los ensayos.
 - Calorimetría. Protocolo R3 a las series de arcilla y a las de LC2.
 - Evaluación de los resultados obtenidos en el ensayo.
 - Determinación del índice de plasticidad de las dos series de LC2 en comparación con un patrón de P-35. Minicono.
 - Evaluación de los resultados obtenidos en el ensayo.
- Producción de hormigón de la serie H3 para una agresividad media, con las dos series de LC2.
- Elaboración de probetas de hormigón cilíndricas de la serie H3 (para agresividad media) ($h=200\text{mm}$ y $r=100\text{mm}$).
- Resistencia a compresión de probetas de hormigón 3,7 y 28 días
- Evaluación de los resultados obtenidos en el ensayo.
- Determinación del por ciento de aire contenido en la mezcla de hormigón de las dos series de LC2.
- Evaluación de los resultados obtenidos en el ensayo.

2.3. Producción de ladrillos en condiciones de laboratorio.

Para la quema de los ladrillos en condiciones de laboratorio se le realizó un precalentamiento a 400 °C por 30 minutos, luego de culminar esta etapa se sube el termostato de la mufla hasta los grados requeridos (en este caso hasta temperaturas de 700, 800 y 900 °C respectivamente) con un tiempo de residencia igual a una hora. Concluido el proceso de calentamiento se extraen los ladrillos del equipo y se espera 12 horas para que alcance la temperatura ambiente. Ver fig.2.1 y 2.2



Fig.2.1 Mufla

Fig.2.2 Ladrillos verdes

2.4. Materias primas utilizadas. Caracterización.

Para la evaluación puzolánica del desecho de material de la producción de cerámica roja (DCL) se obtuvieron ladrillos cocidos directamente desde el horno artesanal enclavado en el municipio Manicaragua, así mismo se obtuvieron ladrillos en condiciones de laboratorio quemados a temperaturas controladas en una estufa, luego se realizó un proceso de molienda de los elementos hasta obtener un material finamente molido.

El cemento seleccionado fue P-35 procedente de la fábrica de cemento de Cienfuegos, como árido se trabajó con arena normalizada para la elaboración de los morteros y para la elaboración del hormigón el árido procedente del Purio. El aditivo a utilizar para la producción del hormigón es el SX 32.

2.4.1 Cemento P-35 de la fábrica de Cienfuegos.

Para evaluar la calidad del cemento P 35 se muestran sus propiedades físicas, químicas y mecánicas según los procedimientos que establecen las normas cubanas vigentes. Los resultados obtenidos en la determinación de los parámetros señalados anteriormente se compararon con las especificaciones de calidad del mismo. (MSc. Ing. Juan Manuel Alonso Lavernia, 2014)

Tabla 2.1. Ensayos Químicos.

Parámetros	P 35	Ensayo
SiO ₂	22,37	XRF
Al ₂ O ₃	5,19	XRF
Fe ₂ O ₃	3,13	XRF
CaO	62,11	XRF
MgO	1,52	XRF
SO ₃	2,96	XRF
CaOL	0,75	NC 505: 2007
RI	3,04	NC 507:2007
PF	2,18	NC 507:2007
Alcalis equiv.	0,65	UNE –EN 196-2:2006
Residuo Disolución	-	Metodología CTDMC (6)
% adición de toba	5	Dosificación por báscula

(MSc. Ing. Juan Manuel Alonso Lavernia, 2014)

Tabla 2.2. Ensayos Físicos

Tipo De Cemento	Pe NC 23:2007	Blaine NC EN 196- 6:2007	CN NC 524:2007	Estabilidad Volumen NC 524:2007	Retenido 90 micras NC EN 196- 6:2007	Tiempo Fraguado NC 524:2007	
						Inicial min	Final horas
P 35	3,08	3166	24,6	0,39	2,6	102	3,17

(MSc. Ing. Juan Manuel Alonso Lavernia, 2014)

Tabla 2.3. Ensayos Mecánicos. Resistencia a Compresión, MPa

Edades	P 35		Especific. Calidad NC 95:2011 NC 96:2011
	CTDMC	Fábrica	
3d	26,5	27,5	17
7d	34,4	35,3	25
28d	45,5	44,6	35

2.4.2 LC3-50

El cemento LC3 no es más que una combinación de 50 % de cemento P35 con 50 % de LC2. El LC2 está compuesto por arcilla calcinada, caliza y yeso. En el caso del presente trabajo se obtuvo el mismo a partir de la molienda de estos tres elementos en un molino de bolas.

2.4.3 Arena sílice normalizada utilizada en la elaboración de los morteros.

Arena constituida por la mezcla de cuatro fracciones de una arena lavada, no molida, de forma aproximadamente redondeada. La misma está garantizada en cuanto a sus parámetros según la correspondiente normativa (NC 54-396 1987) por lo que la misma se distribuye en cantidades limitadas para trabajos de laboratorio, a continuación, se muestran sus características.

Tabla 2.4. Arena normalizada

Características	U.M	Valor
Óxido de Silicio (min.)	%	98
Pérdida por ignición (máx.)	%	0,3
Impurezas orgánicas (máx.)	%	0,3
Impurezas arcillosas y polvo (máx.)	%	0,6

Apertura tamiz (mm)	Retenido (%)	Apertura tamiz (mm)	Retenido (%)
0,09	96-100	1	28-38
0,15	83-93	1,7	0-10
0,5	62-72	2	0

	Granulometría	Peso (g)
I	1-2 mm	445
II	0,5-1 mm	460
III	0,15-0,5 mm	270
IV	0,09-0,15 mm	175
	Total	1350

(NC54-396, 1987)

2.4.4 Áridos procedentes del Purio. Informe de Ensayo. Áridos.

Tabla 2.5. Material: 19.0- 9.50 mm

Ensayos	Resultado Anterior	Árido Corregido	Según NC251:2013
Material más Fino que 0.074 mm (%)	2.4	1.1	≤ 1.0
Partículas de Arcillas (%)			
Partículas Planas y Alargadas (%)	11.63	12.05	≤ 10
Impurezas Orgánicas			
Pesos Específicos Corriente	2.44	2.88	≥2.50
Pesos Específicos Saturado	2.51	2.94	
Pesos Específicos Aparente	2.6	3.1	
Absorción (%)	2.53	2.31	≤ 3.0
Masa Volumétrica Suelta (kg/m3)	1452.801	1375.938	
Masa Volumétrica Compactada (kg/m3)	1579.927	1513.223	
Porcentaje de Huecos (%)	35.25	47.57	

Análisis Granulométrico.

% Pasado	Tamiz No										
	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.50 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	600 μm	300 μm	150 μm	74 μm
Árido sin Corregir	100	95	53	30	11						
Árido Corregido	100	95	35	8	2						
NC 251:2013	100	90-100	20-55	0-15	0-5						

Tabla 2.6. Material: 9.50 4.76mm. Resultados de Ensayos.

Ensayos	Resultado Anterior	Árido Corregido	Según NC251:2013
Material más Fino que 0.074 mm (%)	5.3	4.0	≤ 1.0
Partículas de Arcillas (%)			
Partículas Planas y Alargadas (%)	11.71	13.46	≤ 10
Impurezas Orgánicas			
Pesos Específicos Corriente	2.39	2.42	≥2.50
Pesos Específicos Saturado	2.46	2.49	
Pesos Específicos Aparente	2.6	2.6	
Absorción (%)	3.03	3.05	≤ 3.0
Masa Volumétrica Suelta (kg/m ³)	1401.910	1400.860	
Masa Volumétrica Compactada (kg/m ³)	1577.251	1520.984	
Porcentaje de Huecos (%)	34.01	31.19	
Módulo de Finura			

Análisis Granulométrico.

%	Tamiz No										
	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.50 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	600 μm	300 μm	150 μm	74 μm
Árido sin Corregir			100	98	46	18	11				
Árido Corregido			100	90	25	5	2				
NC 251:2013			100	85-100	15-35	0-10	0-5				

Tabla 2.7. Material: 4.76 - 0.147m.

Ensayos	Resultado Anterior	Árido Corregido	Según NC251:2013
Material más Fino que 0.074 mm (%)	4.3	5.4	≤ 3.0
Partículas de Arcillas (%)			
Partículas Planas y Alargadas (%)			
Impurezas Orgánicas			
Pesos Específicos Corriente	2.40	2.45	≥2.50
Pesos Específicos Saturado	2.48	2.55	
Pesos Específicos Aparente	2.6	2.7	
Absorción (%)	3.33	4.08	≤ 3.0
Masa Volumétrica Suelta (kg/m ³)	1430.104	1533.457	
Masa Volumétrica Compactada (kg/m ³)	1614.854	1666.564	
Porcentaje de Huecos (%)	32.71	31.84	
Módulo de Finura	3.59	2.76	2.20 – 3.58

Análisis Granulométrico.

% Pasado	Tamiz No										
	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.50 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	600 μm	300 μm	150 μm	74 μm
Árido sin Corregir				100	99	67	48	28	13	4	
Árido Corregido				100	98	86	65	44	22	8	
NC 251:2013				100	90-100	70-100	45-80	25-60	10-30	2-10	

2.4.5 Aditivo Dynamon SX 32 utilizado en la producción de hormigón.

El aditivo empleado es el Dynamon SX 32, es un aditivo líquido superplastificante que logra una significativa reducción del agua de amasado garantizando una elevada trabajabilidad y prestaciones mecánicas. Este aditivo es capaz de lograr consistencia de S4 ò S5 según la norma EN 206- 1. Dynamon SX 32 es una solución acuosa al 22,1%

de polímeros acrílicos, exenta de formaldehidos, capaz de dispersar eficazmente los gránulos del cemento, con componentes secundarios que mejoran notablemente la cohesión.

Tabla 2.8 Aditivo Dynamon SX 32

Datos Técnicos. Aditivo Dynamon SX 32	
Consistencia	Líquida
Color	Ámbar
Densidad según ISO 785 (g/cm ³)	1.08 + 0.02 + 200C
Residuo seco según EN 934-2	22.1 + 1.1
Acción principal	Aumento y conservación de la trabajabilidad y/o reducción de agua
Clasificación según EN 934-2	Reductor de agua de alta eficacia / superfluidificante, prospero 11.1-11.2
Cloruros solubles en agua según EN 840-10 (%)	< 0.1 (Ausentes según EN 934-2)
pH según la ISO 4316	6.5 + 1
Conservación	12 meses en los envases originales no abiertos, proteger del hielo
Clasificación de peligrosidad según la directiva 1999/45/CE	Ninguna

2.4.6 Caracterización del material arcilloso originario.

Los desechos cerámicos procedentes de ladrillos, DCL, han sido en este caso obtenidos a partir de elementos fabricados con arcilla originaria de Manicaragua, región tipificada por una alta y dispersa producción de elementos cerámicos, en muchos casos estos elementos cerámicos se obtienen en talleres artesanales con capacidad de producción de 6000 a 20000 ladrillos por quema. (Machado, 2011)

En este sentido la preparación del material arcillosos (roca o suelo arcillosos) con vistas a su empleo en la elaboración de elementos cerámicos puede incrementar el potencial de la materia prima para ser transformada en una puzolana de adecuada reactividad. Además, la reducción del tamaño de las partículas a ser calcinadas favorece la reactividad desde el punto de vista morfológico.

Las principales fases minerales identificadas por DRX en la fracción arcillosa son montmorillonita $[Al_2(Si_4O_{10})(OH)_2 \cdot n(H_2O)]$, illita $[(Si_{8-x}Al_x)(Al, Mg, Fe)_4O_{20}(OH)_4 \cdot Kx]$ y caolinita $[Al_2(Si_2O_5)(OH)_4]$. (Díaz, 2010)

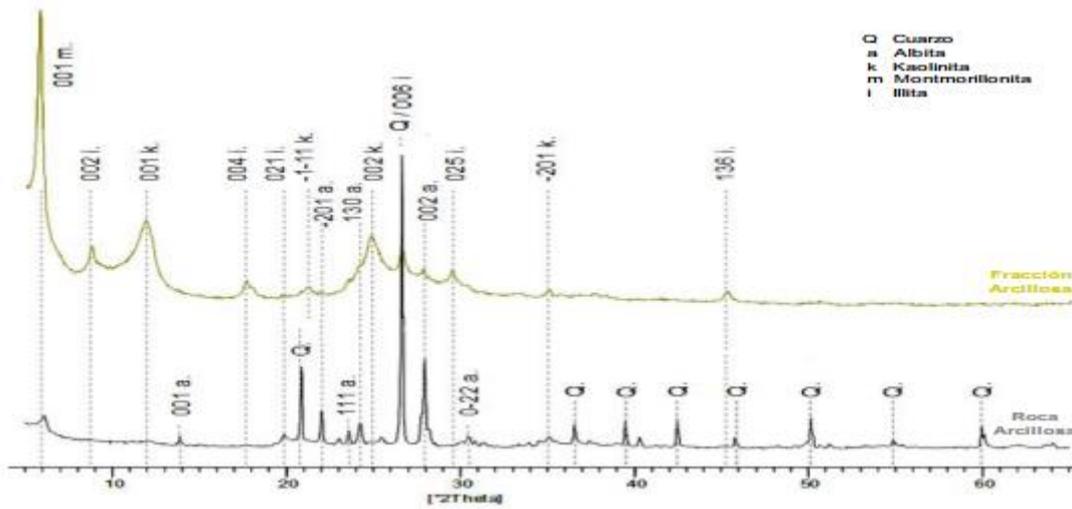


Fig. 2.3. Difractogramas de la roca y de la fracción arcillosa. Fuente:

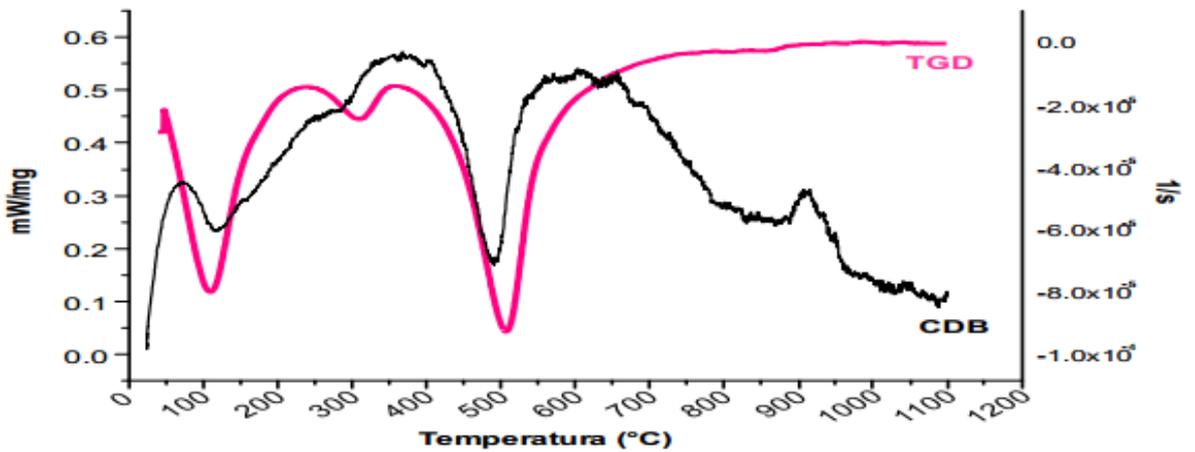


Fig. 2.4. CDB y TGD de la roca y de la fracción arcillosa.

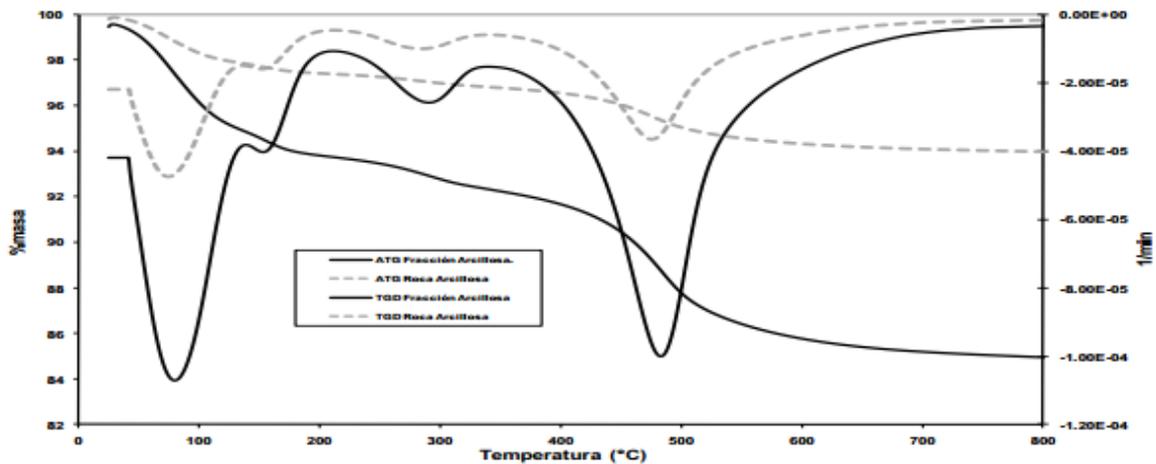


Fig. 2.5. ATG y TGD de la roca y de la fracción arcillosa.

Los relativamente altos niveles de K_2O en la composición química de la fracción arcillosa son relacionados a la presencia de illita, mientras que el alto contenido de Na_2O y MgO puede estar asociado tanto a la presencia de montmorillonita como a los feldespatos de muy pequeño tamaño de grano. Son de destacar además los altos niveles de Fe_2O_3 , que pueden encontrarse como sustituciones isomórficas en cualquiera de las fases arcillosas presentes, y bajo la forma estructural de óxidos o hidróxidos, y que son en gran medida los responsables del color rojizo de la arcilla.

En las curvas de TGD y CDB (Figura 2.4) puede observarse hasta los 250 °C un primer efecto endotérmico y de pérdida de masa asociado a la deshidratación del sistema. La magnitud de este efecto confirma la presencia de arcillas con una alta capacidad de absorción de agua, como la montmorillonita o las illitas con bajo grado de ordenamiento estructural. Este efecto va seguido de otro menos intenso entre los 250 y los 350 °C, que puede ser asignado a la descomposición de hidróxidos de hierro del tipo limonita [$FeO(OH) \cdot nH_2O$].

La pérdida de masa en el rango de los 400 a los 650 °C y con una temperatura pico cercana a los 600 °C, se debe en su mayor parte a la desoxhidrilación de la caolinita, aunque presenta también contribuciones de la desoxhidrilación de las otras fases arcillosas en su parte derecha. El ancho de este efecto hace suponer una caolinita con una estructura poco ordenada. Se ha demostrado que la actividad puzolánica de la caolinita calcinada está relacionada directamente con el grado de cristalinidad en la estructura en su estado natural, ya que una caolinita bien ordenada da como resultado un metacaolín menos reactivo. La asimetría en la curva de TGD hacia la parte derecha,

acompañado de un claro efecto endotérmico, señala las contribuciones de la desoxhidrilación de la montmorillonita e illita.

Para la montmorillonita está reportada su desoxhidrilación para un rango entre los 550 y los 750 °C. Esta fase arcillosa es muy susceptible a la presencia de sustituciones isomórficas en la capa octaédrica, que pueden afectar la temperatura para la cual ocurre la desoxhidrilación. Para la illita, con una estructura más estable térmicamente, el rango de temperaturas para el cual ocurre la desoxhidrilación puede extenderse entre los 600 y los 900°C en forma de una señal amplia y de baja intensidad, por lo que se solapa con los efectos correspondientes a la desoxhidrilación de la montmorillonita y parcialmente de la caolinita. En la curva de CDB se puede identificar con precisión el efecto exotérmico sin cambio de masa asociado que aparece entre los 900 y los 1 000 °C y que corresponde a la reorganización estructural del sistema. Su baja intensidad y relativa amplitud es otro indicio de la presencia de fases débilmente cristalizadas. Debido a su tendencia hacia la orientación preferencial y a su amplia variabilidad estructural incluso dentro de una misma familia de minerales arcillosos, no es posible cuantificar el contenido de las diferentes fases arcillosas por DRX. Sin embargo, los contenidos de las fases que presentan reacciones de descomposición asociadas a pérdidas de masa pueden ser estimados a partir del análisis combinado de las curvas de ATG-TGD de la roca y de la fracción arcillosa, de la composición química y de la composición teórica asignada a las fases identificadas por DRX.

Tabla 2.9 Composición química de la roca o suelo arcillosa.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	MnO	Na ₂ O	Otros	PPI	Total
Roca Arcillosa	57.74	18.71	7.07	1.85	1.80	0.02	0.65	0.12	2.68	0.76	8.57	99.97

Tabla 2.10. Comparación entre la composición química estimada para las fases arcillosas y la determinada por FRX.

% SiO ₂ asignado a las fases arcillosas	43.77	% SiO ₂ determinado por FRX	43.89
% Al ₂ O ₃ asignado a las fases arcillosas	28.65	% Al ₂ O ₃ determinado por FRX	24.73
% Fe ₂ O ₃ asignado a la limonita	8.28	% Fe ₂ O ₃ determinado por FRX	11.13

Tabla 2.11. Estimado del % en masa de algunas fases en la roca o suelo arcilloso.

Rango de Temperaturas	0-250 °C	250-350 °C	350-550 °C	550-750 °C	750-950 °C
Fase asignada a la pérdida de masa	agua	limonita	caolinita	montmorillonita	illita**
Fórmula (Teórica*)	H ₂ O	FeO(OH).0,5H ₂ O	Al ₂ (Si ₂ O ₅) ₂ (OH) ₄	Al ₂ (Si ₄ O ₁₀) ₂ ·n(H ₂ O)	(Si _{6-x} Al _x)(Al) ₄ O ₂₀ (OH) ₄ ·K _x
% de pérdida de masa asignada a la descomposición de la fase (Teórica)	-	14,46 %	13,90 %	5,00 %	4,50 %
Roca Arcillosa					
% de pérdida de masa (ATG)	2,40 %	0,70 %	2,30 %	0,80 %	0,20 %
% en masa representado por la fase (Calculado)	2,40 %	4,84 ± 0,50 %	16,55 ± 1,70 %	16,00 ± 3,20 %	4,42 ± 0,80 %
% de Fe ₂ O ₃ asignado a la fase (Calculado)	-	4,14 ± 0,40 %			
% de SiO ₂ asignado a la fase (Calculado)	-	-	7,70 ± 0,80 %	10,67 ± 2,10 %	2,00 ± 0,40 %
% de Al ₂ O ₃ asignado a la fase (Calculado)	-	-	6,54 ± 0,70 %	4,53 ± 0,90 %	1,70 ± 0,30 %

Es importante aclarar que para la asignación a las distintas fases arcillosas de las pérdidas de masa determinadas en la curva de análisis térmico se tomaron las zonas donde la contribución de cada una de estas fases es mayor, de acuerdo a lo observado en la curva y a los valores reportados en la literatura. Sin embargo, no pueden evitarse los errores causados por el solapamiento de las pérdidas de masa en la curva, que son mucho mayores para la montmorillonita y la illita que para la caolinita y la limonita. Además, las asignaciones de las pérdidas de masa por la desoxhidrilación y los cálculos derivados de estas (% en masa de las fases y de los óxidos que las componen) son basadas en fórmulas teóricas que representan un mínimo de sustituciones isomórficas en la estructura. Las sustituciones isomórficas son mucho más frecuentes en la montmorillonita y en la illita que en la caolinita, y consecuentemente, los errores derivados del empleo de las fórmulas teóricas para estas fases. Por lo tanto, para las estimaciones de los contenidos de fases arcillosas, se le asigna un error relativo del 10% a los cálculos realizados para la limonita y la caolinita, y de un 20% para los cálculos realizados para la montmorillonita y la illita.

No obstante, las fuentes de error antes señaladas, la estimación del contenido de las diferentes fases brinda valiosa información acerca de las potencialidades del material como fuente de puzolanas. Las mezclas arcillosas con más de un 35 % de caolinita pueden ser directamente procesadas por activación térmica para la obtención de materiales puzolánicos.

De acuerdo a la composición física estimada, la fracción arcillosa estaría dominada por la caolinita [(40,30 ± 4,50) %], seguida por la montmorillonita [(30,00 ± 6,00) %] y la illita [(10,00 ± 2,00) %]. La contribución de estas dos últimas fases a la fracción arcillosa no es despreciable, sobre todo la montmorillonita. Como las temperaturas de activación térmica para estas dos fases son mayores que las de la caolinita, es de esperar que la temperatura a la cual se alcance el máximo carácter puzolánico para esta fracción arcillosa sea mayor que la temperatura reportada para rocas o fracciones arcillosas con un claro predominio de la caolinita sobre las demás fases arcillosas. (Díaz, 2010)

2.4.7 Caliza

La caliza que se emplea procede de Guayos, municipio de Santi Spiritus, específicamente de la cantera Nieve de Morejón. Las caracterizaciones de la misma se muestran en la en la Tabla 2.12

Tabla 2.12 Composición química de la caliza.

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaCO ₃
Por ciento %	4.12	1.15	0.64	51.59	1.21	40.92	92

2.4.8 Yeso

El yeso empleado es tomado en forma de roca proveniente del yacimiento ubicado en Sibuaney en Punta Alegre, su composición química se muestra en la tabla 2.13

Tabla 2.13: Composición química del Yeso.

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PPI	RI
Por ciento %	5.24	4.7	3.38	30.36	1.96	31.95	21.67	9.07

2.4.9 Agua

El agua empleada es la que se utiliza en el laboratorio de materiales de la facultad de construcciones de la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, para la elaboración de hormigones y otros trabajos de laboratorio, la cual se considera adecuada según lo

especificado en la "NC 353-2004 Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones".

2.5. Características del proceso de producción de los ladrillos de cerámica roja en el combinado de Manicaragua.

El Combinado de cerámica de Manicaragua ubicado en la provincia de Villa Clara, clasifica como de mediana industria, por su industrialización parcial del proceso productivo de ladrillos de cerámica roja, logrando una automatización total, solo para el caso del conformado del ladrillo verde. Esto posibilita una adecuada calidad de las piezas ante los procesos térmicos (secado y cocción), los cuales responden a las siguientes características:

Proceso de Secado: El material conformado se coloca en secaderos naturales cubiertos (Ver figura 2.6), en naves que protegen de la lluvia y de la incidencia directa de los rayos del sol, lo cual permite una regulación adecuada y constante de las corrientes de aire y de la radiación solar. El tiempo de secado de los elementos normalmente tarda entre 8 y 10 días, a una temperatura ambiente entre 23 y 33°C, pero puede aumentar en dependencia de las condiciones climatológicas, hasta 15 días. La humedad requerida en las piezas para dar por concluido este proceso y poder pasar a la cocción, se encuentra entre un 6% y un 8 %.



Fig. 2.6 Secadero natural a la sombra.

Proceso de cocción: La fábrica dispone de tres hornos discontinuos, con capacidades de producción estimadas en 6800, 16000 y 32000 unidades, respectivamente, con un consumo de combustible en dependencia de la capacidad de horno entre las 3600 y 800 litros de Fuel Oil por quema (Ver Figura 2.7 y 2.8). En el caso específico de estos hornos, no existe la posibilidad de controlar el flujo el combustible ni de controlar la temperatura, por lo que ambas se realizan de forma empírica, teniendo en cuenta la experiencia del personal(hornero), donde el tiempo de cocción oscila entre 20 y 36 horas, en función de la capacidad del horno utilizado.



Fig.2.7 Horno artesanal.



Fig.2.8 Disposición de los quemadores

2.6. Determinación de la resistencia mecánica de probetas prismáticas.
Amasado del Mortero. Moldeado de las Probetas. Resistencia a compresión.

Para la elaboración de las probetas se limpiaron, engrasaron y armaron los moldes a utilizar según las especificaciones de la norma NC 173:2002. El amasado del mortero, moldeado de las probetas y la determinación de la resistencia mecánica de las misma según las especificaciones de la norma NC 506:2013.



Fig.2.9 Probetas prismáticas 40 x 40 x 160 mm. Fuente: Elaboración propia.

2.6.1 Amasado del Mortero.

Para el mezclado de cada lote de mortero mecánicamente se utiliza la amasadora (Ver figura 2.10) procediendo según la siguiente metodología.

Verter el agua dentro del recipiente y añadir el cemento.

Inmediatamente arrancar la amasadora a velocidad lenta (Ver Tabla 2.14) y después de 30 segundos (s), introducir regularmente toda la arena durante los 30 s siguientes. Cuando se utiliza arena clasificada por tamaños añadir la cantidad precisa de cada tamaño sucesivamente, empezando por la más gruesa. Poner la amasadora a la velocidad rápida y continuar el amasado durante otros 30 s.

Parar la amasadora durante 1 min. 30 s. En los primeros 15 s, quitar, por medio de una espátula de goma, todo el mortero adherido fuera de la zona de amasado y volverlo a la mezcla.

Continuar el amasado a la velocidad rápida durante 60 s.

La duración de los distintos períodos de amasado se debe cumplir con una precisión de ± 1 s. (NC506, 2013)

Tabla 2.14 — Velocidades de la pala mezcladora.

Velocidad	Rotación min⁻¹	Movimiento planetario min⁻¹
Lenta	140 \pm 5	62 \pm 5
Rápida	285 \pm 10	125 \pm 10

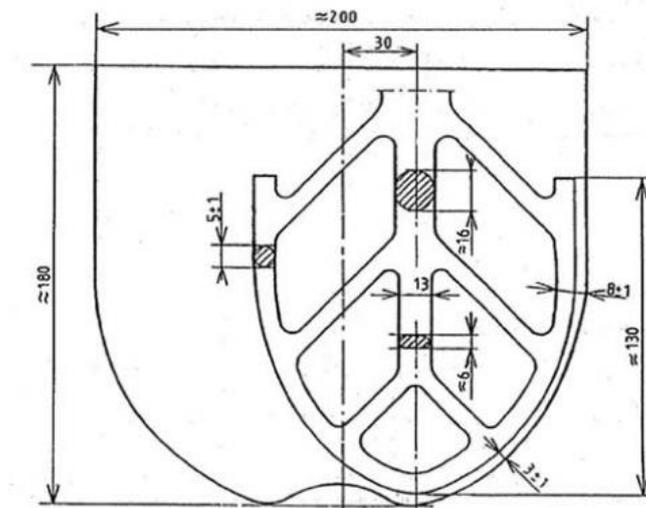


Fig. 2.10 Recipiente y pala.

Nota– La holgura indicada en la figura 1 ($3\text{mm} \pm 1\text{mm}$), se refiere a la situación cuando, la pala, en el recipiente vacío, se lleva tan próxima a la pared como sea posible. Cuando la medida es difícil, son útiles los medidores sencillos de tolerancias (“galgas de espesor”). (NC506, 2013)



Fig. 2.11 Mezcladora utilizada.

2.6.2 Moldeado de las Probetas.

Las probetas serán moldeadas inmediatamente después de la preparación del mortero. Con el molde y la tolva firmemente unidos a la mesa de la compactadora, introducir directamente de la cubeta de la amasadora, en una o varias veces con una cuchara adecuada, la primera de las dos capas de mortero (cada una aproximadamente de 300 g) en cada compartimiento del molde. Extender la capa uniformemente, utilizando la espátula mayor mantenida verticalmente y con sus ensanchamientos en contacto con el borde superior de la tolva, pasándola a lo largo de cada compartimiento del molde, una vez hacia delante y hacia atrás. A continuación, se compacta la primera capa de mortero con 60 golpes. Se introduce la segunda capa de mortero, se iguala con la espátula pequeña y se compacta la capa con otros 60 golpes.

Retirar con precaución el molde de la mesa de sacudidas y separar la tolva. Inmediatamente quitar el exceso de mortero con la regla plana (Ver Figura 2.14),

manteniéndola casi vertical, con lentos movimientos transversales de sierra, una vez en cada dirección como se indica en la Figura 2.12. Alisar la superficie de las probetas utilizando la misma regla mantenida casi vertical. (NC506, 2013)

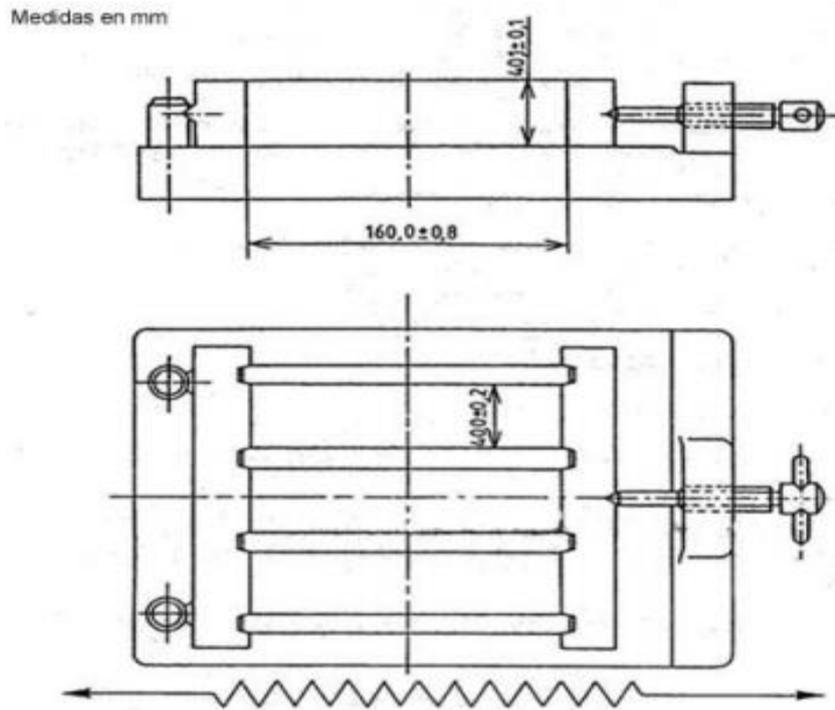


Fig.2.12 Ejemplo de molde.

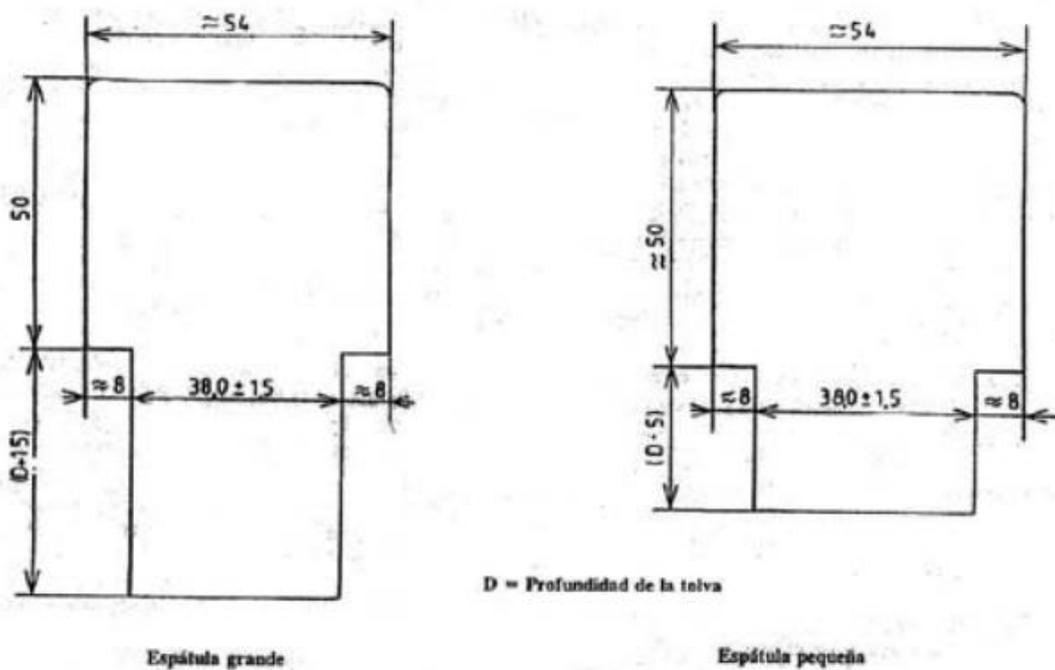


Fig.2.13 Espátula grande y pequeña.

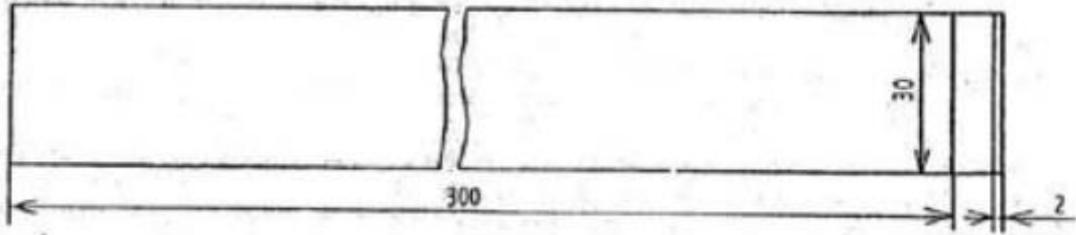
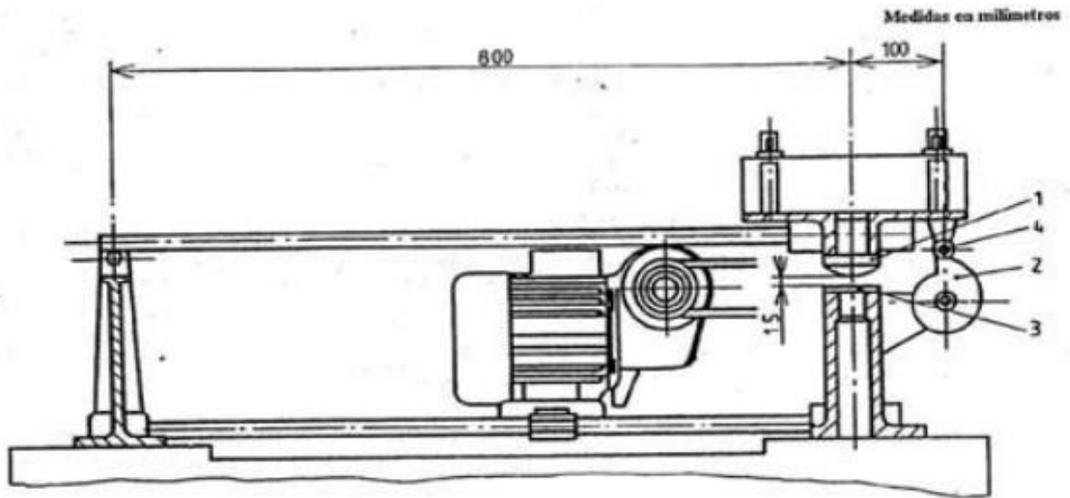


Fig.2.14 Regla



1 Martinete 2 Leva 3 Tope yunque 4 Rodillo de leva

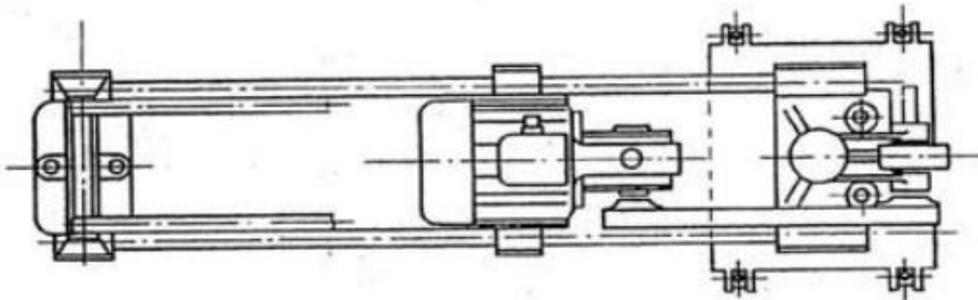


Fig.2.15 Ejemplo de compactadora.



Fig.2.16 Compactadora

2.6.3 Resistencia a compresión.

- Ensayar los semi - prismas a compresión sobre las caras laterales.
- Centrar cada semi - prisma lateralmente con relación a los platos de la máquina a $\pm 0,5$ mm y longitudinalmente de forma que la base del prisma no sobresalga de los platos o placas auxiliares más de unos 10 mm. Aumentar la carga uniformemente a una velocidad de $2\ 400\ \text{N} \pm 200\ \text{N/s}$ durante todo el tiempo de aplicación de la carga hasta la rotura. Cuando el incremento de carga se regula a mano se debe reducir la velocidad en las proximidades de la carga de rotura.
- Calcular la resistencia a compresión $R_c(\text{N/mm}^2)$ (MPa) según la fórmula

siguiente:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Donde:

R_c : Resistencia a compresión (MPa);

F_c : Carga máxima de rotura (N)

1600 = (40 x 40) mm² es la superficie de los platos o placas auxiliares

1 N/mm² = 1MPa. (NC506, 2013)



Fig. 2.17 Máquina de ensayo de resistencias a compresión

2.7. Proceso de producción de probetas cilíndricas 200x100mm.

La producción de las mezclas se realizó en una hormigonera de eje vertical con una capacidad nominal de producción de 350 litros (Ver figura 2.18: 2.19). Las mezclas realizadas fueron de 19 litros cada una. Las dos amasadas se hicieron el mismo día, para una producción de 18 probetas de 200 x100 mm, 9 probetas por cada serie de cemento LC3. La introducción de las materias primas fue según el siguiente orden, primeramente, los áridos, luego el cemento, el agua y el aditivo. Luego se vertió la mezcla en los moldes en dos capas compactadas con una varilla metálica con 25 golpes cada una.



Fig.2.18 Hormigonera de eje vertical. Fuente: Elaboración propia.



Fig.2.19 moldes cilíndricos 200x100mm

2.8 Chequeo de la consistencia.

Se realizó la medición del asentamiento por el método del cono de Abrams a cada una de las amasadas realizando la evaluación según los requisitos expuestos en la tabla 2.15 y la figura 2.20. Para ello se llenó el cono en tres capas compactadas cada una con varilla mediante 25 golpes, luego se levanta el cono verticalmente y se realiza la medición en cuatro puntos. El resultado final será obtenido mediante el cálculo del promedio de todas las mediciones. El procedimiento se realizaba para cada mezcla .(NC174, 2002).

Tabla 2.15 Tipos de asentamiento por el Cono de Abrams.

Tipo	Valoración cualitativa	Asentamiento (mm)
A1	Seca	10 a 40
A2	Plástica	50 a 90
A3	Blanda	100 a 150
A4	Fluida	160 a 210
A5	Muy fluida	≥ 220

(NC120, 2014)

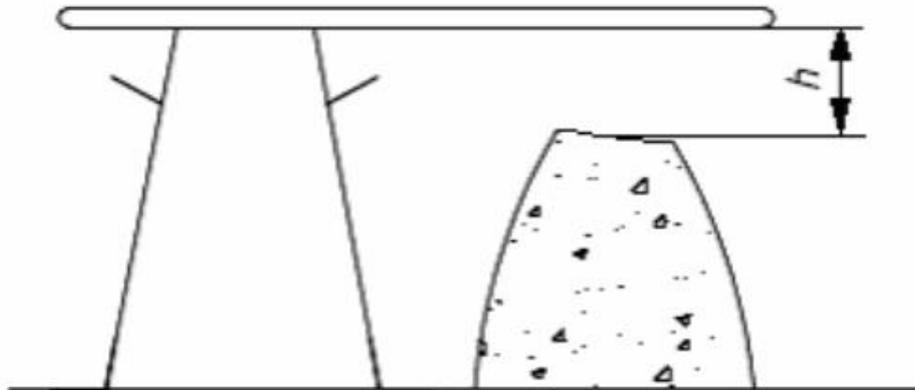


Fig.2.20 Medición por el método del cono de Abrams

2.9 Curado de las probetas

El curado de las probetas se realizó sumergiendo los especímenes desmoldados una vez pasadas la 24 + 8 horas. El tiempo de curados se extendía hasta que el hormigón alcanzara las edades de tres, siete, y veintiocho días respectivamente.

2.10. Minicono. Procedimiento para la determinación de la plasticidad.

- Se pesan 100 ± 0.02 g de cemento y se vierten en el beaker o recipiente cilíndrico e inmediatamente se vierte la cantidad de agua calculada para la relación agua/cemento establecida, con o sin el aditivo y/o la adición.
- Se introduce la paleta de la mezcladora dentro del beaker y se pone en movimiento a la velocidad de 250 r.p.m. durante dos minutos.
- Se detiene el mezclado, se tapa el recipiente con el plástico ranurado y se deja reposar la mezcla durante tres minutos.
- Se pone nuevamente en movimiento la mezcladora y se mezcla durante dos minutos finales.
- Se coloca el minicono sobre la placa de acrílico o vidrio.
- Se detiene la mezcladora:
- Se vierte la pasta con la ayuda de la varilla dentro del Minicono
- Se enrasa con la espátula y se elimina el exceso de pasta en el extremo superior y lateral del Minicono
- Se mantiene en reposo el Minicono durante un minuto y se levanta verticalmente con movimiento rápido dejando caer la pasta hasta que la superficie interior del Minicono quede completamente limpia.

La pasta formará una pastilla circular que se mantiene en reposo durante 24 horas como mínimo hasta su total endurecimiento



Fig.2.21 Proceso de mezclado.



Fig.2.22 Mezcladora.

2.10.1 Diámetro medio de la pastilla.

Se mide 8 veces el diámetro de la pastilla sin desmoldar a diferentes ángulos recorriendo toda su circunferencia, se halla el diámetro medio y se calcula el área como la de un círculo.

$$D = \frac{\sum d}{8}$$

Donde d: diámetro de cada medición

$$\text{Área} = \frac{\pi D^2}{4}$$



Fig.2.23 Minico



Fig.2.24 Medición de los diámetros

2.11 Contenido de aire en la mezcla

Para determinar el contenido de aire en la mezcla de hormigón en estado fresco mediante el método de indicador de presión se procedió al vertido del hormigón en el recipiente mediante tres capas compactadas manualmente con una varilla, aplicando 25 golpes por capa una, luego de ser enrasada la superficie y de limpiar completamente los bordes del recipiente, se coloca la tapa en su lugar, para así realizar las mediciones. (NC-ISO1920-2, 2010)

Este mismo procedimiento se aplica a los áridos de cada mezcla, posteriormente, con los valores de los áridos y del hormigón se realizó el cálculo del % del contenido de aire en la mezcla cumpliendo con el procedimiento siguiente:

$$A_s = A_1 - G$$

Donde:

A_s = contenido de aire de la muestra sometida a ensayo, en %

A_1 = contenido relativo de aire de la muestra sometida a ensayo, en %

G = factor de corrección del árido, en %. (NC-ASTM-C-231, 2005)

2.12 Calorimetría

Para la realización de la calorimetría dependiendo del material a analizar existen dos formas de preparar el ensayo, en el caso del LC3 se mezclan el mismo y el agua, en una relación $a/c=0.42$, por dos minutos con una mezcladora a 1200 rpm; en el caso de la arcilla calcinada se le agrega $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y se vierte en una vasija de la mezcladora, luego en otra vasija se junta KOH , K_2SO_4 y agua, todo se une en la vasija de la mezcladora y se sigue el mismo procedimiento anterior. Luego del mezclado se montan las muestras en el calorímetro.



Fig.2.25 Mezcladora



Fig.2.26 Calorímetro

2.13 Dosificaciones.

En las dosificaciones empleadas se mantiene constante la relación a/c ya sea en la producción del mortero o el hormigón. La única variación es la temperatura de activación de la arcilla utilizada en cada caso.

2.13.1 Mortero.

Para la elaboración de los morteros (P35,70-30 y LC3) se utilizó la misma relación a/c=0.5 y el contenido de arena, normalizada, es tres veces el contenido de cemento.

2.13.1.1 Mortero 70-30

Se hicieron 24 probetas, 6 por cada serie (700,800,900°C y la serie de referencia de Manicaragua.). Estas probetas serán ensayadas a los 7 y 28 días de curado.

Tabla 2.16 Dosificación probetas prismáticas

Cemento	450g	70% cemento	30% arcilla
Agua	225ml		
Arena	1350g		

2.13.1.2 Mortero LC3

Fueron elaboradas 18 probetas, 9 por cada serie de LC3 (una con DC procedente de los ladrillos producidos en Manicaragua y otra con los obtenidos en condiciones de laboratorio a una temperatura de (800°C). Serán ensayadas a los 3,7 y 28 días de curado.

Tabla 2.17 Dosificación Probetas prismáticas

Cemento	450g	50% cemento	50% LC2
Agua	225ml		
Arena	1350g		

2.13.1.3 Mortero P 35

Fueron elaboradas 9 probetas para ser utilizadas como patrón para determinar el IAP. Serán ensayadas a los 3,7 y 28 días de curado.

Tabla 2.18 Dosificación probetas prismáticas

Cemento	450g
Agua	225ml
Arena	1350g

2.13.2 Hormigón elaborado con LC3.

En el caso de las mezclas de hormigón serán dos con la misma dosificación, variando solamente la temperatura de activación de la arcilla utilizada para la elaboración del LC3 que se usa en cada una. Para las dos series de hormigón se usará la misma relación $a/c=0.5$ y el mismo por ciento de aditivo SX 32 (1%). Este diseño de mezcla está previsto para 19 lt, el mismo es obtenido de la (NC120 2014), serie de hormigón H3 para agresividad media. Serán elaboradas 18 probetas cilíndricas de 200x100mm, 9 de cada serie.

Tabla 2.19 Dosificación probetas cilíndricas

	Peso Kg	% (Total)
Cemento	7,125	16,0
Agua	3,56	8,0
Arena	14,16	31,7
A. grueso	11,86	26,6
A. medio	7,83	17,6
Aditivo	0,07125	0,16
Total	44,60625	100

2.13.2.1 LC3 (cemento CP 50% + LC2 50 % respectivamente)

Para un total de 30 Kg se utilizan 18 Kg de arcilla calcinada(CCL), 9 Kg de caliza (LS) y 3 Kg de yeso (GYP) como se muestra en la tabla 2.20.

El % utilizado, para una muestra mayor, de cada uno de los componentes con respecto al total se muestra a continuación.

CCL 60%

LS 30%

GYP 10%

Tabla 2.20

		CLK	CCL	LS	GYP	Total
LC2	50%	0,00	18,00	9,00	3,00	30,00

2.13.3 Minicono

Para la determinación de la plasticidad por el método del minicono serán utilizados 100 g de cemento P35 y 50g de agua, para una relación $a/c=0.5$, de la misma forma se procede con las dos series de LC3.

2.13.4 Calorimetría

Las calorimetrías han sido montadas para las dos series principales de arcilla (800° y Manicaragua) y para las dos series de LC3. En el caso de las dos series de LC3 solo es necesario preparar la muestra de cemento con agua, para una relación $a/c=0.42$, la arcilla calcinada lleva otra dosificación para llevar a cabo el ensayo y se muestra en la tabla 2.21

Tabla 2.21

Arcilla calcinada	5 g
Ca(OH)₂	15 g
KOH	0,126 g
K₂SO₄	0,589 g
Agua	24 g

2.13.5 Contenido de aire en la mezcla

Para la preparación del ensayo se utilizó la misma dosificación de la serie H3. En este caso para 10 litros de hormigón, de la misma forma se hizo la formulación para la corrección de los áridos lo que se hizo un diseño para 7 litros solamente.

2.14 Conclusiones parciales

- Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en la investigación, se concibió el diseño experimental al obtener DCL procedentes de ladrillos producidos en condiciones semi – industriales y en condiciones de laboratorio procesados con temperaturas controladas (700: 800 y 900 0C), todo ello con arcillas bien caracterizadas procedentes del municipio Manicaragua en la región central de Villa Clara.
- La obtención de los DCL en correspondencia con el diseño experimental elaborado permite, una vez realizada la preparación y caracterización de las materias primas involucradas, la elaboración de LC2, así como la fabricación de morteros y hormigones con la adición de LC3.

Las diferentes condiciones de obtención de los desechos cerámicos permiten evaluar y comparar mediante ensayos físico – mecánicos y de calorimetría su mejor reactividad puzolánica con vistas a la elaboración local de cemento de bajo carbono.

- A los HORMIGONES elaborados a partir de los cementos artesanales se les realizaron los ensayos del Cono de Abrams y de resistencia a compresión según lo establece la NC 274-2009.

Capítulo 3: Análisis y discusión de los resultados de la evaluación de la reactividad puzolánica de los materiales cerámicos obtenidos en diferentes condiciones.

3.0. Introducción.

En este capítulo se evalúan los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas a los diferentes morteros aditivados con materiales puzolánicos procedentes de desechos de la producción artesanal de cerámica roja y producidos en condiciones de laboratorio. Se exponen resultados del comportamiento físico-mecánico de las muestras y su comparación con patrones con un 100% de P35, así como el IAP determinado para cada serie y a distintas edades.

Las series, ya sea de arcilla activada térmicamente o de LC3, fueron sometidas a varios ensayos manteniendo siempre la relación a/c constante y el % de aditivo respectivamente, las cuatro series a evaluar son 700°C, 800°C, 900°C y Manicaragua(MAN); nombradas así para destacar la procedencia y la temperatura a que fueron quemados los ladrillos evaluados en este TD.

3.1. Análisis de resultados de la resistencia mecánica de los morteros e índice de actividad puzolánica.

La resistencia a compresión de los morteros se determinó a las edades de 3, 7 y 28 días. Se utilizó para la realización del ensayo en cada edad, 3 probetas de 40 x 40 x 160 mm, para un total de 24 probetas de 70-30 (70% de cemento y 30% de arcilla) que fueron ensayadas a 7 y 28 días; las probetas conformadas por LC3 son 18 y las de P35 9 ambas ensayadas a 3,7 y 28 días. Cabe destacar que los valores representados corresponden a el ensayo a compresión de tres probetas, para cada serie y distintas temperaturas de ahí que los valores de resistencia son obtenidos a partir de los seis semi – prismas correspondientes a dicha cantidad de probetas.

3.1.1 Probetas 70-30 (70% de cemento y 30% de arcilla) y patrón de P35.

En la tabla 3.1 se muestran los valores de resistencia a compresión de las probetas prismáticas elaboradas a partir de la sustitución de un 30 % del cemento por DC

proveniente de la molienda del taller artesanal de Manicaragua y los obtenidos en condiciones de laboratorio.

Tabla 3.1 Resistencia a compresión y IAP.

Probetas (7 días)	1	2	3	4	5	6	Resistencia(MPa)	IAP
700	22,7	26	19,4	29	28,4	28,7	16,06	0,56
800	38,1	39	35,2	33,8	33,7	37,7	22,66	0,78
900	37,2	37,9	39,9	39,8	31,4	33,8	22,92	0,79
MAN	37,8	37,8	36,2	38	39,3	35,7	23,42	0,81
Probetas(28 días)	1	2	3	4	5	6	Resistencia(MPa)	
700	38	41,6	33,3	32	35,4	32,5	22,2	0,53
800	54	50,6	53	51	53	52,1	32,7	0,78
900	49,2	50,4	51	50,3	55,9	49	31,9	0,76
MAN	59,3	58,4	60,6	60,2	61,9	57,3	37,3	0,89
Probetas(P 35)	1	2	3	4	5	6	Resistencia(MPa)	
7	45,4	44,8	47,8	44,8	46,4	47,9	28,9	
28	68,5	64,7	67,6	67,1	68,6	67,6	42,1	

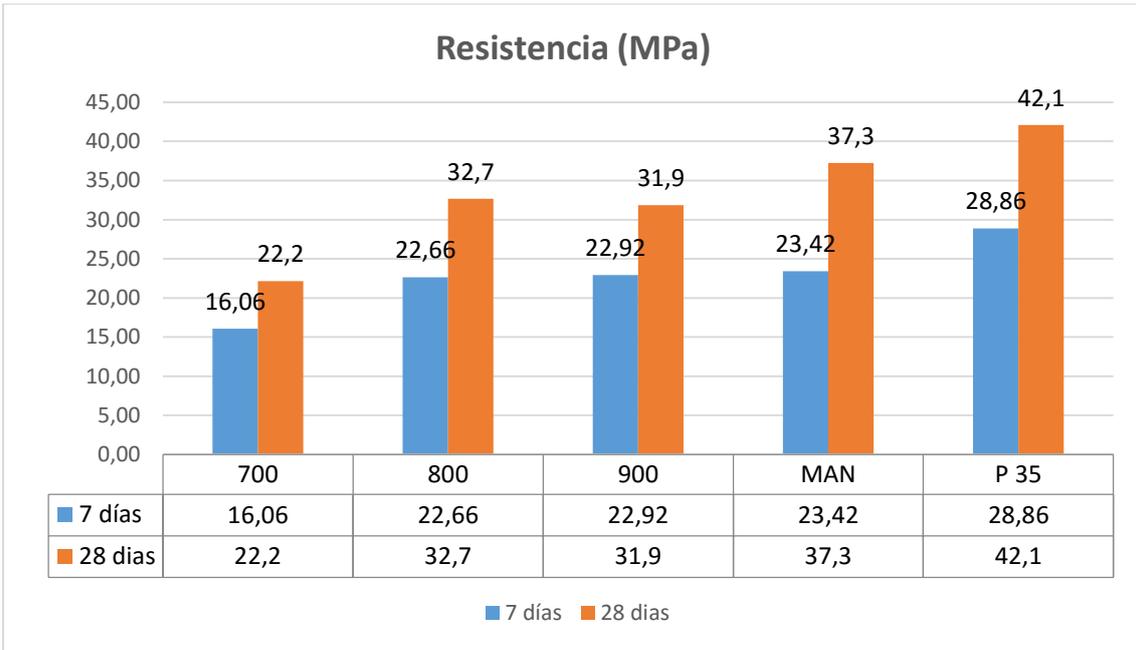


Fig.3.1 Resistencia a compresión

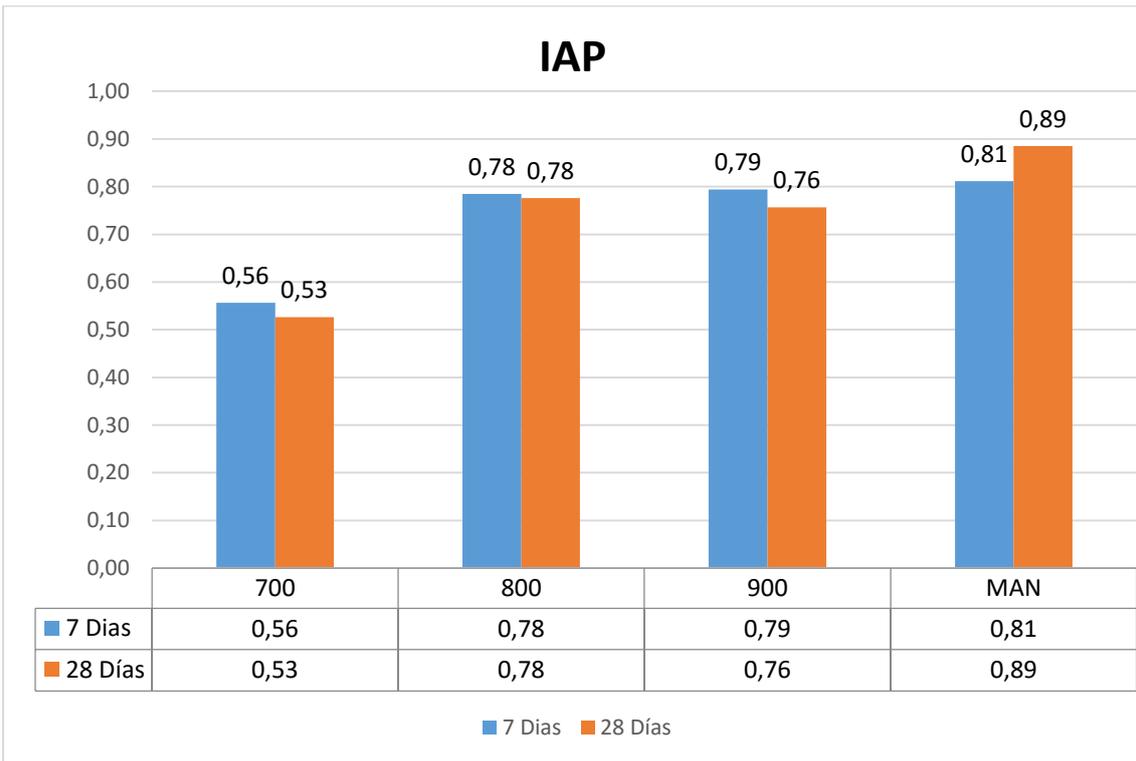


Fig.3.2 IAP

En los gráficos (Fig.3.1 y Fig.3.2) se aprecia el aumento de la resistencia a compresión en el tiempo, para cada serie de mortero, por lo que su comportamiento es consistente con la teoría. Por otra parte, el IAP no varía mucho en el tiempo, siempre destacando los resultados de la serie Manicaragua. Estos resultados, (IAP), se corresponden con

los obtenidos en el ensayo a compresión ya que este valor se obtiene de la ecuación R muestra / R Patrón. Los resultados obtenidos con las series 800°C, 900°C y Manicaragua son satisfactorios y cumplen con los parámetros de la norma ASTM C618 que establece el valor del IAP mínimo igual 0.75 para clasificar un material como de carácter puzolánico, no siendo así con los valores de la serie 700°C.

En la figura 3.1 se comparan los resultados obtenidos del ensayo a compresión a los 7 y 28 días de curado, respectivamente, de las cuatro series a evaluar en este trabajo. Los resultados obtenidos muestran un comportamiento constante en las series de 800, 900°C y Manicaragua, no siendo así con la serie de 700°C que no presenta un adecuado comportamiento.

3.1.1.1 Análisis estadísticos para las cuatro series más la referencia de P35 utilizando el programa Statgraphics Centurion

Tabla 3.2 ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	3370,05	4	842,513	157,54	0,0000
Intra grupos	133,698	25	5,34793		
Total (Corr.)	3503,75	29			

La tabla 3.2 descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 157,54, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 5 variables con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se realizan las Pruebas de Múltiples Rangos.

Tabla 3.3 Pruebas de Múltiple Rangos

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T 700	6	35,4667	X
T 900	6	50,9667	X
T 800	6	52,2833	X
Manicaragua	6	59,6167	X
P 35	6	67,35	X

Tabla 3.4 Pruebas de Múltiple Rangos

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Manicaragua - P 35	*	-7,73333	2,74981
Manicaragua - T 700	*	24,15	2,74981
Manicaragua - T 800	*	7,33333	2,74981
Manicaragua - T 900	*	8,65	2,74981
P 35 - T 700	*	31,8833	2,74981
P 35 - T 800	*	15,0667	2,74981
P 35 - T 900	*	16,3833	2,74981
T 700 - T 800	*	-16,8167	2,74981
T 700 - T 900	*	-15,5	2,74981
T 800 - T 900		1,31667	2,74981

* indica una diferencia significativa.

Las Pruebas de Múltiple Rangos aplican un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La tabla 3.4 muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 9 pares indica que estos pares muestran diferencias

estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la tabla 3.3 se han identificado 4 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

Tabla 3.5. Medias con intervalos de confianza del 95,0%

			Error Est.		
	Casos	Media	(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
Manicaragua	6	59,6167	0,944099	58,2418	60,9916
P 35	6	67,35	0,944099	65,9751	68,7249
T 700	6	35,4667	0,944099	34,0918	36,8416
T 800	6	52,2833	0,944099	50,9084	53,6582
T 900	6	50,9667	0,944099	49,5918	52,3416
Total	30	53,1367			

La tabla 3.5 muestra la media para cada columna de datos. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. El error estándar es el resultado de dividir la desviación estándar mancomunada entre el número de observaciones en cada nivel. La tabla 3.5 también muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, ver Fig.3.3. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces.

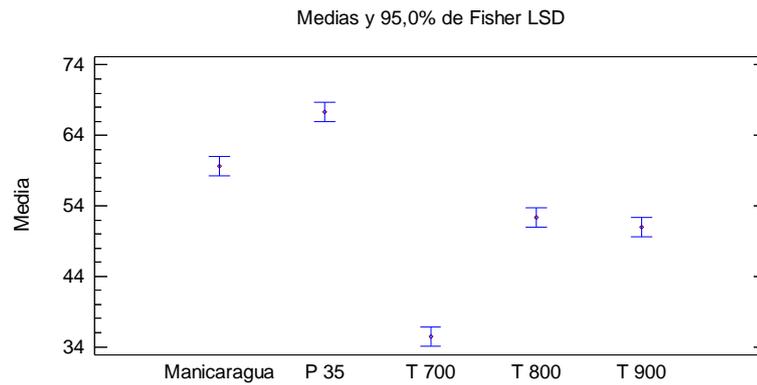


Fig. 3.3 Medias y 95,0% de Fisher LSD

“El resultado del análisis estadístico a los 7 días de curado en los anexos”.

El análisis estadístico, utilizando el programa Statgraphics Centurion, muestra que no existe una diferencia significativa entre las series 800°C y 900°C, ya que presentan valores de resistencia, a los 28 días de curado, de 32,7 y 31,9 MPa respectivamente. Existe una diferencia significativa de todas las series en comparación con el patrón de P 35 ya que el mismo presenta valores de resistencia igual a 42,1 MPa, ver tabla 3.1.

3.1.2 Probetas LC3 y patrón P35.

En la tabla 3.6 se muestran los valores de resistencia a compresión de las probetas prismáticas elaboradas con cemento LC3 el cual fue confeccionado con DC proveniente de la molienda de los ladrillos del taller artesanal de Manicaragua y los obtenidos en condiciones de laboratorio.

Tabla 3.6 Resistencia a compresión

Probetas (3 días)	1	2	3	4	5	6	Resistencia(MPa)	IAP
800	22,9	22	21,3	22	21,9	19,6	13,5	0.64
MAN	19,7	17,3	17,7	19,2	19,5	19,4	11,8	0.56
Probetas (7 días)	1	2	3	4	5	6	Resistencia(MPa)	
800	28,2	27,7	30,2	31,3	30,8	32,9	18,9	0.65
MAN	29,5	26,9	27,8	29,7	25,6	29,6	17,6	0.61
Probetas(28 días)	1	2	3	4	5	6	Resistencia(MPa)	
800	41,6	42,9	40,3	39,2	40	42	25,6	0.61
MAN	39,1	42,2	35,6	35,7	38,6	35,2	23,6	0.56
Probetas(P 35)	1	2	3	4	5	6	Resistencia(MPa)	
3	32,2	29,6	35,6	38,2	33,6	34	21,2	
7	45,4	44,8	47,8	44,8	46,4	47,9	28,9	
28	68,5	64,7	67,6	67,1	68,6	67,8	42,1	

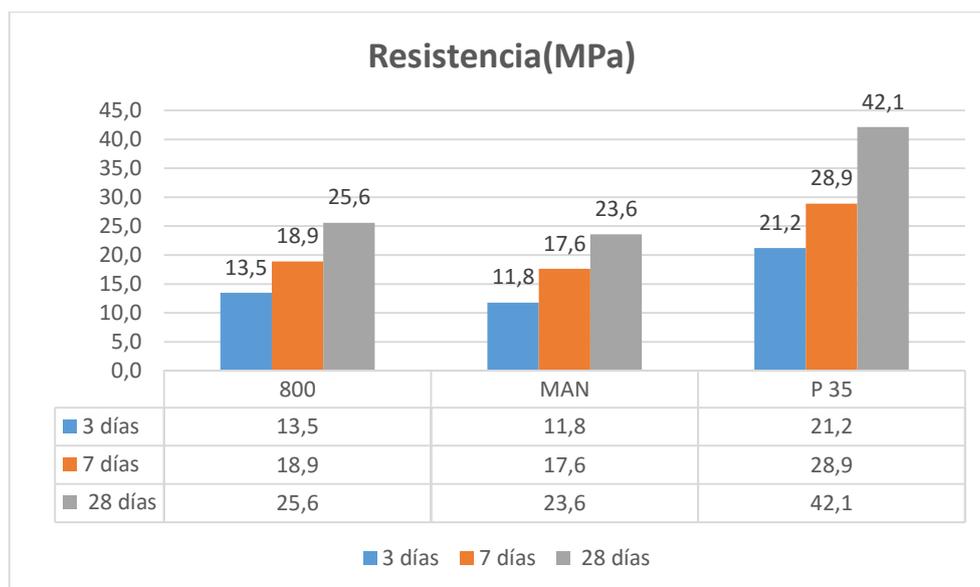


Fig.3.4 Resistencia a compresión

En el gráfico (Fig.3.4) se aprecia el aumento de la resistencia a compresión en el tiempo, para cada serie de mortero, por lo que su comportamiento es consistente con la teoría. Se comparan los resultados obtenidos del ensayo a compresión a los 3, 7 y 28 días de curado, respectivamente, de las dos series a evaluar en este trabajo y el patrón de P35. Los valores de IAP no cumplen con lo establecido por la norma ASTM C618 que establece el valor del IAP mínimo igual 0.75 para clasificar un material como de carácter puzolánico.

3.1.2.1 Análisis estadísticos para las dos series más la referencia de P35 utilizando el programa Statgraphics Centurion

Tabla 3.7. ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	3171,75	2	1585,87	412,98	0,0000
Intra grupos	57,6017	15	3,84011		
Total (Corr.)	3229,35	17			

La tabla 3.7 descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 412,976, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se realizan las Pruebas de Múltiples Rangos.

Tabla 3.8 Pruebas de Múltiple Rangos

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Manicaragua	6	37,7333	X
T 800	6	41,0	X
P 35	6	67,3833	X

Tabla 3.9 Pruebas de Múltiple Rangos

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Manicaragua - P 35	*	-29,65	2,4115
Manicaragua - T 800	*	-3,26667	2,4115
P 35 - T 800	*	26,3833	2,4115

* indica una diferencia significativa.

Las Pruebas de Múltiple Rangos aplican un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La tabla 3.9 muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 3 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la tabla 3.8 se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

Tabla 3.10 Medias con intervalos de confianza del 95,0%

			Error Est.		
	Casos	Media	(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
Manicaragua	6	37,7333	0,800012	36,5276	38,9391
P 35	6	67,3833	0,800012	66,1776	68,5891
T 800	6	41,0	0,800012	39,7942	42,2058
Total	18	48,7056			

La tabla 3.10 muestra la media para cada columna de datos. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. El

error estándar es el resultado de dividir la desviación estándar mancomunada entre el número de observaciones en cada nivel. La tabla 3.10 también muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, ver Fig.3.5. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces.

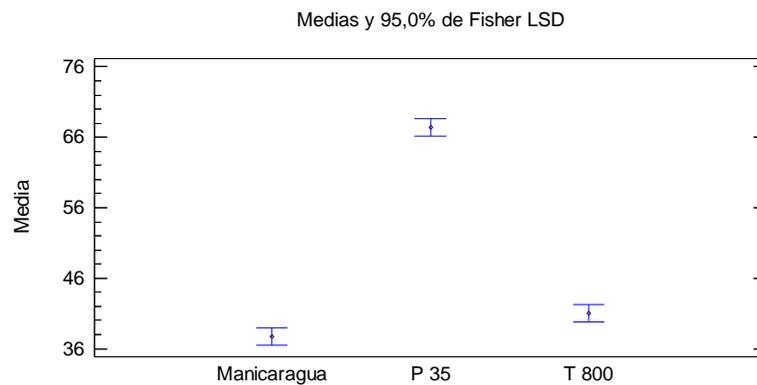


Fig. 3.5 Medias y 95,0% de Fisher LSD

“El resultado del análisis estadístico a los 3 y 7 días de curado en los anexos”.

El análisis estadístico, utilizando el programa Statgraphics Centurion, muestra que existe una diferencia significativa entre las series 800°C y Manicaragua, ya que presentan valores de resistencia, a los 28 días de curado, de 25,6 y 23,6 MPa respectivamente. Existe una diferencia significativa de las dos series en comparación con el patrón de P 35 ya que el mismo presenta valores de resistencia igual a 42,1 MPa, ver tabla 3.1. Por lo antes dicho la serie 800°C presenta mejores resultados en comparación con la serie de Manicaragua.

Ensayos anteriores realizados a este mismo material, hechos por el laboratorio del Centro Técnico de Desarrollo de Materiales de la Construcción en el año 2016, muestra valores de 24 MPa a los 28 días de curado, similares a los obtenidos con las series de 800°C y Manicaragua en este trabajo; resaltando que el resultado de la serie de 800°C muestra un valor superior, 25,6 MPa, que el obtenido por dicho laboratorio.

3.2 Análisis de resultados de la resistencia mecánica de las probetas cilíndricas 200x100mm.

En la tabla 3.11 se muestran los valores de resistencia a compresión de las probetas cilíndricas elaboradas con cemento LC3 el cual fue confeccionado con DC proveniente de la molienda de los ladrillos del taller artesanal de Manicaragua y los obtenidos en condiciones de laboratorio.

Tabla 3.11 Resistencia a compresión.

	Arcilla	1	2	3	Resistencia (MPa)
3 días	800	8	8	8	8
	MAN	7	8	7	7,3
	Arcilla	1	2	3	Resistencia (MPa)
7 días	800	11	10	10	10,3
	MAN	11	11	12	11,3
	Arcilla	1	2	3	Resistencia (MPa)
28 días	800	18	18	17	17,7
	MAN	16	16	15	15,7

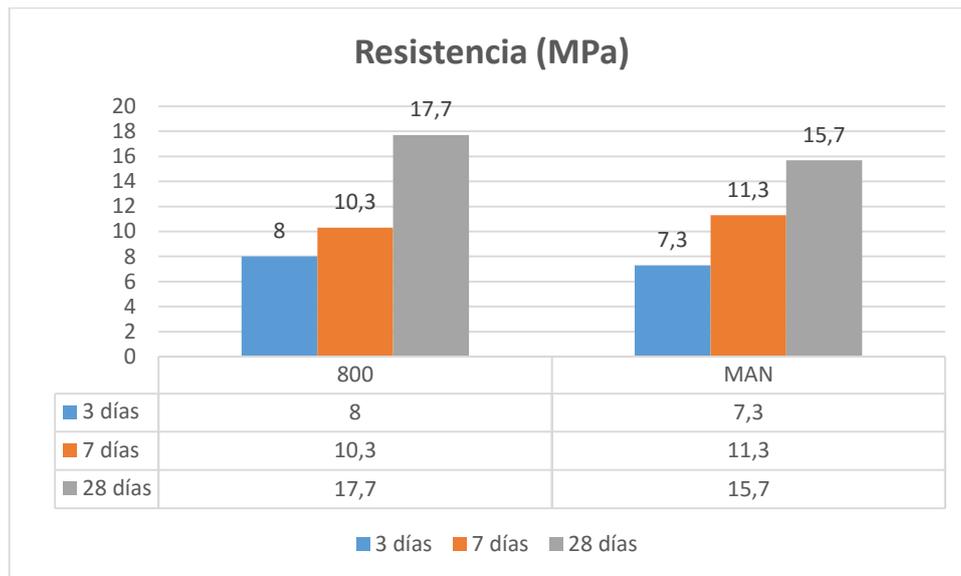


Fig.3.6 Resistencia a compresión.

En el gráfico (Fig.3.6) se aprecia el aumento de la resistencia a compresión en el tiempo, para cada serie, por lo que su comportamiento es consistente con la teoría. Se comparan los resultados obtenidos del ensayo a compresión a los 3, 7 y 28 días de curado, respectivamente, de las series de 800°C y Manicaragua.

3.2.1 Análisis estadísticos para las series de 800°C y Manicaragua utilizando el programa Statgraphics Centurion.

Tabla 3.12. ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	6,0	1	6,0	18,00	0,0132
Intra grupos	1,33333	4	0,333333		
Total (Corr.)	7,33333	5			

La tabla 3.12 descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 18,0, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 2 variables con un nivel

del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se realizan las Pruebas de Múltiples Rangos.

Tabla 3.13 Pruebas de Múltiple Rangos

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Manicaragua	3	15,6667	X
T 800	3	17,6667	X

Tabla 3.14 Pruebas de Múltiple Rangos

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Manicaragua - T 800	*	-2,0	1,30883

* indica una diferencia significativa.

Las Pruebas de Múltiple Rangos aplican un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La tabla 3.14 muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco junto a 1 par, indicando que este par muestra diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la tabla 3.13 se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

Tabla 3.15. Medias con intervalos de confianza del 95,0%

			Error Est.		
	Casos	Media	(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
Manicaragua	3	15,6667	0,333333	15,0123	16,3211
T 800	3	17,6667	0,333333	17,0123	18,3211
Total	6	16,6667			

La tabla 3.15 muestra la media para cada columna de datos. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. El error estándar es el resultado de dividir la desviación estándar mancomunada entre el número de observaciones en cada nivel. La tabla 3.15 también muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, ver Fig.3.7. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces.

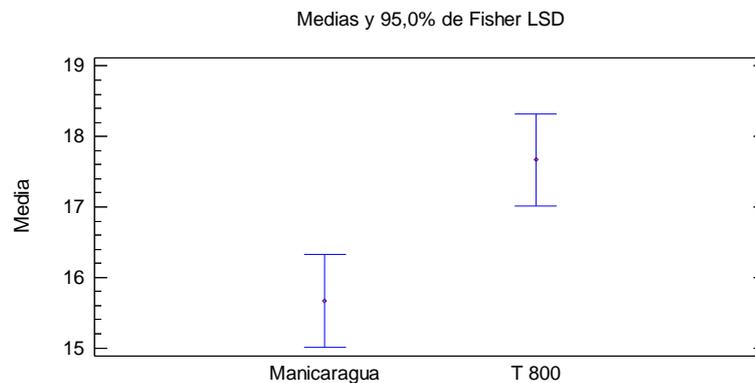


Fig. 3.7 Medias y 95,0% de Fisher LSD

“El resultado del análisis estadístico a los 3 y 7 días de curado en los anexos”.

El análisis estadístico, utilizando el programa Statgraphics Centurion, muestra que existe una diferencia significativa entre las series 800°C y Manicaragua, ya que presentan valores de resistencia, a los 28 días de curado, de 17,7 y 15,7 MPa

respectivamente. Por lo antes dicho la serie 800°C es mejor que la serie de Manicaragua por tener una resistencia a compresión mayor.

3.3 Chequeo de la consistencia.

Tabla 3.16 Consistencia por cono de Abrams

	1	2	3	4	Promedio (cm)
800	21	22	22	24	22,25
Manicaragua	14	13	16	12	13,75

El asentamiento medido por el Cono de Abrams dio como resultado que la mezcla número uno (800°C) es tipo A5, muy fluida y la mezcla dos (Manicaragua) es tipo A3 blanda, por tener valor mayor que 220mm y entre 100 y 150 mm respectivamente, ver tabla 2.15 del epígrafe anterior. (NC120, 2014)

3.4 Análisis de resultados minicono.

Tabla 3.17 Área de las pastillas.

	1	2	3	4	5	6	7	8	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Área (cm ²)
P-35	6,3	6	6	6,1	5,9	6,3	6,2	6,3	6,1	29,6	35
	6,7	6,8	6,8	6,8	6,8	6,9	6,9	6,8	6,8	36,4	
	7,1	7	7	7	7	6,9	7,1	7,3	7,1	39,0	
800	6	5,9	6,1	6,1	6	6,1	6	6	6,0	28,5	25
	5,2	5,3	5,3	5,4	5,4	5,3	5,2	5,2	5,3	21,9	
	5,6	5,6	5,7	5,5	5,5	5,5	5,5	5,6	5,6	24,3	
MAN	6,5	6,5	6,5	6,7	6,7	6,4	6,4	6,5	6,5	33,4	31
	6,2	6,1	5,9	5,9	6,1	6,6	6,5	6	6,2	29,8	
	6,1	6	6	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,1	29,6	

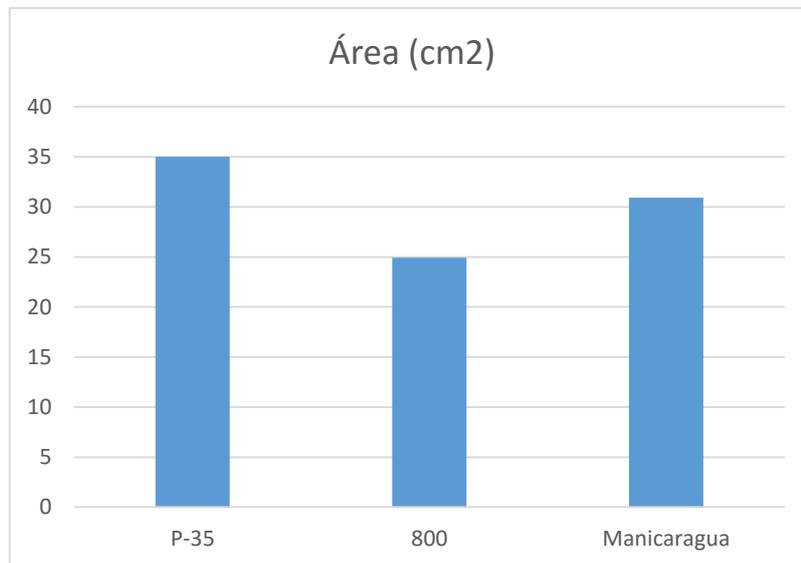


Fig.3.8 Área de las pastillas

En la figura 3.8 se muestran los resultados del ensayo del minicono realizado a las series de Manicaragua y a la de 800°C, además de la muestra patrón de P 35. Como se puede observar tanto el cemento LC3 de 800°C como el de Manicaragua requieren de mayor cantidad de agua para lograr cumplir con los requisitos de laborabilidad que presenta el cemento P-35, dado que el área de extensión de las pastas de cemento al quitar el Minicono de ambas mezclas es menor que la obtenida con la muestra patrón, esto se debe a la gran cantidad de arcilla existente en sus composiciones, que es finamente molida por su baja dureza, logrando que estos cemento posean una mayor superficie específica y mayor demanda de agua. El cemento LC3 de la serie 800°C necesita mayor cantidad de agua para lograr que la pasta sea laborable en comparación con el cemento LC3 de Manicaragua, lo que puede estar condicionado por la diferencia de temperaturas a los que fueron producidos los componentes arcillosos presentes en ambos.

3.5 Calorimetría.

Este ensayo se realizó para tener otra forma de determinar cuál de las series (70-30 y LC3) presenta una mayor reactividad puzolánica y para comparar los resultados con los obtenidos en el ensayo a compresión de las probetas prismáticas de 70-30 y LC3.

3.5.1 Protocolo R3.

En la fig.3.9 se muestran las curvas de calor acumulado resultantes del ensayo de las series de arcilla 800°C y Manicaragua.

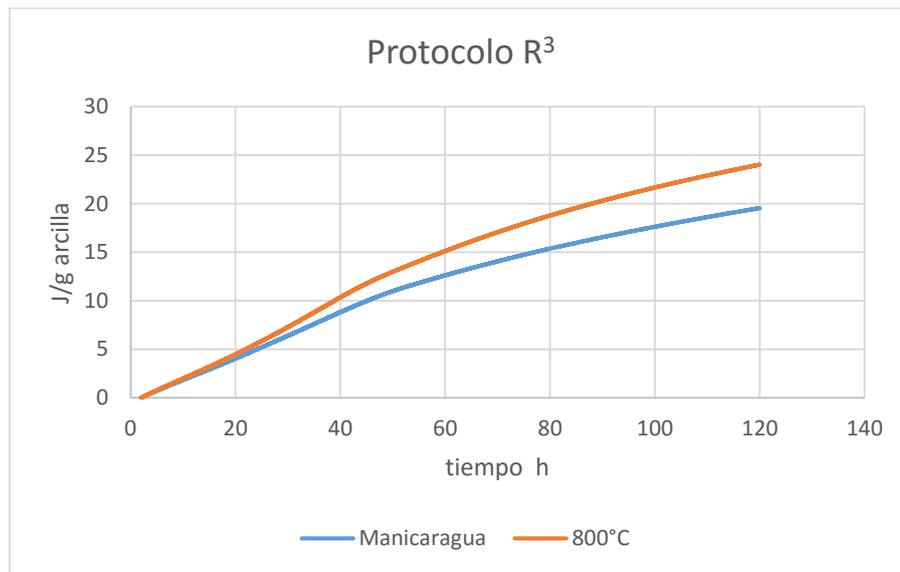


Fig.3.9 Curvas de calor acumulado en el tiempo.

Según los resultados obtenidos en este ensayo se ha concluido que la serie de 800°C presenta una mayor reactividad puzolánica que la serie de Manicaragua, ya que tiene mayor valor de calor acumulado en un período de 5 días. Ver fig.3.9.

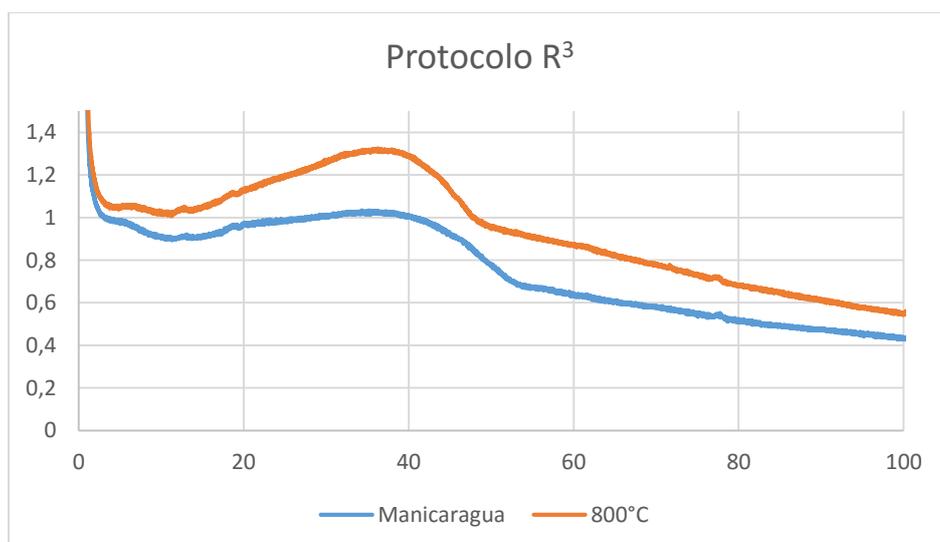


Fig.3.10. cinética de la reacción

La fig.3.10 muestra la comparación de las dos series en cuanto a la cinética de la reacción, que no es más que el aumento de la temperatura que presenta cada serie en el comienzo del ensayo, se ve a simple vista que la serie de 800°C presenta una cinética de la reacción mayor que la serie de Manicaragua.

Por el análisis hecho a estas dos series en las figuras 3.9 y 3.10 se puede concluir que la serie de 800°C presenta una reactividad puzolánica mucho mayor que la serie de Manicaragua y que alcanza un valor de reactividad mayor en iniciar el ensayo, ya que tiene mayor calor acumulado y una cinética de la reacción mucho mayor.

3.5.2 Calorimetría isotérmica

La fig.3.11 muestra las curvas de calor acumulado para las series de cemento LC3 de 800°C y Manicaragua, más un patrón de P 35.

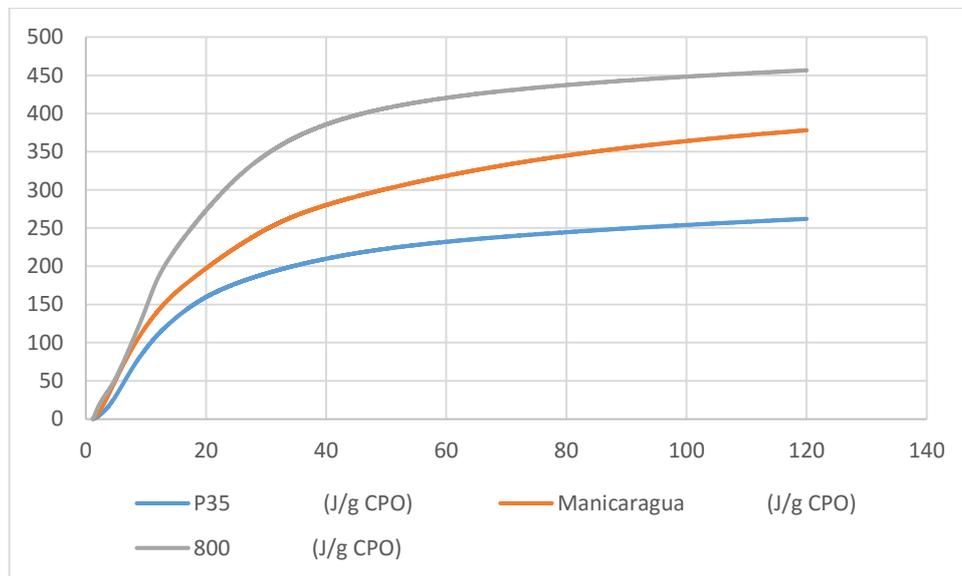


Fig.3.11 Curvas de calor acumulado

La fig.3.11 muestra un mayor valor de calor acumulado para la serie de cemento LC3 de 800°C en comparación con la serie de Manicaragua, lo que quiere decir que presenta mayor reactividad puzolánica. La figura también muestra una comparación de ambas series con relación al cemento P 35, la reacción del cemento LC3 es mucho mayor que la del P35 puesto que el primero contiene un % de puzolana mucho mayor.

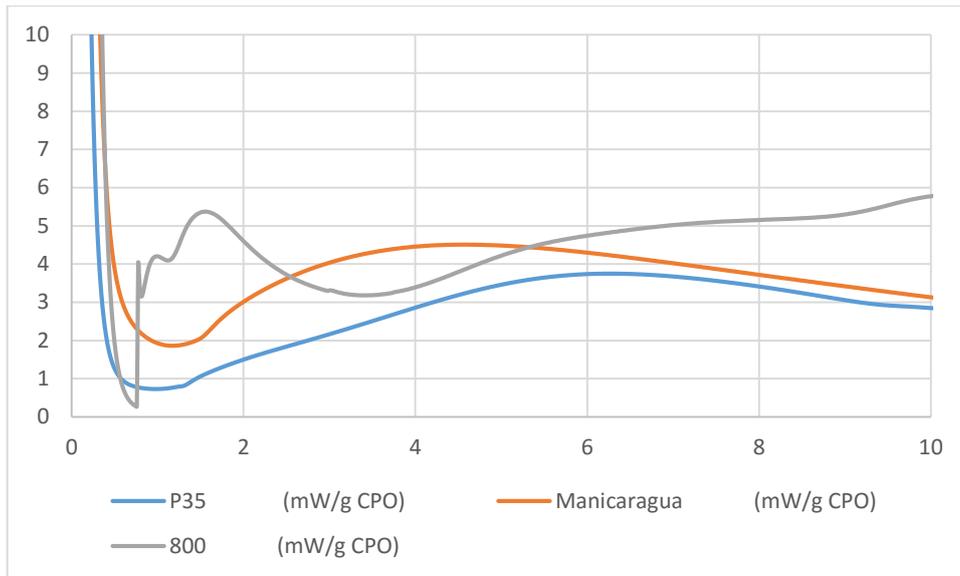


Fig.3.12 Cinética de la reacción

En la fig.3.12 se evidencia el aumento significativo de la reactividad que presenta la serie 800°C con relación a las de P35 y Manicaragua, en un período de una hora y media. Por tanto, la serie de 800°C presenta una cinética de la reacción mayor.

3.6 Cálculo del contenido de aire en el hormigón.

Una vez realizado el ensayo a cada mezcla de hormigón como a los áridos constituyentes de las mismas se procede al cálculo del contenido de aire en la mezcla como se indica en la NC - ISO 1920-2:2010 "Ensayos al Hormigón-Parte 2: Propiedades del Hormigón fresco". A continuación, se muestra el procedimiento de cálculo:

$$C_c = C_1 - G$$

Donde:

C_c : contenido de aire del hormigón.

C_1 es el contenido de aire permanente de la muestra ensayada, expresado al 0.1% más cercano.

G es el factor de corrección de los áridos, expresado al 0.1% más cercano.

Tabla 3.18. Contenido de aire.

Mezclas LC3	Contenido de aire en la mezcla	Corrección de los áridos	Contenido de aire en el hormigón (%)
800	0.05	0.035	1.5
MAN	0.075	0.065	1

Como se observa en la tabla 3.8 los resultados de contenido de aire en el hormigón son menores que 2% para las dos mezclas por lo que se consideran satisfactorios, según MÉTODOS PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGÓN. MÉTODO ACI 211.1. (BOLIVAR, 2006)

3.7 Conclusiones parciales

- Los resultados obtenidos de las series de probetas (70-30) 800°C, 900°C y Manicaragua cumplen con lo establecido en la norma ASTM C618 que establece el valor del IAP mínimo igual 0.75 para clasificar un material como de carácter puzolánico, no siendo así con los valores de la serie 700°C.
- Los resultados obtenidos de las series de probetas (LC3) no cumplen con lo establecido en la norma ASTM C618 que establece el valor del IAP mínimo igual 0.75 para clasificar un material como de carácter puzolánico.
- La serie de 800°C presenta valores de resistencia y de actividad puzolánica mucho mayores, a los 28 días, que las otras series evaluadas, tanto en probetas de 70-30 como LC3.
- Las probetas cilíndricas elaboradas con CBC no cumplen con los parámetros de resistencia de la norma NC120 2014, para nivel de agresividad media, que establece una resistencia mínima para Hormigón armado (25 MPa)
- Los resultados obtenidos en el ensayo Calorimetría isotérmica concuerdan con los obtenidos en los ensayos de resistencia; la serie de 800°C presenta mayores valores de reactividad que las demás series ensayadas, ya sea de arcilla o de CBC.

Conclusiones Generales

- El índice de Actividad Puzolánica resulta adecuado para los DC provenientes de elementos fabricados a temperaturas entre 800 y 900 °C, lo que está en relación con un adecuado proceso de activación térmica dado por la tecnología empleada y las características físico – químicas y morfológicas del material arcilloso originario.
- El análisis por DRX y ATD del material arcilloso originario, demuestra la existencia de altos contenidos de montmorillonita e Illita, lo que hace necesario el empleo de temperaturas relativamente altas para lograr una adecuada reactividad puzolánica.
- El cemento LC3 elaborado de la combinación de LC2 más P35 alcanza valores de resistencia en morteros normalizados de hasta 25.6 MPa, lo que demuestra la idoneidad de los DC para la obtención local de aglomerantes de uso en diferentes aplicaciones de albañilería.
- El hormigón elaborado con los cementos LC3 de producción local, empleando la dosificación presentada en la NC120 2014 presenta un índice de resistencia de 17.7 MPa lo que resulta inferior a lo establecido para la serie H3 de un nivel de agresividad media. Los resultados pueden estar relacionados con la no correspondencia de los áridos.
- Los resultados del protocolo R3 aplicado a las series de arcillas demuestra que la serie de 800°C presenta es mucho mejor que las demás series, por lo que los DC de ladrillos, obtenidos a esta temperatura y en condiciones de laboratorio, son más eficientes y presenta un valor de reactividad mucho mayor.
- El uso de la formulación del LC3 proporciona importantes ventajas desde el punto de vista económico y ambiental, en este sentido el uso de los DC para la producción local de aglomerantes con una formulación análoga, logra una contribución importante al uso de materiales y tecnologías locales al disminuir la carga contaminante del proceso constructivo.

Bibliografía

1987, N. 5.-3., s.f. *Arena sílice normalizada para ensayo de cemento. Especificaciones de calidad*, s.l.: s.n.

A.A.Pérez, 2014. *Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de morteros de albañilería y prefabricados de pequeño formato a base de Cemento de Bajo Carbono.* , Snta Clara: s.n.

Alujas, A., 2015. *Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: influence of mineralogical composition.*, Moa: s.n.

Anon., 2005. *EL YESO :PRODUCCION DE MATERIALES PARA ACABADOS EN LA CONSTRUCCION A PARTIR DE UN YESO DE ALTA CALIDAD Y PUREZA.*, Barcelona: s.n.

BIANUCCI, A. M. A., 2009. *EL LADRILLO– Orígenes y Desarrollo* , Buenos Aires: s.n.

BOLIVAR, O. G., 2006. *DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS DE HORMIGÓN*, MEDELLÍN: s.n.

CANTU, J. C., 2011. *ACTIVACIÓN MECÁNICA DE ARCILLA S*, Nuevo León: s.n.

Cárdenas, D. Y. D., 2011. *EVALUACION DEL USO DEL CARBONATO DE CALCIO COMO ADITIVO FUNDENTE EN LA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS HUECOS COCIDOS. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO* , Santa Clara: s.n.

CEMENTO, F. I. D., 2013. *Informe Estadístico*, s.l.: s.n.

Díaz, L. A. A., 2010. *OBTENCIÓN DE UN MATERIAL PUZOLÁNICO DE ALTA REACTIVIDAD A PARTIR DE LA ACTIVACIÓN TÉRMICA DE UNA FRACCIÓN ARCILLOSA MULTICOMPONENTE*, Santa Clara: s.n.

Guerrero, C. J., 2001. *Rocas calizas: Formación, ciclo del carbonato, propiedades, aplicaciones, distribución y perspectivas en la Mixteca Oaxaqueña*, Mixteca Oaxaqueña: s.n.

Hernández., R. Y. L., 2014. *Evaluación de la eco-eficiencia en los hormigones hidráulicos* , Santa Clara: s.n.

Irassar, 2015. *Ternary Blended Cement with Limestone Filler and Kaolinitic Calcined Clay*, Lausanne, Switzerland: s.n.

J. Payá, J. M. M. B. P. S. S. V. L. O., 2012. *EL FACTOR DE EFICACIA CEMENTANTE DE PUZOLANAS*, Valencia: s.n.

LESCANO, J. E. B., 2014. *PROCESO PRODUCTIVO DE LOS LADRILLOS DE ARCILLA PRODUCIDOS EN LA REGIÓN PIURA*, Piura: s.n.

Machado, D. I. I., 2016. *Producción local de cemento de bajo carbono, LC3, y su aplicación en la obtención*, Santa Clara: s.n.

Machado, I., 2011. *"Transformación puzolánicas del residuo de la auto combustión del conglomerado material arcillosos + biomasa lignocelulosica".TGC*, Santa Clara: s.n.

Matirena, F., 2015. *LC3*, Santa Clara: s.n.

MSc. Ing. Juan Manuel Alonso Lavernia, C., 2014. *Evaluación del cemento PP 35 con adición del 15% de toba Las Carolinas en la fábrica Cementos Cienfuegos S.A.*, La Habana: s.n.

NC120, 2014. *HORMIGON HIDRÁULICO — ESPECIFICACIONES*, s.l.: s.n.

NC174, 2002. *Hormigón fresco. Medición del asentamiento por el cono*, s.l.: s.n.

NC506, 2013. *CEMENTO HIDRÁULICO — MÉTODO DE ENSAYO — DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA*, s.l.: s.n.

NC54-396, 1987. *Arena silice normalizada para ensayo de cemento*, s.l.: s.n.

NC-ASTM-C-231, 2005. *Hormigón fresco- determinación del contenido de aire del hormigón por el método de presión.*, s.l.: s.n.

NC-ISO1920-2, 2010. *Ensayos al Hormigón-Parte 2: Propiedades del Hormigón fresco*, s.l.: s.n.

Reyes., C. A. J., 2016. *EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES PUZOLÁNICAS DEL MATERIAL DE DESECHO DE LA PRODUCCIÓN DE CERÁMICA ROJA.*, Santa Clara: s.n.

Rivera, J. M. H., 2010. *CARACTERIZACION DE PUZOLANAS NATURALES PARA SU USO COMO*, Querétaro: s.n.

Rodríguez, L. M. D., 2015. *Formulación de cementos de bajo carbono con sustituciones del 60 y 75 porciento de clínker por adiciones de caliza- arcilla calcinada en la planta decemento de Siguaney.*, Santa Clara: s.n.

Ruben Snellings, G. M. a. J. E., 2012. *Supplementary Cementitious Materials*, Leuven: s.n.

TIRONI, A., 2013. *MATERIALES CEMENTICIOS DE BAJA ENERGÍA.* , La Plata: s.n.

TIRONI, A., 2013. *MATERIALES CEMENTICIOS DE BAJA ENERGÍA. ACTIVACIÓN TÉRMICA DE ARCILLAS, RELACIÓN ENTRE ESTRUCTURA Y ACTIVIDAD PUZOLÁNICA.*, La Plata: s.n.

Vera, I. J. V. S., 2013. *CEMENTO PORTLAND*, Buenos Aires: s.n.

Anexos

1. Análisis estadísticos para las cuatro series más la referencia de P35, a los 7 días, utilizando el programa Statgraphics Centurion para las probetas de 70-30

Tabla ANOVA

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	1268,52	4	317,131	44,21	0,0000
Intra grupos	179,33	25	7,1732		
Total (Corr.)	1447,85	29			

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 44,2106, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 5 variables con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se realizan las Pruebas de Múltiples Rangos.

Pruebas de Múltiple Rangos

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
T 700	6	25,7	X
T 800	6	36,25	X
T 900	6	36,6667	X
Manicaragua	6	37,4667	X
P 35	6	46,1833	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Manicaragua - P 35	*	-8,71667	3,18469
Manicaragua - T 700	*	11,7667	3,18469
Manicaragua - T 800		1,21667	3,18469
Manicaragua - T 900		0,8	3,18469
P 35 - T 700	*	20,4833	3,18469
P 35 - T 800	*	9,93333	3,18469

P 35 - T 900	*	9,51667	3,18469
T 700 - T 800	*	-10,55	3,18469
T 700 - T 900	*	-10,9667	3,18469
T 800 - T 900		-0,416667	3,18469

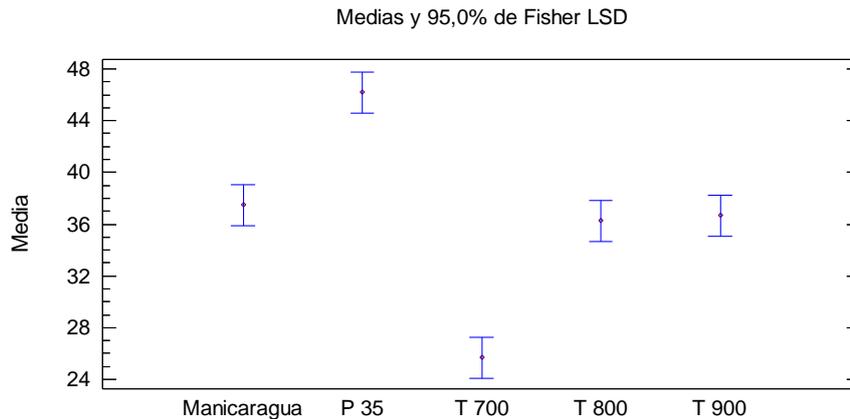
* indica una diferencia significativa.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 7 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la tabla..., se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla Medias con intervalos de confianza del 95,0%

			<i>Error Est.</i>		
	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>(s agrupada)</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
Manicaragua	6	37,4667	1,0934	35,8743	39,059
P 35	6	46,1833	1,0934	44,591	47,7757
T 700	6	25,7	1,0934	24,1077	27,2923
T 800	6	36,25	1,0934	34,6577	37,8423
T 900	6	36,6667	1,0934	35,0743	38,259
Total	30	36,4533			

Esta tabla muestra la media para cada columna de datos. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. El error estándar es el resultado de dividir la desviación estándar mancomunada entre el número de observaciones en cada nivel. La tabla también muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces.



2. Análisis estadísticos para las dos series más la referencia de P35, a los 3 días y 7 días, utilizando el programa Statgraphics Centurion para las probetas de LC3

- **3 días**

Tabla ANOVA

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	770,001	2	385,001	106,31	0,0000
Intra grupos	54,3217	15	3,62144		
Total (Corr.)	824,323	17			

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 106,311, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se realizan las Pruebas de Múltiples Rangos.

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Manicaragua	6	18,8	X
T 800	6	21,6167	X
P 35	6	33,8667	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
T 800 - P 35	*	-12,25	2,34183
T 800 - Manicaragua	*	2,81667	2,34183
P 35 - Manicaragua	*	15,0667	2,34183

* indica una diferencia significativa.

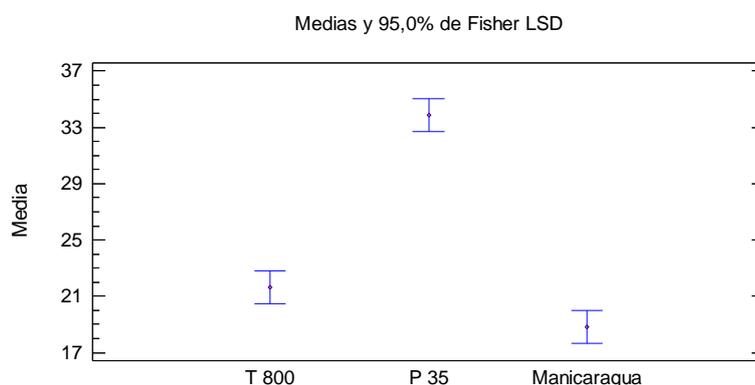
Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 3 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla de Medias con intervalos de confianza del 95,0%

			Error Est.		
	Casos	Media	(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
T 800	6	21,6167	0,7769	20,4457	22,7876
P 35	6	33,8667	0,7769	32,6957	35,0376
Manicaragua	6	18,8	0,7769	17,6291	19,9709
Total	18	24,7611			

Esta tabla muestra la media para cada columna de datos. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. El

error estándar es el resultado de dividir la desviación estándar mancomunada entre el número de observaciones en cada nivel. La tabla también muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces. Puede ver gráficamente los intervalos seleccionando Gráfico de Medias de la lista de Opciones Gráficas. En las Pruebas de Rangos Múltiples, estos intervalos se usan para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras.



- 7 días

Tabla ANOVA

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	1168,0	2	584,0	200,62	0,0000
Intra grupos	43,665	15	2,911		
Total (Corr.)	1211,66	17			

El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 200,618, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medias son significativamente

diferentes de otras, seleccione Pruebas de Múltiples Rangos, de la lista de Opciones Tabulares.

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Manicaragua	6	28,1833	X
T 800	6	30,1833	X
P 35	6	46,1833	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
P 35 - Manicaragua	*	18,0	2,0996
P 35 - T 800	*	16,0	2,0996
Manicaragua - T 800		-2,0	2,0996

* indica una diferencia significativa.

El StatAdvisor

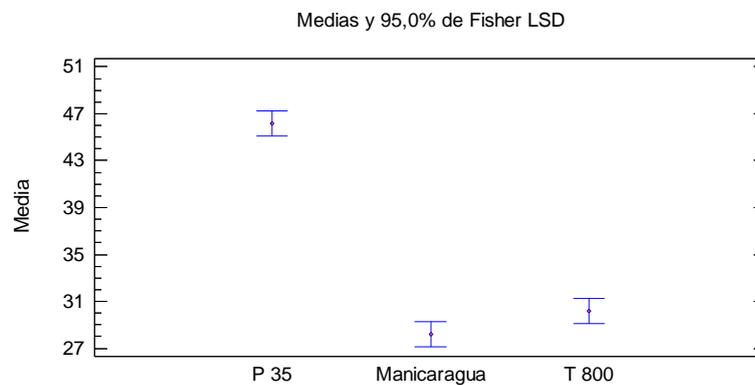
Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla de Medias con intervalos de confianza del 95,0%

			Error Est.		
	Casos	Media	(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
P 35	6	46,1833	0,696539	45,1335	47,2331
Manicaragua	6	28,1833	0,696539	27,1335	29,2331
T 800	6	30,1833	0,696539	29,1335	31,2331
Total	18	34,85			

El StatAdvisor

Esta tabla muestra la media para cada columna de datos. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. El error estándar es el resultado de dividir la desviación estándar mancomunada entre el número de observaciones en cada nivel. La tabla también muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces. Puede ver gráficamente los intervalos seleccionando Gráfico de Medias de la lista de Opciones Gráficas. En las Pruebas de Rangos Múltiples, estos intervalos se usan para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras.



3. Análisis estadísticos para las dos series más la referencia de P35, a los 3 días y 7 días, utilizando el programa Statgraphics Centurion para las probetas de LC3

3 días

Tabla ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,666667	1	0,666667	4,00	0,1161
Intra grupos	0,666667	4	0,166667		
Total (Corr.)	1,333333	5			

El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este

caso es igual a 4,0, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 2 variables con un nivel del 95,0% de confianza.

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Manicaragua	3	7,333 33	X
T 800	3	8,0	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Manicaragua - T 800		-0,666667	0,925485

* indica una diferencia significativa.

El StatAdvisor

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's en columna. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

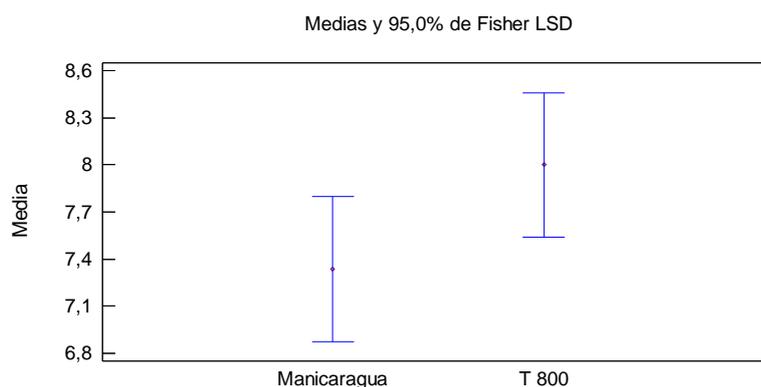
Tabla de Medias con intervalos de confianza del 95,0%

			Error Est.		
	Casos	Media	(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
Manicaragua	3	7,333 33	0,235702	6,87059	7,79608
T 800	3	8,0	0,235702	7,53726	8,46274

Total	6	7,666 67			
-------	---	-------------	--	--	--

El StatAdvisor

Esta tabla muestra la media para cada columna de datos. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. El error estándar es el resultado de dividir la desviación estándar mancomunada entre el número de observaciones en cada nivel. La tabla también muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces. Puede ver gráficamente los intervalos seleccionando Gráfico de Medias de la lista de Opciones Gráficas. En las Pruebas de Rangos Múltiples, estos intervalos se usan para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras.



- 7 días

Tabla ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1,5	1	1,5	4,50	0,1012
Intra grupos	1,33333	4	0,333333		
Total (Corr.)	2,83333	5			

El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este

caso es igual a 4,5, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 2 variables con un nivel del 95,0% de confianza.

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T 800	3	10,3333	X
Manicaragua	3	11,3333	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Manicaragua - T 800		1,0	1,30883

* indica una diferencia significativa.

El StatAdvisor

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's en columna. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla de Medias con intervalos de confianza del 95,0%

			Error Est.		
	Casos	Media	(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
Manicaragua	3	11,3333	0,333333	10,6789	11,9877
T 800	3	10,3333	0,333333	9,67892	10,9877
Total	6	10,8333			

El StatAdvisor

Esta tabla muestra la media para cada columna de datos. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. El error estándar es el resultado de dividir la desviación estándar mancomunada entre el número de observaciones en cada nivel. La tabla también muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces. Puede ver gráficamente los intervalos seleccionando Gráfico de Medias de la lista de Opciones Gráficas. En las Pruebas de Rangos Múltiples, estos intervalos se usan para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras.

