

volturas. Las propiedades físicas y el análisis químico del cemento se dan en la tabla 3.

Caliza Triturada.

La caliza triturada con tamaños menores de 25 mm y mayores de 4.75 mm (menores de 1 pulg y mayores del #4) fue tomada como el agregado grueso de referencia en todas las mezclas de control y también en aquellas revolturas donde el agregado fino se obtuvo a partir del concreto reciclado..

Arena Natural.

Arena Natural del Valle de Ottawa fue el agregado fino de referencia, tanto en las revolturas de control como en aquellas en las cuales se utilizó concreto reciclado como agregado grueso. Para mantener una granulometría uniforme para cada mezcla, la arena se separó en fracciones de diferentes tamaños y posteriormente combinadas para dar una granulometría específica.

Agregado Grueso preparado a partir de Concreto Reciclado.

La fracción de concreto reciclado con tamaños menores de 25 mm y mayores de 4.75 mm (menores de 1 pulg y mayores de la #4) se utilizó como el agregado grueso en tres de las revolturas que se investigaron.

Agregado Fino Preparado a partir del Concreto Reciclado.

La fracción del concreto reciclado con tamaños menores del #4 y mayores del #100 (menores de 4.75 mm y mayores de 150  $\mu$  m) se utilizó como agregado fino en tres de las revolturas. En estas revolturas los tamaños menores de la #100 (menores de 150  $\mu$  m) fueron sustituidos por una fracción similar de arena natural. Como se hizo con la arena natural, para mantener la granulometría uniforme para cada revoltura, se combinaron las fracciones de diferentes tamaños para dar una granulometría específica.

Granulometría de los Agregados.

La granulometría, tanto de los agregados naturales como aquellos preparados de concreto reciclado, se muestran en la tabla 4. El peso específico y absorción de los dos tipos de agregado se dan en la tabla 5.

Proporcionamiento de las Revolturas.

Datos del proporcionamiento para las revolturas de concreto se dan en la tabla 6. Los agregados fueron secados a las condiciones del laboratorio y la cantidad de agua para la revoltura se ajustó para tomar en cuenta la absorción.

En todas las mezclas se utilizó un agente inclusor de aire.

Como se mencionó anteriormente, de acuerdo al nivel de resistencia de los cilindros descartados, se prepararon 3 lotes diferentes de agregado preparado mediante el reciclado de los cilindros de concreto. Al hacer las revolturas de concreto utilizando agregados preparados de concreto reciclado se aseguró que para las revolturas de concreto de alta resistencia, sólo se usará aquel agregado, ya

TABLA 3  
Propiedades físicas y análisis químico del cemento

| Descripción del ensaye                                   |                                   |
|--|-----------------------------------|
| <b>Ensayes físicos - general</b>                         |                                   |
| Tiempo de fraguado (Aguja Vicat): Inicial....            | 1 hr 15 min                       |
| Final.....   | 4 hr 50 min                       |
| Finura: Pasa la #200.....                                | 97.9 %                            |
| Sanidad - Autoclave.....                                 | 0.2 %                             |
| <b>Ensayes físicos - resistencia del mortero</b>         |                                   |
| Resistencia a la compresión de cubos de 51 mm (2 pulg).  |                                   |
| a los 3 días.....  | 165 kg/cm <sup>2</sup> (16.1 MPa) |
| a los 7 días.....  | 271 kg/cm <sup>2</sup> (26.5 MPa) |
| a los 28 días.....                                       | 378 kg/cm <sup>2</sup> (37.0 MPa) |
| <b>Análisis químico</b>                                  |                                   |
| Residuo insoluble.....                                   | 0.12 %                            |
| Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> ).....              | 21.1 %                            |
| Oxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )..... | 5.8 %                             |
| Oxido férrico (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).....     | 2.6 %                             |
| Oxido de calcio total (CaO).....                         | 64.1 %                            |
| Oxido de magnesio (MgO).....                             | 2.9 %                             |
| Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ).....               | 2.2 %                             |
| Pérdidas de ignición.....                                | 0.34 %                            |
| Otros.....   | 0.84 %                            |

\* Los resultados de ensayos y análisis químico fueron proporcionados por la compañía fabricante del cemento.

TABLA 4

Granulometría de los Agregados

| Agregado grueso           |                               | Agregado fino             |                               |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Tamaño de malla mm (pulg) | Porcentaje retenido acumulado | Tamaño de malla mm (pulg) | Porcentaje retenido acumulado |
| 19 (3/4)                  | 33.4                          | 4.75 (4)                  | 0.0                           |
| 9.5 (3/8)                 | 66.6                          | 2.36 (8)                  | 10.0                          |
| 4.75 (4)                  | 100.0                         | 1.18 (16)                 | 32.5                          |
|                           |                               | 1.40 (30)                 | 57.5                          |
|                           |                               | 300 (50)                  | 80.0                          |
|                           |                               | 150 (100)                 | 94.0                          |
|                           |                               | Pan                       | 100.0                         |

TABLA 5

Propiedades físicas de los agregados grueso y fino

|                          | Agregados preparados a partir de concreto reciclado. |                   |                  |                  |                   |                  | Caliza triturada | Arena natural |
|--------------------------|--|-------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|---------------|
|                          | Grueso   |                   |                  | Fino             |                   |                  |                  |               |
|                          | Alta resistencia                                     | Resistencia media | Baja resistencia | Alta resistencia | Resistencia media | Baja resistencia |                  |               |
| Peso específico (S.S.D.) | 2.53   | 2.53              | 2.50             | -                | 2.31              | 2.34             | 2.68             | 2.70          |
| Absorción, %             | 4.0  | 3.9               | 4.4              | 7.9              | 9.3               | 8.6              | 0.40             | 0.50          |

USO DEL CONCRETO RECICLADO

fuese grueso o fino, que había sido preparado de cilindros descartados correspondientes a ese nivel de resistencia.

Propiedades del Concreto Fresco.

Las propiedades del concreto fresco, temperatura, revenimiento, peso unitario y contenido de aire, están dadas en la tabla 6

PREPARACION Y COLADO DE LOS ESPECIMENES DE ENSAYE.

Para cada revoltura fueron colados 6 cilindros de 152 x 305 mm (6 x 12 pulg) y seis prismas de 85 x 102 x 406 mm (3.5 x 4 x 16 pulg). Se colaron los cilindros llenando moldes de acero en 2 capas aproximadamente iguales, cada capa siendo compactada mediante un vibrador interno. Los prismas se colaron en moldes de latón llenándose en aproximadamente dos capas iguales, compactándose cada capa colocando los moldes en una mesa vibratoria durante 30 segundos. Después del colado, todos los especímenes se cubrieron con arpilleras saturadas, se dejaron a una temperatura de  $25 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$  ( $75 \pm 3^{\circ}\text{F}$ ) y a 50% de humedad relativa durante 24 horas. Finalmente fueron sacados de los moldes y transferidos al cuarto de curado hasta el momento de ser ensayados.

ENSAYE DE LOS ESPECIMENES.

A los 7, 28 y 91 días se sacaron del cuarto de curado dos cilindros de cada revoltura, se recapearon con una revoltura de azufre y roca triturada, y se ensayaron a compresión en una máquina de ensaye Amsler. A los 14 días se ensayaron a flexión dos prismas de acuerdo a la norma ASTM C78-75 aplicando cargas en los tercios.

ESTUDIOS DE DURABILIDAD.

Aunque la durabilidad no puede medirse directamente, una exposición prolongada del concreto a ciclos de hielo y deshielo produce cambios medibles en los especímenes de ensaye, los cuales pueden indicar deterioro. Mediciones hechas sobre los especímenes de ensaye después de estar expuestos a ciclos de hielo y deshielo, proporcionan información que puede utilizarse para evaluar la resistencia relativa a la helada o durabilidad.

En esta investigación, los prismas de ensaye fueron expuestos a ciclos repetidos de congelamiento en aire y deshielo en agua de acuerdo a la norma ASTM C666-75. La unidad automática de hielo y deshielo\* tiene la capacidad de completar -

\* Fabricado por la Canadian Ice Machine Company Ltd., Toronto, Ontario.

TABLA 6  
PROPORCIONAMIENTO Y PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO

| Serie de revolutura | No. de revolutura | Tipo de revolutura   | Proporcionamiento               |  | Propiedades del concreto fresco |                |                 |                                   |                     |       |     |
|---------------------|-------------------|--|---------------------------------|--|---------------------------------|----------------|-----------------|-----------------------------------|---------------------|-------|-----|
|                     |                   |  | Relación agua-cemento (en peso) | Relación agua-agregado-cemento (en peso) | Temperatura °C                  | Temperatura °F | Revenimiento mm | Peso específico kg/m <sup>3</sup> | Contenido de aire % |       |     |
| A                   | 1                 | Control  | 0.69                            | 7.77                                     | 24.4                            | 76             | 50              | 2.0                               | 2210                | 138.0 | 6.2 |
|                     | 2                 | A.G. preparado a partir del concreto reciclado y A. F. de referencia   | 0.69                            | 7.92                                     | 24.4                            | 76             | 60              | 2.5                               | 2115                | 132.0 | 6.9 |
|                     | 3                 | Control  | 0.67                            | 7.80                                     | 25.0                            | 77             | 40              | 1.75                              | 2275                | 142.0 | 5.3 |
|                     | 4                 | A. G. de referencia y A. F. preparado a partir del concreto reciclado. | 0.67                            | 8.10                                     | 25.0                            | 77             | 50              | 2.0                               | 2240                | 140.0 | 3.5 |
| B                   | 5                 | Control  | 0.56                            | 6.50                                     | 21.7                            | 71             | 60              | 2.5                               | 2240                | 140.0 | 6.1 |
|                     | 6                 | A. G. preparado a partir del concreto reciclado y A. F. de referencia  | 0.56                            | 6.63                                     | 22.2                            | 72             | 60              | 2.5                               | 2160                | 134.8 | 6.3 |
|                     | 7                 | Control  | 0.57                            | 6.51                                     | 23.3                            | 74             | 60              | 2.5                               | 2270                | 141.6 | 5.9 |
|                     | 8                 | A. G. de referencia y A. F. preparado a partir del concreto reciclado. | 0.57                            | 6.76                                     | 24.4                            | 76             | 60              | 2.5                               | 2165                | 135.2 | 6.0 |
| C                   | 9                 | Control  | 0.41                            | 4.45                                     | 23.2                            | 72             | 70              | 2.75                              | 2371                | 148.0 | 4.2 |
|                     | 10                | A.G. preparado a partir del concreto reciclado y A. F. de referencia.  | 0.41                            | 4.94                                     | 21.7                            | 71             | 75              | 3.0                               | 2250                | 140.4 | 4.5 |
|                     | 11                | Control  | 0.41                            | 4.45                                     | 24.4                            | 76             | 50              | 2.0                               | 2370                | 148.0 | 4.9 |
|                     | 12                | A. G. de referencia y A. F. preparado a partir del concreto reciclado. | 0.41                            | 4.57                                     | 24.4                            | 72             | 63.5            | 2.5                               | 2223                | 138.8 | 4.8 |

A. G. = Agregado grueso.  
A. F. = Agregado fino.

ocho ciclos diarios. Un ciclo completo desde  $4.4 \pm 1.7^\circ\text{C}$  a  $-17.8 \pm 1.7^\circ\text{C}$  ( $40 \pm 3^\circ\text{F}$  a  $0 \pm 3^\circ\text{F}$ ) y de nuevo hasta  $4.4 \pm 1.7^\circ\text{C}$  ( $40 \pm 3^\circ\text{F}$ ) requiere cerca de 3 horas.

Al final del período inicial de curado de 14 días, la temperatura de cada juego de dos prismas se redujo a una temperatura uniforme de  $4.4 \pm 1.7^\circ\text{C}$  ( $40 \pm 3^\circ\text{F}$ ) colocándolos en el gabinete del hielo y deshielo durante la fase del deshielo durante una hora. La medición inicial y todas las subsecuentes de los especímenes de ensaye para el hielo y deshielo y de referencia se hicieron a esta temperatura. Después de que se tomaron las mediciones iniciales a los prismas de ensaye, se colocaron dos prismas en el gabinete de hielo y deshielo y los dos prismas compañeros en el cuarto de curado para actuar como de referencia.

Los especímenes de ensaye sujetos al hielo y deshielo fueron examinados, pesados y ensayados mediante un método de velocidad de pulso ultrasónico\* a intervalos que variaron desde 100 a 750 ciclos. Al final del ensaye, los especímenes sujetos al hielo y deshielo y de referencia fueron ensayados mediante velocidad ultrasónica y ensayados para determinar su resistencia a la flexión. Ningunas mediciones para la frecuencia resonante fueron posibles debido al mal funcionamiento del equipo.

RESULTADOS DE LOS ENSAYES Y SU ANALISIS.

En esta investigación se ensayaron 72 cilindros y 72 prismas. La densidad de todos los especímenes se tomó a un día como se muestra en la tabla 7. Se da un resumen en las tablas de la 8 a la 12 de la resistencia a la compresión y a la flexión de los cilindros y prismas, respectivamente, de los cambios en la velocidad ultrasónica de los prismas de ensaye durante los ciclos de hielo y deshielo, y de los prismas de referencia durante el almacenamiento en el cuarto de curado. Se calcularon la desviación estándar y el coeficiente de variación, que se muestra en las tablas 13 y 14.

Las relaciones de edad contra resistencia a la compresión se muestran en las figuras 5 y 6; la resistencia a la flexión de los prismas a los 14 días se ilustra en forma de gráfica de barras en la figura 7. En las figuras del 7 al 11 se muestran las relaciones entre la relación agua-cemento y la resistencia a la compresión y a la flexión expresadas como un por ciento de la resistencia en los especímenes de control.

\* Se utilizó equipo "PUNDIT", fabricado por C.N.S. Instruments Ltd., 61-63 Holmes Road, Londres, Inglaterra.

TABLA 7  
DENSIDAD DE CILINDROS Y PRISMAS DE CONCRETO A UN DIA

| Serie de revoltura | Revoltura No. | Tipo de revoltura  | Relación agua-cemento (en peso) |                    | Densidad de resultados de seis ensayos |                    |
|--------------------|---------------|--|---------------------------------|--------------------|--|--------------------|
|                    |               |  | 152x305-mm (6x12-in.) Cilindros |                    | Prismas                                |                    |
|                    |               |  | kg/m <sup>3</sup>               | lb/ft <sup>3</sup> | kg/m <sup>3</sup>                      | lb/ft <sup>3</sup> |
| A                  | 1             | Control  | 0.69                            | 141.7              | 2270                                   | 140.5              |
|                    | 2             | A.G. preparado a partir del concreto reciclado y A. F. de referencia.  | 0.69                            | 143.3              | 2296                                   | 142.9              |
|                    | 3             | Control  | 0.67                            | 145.8              | 2335                                   | 143.1              |
|                    | 4             | A. G. de referencia y A. F. preparado a partir del concreto reciclado. | 0.67                            | 141.4              | 2265                                   | 140.0              |
| B                  | 5             | Control  | 0.56                            | 141.6              | 2270                                   | 140.5              |
|                    | 6             | A.G. preparado a partir del concreto reciclado y A. F. de referencia.  | 0.56                            | 137.0              | 2195                                   | 135.5              |
|                    | 7             | Control  | 0.57                            | 142.7              | 2285                                   | 141.9              |
|                    | 8             | A. G. de referencia y A. F. preparado a partir del concreto reciclado. | 0.57                            | 137.1              | 2195                                   | 136.4              |
| C                  | 9             | Control  | 0.41                            | 148.8              | 2385                                   | 147.5              |
|                    | 10            | A.G. preparado a partir del concreto reciclado y A. F. de referencia.  | 0.41                            | 142.5              | 2280                                   | 140.9              |
|                    | 11            | Control  | 0.41                            | 149.2              | 2390                                   | 147.9              |
|                    | 12            | A. G. de referencia y A. F. preparado a partir del concreto reciclado. | 0.41                            | 140.8              | 2250                                   | 140.1              |

TABLA 8

RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYE PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESION A VARIAS EDADES.

| Serie de revoltura | Revoltura No. | Tipo de revoltura  | Relación agua-cemento (en peso) | Resistencia a la compresión de cilindros de 152 x 305 mm (6 x 12 pulg) |       |                    |      |                    |      |
|--------------------|---------------|--|---------------------------------|--|-------|--------------------|------|--------------------|------|
|                    |               |  |                                 | 7 días   |       | 28 días            |      | 91 días            |      |
|                    |               |  |                                 | kg/cm <sup>2</sup>   | MPa   | kg/cm <sup>2</sup> | MPa  | kg/cm <sup>2</sup> | MPa  |
| A                  | 1             | Control  | 0.69                            | 143.1  | 14.0  | 179.7              | 17.6 | 182.8              | 17.9 |
|                    | 2             | A.G. preparado a partir del concreto reciclado y A. F. de referencia.  | 0.69                            | 92.1   | 9.0   | 139.7              | 13.6 | 142.8              | 13.9 |
|                    | 3             | Control  | 0.67                            | 166.0  | 16.2  | 199.7              | 19.5 | 229.6              | 22.4 |
|                    | 4             | A. G. de referencia y A. F. preparado a partir del concreto reciclado. | 0.67                            | 130.5  | 12.7  | 167.4              | 16.3 | 183.2              | 17.9 |
| B                  | 5             | Control  | 0.56                            | 181.8  | 17.6  | 224.3              | 21.9 | 234.9              | 22.9 |
|                    | 6             | A.G. preparado a partir del concreto reciclado y A. F. de referencia.  | 0.56                            | 163.9  | 16.0  | 204.3              | 20.0 | 212.0              | 20.7 |
|                    | 7             | Control  | 0.57                            | .....  | ..... | 207.5              | 20.3 | 228.9              | 22.4 |
|                    | 8             | A. G. de referencia y A. F. preparado a partir del concreto reciclado. | 0.57                            | .....  | ..... | 173.7              | 17.0 | 182.5              | 17.8 |
| C                  | 9             | Control  | 0.41                            | 318.2  | 31.1  | 332.6              | 32.5 | 362.9              | 35.4 |
|                    | 10            | A.G. preparado a partir del concreto reciclado y A. F. de referencia.  | 0.41                            | 291.1  | 28.4  | 330.5              | 32.3 | 382.6              | 37.4 |
|                    | 11            | Control  | 0.41                            | 325.9  | 31.8  | 370.6              | 36.2 | 416.3              | 40.7 |
|                    | 12            | A. G. de referencia y A. F. preparado a partir del concreto reciclado. | 0.41                            | 265.8  | 26.0  | 324.5              | 31.7 | 344.9              | 33.7 |

TABLA 9

RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYE PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA FLEXION

| Revoltura No. | Tipo de revoltura  | Relación agua-cemento (en peso) | Resistencia a la flexión*   |     |   |     |  |     |  |     |                                    |
|---------------|--|---------------------------------|-----------------------------|-----|---|-----|--|-----|--|-----|------------------------------------|
|               |  |                                 | Prismas curados con humedad |     |   |     | Los prismas después de estar expuestos a los ciclos de congelamiento y deshielo. |     |  |     |                                    |
|               |  |                                 | Después de 14 días          |     | A la edad correspondiente al final de los ciclos de congelamiento y deshielo. |     | Núm. de ciclos de congelamiento y deshielo.                                      |     | Edad al final de los ciclos de congelamiento y deshielo. |     | Porcentaje de resistencia residual |
|               |  |                                 | kg/cm <sup>2</sup>          | MPa | kg/cm <sup>2</sup>  | MPa |  |     | Resistencia  |     |                                    |
| 1             | Control  | 0.69                            | 45.4                        | 4.4 | 52.4  | 5.1 | 760  | 100 | 47.5   | 4.6 | 90.6                               |
|               | A.G. preparado a partir del concreto reciclado y A. F. de referencia.  |                                 | 38.0                        | 3.7 | 41.8  | 4.1 | 760  | 100 | 38.3   | 3.8 | 91.6                               |
|               | Control  |                                 | 50.3                        | 4.9 | 54.9  | 5.4 | 684  | 93  | 51.0   | 4.9 | 92.9                               |
|               | A. G. de referencia y A. F. preparado a partir del concreto reciclado. |                                 | 46.1                        | 4.5 | 53.4  | 5.2 | 684  | 93  | 46.1   | 4.6 | 86.2                               |
| 5             | Control  | 0.56                            | 59.1                        | 5.8 | 58.0  | 5.7 | 603  | 82  | 54.1   | 5.3 | 93.3                               |
|               | A.G. preparado a partir del concreto reciclado y A. F. de referencia.  |                                 | 47.5                        | 4.7 | 47.1  | 4.6 | 603  | 82  | 52.4   | 5.1 | 111.2                              |
|               | Control  |                                 | 51.3                        | 5.0 | 56.3  | 5.5 | 603  | 82  | 53.4   | 5.2 | 95.0                               |
|               | A. G. de referencia y A. F. preparado a partir del concreto reciclado. |                                 | 43.6                        | 4.3 | 47.8  | 4.7 | 603  | 82  | 47.1   | 4.7 | 98.5                               |
| 9             | Control  | 0.41                            | 66.1                        | 6.5 | 77.0  | 7.5 | 750  | 96  | 73.1   | 7.2 | 95.0                               |
|               | A.G. preparado a partir del concreto reciclado y A. F. de referencia.  |                                 | 68.2                        | 6.7 | 70.3  | 6.9 | 750  | 96  | 68.2   | 6.7 | 97.0                               |
|               | Control  |                                 | 70.0                        | 6.9 | 84.4  | 8.3 | 750  | 100 | 77.7   | 7.7 | 92.1                               |
|               | A. G. de referencia y A. F. preparado a partir del concreto reciclado. |                                 | 56.3                        | 5.5 | 73.8  | 7.2 | 750  | 93  | 60.5   | 5.9 | 81.9                               |

\* Cada resultado es el promedio de resultados de dos prismas, haciéndose el ensaye con cargas a los tercios.

A.G. = Agregado grueso.  
A.F. = Agregado fino.