
RESUMEN

La durabilidad de las estructuras de concreto se ha tornado un asunto de interés mundial en las últimas dos décadas. Los costos económicos asociados a reparos de estructuras de concreto son cada vez mayores, y cada vez más, la incidencia de fallas en esas intervenciones correctivas que no resultan adecuadas es reportada.

En Brasil, la técnica de intervención correctiva más utilizada es la de reparos localizados con morteros de base cemento modificados con polímeros. Una de las patologías más comúnmente presentada cuando del uso de este tipo de intervención es la fisuración asociada a la retracción.

El presente trabajo, extraído de la disertación de maestría de este autor, pretende evaluar la influencia de las variables más importantes e incluso de algunos parámetros de dosificación en la fisuración debido a la retracción de morteros de reparo. Para tal, fue estudiada una familia de morteros de una misma consistencia de proporciones cemento:arena 1:1,0, 1:1,5, 1:2,2 y 1:3,0; utilizando para estas una cantidad fija de polímero y de aditivo superplastificante con relación al peso del cemento. Fueron también evaluados tres morteros de base cemento modificados con polímeros disponibles en el país y comercializados para el reparo de estructuras de concreto, de modo a clasificar y comparar estos con relación a la fisuración, con relación a aquellos morteros dosados en el laboratorio. Para evaluar la tendencia a la fisuración de los morteros fueron realizados ensayos de retracción potencial libre, resistencia a tracción por flexión (módulo de ruptura), módulo de elasticidad y retracción restringida.

Los resultados obtenidos muestran que el modelo $\epsilon_j - f_{tj}/E_{cj}$ consiguió acusar la fisuración de los morteros que realmente fisuraron en el ensayo de retracción restringida. Este modelo considera todas las variables influyentes en la fisuración medidas en el programa experimental. Fue verificado también que para un estudio más simplificado puede ser utilizado un modelo que considera apenas la retracción libre, aunque este se coloque siempre a favor de la seguridad.

Para morteros de una misma familia, se puede decir que existe una proporción de mezcla que presenta la menor tendencia a fisuración.

ABSTRACT

The durability of concrete structures has become an issue of interest worldwide especially during the last two decades. The expenditures associated to the repair and rehabilitation of concrete structures is becoming increasingly higher, and the amount of unsucceeded repairs on concrete structures has been reported as unacceptable.

In Brazil, patch repair with cement-based polymer modified mortars is the most widely technique used. One of the main causes of distress when using this type of repair has been found to be shrinkage cracking.

The target of this research, which is an extract from the master's degree dissertation of this author, is to evaluate the effect of some significant properties and also some mix-design parameters on the cracking potential due to shrinkage of repair mortars. Therefore, a family of mortars with the same consistency with cement:sand proportions of 1:1,0, 1:1,5, 1:2,2 and 1:3,0; with a constant polymer and superplasticizer content related to the cement weight. Also, three industrialized polymer modified repair mortars from different manufacturers were evaluated, thus allowing classifying and comparing their cracking potential with the laboratory prepared mortars.

For evaluating the cracking potential of the mortars the following tests were selected, free-shrinkage, flexural strength, elasticity modulus and restrained shrinkage.

The results obtained show that the model $\varepsilon_j - f_{tj}/E_{cj}$ was able to distinguish the mortars that cracked during the restrained shrinkage testing from the mortars that did not crack. This model considers all of the variables measured during the experimental program affecting shrinkage related cracking. It was also verified that a more simplified study can considering only the free-shrinkage of the mortars can be applied; being that this model will always be in favor of security.

For mortars of a same family it can be concluded that there is one mix-proportion that will present the least cracking tendency.

SUMARIO

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
SUMARIO.....	II
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO.....	3
2 EVALUACIÓN DE LA RETRACCIÓN RESTRINGIDA.....	3
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	9
3.1 INTRODUCCIÓN	9
3.2 VARIABLES DEL ESTUDIO.....	9
3.2.1 <i>Parámetros fijados:</i>	9
3.2.2 <i>Variables independientes.</i>	10
3.2.3 <i>Variables dependientes</i>	10
3.2.4 <i>Variables intervinientes.</i>	10
4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	10
4.1 MODELAJE DE LA TENDENCIA A LA FISURACIÓN	10
4.1.1 <i>f_i vs tiempo.</i>	17
4.1.2 <i>E_c vs tiempo</i>	17
4.1.3 <i>f_i/E_c vs tiempo</i>	17
4.1.4 <i>ε vs tiempo</i>	18
4.1.5 <i>ε - f_i/E_c vs tiempo</i>	18
4.2 PARÁMETROS DE DOSIFICACIÓN DE LOS MORTEROS DE REPARO PREPARADOS EN EL LABORATORIO BUSCANDO LA DISMINUCIÓN DE LA TENDENCIA A FISURACIÓN.....	19
5 CONSIDERACIONES FINALES.....	21
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	22

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años, tanto en Brasil como en muchos otros países adelantados la sociedad y la ingeniería han percibido que las estructuras de concreto no son eternas, como un día se creyó. La interacción con el medio ambiente a lo largo de la extensa etapa de uso y operación de las edificaciones ocasiona su deterioración, hecho que viene preocupando al medio técnico tanto en el ámbito internacional como en el nacional.

Las mudanzas volumétricas en los morteros y concretos de cemento Portland debido a la retracción constituyen uno de los mayores causadores de deterioro prematuro de las estructuras de concreto. Debido a las restricciones existentes e inevitables, estas mudanzas originan tensiones de tracción que pueden causar la fisuración del material. Esta predisposición a la fisuración ha sido apuntada como uno de los mayores inconvenientes tanto en el caso de los morteros estructurales, como en el mismo concreto, por formar parte de una red de microfisuras interconectadas que se constituye en un camino de fácil acceso de los agentes agresivos¹. La publicación técnica detallada del NIST (National Institute of Standards and Technology), NISTIR 6519², afirma que uno de los factores más importantes que afectan el transporte iónico a través del concreto es la presencia de fisuras.

Otro factor que no deja de tener gran importancia y que ya fue señalado por Dal Molin³ es el hecho de que las fisuras afectan al usuario bajo el punto de vista del confort, salubridad y satisfacción psicológica.

Varios autores y autoridades vienen haciendo alertas sobre el gran número de vicios en las intervenciones correctivas en estructuras de concreto, especialmente en el caso de estructuras con corrosión de armaduras. El resumen del "workshop" sobre desempeño de materiales de reparo organizado por el NIST, concluyó que la gran propensión a fisuración de estos materiales es uno de los factores críticos que afectan la durabilidad de estructuras

¹ MEHTA, PK. Durability – Critical issues for the future, *Concrete International*, V19, no 7, pp 27-33, 1997.

² NISTIR 6519. **Effect of drying-shrinkage cracks and flexural cracks on concrete bulk permeability.** National Institute of Standards and Technology, Technology Administration, US Department of Commerce. Kenneth Snyder, 39p, Maio 2000.

³ DAL MOLIN, DENISSE CARPENA COITINHO. **Fissuras em estruturas de concreto armado. Análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, 1998, 199p. Dissertação (mestrado). Escola de engenharia da universidade federal do rio grande do Sul.

reparadas⁴. El cuerpo de ingenieros de la U.S. ARMY (Fuerzas Armadas de los Estados Unidos) llegó a una conclusión similar cuando clasificó la alta tasa de vicios en reparos como inaceptable, siendo la fisuración la principal causa de estas fallas⁵.

En los Estados Unidos, la importancia de los materiales de reparo es evidenciada con el hecho de que el mercado de estos productos haber tenido una tasa de crecimiento entre 30% y 50% mayor que el mercado de nuevas construcciones, en el período comprendido entre 1980 y 2000, lo que ha causado una avalancha de nuevos productos, dificultando la selección y potencializando la ocurrencia de problemas⁶.

Los altos costos asociados a las intervenciones correctivas no dejan de ser un factor que justifique este tipo de estudio⁷, hecho ya apuntado en la década del 80 por Sitter⁸ que mostró los altos costos envueltos en esas intervenciones en estructuras de concreto.

Según el NRC-IRC (Institute for Research in Construction – National Research Council of Canada), los costos debidos al envejecimiento de la infra-estructuras de los Estados Unidos y de Canadá son altos de tal forma que pueden afectar la eficiencia económico de ambos países, lo que hace necesario el estudio de técnicas de rehabilitación que garanticen eficacia, seguridad y economía⁹.

La importancia del estudio de la fisuración debido a la retracción no se limita únicamente al caso de morteros de reparo. Todos los elementos de elevada relación superficie/volumen y todos los elementos pasibles de sufrir la fisuración debida a la retracción pueden resultar beneficiados con este trabajo.

⁴ NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY – NISTIR 6402. **Predicting the performance of concrete repair materials**. Summary of Workshop, Reported by VAYSBURD, AM; CARINO, NJ; BISSONETTE, B. April 1999, Durham, New Hampshire. 46p.

⁵ US ARMY CORPS OF ENGINEERING. **Performance Criteria for Dimensionally Compatible Repair Materials**. By McDONALD, JE; VAYSBURD, AM; POSTON, RW. High Performance Materials and Systems Research Program. Information Bulletin 00-1. 2000.

⁶ MAILVAGANAM, NP. **Repair and protection of concrete structures**. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp 542, 1992.

⁷ HASSAN, KE; ROBERY, PC; AL-ALAWI, L. Effect of hot-dry curing environment on the intrinsic properties of repair materials, **Cement and Concrete Composites**, V. 22, 2000, pp453-458.

⁸ SITTE, WR. Costs for service life optimization. The "Law of fives". In: CEB-RILEM. Durability of concrete structures. Proceedings of the international workshop held in Copenhagen, p. 18-20, Copenhagen, 1984. (Workshop Report by Steen Rostam).

⁹ National Research Council Canadá – Institute for Research in Construction. **Urban Infrastructure Rehabilitation** <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/uir/> accesado el 20 de octubre del 2004.

1.1 Objetivo

El objetivo de este trabajo es el de verificar la influencia de los factores más relevantes en la fisuración por retracción de morteros de reparo. Para tal serán evaluadas algunas propiedades de los morteros de reparo utilizando tres morteros industrializados y una familia de morteros de una misma consistencia dosificada en el laboratorio del CPqDCC de la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo.

Las propiedades medidas serán resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, resistencia a tracción por flexión y retracción libre. Paralelamente serán moldadas probetas en formato de anillos donde será evaluada la retracción restringida de estos morteros. Los morteros que fisuraron, ofrecen pares de puntos (propiedad; edad de fisuración) que servirán para alimentar los modelos escogidos para la cuantificación de la tendencia a la fisuración. Estos modelos serán testados cuando plotados junto con las propiedades analizadas en función del tiempo de todos los morteros, siendo validado cuando el mismo consiga separar los morteros que fisuraron de los que no fisuraron.

El modelo validado hará parte de los parámetros de dosificación presentados en el capítulo 5.2. Esos parámetros, que posibilitan la elección de un mortero que atienda las especificaciones de un dado caso de reparo (como por ejemplo, un f_{ck} mínimo y una determinada absorción de agua máxima), pasarán también a informar el mortero que atienda a las especificaciones exigidas y que tenga la menor tendencia a la fisuración por retracción.

2 EVALUACIÓN DE LA RETRACCIÓN RESTRINGIDA

El interés por métodos de evaluación de la retracción restringida ha crecido mucho en los últimos años, principalmente debido a estos permitir la evaluación directa del potencial de fisuración de un material¹⁰.

Probetas en formato de barras han sido ampliamente utilizadas con suceso por varios investigadores. Infelizmente, el alto costo asociado a estas es un factor limitante de su uso. También ha sido reportada la dificultad de alcanzar una restricción adecuada, como ocurre frecuentemente en ensayos de determinación de resistencia a reacción directa. Con todo,

¹⁰ WEISS, WJ. **Prediction of Early-Age Shrinkage Cracking in Concrete**. Evanston, Illinois, 1999. Tese (doutorado). Northwestern University.

este tipo de ensayo permite obtener información sobre la retracción, la fluencia y todavía, la tensión sufrida por el material, en el grado de restricción deseado.

Igarashi et al¹¹ utilizaron esta configuración de ensayo en la evaluación de la tendencia a fisuración debido a la retracción autógena de mezclas de concreto de alta resistencia*. En la **Error! Reference source not found.** se presenta una parcela de los resultados de estos autores. En este estudio, el ensayo de retracción restringida era interrumpido en el momento en que la carga responsable por la restricción de la probeta era igual a 80% de la capacidad de la célula de carga utilizada (en este caso, 5000 N).

También han sido usadas probetas en formato de placas restringidas lateralmente y por la base, en este caso contabilizándose el diámetro medio de la abertura de las fisuras y del área total de fisuras, en una determinada edad. Tienen la ventaja de presentar formato parecido con el de las piezas normalmente encontradas en servicio; como desventaja no se consigue siempre una restricción adecuada en los bordes.

Hace más de 50 años, las probetas en forma de anillo han sido usadas con suceso. El anillo interno restringe la deformación del material, pudiendo causar la fisuración. Antiguamente, el espesor del anillo interno era grande de tal forma, que la restricción proporcionada por el anillo a la probeta era prácticamente total. Hoy día, se persigue el uso de anillos de espesores reducidos ($\approx 12,5$ mm) lo que permite la deformación del anillo metálico. Esta información adicional proporciona una salida cuantitativa de la retracción restringida (deformación sufrida por el anillo interna), y no una salida apenas cualitativa (edad del apareamiento de la fisura y abertura de la fisura).

¹¹ IGARASHI, S; BENTUR, A; KOVLER, K. Autogenous shrinkage and induced restraining stresses in high-strength concretes, **Cement and Concrete Research**, V30, 2000, pp 1701-1707.

* Una crítica a este trabajo, es el uso de contenido de aditivo superplastificante muy distintos. En los concretos de relación agua/aglomerante de 0.33, el contenido de aditivo fue igual a 1.5%. Ya en el caso de los concretos de relación agua/aglomerante de 0.25, el contenido de aditivo empleado fue de 5%.

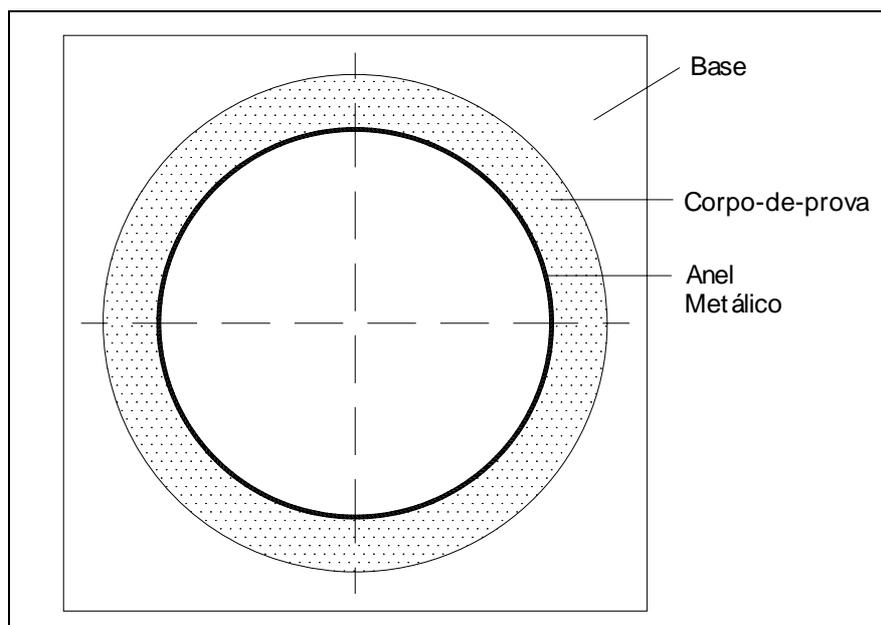


Figura 1 – Probeta utilizada para evaluación de la fisuración. Las dimensiones de esta probeta han sido muy distintas desde los primeros usos de este ensayo por Carlson y Coutinho* hasta la actualidad.

Grochoski et al¹² utilizaron este ensayo para evaluar la influencia de distintos tipos de adiciones en morteros de una misma matriz, ($a/c=0,45$) y proporción cemento arena (1:2,5) en la fisuración. Fueron usados dos resinas poliméricas acrílicas (AR1 y AR2), látex de estireno-butadieno (SBR), fibra de polipropileno de bajo módulo (Fibra) y éter de polipropileno glicol (EPG). El mortero modificado con EPG mostró un desempeño muy superior debido a la baja retracción del mismo. La modificación con SBR propició el peor desempeño de los morteros, probablemente debido a la retracción ligeramente mayor y a una relación resistencia a tracción/módulo de elasticidad menor. En la Figura 2 pueden ser apreciados algunos de los resultados de este trabajo.

* Algunas personas atribuyen la creación del ensayo a Coutinho, investigador portugués autor del trabajo titulado: "The influence of the type of cement on its cracking tendency" en una publicación de la RILEM en el año de 1958. Carlson utilizó el ensayo desde el año de 1939, y en 1940 publicó el trabajo: "Attempts to measure the cracking tendency of concrete" en el ACI Journal.

¹² GROCHOSKI, M; GRULLON, M; HELENE, P; TULA, L. ¿Pueden los agentes reductores de retracción actuar en morteros de alta resistencia?. In: 15^{ava} Reunión Técnica – Seminario de Hormigones Especiales. Santa Fe, Argentina, 2003.

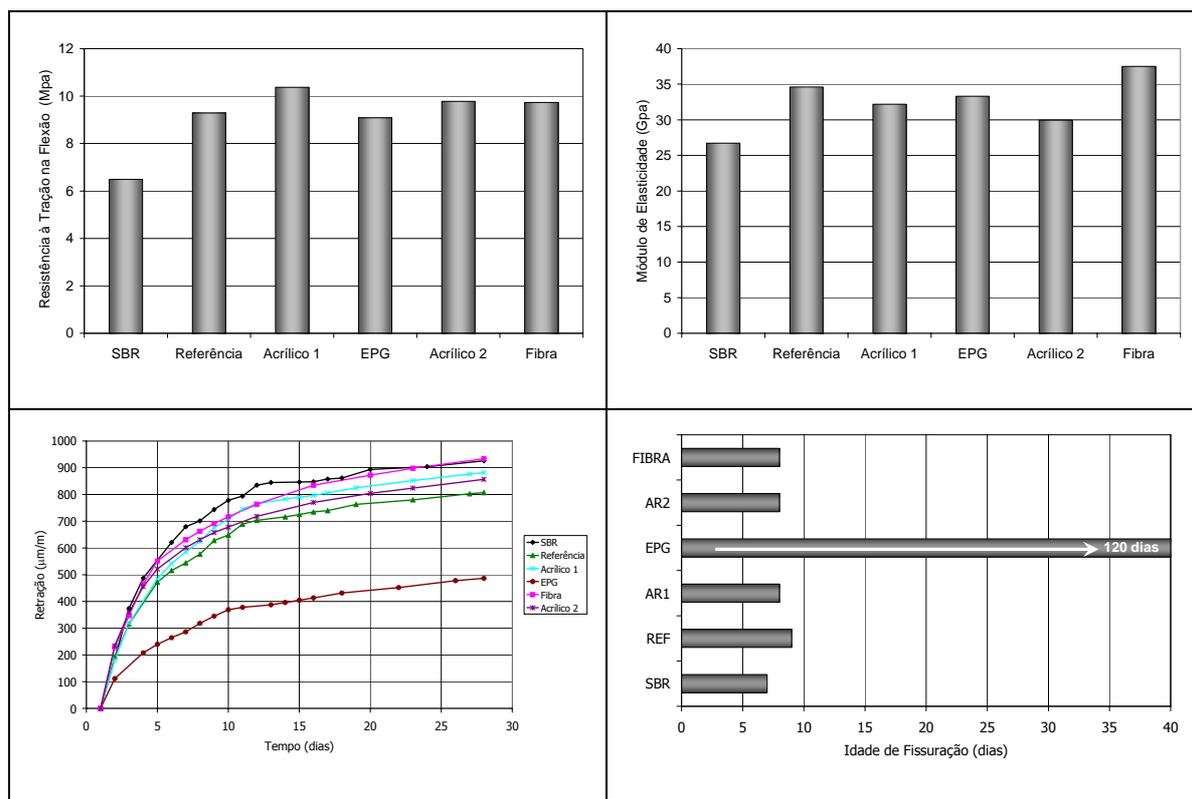


Figura 2 – Resistencia a tracción por flexión y módulo de elasticidad a los 28 días, retracción libre y edad de fisuración de seis morteros de mismas proporciones de mezcla modificados con distintos materiales (Grochoski et al, 2003).

Recientemente este método de ensayo ha sido utilizado con algunas modificaciones y embasamiento matemático que permite estimar el esfuerzo actuante en la probeta¹³. En la Figura 3 se presentan algunos de los resultados de estos investigadores, evaluando la deformación sufrida por tres anillos de espesores diferentes (3,1mm, 9,5mm, 19mm), y dos morteros. Puede apreciarse que mientras menor es el espesor del anillo, mayor será la deformación del mismo, y por tanto menor será el grado de restricción, lo que se traduce en tensiones menores. Las mezclas fueron preparadas con cemento Pórtland tipo I y una misma proporción cemento:arena.

¹³ HOSSAIN, AB; WEISS, J. Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens, **Cement and Concrete Composites**, V26, n. 6, 2004, pp531-540.

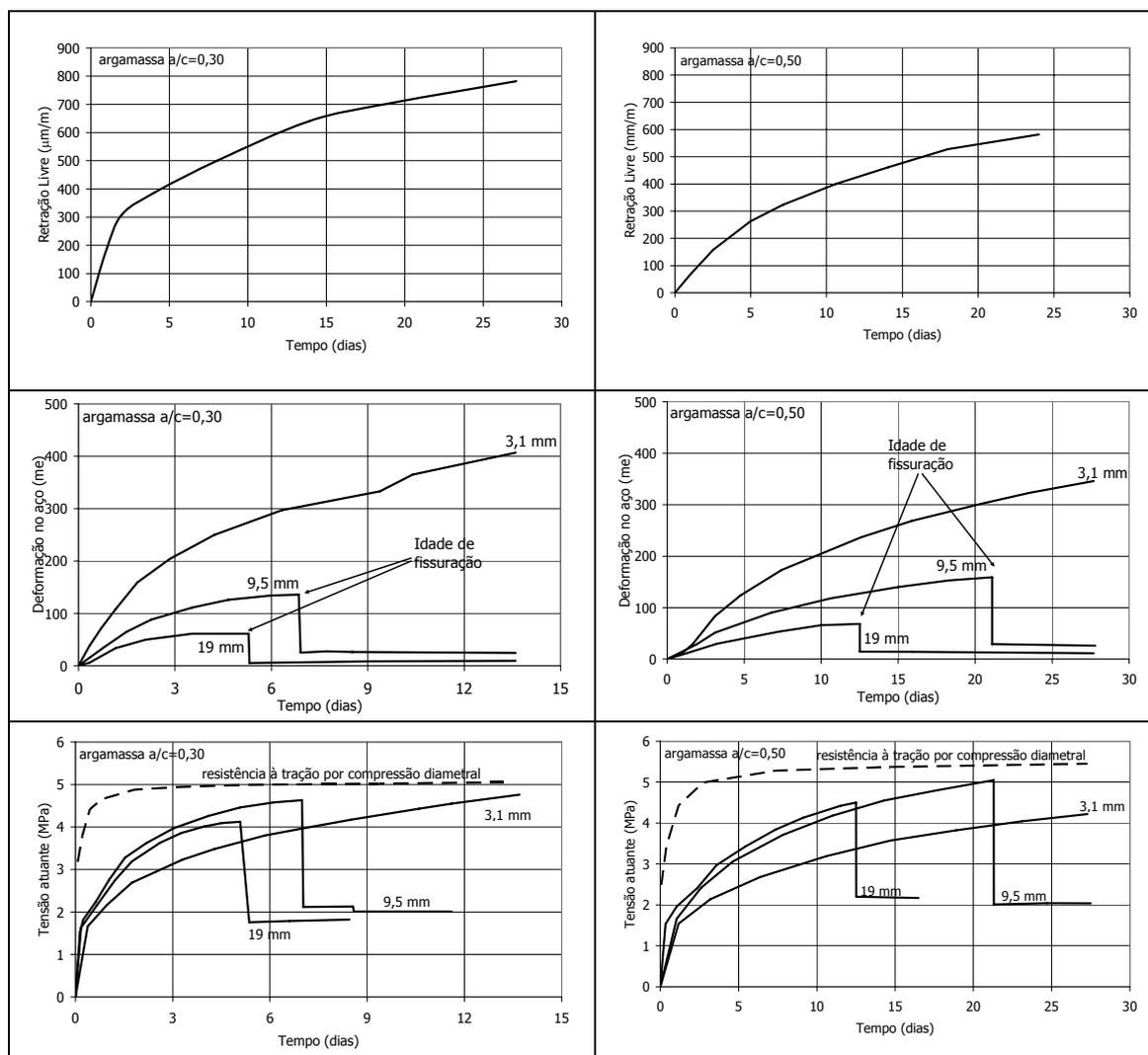


Figura 3 – Resultados obtenidos por Hossain y Weiss en ensayos de retracción restringida por el método del anillo (Hossain y Weiss).

Es interesante notar que el mortero de relación $a/c=0,30$ experimentó una mayor retracción y propensión a fisuración, además de una menor resistencia a tracción por compresión diametral que el mortero de relación $a/c=0,50$. Otra crítica a este trabajo es el hecho de haber sido utilizado en el mortero de $a/c=0,30$, 3% de superplastificante en relación a la masa del cemento, lo que puede haber creado diferencias significativas entre las dos mezclas.

Bajo un proceso de carga continuo, la fluencia y el acúmulo de daños puede promover el apareamiento de fisuras en un nivel menor al de la resistencia a tracción. Un valor de relación tensión actuante/tensión resistente de 0,8 es típicamente encontrado en concretos y morteros. Debido a este motivo, el factor reductor de resistencia de 0,8 puede ser aplicado en un análisis de la fisuración por retracción basado en conceptos únicamente de resistencia [Error! Bookmark not defined.](#). Esta afirmación es corroborada por los resultados de

Hossain e Weiss, que muestran que la fisuración siempre ocurre en un nivel menor al de la resistencia del material, y que la medida en que la edad de fisuración y el espesor del anillo aumentan, esta diferencia se torna todavía mayor.

El ensayo del anillo ha sido realizado en probetas de dimensiones muy diferentes, lo que dificulta la comparación directa entre los resultados disponibles en la literatura., En este sentido, la implementación del proyecto de norma de la AASHTO¹⁴ (American Association of State Highway and Transportation Officials) debe contribuir en pro del consenso del medio científico y técnico mundial. Este proyecto de norma preconiza el uso de extensómetros para la evaluación de la deformación sufrida por el anillo interno metálico. En la **Error! Not a valid bookmark self-reference.** es presentado un levantamiento de distintas dimensiones de esta probeta que han sido utilizadas a través de los años.

Tabela 1 – Levantamiento de distintas dimensiones utilizadas en el ensayo del anillo para evaluación de la tendencia a fisuración de concretos y morteros.

Investigadores	Diámetro Interno (mm)	Espesor de la probeta (mm)	Altura	Espesor del anillo	Característica adicional
Carlson y Reading, 1940	125	34	-	-	-
Coutinho, 1958	405 125	80 25	-	-	-
AASHTO, 2000	300	75	150	12,0	Anillo no queda adherido a la base metálica
Poston et al, 2001	254	32	102	25,4	Anillo queda adherido a la base metálica
Grochoski et al, 2003	300	40	70	3,1	Anillo queda adherido a la base metálica
Hossain e Weiss, 2004	300	150	75	3,1 9,5 19,0	Anillo no queda adherido a la base metálica
Grullon, 2004	300	40	70	3,1	Anillo queda adherido a la base metálica

¹⁴ AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Standard Practice for Estimating the Crack Tendency of Concrete. AASHTO Designation PP-34-89, pp. 179-182.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

Para alcanzar el objetivo propuesto, se escogió estudiar una familia de morteros dosados en el laboratorio, todos con una misma consistencia en el estado fresco, y por tanto, posibles de que sean usados para un mismo fin.

Fueron también evaluados tres morteros industrializados, de misma consistencia y destinados al mismo uso. Se buscó reunir un conjunto de informaciones que posibilite explicar de que forma las propiedades mecánicas de estos morteros y su retracción influyen en el potencial o tendencia a fisuración.

En este capítulo son presentadas las variables envueltas en el trabajo, los materiales empleados, los métodos de ensayo utilizados y los resultados brutos obtenidos.

3.2 Variables del estudio

3.2.1 Parámetros fijados:

- Contenido de aditivo superplastificante: Fue utilizado un contenido constante y óptimo en relación al peso del cemento, el cual fue pré-determinado a través del grado de saturación;
- Contenido de polímero: Fue utilizado un copolímero acrílico-estireno en una cantidad constante en relación al peso del cemento. El contenido usado fue escogido con la ayuda de un programa experimental preliminar que se encuentra en la tesis de maestría de este autor;
- Cura: Después del moldado, las probetas fueron cubiertas con un plástico y llevadas a un cuarto climatizado con $UR \geq 95\%$ y $23 \pm 2^\circ\text{C}$ (cámara húmeda) hasta completadas las 24 horas de edad. Después de este tiempo, estas probetas fueron llevadas a un cuarto climatizado con $UR 50 \pm 4\%$ y $23 \pm 2^\circ\text{C}$ (cámara seca), donde fueron mantenidos hasta las edades de ensayo. Este tipo de cura fue escogido debido a representar una condición comúnmente encontrada en la práctica, además de permitir que los ensayos de retracción restringida fuesen realizados en un intervalo de tiempo menor;
- Cemento CPV ARI PLUS: Escogido por tener una rápida evolución de las propiedades mecánicas;
- Arena: Fue escogida una arena de origen natural fluvial, comúnmente empleada en la confección de concretos y morteros en el estado de São Paulo.
- Mezclador: Fue usado el mismo mezclador de mortero, de capacidad nominal de 20 litros. Este mezclador cumple con los requisitos de la norma ASTM C109/C109M-99¹⁵;
- Consistencia: El intervalo de consistencia fijado, medido por el diámetro de abertura fue fijado en 200 ± 15 mm.

¹⁵ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2 in [50mm] cube specimens). ASTM C109/C109M-99. Philadelphia, USA, 1999.

3.2.2 Variables independientes.

- Morteros Industrializados – tres morteros de fabricantes y formulaciones distintas, todos de un mismo intervalo de consistencia;
- Morteros Dosados en el Laboratorio – Familia de morteros de misma consistencia e igual a la de los morteros industrializados, con proporciones cemento:arena en peso iguales a 1:1,0; 1:1,5, 1:2,2 e 1:3,0;
- Edad – Fueron adoptadas las edades de 1, 3, 7, 14, 28 y 63 como referencia para la medición de las variables dependientes.

3.2.3 Variables dependientes

- Resistencia a tracción por flexión;
- Módulo de elasticidad;
- Retracción libre;
- Retracción restringida por el método del anillo;

3.2.4 Variables intervinientes.

- Peso específico;
- Contenido de aire aprisionado;
- Humedad relativa del ambiente;
- Temperatura.

La descripción de los materiales y métodos de ensayo utilizados puede ser encontrada en la disertación de maestría de este autor.

4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Modelaje de la tendencia a la fisuración

Para evaluar la tendencia a fisuración de los morteros estudiados con base en las variables medidas, se buscó modelar las propiedades de los morteros que figuraron en relación al tiempo.

Para que un modelo sea considerado como adecuado, cuando colocado junto a las curvas de todos los morteros, el mismo debe conseguir separar los morteros que fisuraron de los que no fisuraron en el ensayo de retracción restringida. O sea, el modelo debe propiciar un resultado similar al presentado en la Tabela 2:

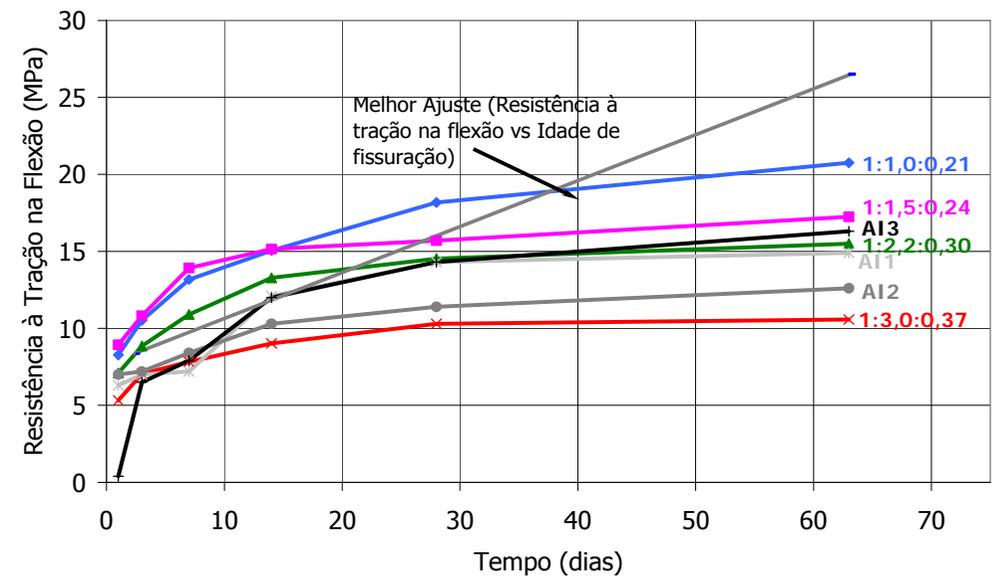
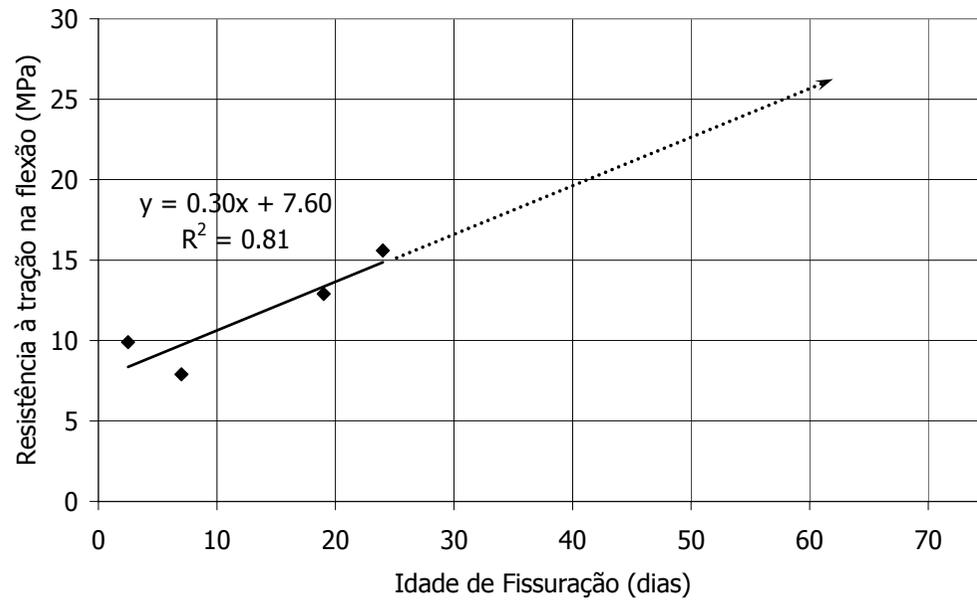
Tabela 2 – Comparación del resultado de los morteros que fisuraron según el modelo empleado con los morteros que figuraron en el programa experimental.

Modelo	Morteros que fisuraron según el ajuste utilizado	Morteros que fisuraron en el programa experimental
X	AI1 – AI3 – 1:1,0 – 1:1,5	AI1 – AI3 – 1:1,0 – 1:1,5

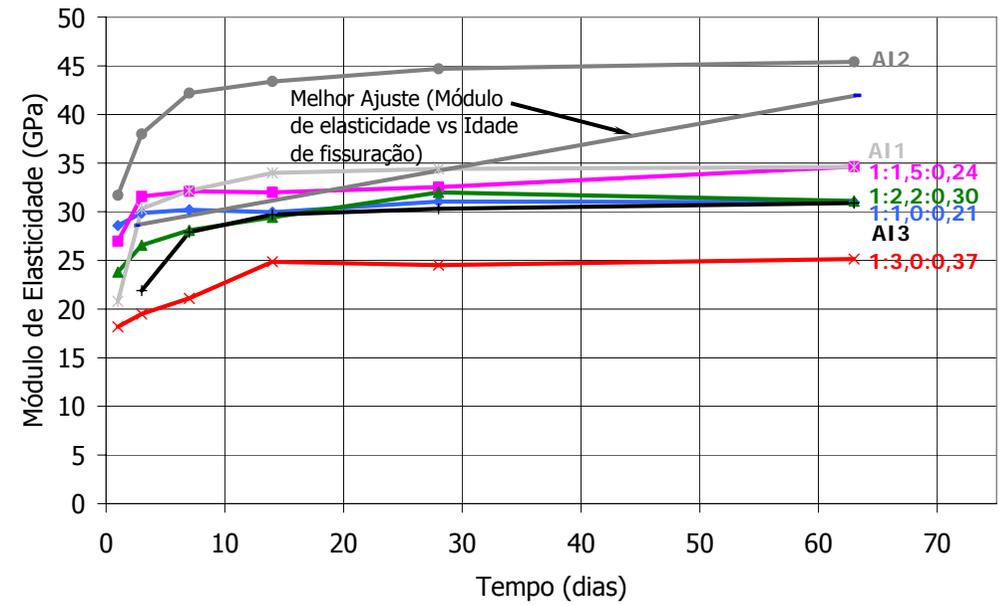
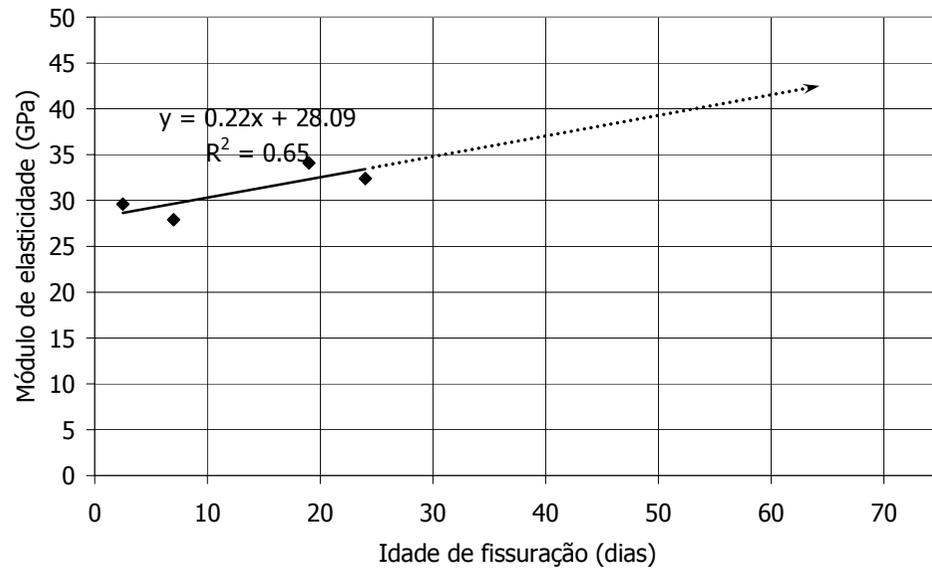
Los modelos que fueron empleados en el análisis fueron:

- f_t vs tiempo: cual es la resistencia a tracción por flexión del mortero en la ocasión de la fisura;
- E_c vs tiempo: cual es el módulo de elasticidad del mortero en la ocasión de la fisuración;
- f_t/E_c vs tiempo: cual es el valor de la relación f_t/E_c del mortero en la ocasión de la fisuración;
- ε vs tiempo: cual es la retracción libre del material en la ocasión de la fisuración;
- $\varepsilon - f_t/E_c$ vs tiempo: cual es la diferencia entre la deformación asociada a la retracción libre y la deformabilidad máxima calculada por la relación f_t/E_c en la ocasión de la fisuración.

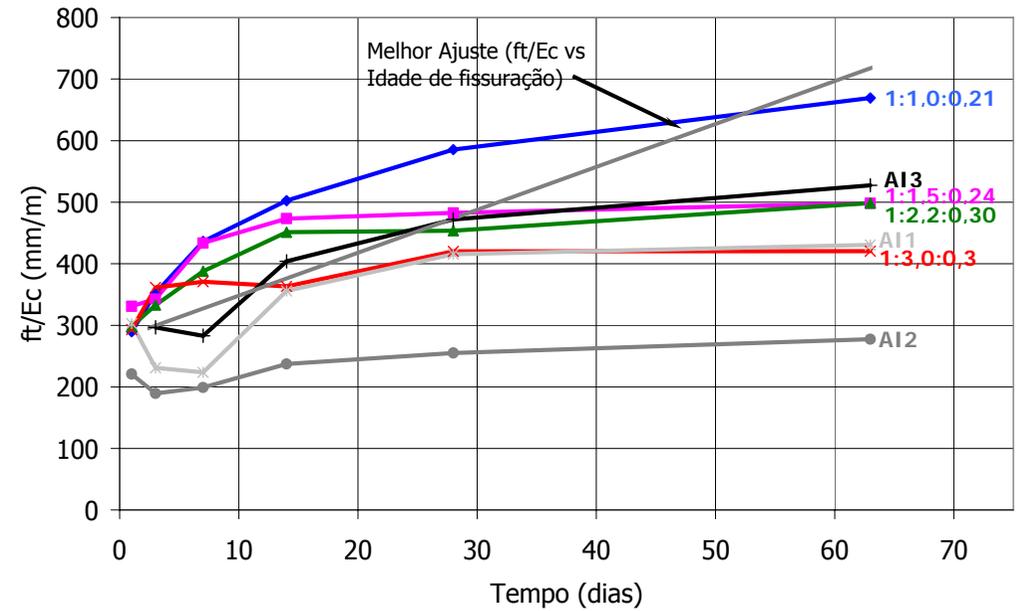
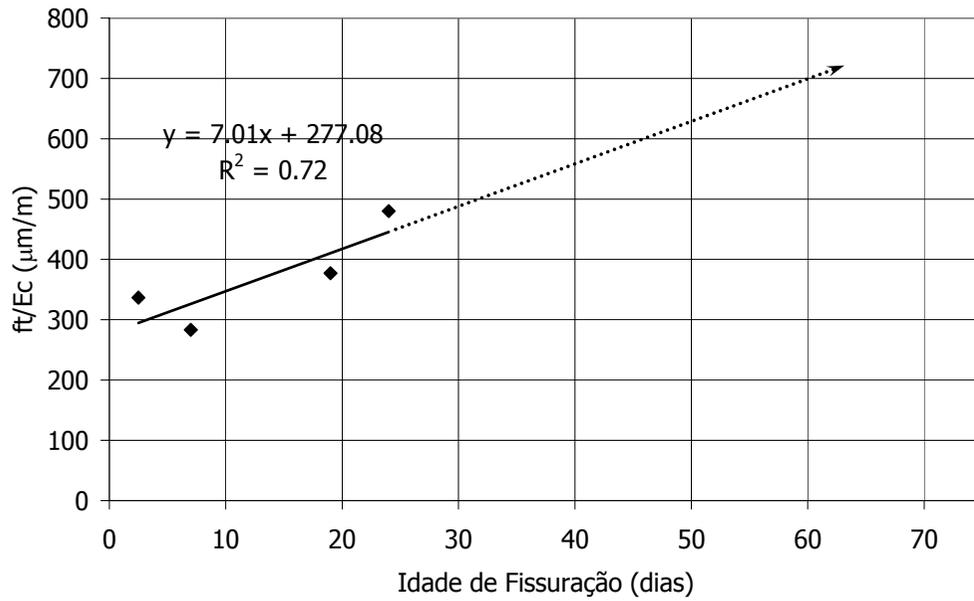
Las figuras siguientes muestran el resultado ofrecido por cada uno de los modelos utilizados. Luego de ser presentados, serán discutidos de forma individual.



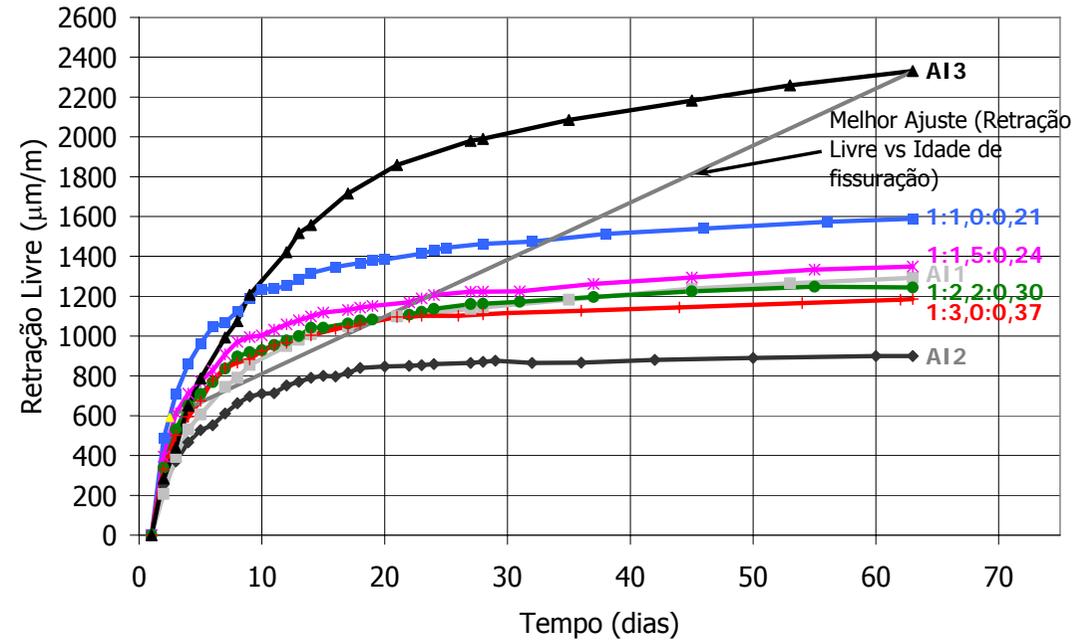
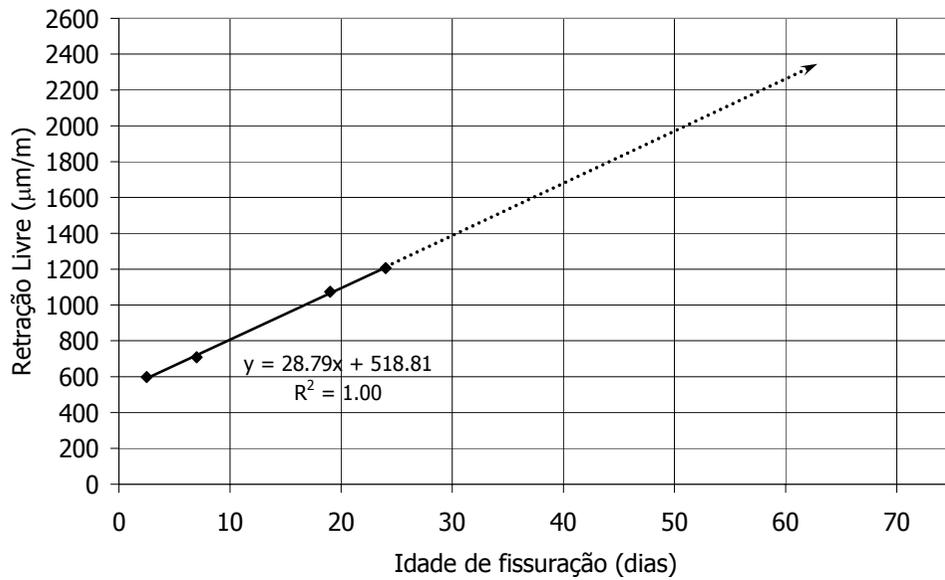
Modelo	Morteros que fissuraram según el ajuste utilizado	Morteros que fisuraron en el programa experimental
f_t vs tempo	AI1 – AI2 – AI3 – 1:1,0 1:1,5 – 1:2,2 – 1:3,0	AI1 – AI3 – 1:1,0 – 1:1,5



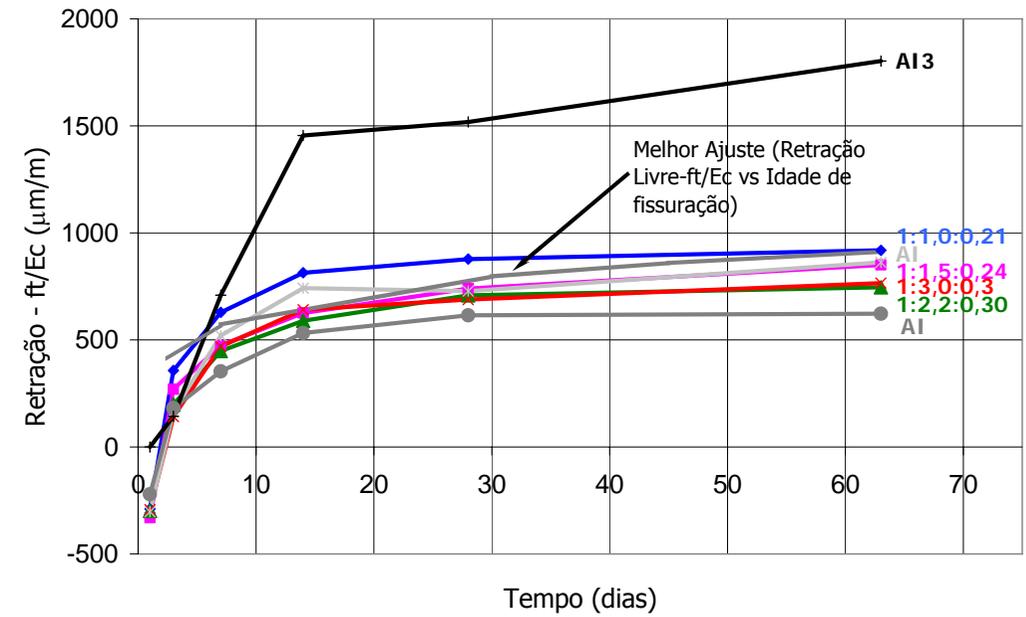
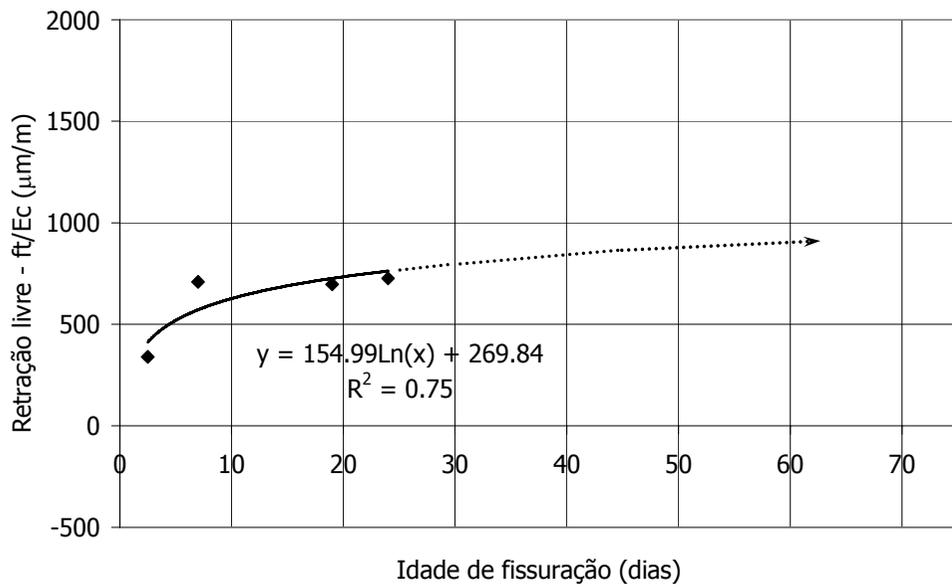
Modelo	Morteros que fissuraram según el ajuste utilizado	Morteros que fissuraron en el programa experimental
E_c vs tempo	AI1 – AI2 – 1:1,0 – 1:1,5	AI1 – AI3 – 1:1,0 – 1:1,5



Modelo	Morteros que fissuraram según el ajuste utilizado	Morteros que fisuraron en el programa experimental
f_t/E_c vs tempo	AI1 – AI2 – AI3 – 1:1,0 1:1,5 – 1:2,2 – 1:3,0	AI1 – AI3 – 1:1,0 – 1:1,5



Modelo	Morteros que fissuraram según el ajuste utilizado	Morteros que fissuraron en el programa experimental
ϵ vs tempo	AI1 – AI3 – 1:1,0 – 1:1,5 1:2,2 – 1:3,0	AI1 – AI3 – 1:1,0 – 1:1,5



Modelo	Morteros que fissuraram según el ajuste utilizado	Morteros que fisuraron en el programa experimental
$\varepsilon - f_t/E_c$ vs tempo	AI1 - AI3 - 1:1,0 - 1:1,5	AI1 - AI3 - 1:1,0 - 1:1,5

De los modelos utilizados para el análisis, únicamente aquel que consideró la retracción libre, resistencia a tracción por flexión y el módulo de elasticidad de forma conjunta consiguió distinguir los morteros que figuraron de los que no fisuraron.

Los modelos obtenidos a partir de las otras propiedades (f_t , E_c , f_t/E_c , ε), aunque hayan presentado coeficientes de correlación elevados, no consiguieron prever los resultados obtenidos en el programa experimental, o sea, esos modelos indicaron tanto la fisuración de morteros que no fisuraron como lo contrario. Se cree que hasta cierto punto estos altos coeficientes de correlación estén asociados al hecho de que todas las propiedades medidas (resistencia a tracción por flexión, módulo de elasticidad, retracción libre y resistencia a compresión) sean función (aumentan) con el tiempo.

4.1.1 f_t vs tiempo.

En ese modelo el tipo de ajuste más apropiado fue el lineal, que propició un coeficiente de correlación de 0,81. Según ese modelo, todos los morteros evaluados deberían haber fisurado hasta los 40 días. También, el mortero AI-2 sería uno de los de mayor tendencia a fisuración, aunque haya sido comprobado exactamente lo contrario durante el programa experimental, lo que demuestra la inadecuación del modelo en la previsión de la tendencia a fisuración.

4.1.2 E_c vs tiempo

El coeficiente de correlación obtenido cuando utilizado ese modelo fue de 0,65, o sea, el menor de entre todos los ajustes utilizados. Mientras tanto, consiguió un resultado aparentemente satisfactorio, por haber separado varios de los morteros que fisuraron de los que no fisuraron.

A pesar de eso, la previsión de la tendencia a fisuración a través de ese modelo se juzgo como inapropiada debido a que según el mismo, el mortero de mayor tendencia a fisuración de entre los evaluados sería uno de los morteros que no fisuró en la pesquisa.

4.1.3 f_t/E_c vs tiempo

El coeficiente de correlación del ajuste lineal hecho para ese modelo fue de 0,72. Según el mismo, los morteros AI-1 y AI-2 son los únicos que fisurarían en el período estudiado, o sea, hasta los 63 días de edad. La inadecuación de ese modelo queda demostrada con el hecho del mismo haber acusado la mayor resistencia a fisuración al mortero de proporción 1:1,0, o

sea, al mortero que fisuró con apenas 2,5 días de edad, y todavía la mayor propensión a fisuración al mortero AI-2, o sea, uno de los que no fisuró en la investigación.

4.1.4 ε vs tiempo

El ajuste más apropiado fue el linear, que ofreció el elevado coeficiente de correlación de 1,00. Ese modelo consiguió acusar la fisuración de todos los morteros que efectivamente fallaron. El problema consiste en que apenas indicó que el mejor de los morteros en relación a la retracción (AI-2) no fisuraría, pudiendo así ser considerado como un modelo muy a favor de la seguridad, que puede ser usado cuando se quiera realizar un estudio más simplificado, considerando apenas una variable que influya en la fisuración.

4.1.5 $\varepsilon - f_t/E_c$ vs tiempo

El ajuste más adecuado a ese modelo fue el logarítmico, el cual propició un coeficiente de correlación de 0,75. Ese modelo fue el único que consiguió separar los morteros que fisuraron de los que no fisuraron.

Teóricamente, la diferencia entre la deformación debido a la retracción y la deformación estimada mediante la relación f_t/E_c debería ser igual a cero en la edad de fisuración de cada uno de los morteros. Se cree que la gran diferencia encontrada entre la deformación por retracción y la deformación estimada a través de la relación f_t/E_c sea principalmente función de haber sido medido el módulo de elasticidad a compresión, de que la diferencia en la retracción entre las probetas utilizadas para la determinación de la retracción libre y las probetas usadas para la determinación de la retracción restringida (fisuración), de distintas relaciones volumen/superficie, y todavía, por el efecto de la fluencia.

Según ese modelo, la fisuración debida a la retracción no acontece de forma linear, o sea, la deformación residual que el material puede resistir aumenta con el tiempo. Esto parece concordar con los resultados obtenidos por Hossain y Weiss, quienes muestran que la relación entre la tensión resistente y la actuante en la edad de fisuración fue mayor en las probetas sometidas a un mayor grado de restricción.

Asumiendo que el ensayo de retracción restringida empleado corresponde a una determinada condición de restricción, posiblemente encontrada en la práctica, el mismo puede ayudar a mostrar la influencia de la cura en la fisuración. Morteros que presentaron curvas de $\varepsilon - f_t/E_c$, muy próximas a la del modelo encontrado, pueden dejar de fisurar con un simple aumento en el tiempo de cura. Como ejemplo, se puede citar el mortero de

proporciones 1:1,5:0,24, presentado en la Figura 4, para edades de cura variando entre 1 y 3 días, donde el aumento del período de cura puede evitar la fisuración del material.

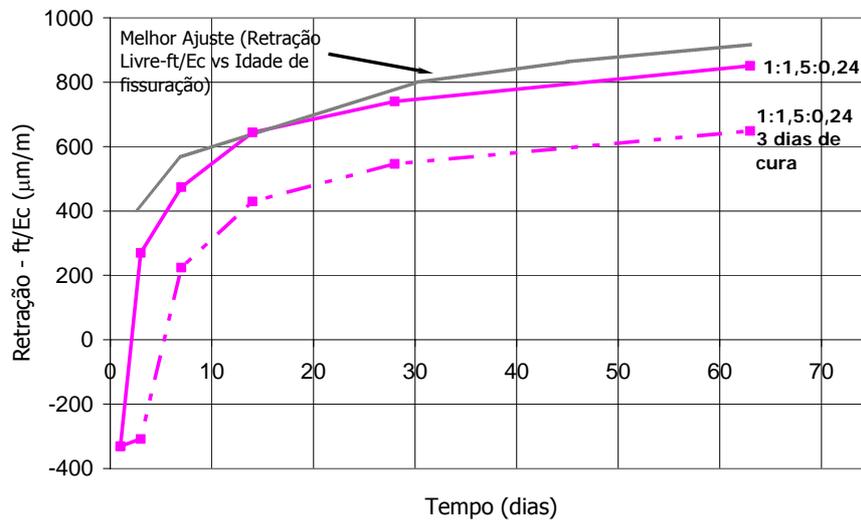


Figura 4 – Efecto del aumento del tiempo de cura en morteros cuya curva de $\varepsilon - f_t/E_c$ se encuentran próximas a la del modelo encontrado.

4.2 Parámetros de dosificación de los morteros de reparo preparados en el laboratorio buscando la disminución de la tendencia a fisuración

Los morteros de reparo deben alcanzar propiedades mecánicas estructurales (resistencia a compresión, módulo de elasticidad) o de durabilidad (absorción de agua, permeabilidad). Un estudio detallado de este tipo permitiría, a partir de exigencias mínimas establecidas para el mortero, la elección de la proporción de mezcla que presente la menor tendencia a fisuración.

El modelo considerado como adecuado para la previsión de la tendencia a fisuración, o sea, el modelo $\varepsilon - f_t/E_c$ fue presentado en un diagrama de dosificación. En la Tabla 3 están presentadas todas las ecuaciones utilizadas para la elaboración del diagrama de dosificación.

Tabla 3 – Ecuaciones empleadas en la ejecución de los diagramas de dosificación.

Propiedades	Ley de Comportamiento	Ecuación	Coefficientes
-------------	-----------------------	----------	---------------

M x a/c	Ley de Lyse	$m = k_1 + k_2 \cdot a / c$	K ₁ y k ₂
C _{cemento} x m	Ley de Molinari	$C_{cemento} = \frac{1000}{k_3 + k_4 \cdot m}$	K ₃ y k ₄
$\epsilon_j - \frac{f_{ij}}{E_{cj}} \times \frac{a}{c}$	Mejor ajuste*	$\epsilon_j - \frac{f_{ij}}{E_{cj}} = k_{5j} \cdot a/c^2 + k_{6j} \cdot a/c + k_{7j}$	k _{5j} , k _{6j} y k _{7j}

*Ecuación que ofrece el mejor coeficiente de correlación ajustada por el programa de análisis de datos.

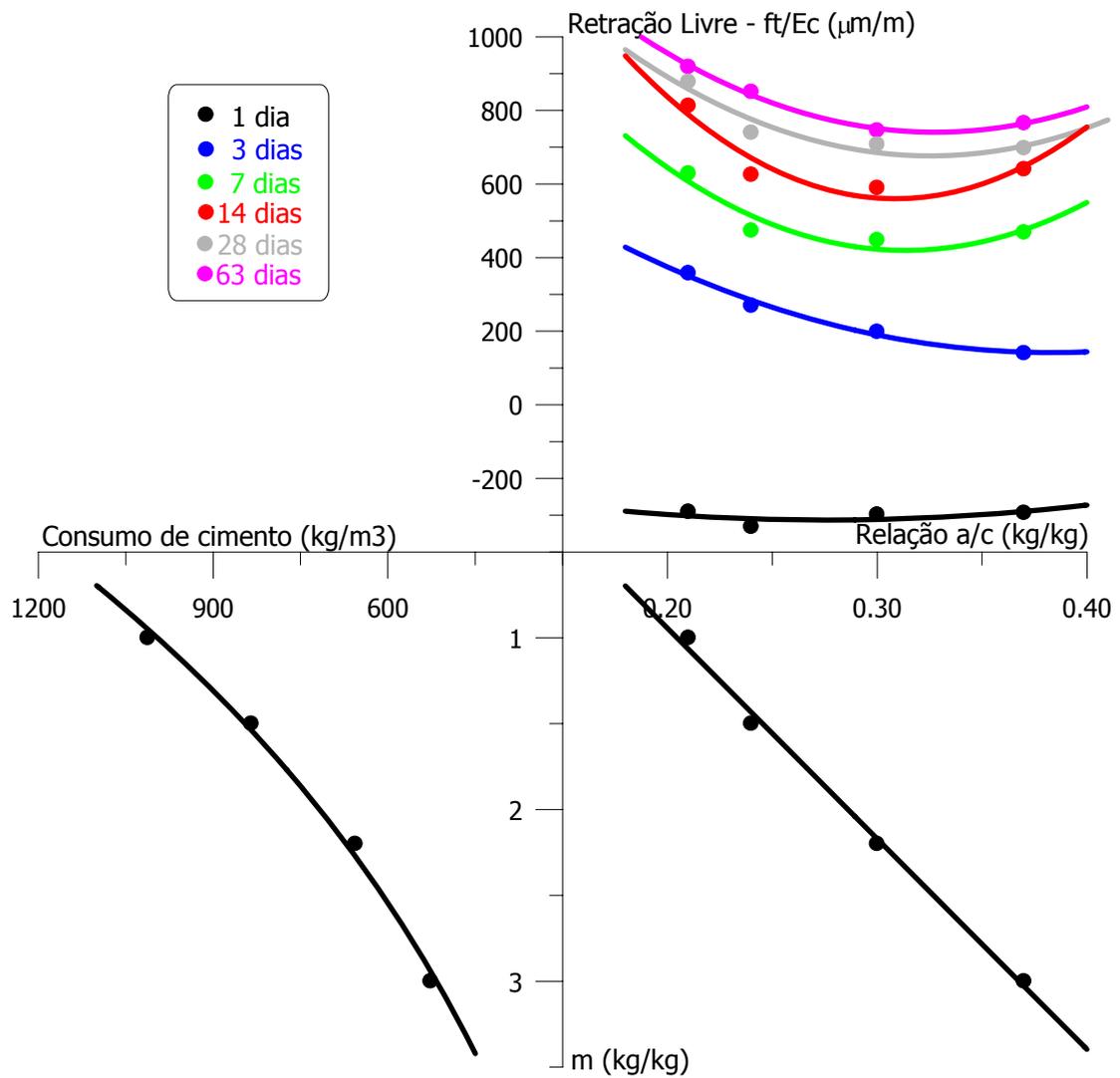


Figura 5 – Diagrama de dosificación para la expresión retracción libre menos la relación ft/Ec.

5 CONSIDERACIONES FINALES

- El único modelo que consiguió acusar la fisuración de los morteros que realmente fisuraron en el ensayo de retracción restringida fue el modelo $\varepsilon_j - ft_j/E_{cj}$, que considera todas las variables influyentes en la fisuración medidas en el programa experimental.
- Para un estudio más simplificado puede ser utilizado el modelo que considera apenas la retracción libre, pues se trata de un modelo que acusó la fisuración de todos los morteros que efectivamente fisuraron y de dos más, intermedios entre los que fisuraron y el que es significativamente mejor de entre los que no fisuraron.
- El modelo considerado como más adecuado en este estudio también consigue mostrar que para morteros con curvas muy próximas a las del modelo, o sea, con una moderada tendencia a fisuración, los mismos pueden dejar de fisurar con un simple aumento del tiempo de cura.
- Para morteros de una misma consistencia se puede decir que existe una mezcla que presenta la menor tendencia a fisuración, pudiendo esa propiedad contribuir en estudios más amplios y profundos sobre el comportamiento de morteros de reparo.
- Cuando determinadas las exigencias mecánicas mínimas que debe alcanzar un mortero de reparo en una aplicación determinada, un estudio de este tipo permite la elección del mortero de menor tendencia a fisuración.
- Para morteros con tendencia a fisuración elevada apenas en las primeras edades, el camino para minimizarla es disminuir la retracción libre de esos morteros, en la medida en que la relación f_t/E_c prácticamente no varía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MEHTA, PK. Durability – Critical issues for the future, **Concrete International**, V19, no 7, pp 27-33, 1997.
2. NISTIR 6519. **Effect of drying-shrinkage cracks and flexural cracks on concrete bulk permeability**. National Institute of Standards and Technology, Technology Administration, US Department of Commerce. Kenneth Snyder, 39p, Maio 2000.
3. DAL MOLIN, DENISSE CARPENA COITINHO. Fissuras em estruturas de concreto armado. Análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998, 199p. Dissertação (mestrado). Escola de engenharia da universidade federal do rio grande do Sul.
4. NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY – NISTIR 6402. **Predicting the performance of concrete repair materials**. Summary of Workshop, Reported by VAYSBURD, AM; CARINO, NJ; BISSONETTE, B. April 1999, Durham, New Hampshire. 46p.
5. US ARMY CORPS OF ENGINEERING. **Performance Criteria for Dimensionally Compatible Repair Materials**. By McDONALD, JE; VAYSBURD, AM; POSTON, RW. High Performance Materials and Systems Research Program. Information Bulletin 00-1. 2000.
6. MAILVAGANAM, NP. **Repair and protection of concrete structures**. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp 542, 1992.
7. HASSAN, KE; ROBERY, PC; AL-ALAWI, L. Effect of hot-dry curing environment on the intrinsic properties of repair materials, **Cement and Concrete Composites**, V. 22, 2000, pp453-458.
8. SITTER, WR. Costs for service life optimization. The “Law of fives”. In: CEB-RILEM. Durability of concrete structures. Proceedings of the international workshop held in Copenhagen, p. 18-20, Copenhagen, 1984. (Workshop Report by Steen Rostam).
9. National Research Council Canadá – Institute for Research in Construction. **Urban Infrastructure Rehabilitation** <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/uir/> acessado no 20 de outubro de 2004.

10. WEISS, WJ. **Prediction of Early-Age Shrinkage Cracking in Concrete**. Evanston, Illinois, 1999. Tese (doutorado). Northwestern University.
11. IGARASHI, S; BENTUR, A; KOVLER, K. Autogenous shrinkage and induced restraining stresses in high-strength concretes, **Cement and Concrete Research**, V30, 2000, pp 1701-1707.
12. GROCHOSKI, M; GRULLON, M; HELENE, P; TULA, L. ¿Pueden los agentes reductores de retracción actuar en morteros de alta resistencia?. In: 15^{ava} Reunión Técnica – Seminario de Hormigones Especiales. Santa Fe, Argentina, 2003.
13. HOSSAIN, AB; WEISS, J. Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens, **Cement and Concrete Composites**, V26, n. 6, 2004, pp531-540.
14. ALTOBAUT, SA; LANGE, DA. **Early age stresses and creep-shrinkage interaction of restrained concrete**. Technical report of research supported by the Federal Aviation Administration. Department of Civil Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign. March, 2001. 234pp.
15. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Standard Practice for Estimating the Crack Tendency of Concrete. AASHTO Designation PP-34-89, pp. 179-182.