

Tópico 3: Caracterización de Materiales

**DISEÑO DE HORMIGONES Y MORTEROS LIGEROS DE ALTA RESISTENCIA EMPLEANDO ZEOLITAS NATURALES SIN PRESATURACION.
PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y ESTRUCTURALES.**

Prof. Dr. Arq. Regino A. Gayoso Blanco

Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de Construcción CTDMC-Cuba.
gayoso@ctdmc.co.cu

Palabras claves: *light weight concrete mix design; natural zeolite aggregate; prestressed hollow core slab; ferrocement lightweight mortar; polymer modified fiber mortar; physic-mechanical properties.*

RESUMEN

Se presentan las experiencias en la obtención de hormigones y morteros estructurales ligeros de altas resistencias, utilizando zeolitas naturales y aplicando procedimientos del diseño de mezcla sin presaturación de áridos ligeros, para lograr el mayor aprovechamiento de sus propiedades mecánicas.

Se obtienen hormigones que alcanzan densidades no mayores de 1890 kg/m³, resistencias mayores de 35,0 MPa a compresión; 2,2 MPa a la tracción y 20,3 GPa de módulo elástico, así como morteros de alta tenacidad polímero-modificados reforzados con fibras de carbón, con densidades no mayores de 1750 kg/m³, con los que se logran resistencias de 9,6 MPa a la flexión y resistencias de 47,2 MPa a compresión.

Se exponen y analizan los resultados experimentales del ensayo estructural de losas alveolares aligeradas de 0,20 m de espesor y 6,00 m de luz, producidas con hormigones pretensados y el comportamiento de la adherencia en hormigones ligeros reforzados, empleando el método de ensayo a flexión de la viga (*beam test*) en investigaciones de diseño de estructuras antisísmicas. Se muestran aplicaciones de morteros ligeros en la construcción de barcos de ferrocemento de 13 y 16 m de eslora, sometidos a pruebas satisfactorias de navegación durante más de 10 años y características microestructurales de los morteros polímero-modificados fibroreforzados empleando las técnicas avanzadas de la físico-química SEM y DRX.

Se evalúan los efectos económicos del ahorro de energía, durabilidad, protección y sostenibilidad del medio ambiente, los que se pueden alcanzar, con la generalización en el empleo de las zeolitas naturales, con abundantes reservas en los suelos latinoamericanos.

1. INTRODUCCION

Aunque se sabe, por las publicaciones que tratan de los conocimientos sobre hormigones especiales, del empleo de la piedra pómez y las cenizas volcánicas como aglomerantes mezcladas con la cal y el aligeramiento de las construcciones antiguas, en las culturas precolombinas asentadas en México (1100 a.C.) y en la cúpula del Panteón Romano con 44 m de diámetro, reconstruida hace ya 2000 años (110-125 a.C.), (1) se debe reconocer que la mayor extensión en el empleo de los hormigones ligeros estructurales ha sido logrado más recientemente, con la invención de los procesos de producción de *áridos ligeros artificiales* obtenidos mediante la sinterización de arcillas en hornos rotatorios patentados por S.J. Hayde en 1917, antes de la Segunda Guerra Mundial.

Desde entonces, no obstante el mayor costo y consumo energético de su producción, los conocimientos de la producción y las aplicaciones de los hormigones ligeros estructurales se han incrementado notablemente. Esto se debe, entre otras ventajas, a la disminución del peso del hormigón y a las nuevas tecnologías para su colocación, así como sus posibilidades de mayor aislamiento térmico en las edificaciones en los países de clima frío. Sus ejemplos más actuales son: la entrega de hormigones bombeados a más de 300 m de altura en las construcciones de edificios altos, tales como la Torre Comercial de Texas, y las plataformas de extracción de petróleo en el Mar del Norte. Otras ventajas son el incremento de la capacidad de carga de los barcos, la reducción de los costos en chapas de acero, la construcción de puentes de grandes luces, así como una mayor absorción de las cargas dinámicas y sísmicas originadas en los terremotos.

Una alternativa que también pudiera presentar ventajas en la disminución del peso propio en las estructuras de hormigón y cumplir con las actuales exigencias de sostenibilidad frente a los cambios climáticos, podría lograrse con el empleo de los *áridos ligeros naturales* obtenidos mediante procesos convencionales de trituración de las tobas con contenido de minerales zeolíticos. Estos comúnmente empleados en la antigüedad presentan reservas muy abundantes en los suelos latinoamericanos.

Con el empleo de estos recursos se pueden obtener, con menor consumo energético (2) y mayor aprovechamiento de sus propiedades físico-químicas y mecánicas, morteros y hormigones de altas prestaciones, introduciendo en los procesos de diseño y producción de sus mezclas, los progresos alcanzados por la moderna tecnología del hormigón del empleo combinado de las aditivos químicos reductores de agua, con las adiciones minerales puzolánicas y los adecuados procesos de mezclado y compactación.

Se debe considerar que los *áridos ligeros naturales* presentan un alto porcentaje y velocidad de absorción, en un intervalo del 10-20% y que los procedimientos de presaturación durante 24 horas recomendados para las mezclas con los *áridos ligeros artificiales*, no resultan convenientes debido a la reducción de su resistencia mecánica en más del 50%, lo que experimentan cuando se encuentran en el estado saturado.

En este trabajo se presentan resultados que demuestran la factibilidad de lograr en la mezcla de morteros y hormigones reforzados con los *áridos ligeros naturales no saturados*, altas tensiones de resistencias en sus propiedades mecánicas estructurales empleando las tecnologías adecuadas para su producción.

2. CARACTERIZACION DE MATERIALES

Los *áridos ligeros naturales* finos y gruesos, empleados en morteros y hormigones estructurales, se producen actualmente en plantas existentes en nuestro país con capacidades de 50,0 mm³/turno. En los procesos de producción se emplean yacimientos de tobas de origen volcánico que contienen principalmente minerales zeolíticos del tipo clinoptilolita-heulandita.

Las tecnologías de producción cuentan con molinos primarios y remoladores, similares a los empleados en la trituración de los áridos de densidad normal, así como hornos para secado, cuyo consumo energético de 0,01 T/m³ es significativamente inferior al de 0,1 T/m³ utilizado en la producción de áridos ligeros artificiales. Las plantas, ubicadas en la región central de Villa Clara y la región oriental de Holguín, producen actualmente fracciones especificadas para la exportación en diversas ramas de la economía y los servicios, como son la agropecuaria, la salud pública, en la elaboración de detergentes y otras aplicaciones.

Las investigaciones de empleo en la construcción de los *áridos ligeros naturales* obtenidos mediante trituración y secado de las zeolitas naturales, alcanzan ya más de 20 años. En los próximos acápite se presentan sus principales resultados.

2.1. Zeolitas naturales. Sus propiedades químicas, físicas y mecánicas

En las Tablas 1, 2 y 3 se exponen las propiedades de las zeolitas.

Tabla 1. Características físico-químicas de las zeolitas naturales tipo clinoptilolita-heulandita en los yacimientos de Tasajera en Villa Clara y de San Andrés en Holguín.

| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | Mg O | Ca O | Na ₂ O | K ₂ O | PPI | Ø50 μ | Blaine (cm ² /g) | BET (m ² /g) |
|------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------|---------|----------------------|------------------|-------|----------|--------------------------------|----------------------------|
| 64,39 | 11,76 | 1,96 | 0,61 | 3,64 | 1,07 | 0,40 | 14,57 | | | |
| 65,34 | 11,54 | 0,81 | 1,10 | 3,04 | 0,54 | 0,79 | 14,34 | 17,4 | 12 553 | 26,9 |

Tabla 2. Características físicas.

| Áridos | Peso específico | Peso suelto (kg/m ³) | Peso compactado (kg/m ³) | Absorción (%) | Abertura del tamiz (mm) |
|---------|--------------------|-------------------------------------|--|------------------|-------------------------------|
| Zeolita | 2,20 | 1 110 | 1 110 | 14 | 3,0 |
| Normal | 2,64 | 1 420 | 1 620 | 3 | 5,0 |



Tabla 3. Características granulométricas.

| Abertura de los tamices (mm) | Pasado (%) | | | |
|------------------------------|--|-------|-------|--------------|
| | Fracciones de árido ligero natural (zeolita) | | | Árido normal |
| | 3/12,5 | 1/3 | 0/1 | 0,15/4,76 |
| 12,72 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 9,52 | 96,7 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 4,76 | 47,1 | 100,0 | 100,0 | 95,0 |
| 2,38 | 4,0 | 98,4 | 99,9 | 72,0 |
| 1,19 | 1,5 | 3,3 | 99,2 | 52,0 |
| 0,595 | 0,0 | 1,5 | 93,0 | 32,0 |
| 0,296 | 0,0 | 0,9 | 65,0 | 14,0 |
| 0,149 | 0,0 | 0,0 | 36,0 | 4,0 |



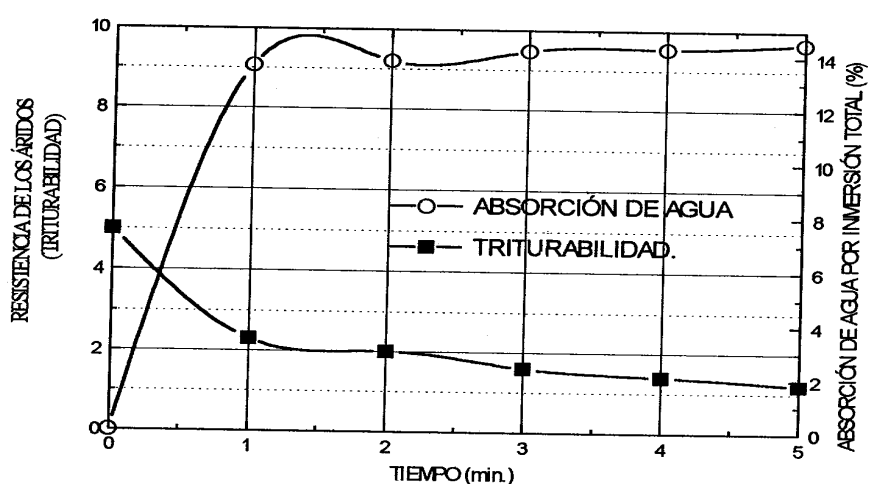
Gráfico 1. Zeolitas naturales trituradas. Fracciones 3/12,5 y 1/3 mm.

Como se puede apreciar en el Gráfico 1, las zeolitas naturales trituradas por molinos de impacto o martillo, se dividen en fracciones de formas cúbicas menos angulosas que las que se obtienen de las rocas convencionales, ígneas o calizas, las cuales son más compactas.

En la Tabla 4 se muestran las pérdidas de resistencia mecánica en las zeolitas saturadas, y en el Esquema 1 y la Tabla 5, aspectos sobre la trituración de áridos.

Tabla 4. Pérdidas de resistencia mecánica en las zeolitas saturadas (fracciones de 3/13 mm).

| Propiedades de los áridos ligeros | Tiempo de saturación (min) | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------------|-----|-----|------|------|-------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Saturación (%) | 0 | 13 | 13 | 13,5 | 13,6 | 14,0 |
| Triturabilidad (MPa)(1) | 5,0 | 2,2 | 2,0 | 1,90 | 1,85 | 1,0 |



Esquema 1. Ensayo de triturabilidad de áridos ligeros naturales.

Tabla 5. Consumo energético en la trituración de áridos normales y ligeros.

| Indicadores | Caliza dolomítica | Arenisca calcárea | Caliza blanda | Árido ligero (zeolita) |
|---|-------------------|-------------------|---------------|------------------------|
| Consumo energético (kW-h) | 619,0 | 252,0 | 96,32 | 27,18 |
| Capacidad horaria (m ³ /h) | 54,3 | 56,0 | 56,0 | 19,06 |
| Consumo Energético (kW-h/m ³) | 11,4 | 4,5 | 1,72 | 1,42 |
| | 8,03 | 3,17 | 1,21 | 1,00 |

2.2. Cemento Portland y aditivos químicos

En los ensayos y pruebas experimentales se empleó cemento Portland producido en fábricas cubanas, que cumplen con las especificaciones de la Norma Cubana NC 95:2001 para la calidad P-350.

Los aditivos químicos superplastificantes reductores de agua de alto rango producidos con empleo de polinaftalenos sulfonados cumplieron con las especificaciones del tipo F de acuerdo con la Norma ASTM C 494.

3. DISEÑO DE MEZCLAS Y PROCESOS TECNOLÓGICOS

En las recomendaciones del ACI 211.2, (3) la presaturación de áridos ligeros, junto con la granulometría y la relación agua/cemento, son considerados los factores más influyentes en el diseño de los hormigones ligeros estructurales.

Aunque en las tecnologías de mezclado convencional se prefiere el empleo de *áridos ligeros saturados*, con el fin de reducir las pérdidas de asentamiento, transporte y colocación de los hormigones en las obras, no se excluye en el diseño de mezclas del ACI 211.2 la posibilidad de aplicar otros procedimientos más eficientes, que permitan introducir procesos de mezclado en etapas (*two-stage mix*), con tiempo que pueden alcanzar los 5 minutos, empleo de la vibro-compactación en la conformación de elementos prefabricados en las plantas, más adecuados para la mezcla con los áridos ligeros como lo han demostrado las experiencias divulgadas por otros autores (4). La introducción de estas innovaciones tecnológicas puede contribuir al mezclado, *sin presaturación* de áridos ligeros naturales con una absorción superior al 10%, con el fin de lograr mayores incrementos en las propiedades mecánicas y en la economía del consumo de cemento.

En este estudio se han considerado los experimentos sobre el comportamiento de las mezclas de hormigones y morteros estructurales con la novedad del empleo de la combinación de los aditivos químicos y adiciones minerales en los *áridos ligeros naturales sin presaturación*, y la energía necesaria para la compactación en seg, VeBe aplicada a la producción de elementos ligeros estructurales prefabricados, como base para la determinación de métodos y procedimientos de diseño más adecuados de las mezclas de hormigón con los áridos ligeros, obtenidos mediante la trituración de las zeolitas naturales. Esto se puede apreciar en los ensayos, pruebas y aplicaciones experimentales que se presentan más adelante. En estos resultados se consideran como objetivos de mayor interés, la posibilidad de alcanzar *mayor compatibilidad elástica entre los áridos y la matriz del mortero*, y la adopción de procedimientos de diseño que aprovechan más favorablemente los estados del contenido de humedad (*OD, oven dry*), característicos de la producción de áridos ligeros naturales y artificiales, en lugar del contenido (*SSD, saturated surface dry*) más utilizado en las tecnologías convencionales. (5)(3)

4. APLICACIONES EXPERIMENTALES

4.1. Producción de losas alveolares pretensadas

Las losas alveolares fueron producidas en procesos tecnológicos de conformación de hormigones, sin asentamiento (*no-slump concrete*) vibro-compactados con máquinas extrusoras, de la firma canadiense Spiroll. Esta tecnología emplea un conjunto de husillos cónicos que posibilitan el desplazamiento y una alta compactación del hormigón, accionados con vibradores de alta frecuencia, los que pueden alcanzar hasta 10 000 rpm.

Inicialmente se experimentó la producción de losas alveolares con espesor de 0,15 m *sin refuerzo* en líneas de producción de 100 m de largo, para verificar la factibilidad de conformar las mezclas sin asentamiento vibrocompactadas con los áridos ligeros obtenidos mediante trituración de zeolitas naturales sin presaturación. Para este fin se utilizó el diseño de mezcla que se presenta en la Tabla 6 y los procedimientos de mezclado en dos etapas. La primera, formación de la pasta mediante mezcla de cemento Portland, zeolita *filler* menor que 74 μ , agua y aditivos superplastificantes, en un tiempo no menor de 3 minutos, con el fin de iniciar la hidratación del cemento. La segunda, mezcla en un tiempo no menor de 3 minutos de fracciones gruesas de zeolitas sin saturación, con la pasta de cemento para las propiedades reológicas de conformación. Este procedimiento permitió una mayor homogenización de la mezcla y entrega a la tolva de la máquina extrusora. Estos resultados fueron satisfactorios y posibilitaron la posterior producción de las losas alveolares de 0,20 m de espesor reforzadas con cables de alambres de alto límite elástico de 12,7 mm de diámetro, las que fueron sometidos a ensayos estructurales.

En la Tabla 6, Gráficos 2 y 3, y en la Tabla 7 se presentan las proporciones de la mezcla diseñada y los resultados de los ensayos de las losas alveolares.

Tabla 6. Dosificación. Hormigones ligeros vibro-compactados.

| Materiales | kg/m ³ | kg / amasada |
|--|-------------------|--------------|
| Cemento Portland | 450 | 170 |
| Zeolita < 0.8 mm | 25 | 10 |
| Zeolita (1/3 mm) | 650 | 247 |
| Zeolita (3 /12,7) | 794 | 302 |
| Agua | 209 | 79 |
| Superplastificante | 2,5 | 1,0 |
| A/C + P | 0,45 | |
| Volumen del hormigón (m ³) | 1 | 0,38 |

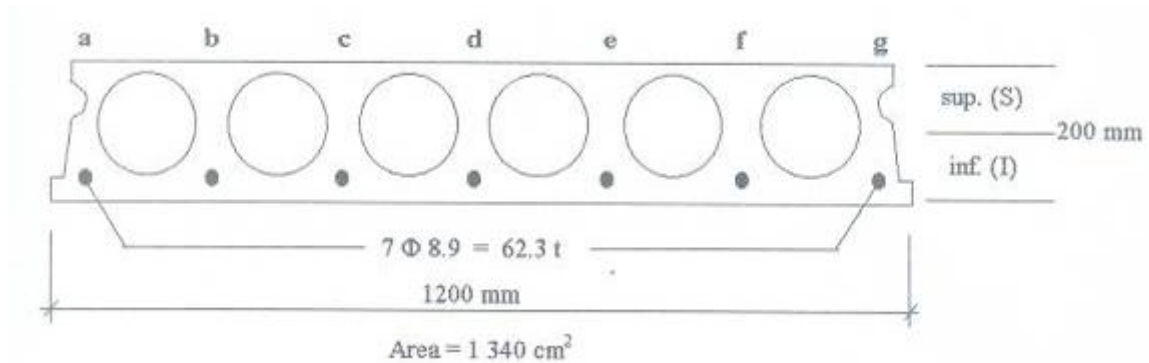


Gráfico 2. Sección de losa alveolar de 200 mm de espesor producida con hormigón vibrocompactado sin asentamiento, empleando zeolitas naturales no saturadas.

Tabla 7. Comportamiento estructural de losas alveolares con zeolitas naturales.

| Ensayos | Losa No.1 | | Losa No.2 | | Losa No.3 | |
|--|-----------|---------|-----------|---------|------------|---------|
| | Ensayo | Cálculo | Ensayo | Cálculo | Ensayo | Cálculo |
| Carga de fisuración (kg/m ²) | 1 200 | 1 050 | 1 500 | 1 037 | 1 100 | 1 058 |
| Flecha. Sección central (cm) | 22,45 | 20,27 | 30,80 | 25,34 | 23,93 | 18,58 |
| | 1/283 | | 1/182 | | 1/247 | |
| Tipo de colapso | cortante | | cortante | | compresión | |
| Carga de colapso (kg/m ²) | 1 800 | | 2 400 | | 2 800 | |
| Carga de control (kg/m ²) | 38 % | 4715 | 51 % | 4892 | 87 % | 2 882 |
| Peso volumétrico (kg/m ³) | 1 771 | | 1 801 | | 1 649 | |
| Compresión en probetas (T) | 29,0 MPa | | | | | |



Gráfico 3. Comportamiento de los ensayos de carga–desplazamiento en losas.

4.2. Producción de hormigón ligero reforzado

En la producción experimental de vigas de hormigón reforzado para los estudios sobre el comportamiento de la adherencia, empleando zeolitas naturales no-saturadas, se utilizó la tecnología de conformación y compactación en mesa vibradora del hormigón en moldes de acero. A diferencia de los hormigones sin asentamiento utilizados en las producciones de losas alveolares extrudadas, se consideraron en el diseño de mezclas las composiciones granulométricas de áridos finos de peso normal con áridos gruesos ligeros triturados, obtenidos de las zeolitas naturales (*sand-lightweight aggregate*), los cuales cumplen las especificaciones de la ASTM C 330 .(6) En estas mezclas se adoptaron recomendaciones del ACI 211.2 para el diseño de mezclas y los procedimientos del mezclado en dos etapas empleando los áridos ligeros sin presaturación. Las proporciones de estas mezclas, dimensiones y refuerzo de las vigas empleadas en los ensayos de adherencia, según RILEM-CEB FIB (UNE EN 10080:06), se presentan a continuación en las Tablas 8 y 9, y en los Gráficos 5, 6 y 7.

Tabla 8. Dosificación experimental del hormigón estructural con zeolitas naturales sin saturación. Procedimiento de mezclado en dos etapas.

| Materiales | kg/m ³ | Amasada (0,05 m ³) |
|----------------------------|-------------------|--------------------------------|
| Cemento Portland | 450 | 22,5 |
| Zeolita natural (< 80 μ) | 30 | 1,5 |
| Arena normal 0,15/4,76 | 454 | 23,0 |
| Aditivo superplastificante | 4 | 0,2 |
| Agua | 216 | 11,0 |
| Primera etapa (tiempo) | 3 min | |
| Zeolita natural (1/3 mm) | 212 | 11,0 |
| Zeolita natural (3/13 mm) | 530 | 26,0 |
| Segunda etapa (tiempo) | 2 min | |
| A/C +P | 0,45 | |
| Consistencia (mm) | 75/100 | |

Tabla 9. Resultado de ensayos mecánicos y NDT de probetas de hormigón en la conformación de vigas reforzadas con áridos ligeros con zeolitas naturales.

| Identificación (serie) | Densidad (kg/m ³) | Compresión (MPa) | Tracción (MPa) | I _r | Vp (m/seg) | Elasticidad (E _s) (GPa) |
|------------------------|-------------------------------|------------------|----------------|----------------|--------------|-------------------------------------|
| HEL 1 | 1 983 | 24,3 | 3,45 | 35,4 | 3 570 | 19,7 |
| HEL 2 | 1 993 | 26,4 | 2,97 | 37,6 | 3 460 | 21,0 |
| HEL 3 | 2 009 | 22,8 | 2,60 | 36,8 | 3 420 | 16,4 |
| HEL 4 | 2 008 | 32,2 | 2,49 | 37,2 | 3 533 | 19,1 |
| HEL 5 | 2 039 | 26,7 | 2,89 | 35,0 | 3 390 | 17,1 |
| HEL 6 | 2 050 | 29,4 | 2,32 | 36,5 | 3 373 | 16,1 |
| Media | 2 014 | 26,97 | 2,78 | 36,4 | 3 458 | 18,2 |
| S | 23,7 | 3,10 | 0,37 | 0,91 | 72,4 | 1,81 |
| V (%) | 1,2 | 11,0 | 13,0 | 2,5 | 2,1 | 9,9 |

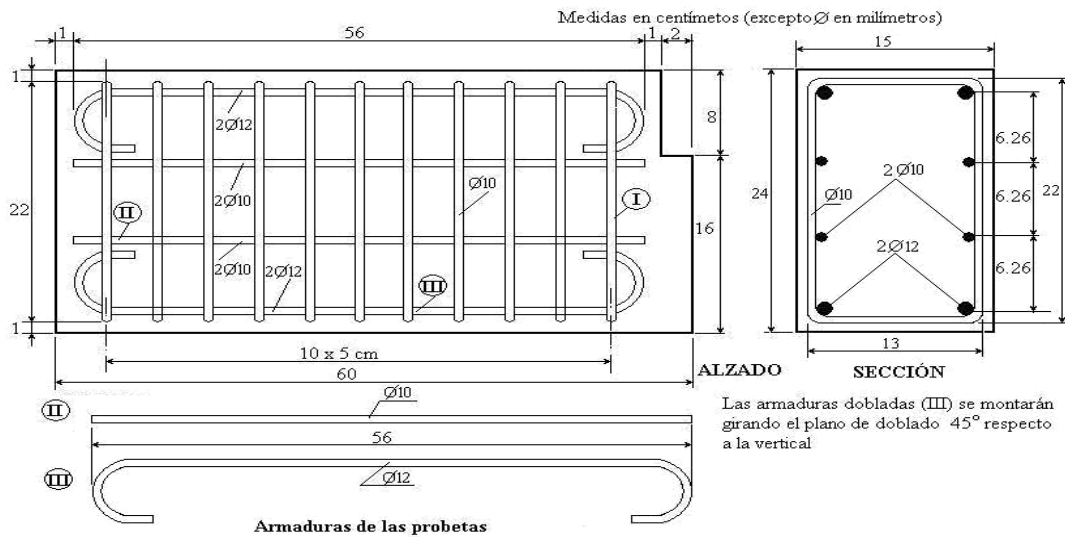


Gráfico 5. Dimensiones y refuerzo de semiviga .Ensayo UNE EN 10080:06.



Gráfico 6. Ensayo de adherencia UNE EN 10008:06 en hormigones ligeros reforzados con zeolitas naturales sin saturar.

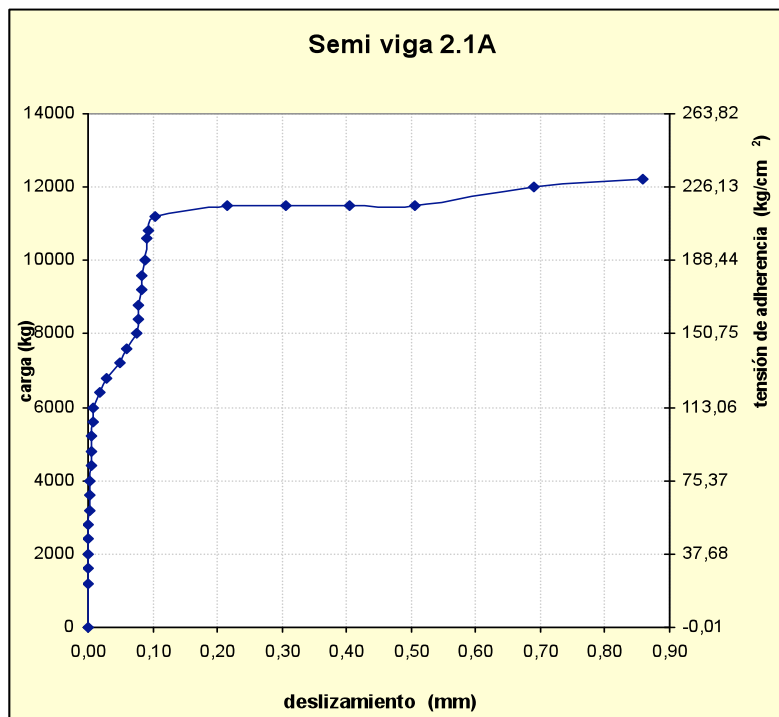


Gráfico 7. Comportamiento estructural del ensayo de adherencia UNE EN 10008:06 en hormigones ligeros reforzados con zeolitas naturales sin saturar.

4.3. Morteros ligeros en barcos de ferrocemento

Las experiencias de aplicaciones de las zeolitas naturales en los procedimientos de mezclado sin saturación se realizaron hace más de 10 años en tecnologías de construcciones de barcos de ferro cemento con 8, 16 y 13 m de eslora. En el diseño de estas mezclas se adoptaron las experiencias recomendadas para estas tecnologías con arenas de peso normal en las proporciones cemento :arena, 1:2 y relación A/C =0,45, las que fueron ajustadas tomando en consideración el aligeramiento de las masas, equivalente a cemento: zeolita: agua/cemento, 1:1.6:046. Se aplicaron los procedimientos de mezclado en dos etapas, pasta: mortero.(7) Las dosificaciones y el comportamiento de las resistencias a la flexo-compresión se presentan en las Tablas 10, 11, 12, 13 y 14, y en el Gráfico 8.

Tabla 10. Proporciones de morteros para ferrocemento con zeolitas naturales no saturadas.

| Proporciones | Cemento (kg/ m ³) | Zeolita (kg/ m ³) | | Agua (L/m ³) | Aditivos | | A/C |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|--------------------------|----------|-----|------|
| | | 0/1 | 1/2,3 | | SP | S | |
| 1:1,6 | 665 | 532 | 532 | 306 | 4,6 | 2,6 | 0,46 |

SP – Aditivo reductor de agua: formaldehído condensado naftaleno sulfonado. S – Sacarosa.

Tabla 11. Resistencia a la compresión de mortero para ferrocemento con zeolitas naturales no saturadas proporción 1: 1,6 - probetas 40x40x40 mm.

| Series | Resistencia a la compresión (MPa) | | | | Absorción(%) | | pH | |
|--------------|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|------------|-------------|-------------|
| | 3d | 7d | 28d | 90d | 28d | 90d | 28d | 90d |
| SA-0 | 21,4 | 47,0 | 61,6 | 62,3 | 3,8 | 2,0 | 11,9 | 11,8 |
| SA-1 | 24,3 | 47,8 | 58,3 | 65,8 | 3,9 | 2,0 | 11,8 | -- |
| SA-2 | 23,1 | 40,7 | 65,3 | 72,6 | 3,9 | -- | 11,9 | -- |
| Media | 22,9 | 45,2 | 61,7 | 68,5 | 3,8 | 2,0 | 11,9 | 11,8 |
| (%) | 37 | 73 | 100 | 111 | | | | |

Tabla 12. Resistencia a la flexión de mortero para ferrocemento con zeolitas naturales no saturadas proporción 1:1,6 - probetas 40x40x160 mm.

| Series | Resistencia a la flexión (MPa) | | | |
|--------------|--------------------------------|------------|------------|-------------|
| | 3d | 7d | 28d | 90d |
| SA-0 | 4,7 | 6,5 | 7,7 | -- |
| SA-1 | 4,3 | 6,5 | 9,4 | 11,4 |
| SA-2 | 5,1 | 6,5 | 10,0 | 11,0 |
| Media | 4,7 | 6,5 | 9,0 | 11,2 |
| (%) | 52 | 72 | 100 | 124 |

Tabla 13. Resistencia a la tracción directa de morteros en proporción 1:1,6 reforzados con malla galvanizada hexagonal, abertura 19 mm, alambre No.18.

| Series | Capas de mallas | Resistencia del mortero (MPa) (edad: 28 días) | | Tracción del ferrocemento (MPa) | |
|----------|-----------------|---|---------|---------------------------------|-------------|
| | | Compresión | Flexión | 0,05 T | 0,1 T |
| SA2-1 | 4 | 58,3 | 9,4 | 1,04 | 1,39 |
| SA2-2 | | | | 1,26 | 1,80 |
| SA2-3 | | | | 1,24 | 1,90 |
| SA2-5 | | | | 1,57 | 2,09 |
| SA2-6 | | | | 1,56 | 2,08 |
| Σ | | | | 1,33 | 1,86 |
| SA6-1 | 6 | 58,3 | 9,4 | 1,90 | 2,88 |
| SA6-2 | | | | 1,92 | 2,98 |
| Σ | | | | 1,91 | 2,91 |
| SA2-17 | 4 | 65,3 | 10,0 | 2,13 | 2,71 |
| SA2-18 | | | | 2,43 | 2,86 |
| Σ | | | | 2,28 | 2,75 |
| SA6-3 | 6 | 65,3 | 10,0 | 3,24 | 3,81 |
| SA6-5 | | | | 3,18 | 3,52 |
| SA6-6 | | | | 2,85 | 3,62 |
| SA6-7 | | | | 2,93 | 3,32 |
| SA6-8 | | | | 2,93 | 3,12 |

| | | |
|----------|-------------|-------------|
| Σ | 3,03 | 3,49 |
|----------|-------------|-------------|

T 0,05 - Ancho de fisuras 50 micras.

T 0,1 -Ancho de fisuras 100 micras.

Tabla 14. Proporciones de morteros con arena sílice normal y con zeolitas naturales empleadas en las construcciones de barcos de ferrocemento.

| Proporción | Arena | Cemento (kg/m ³) | Áridos Fracción | | Aditivos (L/m ³) | | A/C |
|------------|---------|------------------------------|-----------------|-------|------------------------------|-----|------|
| | | | 0/1 | 1/3 | S-3 | S | |
| 1:2,0 | Sílice | 665 | -- | 1 330 | -- | -- | 0,43 |
| 1:1,6 | Zeolita | 625 | 500 | 500 | 9,7 | 2,5 | 0,53 |
| 1:1,6 | Zeolita | 650 | 520 | 520 | 10,1 | 2,6 | 0,50 |
| 1:1.6 | Zeolita | 670 | 536 | 5,36 | 10,4 | 2,7 | 0,45 |

S-3 -Superplastificante polinaftaleno sulfonado.

S – Sacarosa.

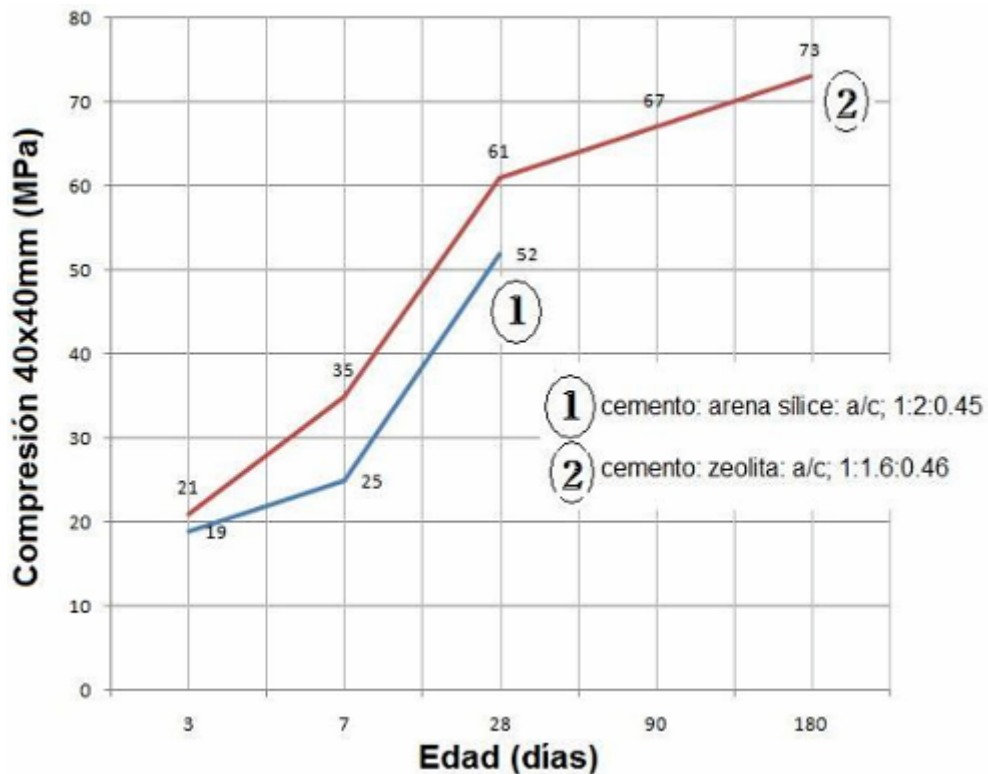


Gráfico 8. Resultados comparativos del comportamiento en el tiempo de la resistencia a compresión de morteros para ferrocemento con arena sílice convencional y zeolitas naturales trituradas sin presaturación.

4.4. Morteros polímero-modificados fibro-reforzados

En los morteros elaborados con las zeolitas naturales sin presaturación, se aplicaron procedimientos recomendados de la adición gradual de las fibras de carbón, mezclándolas a baja velocidad (53 rpm), con adiciones puzolánicas y aditivos químicos, con el fin de lograr la adecuada dispersión, en el tiempo no mayor de 4 minutos,

continuando con la mezcla del poliéster acrílico (PAE) y el cemento Portland en el tiempo de 2 minutos, un reposo de 30 segundos y el aumento final de la velocidad (95 rpm) en el tiempo de 2,5 minutos. Con la mezcla compactada manualmente, se conformaron probetas de 40x40x160 mm en moldes de acero, las que fueron sometidas a curado, y posteriormente a los ensayos de flexión y compresión a las edades de 7 y 28 días. (8) (9) (10)

En las Tablas 15, 16 y 17, y en el Gráfico 9, se exponen los resultados comparativos de estos ensayos obtenidos con los morteros polímero-modificados, empleando arena sílice convencional y zeolitas naturales, y el análisis microestructural (DRX y SEM) de los morteros polímero-modificados ligeros con adición de zeolita naturales y fibras de carbón.

Tabla 15. Análisis granulométrico del árido ligero zeolita natural.

| Abertura del tamiz (mm) | Retenido parcial (gr) | Retenido parcial (%) | Retenido Acumulado (%) | Pasado (%) |
|-------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|------------|
| 1,19 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 0,300 | 88 | 12 | 12 | 88 |
| 0,500 | 464 | 68 | 77 | 23 |
| 0,100 | 110 | 16 | 93 | 7 |
| 0,074 | 52 | 7 | 100 | 0 |

Tabla 16. Proporciones de morteros polímero-modificados con árido normal y aligerado con zeolitas naturales.

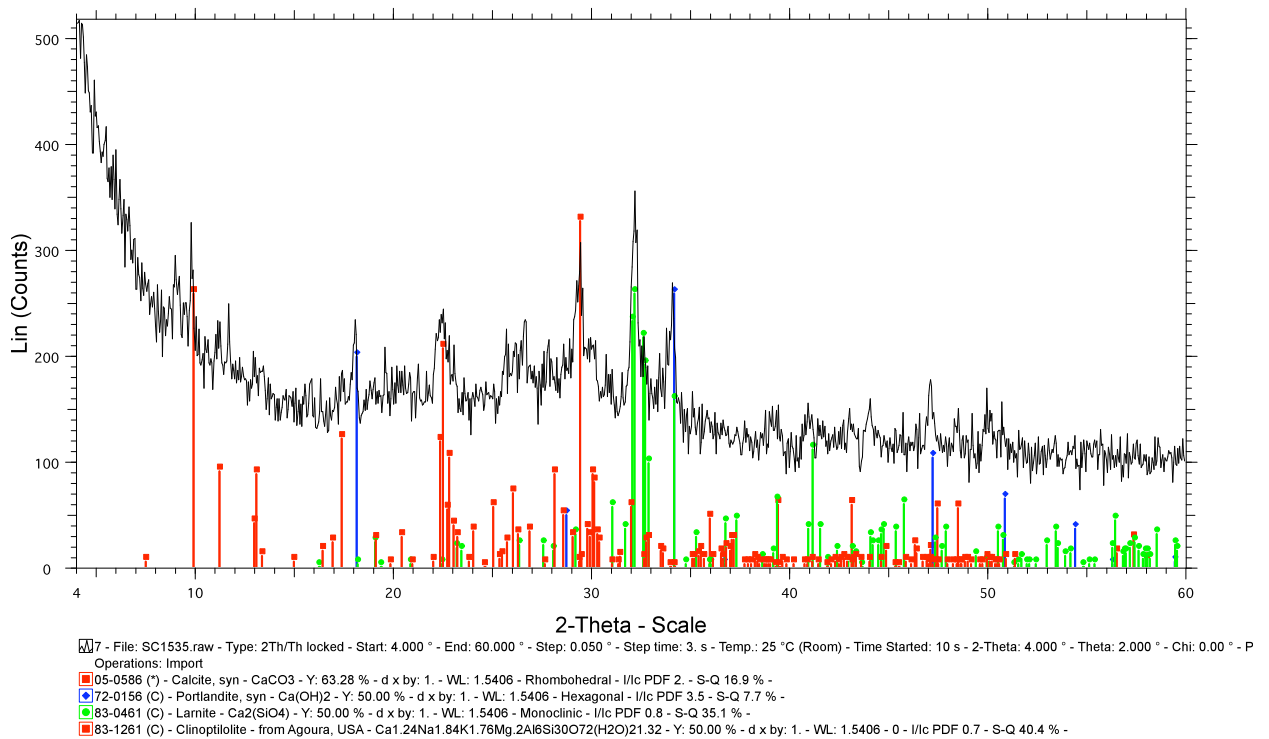
| Materiales | | Mortero polímero-modificado normal | Mortero polímero-modificado ligero |
|--------------------|------|------------------------------------|------------------------------------|
| Cemento Portland | (gr) | 884 | 714 |
| Arena Sílice | (gr) | 884 | -- |
| Zeolita < 1,19 | (gr) | -- | 714 |
| Fibra poliamida | (gr) | 0,5 | -- |
| Fibra carbón -3 mm | (gr) | -- | 1,0 |
| Zeolita < 80 μ | (gr) | | |
| Agua | (gr) | | |

| Series | Flexión (MPa) | | Compresión (MPa) | | Densidad (kg/m ³) |
|----------------|---------------|---------|------------------|---------|-------------------------------|
| | 7 días | 28 días | 7 días | 28 días | |
| Normal | 7,0 | 10,7 | 37,5 | 51,6 | 2 035 |
| Ligero | 7,1 | 9,6 | 33,4 | 47,2 | 1 738 |
| A/C+P | | 0,26 | | 0,31 | |
| Látex acrílico | (gr) | 385 | | 307 | |
| Plasticidad | (mm) | 80 | | 80 | |

Tabla 17. Resistencias mecánicas de morteros polímero-modificados con peso normal y aligerado con zeolita naturales sin saturar - probetas 40x40x160 mm.



7



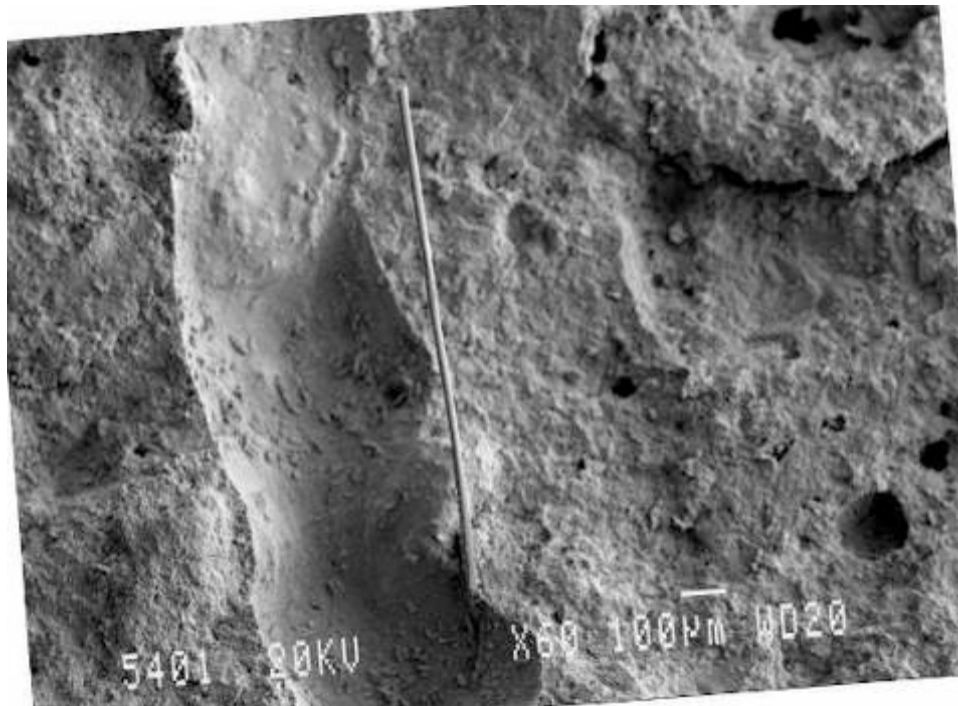


Gráfico 9. Análisis microestructural del mortero polímero–modificado fibro-reforzado aligerado con zeolitas naturales. DRX y SEM.

5. DISCUSION DE RESULTADOS

1. Las experiencias en la producción de hormigones sin asentamiento vibro-compactados en tecnologías de conformación con alta frecuencia de vibración empleando áridos ligeros naturales sin presaturación, han demostrado la factibilidad de producir losas alveolares estructurales sin refuerzo y reforzadas con acero de alto límite elástico. Empleando fracciones de áridos ligeros integrales (*all lightweight aggregates*), obtenidos mediante trituración de zeolitas naturales, se confirmó la posibilidad de alcanzar densidades de $1\,770\text{ kg/m}^3$, recomendadas para los hormigones estructurales ligeros.



2. Aunque en los ensayos estructurales de las losas alveolares pretensadas, sometidas a cargas de trabajo de 600-1 000 kg/m² se observaron desplazamientos similares a los obtenidos en las losas producidas con los áridos de densidad normal, siendo el comportamiento de sus flechas bajo las cargas, bastante cercanas a las obtenidas en los cálculos hasta el umbral de fisuración, con la aparición de fisuras hasta la rotura, se apreciaron grandes variaciones ocasionadas en parte por fallos a cortante. Por ello se determinó que no resulta recomendable el empleo de los áridos ligeros naturales integrales en las tecnologías de producción de hormigones pretensados. No obstante, se considera la posibilidad de realizar los estudios para su empleo, aprovechando las ventajas de disminución del pesos propio, en elementos pos-tensionados, donde es posible garantizar la protección del acero de alto límite elástico aplicando la inyección de lechadas (*grouting*) en el interior de los conductos, y realizar los procedimientos del desmolde y destense de elementos, sin cumplir el requisito de altas resistencias a edades tempranas.
3. En los experimentos de combinar arenas trituradas con los áridos ligeros naturales obtenidos con el empleo de las zeolitas naturales no presaturadas (*sand lightweight aggregates*), se lograron resultados más satisfactorios en los hormigones reforzados con acero grado G-60 sometido a ensayos de adherencia. Estos resultados satisfacen el requisito de alcanzar las tensiones de adherencia media, superiores al mínimo exigido por la RILEM TC 162-TDF y UNE EN 10080:06 como se apreciaron en las curvas de tensión de adherencia-deslizamiento para barras de Ø 16 mm de diámetro. Se cumplieron los requisitos especificados de alcanzar valores superiores de $r_{bm} > 5,92$ MPa y de tensiones de rotura de $r_{bm} > 9,7$ MPa.
4. Aún con variaciones en las propiedades mecánicas del hormigón, que pueden ser eliminadas con mayor uniformidad en los controles de los procesos de mezclado y compactación, se demuestra que, con los áridos ligeros naturales obtenidos mediante la trituración de zeolitas naturales combinadas con arenas trituradas de densidad normal, se pueden superar las resistencias mínimas a compresión y tracción de 28,0 y 2,2 MPa especificadas por la ASTM C 330, (6), así como módulos de deformación promedio de 18,2 GPa superiores a los mínimos recomendados para los hormigones con áridos ligeros estructurales. Es de interés continuar estos estudios donde se desarrollan las investigaciones sobre la ductilidad de los hormigones con áridos ligeros naturales, y su comportamiento post-pico en el diseño de las estructuras antisísmicas. También es importante la influencia de los procedimientos de homogeneidad y compactación del hormigón con áridos triturados de zeolitas naturales utilizando el ultrasonido. Véanse a continuación las aplicaciones en los Gráficos 10 y 11.



Gráfico 10. Hormigón vibrocompactado con peso volumétrico de $1\,770\text{ kg/m}^3$
 $V_p = 3\,780\text{ m/seg.}$



Gráfico 11. Hormigón vibrado con peso volumétrico de $2\,000\text{ kg/m}^3$
 $V_p = 3\,458\text{ m/seg.}$

5. En las experiencias del aligeramiento de morteros para ferrocemento con empleo de las zeolitas naturales, se han logrado resultados satisfactorios con notables incrementos de las resistencias mecánicas y la reducción del peso propio de los barcos de 8, 13 y 16 m de eslora construidos en astillero. Las resistencias de los morteros ligeros con zeolitas naturales sin presaturación, empleando los procedimientos de mezclado en dos etapas, mostraron notables incrementos de las resistencias a tracción y flexión. Esto originó un adecuado empaquetamiento de la matriz, así como las influencias de la mayor adherencia química alcanzada por la actividad puzolánica en la zona de transición; lo que determina la posibilidad de alcanzar mayores economías en el consumo de cemento Portland utilizado en las construcciones de ferrocemento construido con arena sílice convencional.

6. CONCLUSIONES

- Las experiencias en las aplicaciones de hormigones estructurales con empleo de áridos ligeros naturales obtenidos mediante procesos de trituración de las zeolitas naturales del tipo clinoptiloita-heulandita, mezcladas sin presaturación, han confirmado las posibilidades de cumplir con las exigencias especificadas en las normas internacionales y se han logrado rangos de densidades entre $1\,700\text{--}1\,980\text{ kg/m}^3$, resistencias a compresión que superan los $28,0\text{ MPa}$, tracción indirecta de $2,20\text{ MPa}$, así como módulos de deformación superiores a los $17,5\text{ MPa}$.
- De acuerdo con los resultados reológicos y físico-mecánicos obtenidos, y por los análisis microestructurales de los morteros y hormigones, se considera que los procesos tecnológicos desarrollados en los experimentos tienen una influencia determinante en las propiedades de las mezclas, lo cual contribuye a la formación de zonas de transición árido-pasta, de mayor compacidad y adherencia, como resultado de la actividad puzolánica de las

zeolitas naturales utilizadas en los procesos de mezclado en dos etapas sin presaturación.

- Las posibilidades de empleo de los áridos ligeros naturales obtenidos mediante procesos de trituración de zeolitas naturales con abundantes reservas en suelos latinoamericano, pueden contribuir significativamente, junto al ahorro de energía, ahorro de cemento Portland y sostenibilidad del medio ambiente, al diseño de estructuras más ligeras y resistente a las tensiones originadas en movimientos sísmicos relativamente frecuentes en nuestro países.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Rossignolo, J.A. y M. V. C Agnesini: Concreto, Ensina, Pesquisa e Realizações, “*Concreto Estructural Leve*”, Cap. 43. Vol.2, pp.1335 -1342. IBRACON. São Paulo Brasil. Año 2005.
2. Mehta, P.K. y P.S.M. Monteiro: Concreto, Estrutura, Propriedades e Materiais, “*Concreto Estructural Leve*”, Editorial Pini p.395. Año 2001
3. ACI 211.2.98: Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight. Concrete ACI Part 1. 2000.
4. Neville, A.M.: Properties of Concrete. Third Edition. Pitman Publishing, pp.228, 232,235, 618. Año 1982.
5. Bremmer, T.W. y T. A. Holm: ACI Materials Journal. Technical Paper, “*Elastic Compatibility and the Behaviour of Concrete*”. March-April, Año 1986.
6. Annual Book of ASTM Standard 04.02 Concrete and Mineral Aggregates. ASTM C 330: “*Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete*”. Año 1999
7. Gayoso, R. C. Gil: Proceedings of the Fith Internacional Symposium on Ferrocement –“*Cracking avoidance in ferrocement using natural zeolite laighweigh agrégate.*” UMIST .Manchester U.K año 1994
8. Ohama, Y.: ACI Materials Journal Technical Paper, “*Principle of Latex Modification and Some Typical Properties of Latex-Modified Mortars and Concretes*”. Sep.–Oct., 1988.
9. Ohama, Y.: Carbon, “*Carbon-Cement Composites*”. Vol.27 No.5, pp. 729-737. Año 1989.



10. Soroushian, P. *et al*: ACI Materials Journals, “ *Modified Carbon Fiber Mortar* “. Vol.88 No.1. January–February, 1991.
11. Vera, D, L. González: Trabajo de diploma *Estudio para la obtención de hormigones estructurales ligeros. Diseño, cálculo y experimentación.* Facultad de Ingeniería Civil, CUJAE. Año 2005.

Agradecimiento:

Al Profesor Dr. Servando Chichón de la Universidad de Alicante, España, por su contribución a los estudios microestructurales realizados con las zeolitas cubanas en morteros y hormigones ligeros.