UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
Departamento de Engenharia de Construção Civil

MANUEL RAMÓN GRULLÓN PEÑA

ESTUDIO DE LA FISURACIÓN ASOCIADA A LA RETRACCIÓN EN MORTEROS PARA REPARO EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Traducción de la Versión Original en Portugués de la Disertación presentada a la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo para obtención del título de Maestro en Ingeniería

São Paulo
2004

MANUEL RAMÓN GRULLÓN PEÑA

ESTUDIO DE LA FISURACIÓN ASOCIADA A LA RETRACCIÓN EN MORTEROS PARA REPARO EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Disertación presentada a la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo para obtención del título de Maestro en Ingeniería

Área de actuación:
Ingeniería de Construcción Civil y Urbana

Orientador:
Prof. Dr. Paulo Helene

São Paulo
2004

Este ejemplar fue revisado y alterado en relación a la versión original, bajo responsabilidad única del autor y con la anuencia de su orientador.

São Paulo, 16 de Diciembre de 2004

_____

Autor

_____

Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Grullón Peña, Manuel Ramón

Estudo da fissuração associada à retracción em argamassas para reparo em estructuras de concreto / Manuel Ramón Grullón Peña. – São Paulo, 2004.

107p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Ingeniería de Construção Civil.

1. Fissuración 2. Retracción 3. Mortero de reparo 4. Recuperación de estructuras I. Universidad de São Paulo. Escuela Politécnica. Departamento de Ingeniería de Construcción Civil. II.t

Dedico este trabajo a mis padres, Manolo y Fanny, a mis hermanas Carol y Gaby, y a mi abuela Pianza. Gracias por todo. Todo lo que soy se lo debo a ustedes.

"De aquí a algunos años estarás más arrepentido por las cosas que no hiciste que por las cosas que hiciste. Entonces sueltas tus amarras. Aléjate del puerto seguro. Agarra el viento en tus velas. Explora. Sueña. Descubre".

Mark Twain*

* Mark Twain (1835 – 1910). Escritor, periodista y humorista americano que conquistó público a nivel mundial con sus divertidas historias juveniles.

AGRADECIMENTOS

Son muchas las personas que directa o indirectamente contribuyeron para que yo pueda concluir otro capítulo de mi historia. Con toda seguridad no me podré recordar de todas, pero de cualquier forma en este primer párrafo quedan registradas mis muchas gracias.

Agradezco a mi orientador, Prof. Paulo Helene. Su capacidad de trabajo, responsabilidad y competencia son ejemplares. Es mucho más fácil la ejecución de un trabajo de este tipo estando a su lado.

Agradezco a la Prof. Silvia Selmo y al Dr. Leonel Tula por sus observaciones y críticas que contribuyeron significativamente en el desarrollo de este trabajo. Todavía, a este último le agradezco la oportunidad de haber trabajado como pasante bajo su orientación en la industria.

Mis agradecimientos a los profesores de las disciplinas cursadas, Milton Vargas, Antônio Figueiredo, Vahan Agopyan, Maria Alba Cincotto, Selmo Kuperman, Maria Helena Santos Taqueda y Vanderley John. A todos los funcionarios del departamento y del CPqDCC, mis amigos, Fátima, Engrácia, Renata, Reginaldo, Dorval, Seu João, Mário e Adílson, por la ayuda, paciencia y principalmente por el compañerismo.

A FAPESP, por el soporte financiero.

Agradezco también a lãs empresas Holcim, Denver, MBT, Sika, Agradezco también a las empresas Holcim, Denver, MBT, Sika, Basf y Grace Brasil por la donación de los materiales usados en la investigación. A la ABCP por la ejecución de los análisis químico y físico del cemento usado.

Agradezco también a todos mis amigos de la pos-graduación, Evandro Bastos, Clovis Nita, Charles Lacerda, Eliana Monteiro, Priscila Carrijo, Maria Fernanda Pereira, Tiago Ern, Marcos Mitre, Carine Hartmann, Rui Barbosa, Juarez-mestre-dos-churrascos, Artemária, Gerusinha, a las Tatianas Cervo y Tuchiya, y a Yoakim. Agradezco especialmente a la amiga Lucianinha, por la dulzura y los cangrejos!, a mis amigos pernambucanos Ângelo, Aluízio y Flávio, por todo lo que compartimos en Sampa, Recife y Floripa. A la Dra. Leontina por haber cuidado hasta de mis dolores de barriga, y por ser esa persona linda y maravillosa.

Algunas personas son ciertamente merecedoras de un destaque especial. Mauricio, por toda la ayuda, amistad y viajes que hicimos juntos en este período. Muchas gracias! A Marcelinho (Dominique también), por la amistad especialísima que hicimos en estos años, me haras mucha falta! A Rita y Patricinha, que fueron y continuarán siendo realmente maravillosas. Las adoro a ustedes y a nuestra amistad. A Maria Augusta por las lindas atenciones y a Mariana por los momentos! Al amigo Humberto Benini, una persona realmente maravillosa. A mis ahijados, Paulo e Ivie. A ustedes tengo muchas cosas por las que agradecer, realmente ni siquiera puedo destacar algo en este corto espacio después de tantos detalles y momentos. Sólo puedo decir que los amo de corazón!

Agradezco también a todos mis amigos que formaron parte de esta experiencia en este país maravilloso, Miguel Paúl, Al Peña, Javier y Reynaldo, Silvia, Pumpy y Tito, Kersten, Joelle Marie e Serginho, José Amílcar y Sandra.

Finalmente, agradezco al Brasil por haberme acogido de la forma en que lo hizo, y por todo el aprendizaje, especialmente aquel que aprendí fuera de la Ciudad Universitaria. En estas últimas líneas, queda registrado mi eterno agradecimiento al pueblo brasileño.

GRULLON P, M. R. Estudio de la fisuración asociada a la retracción en morteros para reparo en estructuras de concreto. São Paulo, 2004. Dissertación (Maestría) – Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo.

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 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 ε_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.

GRULLON P, M. R. A study on shrinkage related cracking on mortars for the repair of concrete structures. São Paulo, 2004. Dissertation (M.Sc.) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

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 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 ε_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.

SUMÁRIO

1 INTRODUCCIÓN 1

1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTANCIA 1
1.2 OBJETIVO 5
1.3 INVESTIGACIONES EN EL ÁREA 6
1.4 ORGANIZACIÓN Y CONTENIDO 10

2 MORTEROS DE REPARO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO 11

2.1 MATERIALES CONSTITUYENTES 13
2.1.1 Cemento 13
2.1.2 Arena 13
2.1.3 Aditivos plastificantes 14
2.1.4 Aditivos retenedores de agua 14
2.1.5 Polímeros 15
2.1.6 Fibras de polipropileno 18
2.2 REPARO TRADICIONAL DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO 18
2.2.1 Metodología de ejecución 19

3 FISURACIÓN POR RETRACCIÓN EN MORTEROS DE REPARO 29

3.1 VARIABLES INFLUYENTES EN LA FISURACIÓN POR RETRACCIÓN DE MORTEROS DE REPARO 29
3.1.1 Resistencia a tracción 29
3.1.2 Retracción 30
3.1.3 Módulo de Elasticidad 31
3.1.4 Fluencia 31
3.1.5 Otras Fisuras en Reparos Localizados 36
3.1.6 Requisitos y criterios para morteros de reparo presentes en la literatura 36
3.1.7 Normalización 39
3.2 EVALUACIÓN DE LA RETRACCIÓN RESTRINGIDA 41

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL 50

4.1 INTRODUCCIÓN 50
4.2 VARIABLES DEL ESTUDIO 50
4.2.1 Parámetros fijos: 50
4.2.2 Variables independientes. 51
4.2.3 Varibles dependientes 51
4.2.4 Variables intervenientes. 51
4.3 MATERIALES EMPLEADOS 52
4.3.1 Cemento 52
4.3.2 Arena 53
4.3.3 Aditivo superplastificante 53
4.3.4 Polímero 55
4.3.5 Morteros industrializados 56
4.4 DOSIFICACIÓN DE LOS MORTEROS PREPARADOS EN EL LABORATORIO 56
4.5 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN 57
4.5.1 Consistencia 57
4.5.2 Resistencia a Compresión 58
4.6 ENSAYOS RELACIONADOS A LA FISSURACIÓN 60
4.6.1 Resistencia a Tracción por Flexión 60
4.6.2 Módulo de Elasticidad 61
4.6.3 Retracción Libre 62
4.6.4 Retracción Restringida 64

5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS **66**

5.1 MODELAJE DE LA TENDENCIA A FISURACIÓN 66

5.1.1 f_t vs tiempo. *72*

5.1.2 E_c vs tiempo *72*

5.1.3 f_t/E_c vs tiempo *73*

5.1.4 ε vs tiempo *73*

5.1.5 $\varepsilon - f_t/E_c$ vs tiempo *73*

5.2 PARÁMETROS DE DOSIFICACIÓN DE LOS MORTEROS PREPARADOS EN EL LABORATORIO BUSCANDO LA DISMINUCIÓN DE LA TENDÊNCIA A FISURACIÓN 74

6 CONSIDERACIONES FINALES **83**

6.1 CONCLUSIONES SOBRE LOS MODELOS UTILIZADOS PARA LA PREVISIÓN DE LA PROPENSIÓN A FISURACIÓN 83

6.2 CONCLUSIONES SOBRE LA DOSIFICACIÓN DE MORTEROS DE REPARO BUSCANDO LA REDUCCIÓN DE LA TENDENCIA A FISURACIÓN 83

6.3 TRANSFERENCIA AL MEDIO 84

6.4 SUGESTIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS 84

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS **85**

ANEXO A **96**

ANEXO B **104**

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CONSISTENCIA IDEAL PARA MORTEROS DE REPARO. AL APRETAR UNA CIERTA CANTIDAD DE MORTERO EN LA MANO, EL MISMO NO FLUYE HACIA AFUERA. 13
FIGURA 2 – EFECTO DE LA CANTIDAD DE ANTIESPUMANTE EN LA CONSISTENCIA DE LOS MORTEROS. NOTAR LA DIFERENCIA EN LA ABERTURA DE LOS DOS MORTEROS. 16
FIGURA 3 – INFLUENCIA DEL TIPO DE CURA EN LA RESISTENCIA A TRACCIÓN POR FLEXIÓN DE MORTEROS MODIFICADOS CON VARIOS TIPOS Y CANTIDADES DE POLÍMERO (OHAMA, 1998)[36]. 17
FIGURA 4 – INFLUENCIA DEL TIPO DE CURA EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CONCRETOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS (OHAMA, 1998)[ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.]. 18
FIGURA 5 – RETRACCIÓN LIBRE DE UNA PARTE DE LOS MORTEROS INDUSTRIALIZADOS PARA REPARO DISPONIBLES EN SÃO PAULO. (MEDEIROS, 2002)[11]. 19
FIGURA 6 – RESISTENCIA A TRACCIÓN POR FLEXIÓN Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE UNA PARCELA DE LOS MORTEROS INDUSTRIALIZADOS DEL MERCADO DE LA CIUDAD DE SÃO PAULO EVALUADOS SEGÚN LA NORMA EN196-1/90. (MEDEIROS, 2002)[11]. 20
FIGURA 7 – DELIMITACIÓN INCORRECTA. LAS DISCONTINUIDADES CAUSAN ACUMULACIÓN DE TENSIONES. 21
FIGURA 8 – RESULTADO ESTÉTICAMENTE DESAGRADABLE EN UNA FACHADA DEBIDO A UNA DEMARCACIÓN INAPROPIADA. 21
FIGURA 9 – ILUSTRACIÓN DE COMO DEBE SER HECHA LA DEMARCACIÓN PARA OPTIMIZAR EL DESEMPEÑO DEL REPARO HECHO CON MORTERO. 22
FIGURA 10 – POSIBLE OCURRENCIA DE VACÍOS FORMADOS POR DETRÁS DE LAS ARMADURAS. 27
FIGURA 11 – REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL REPARO CONSIDERADO (SADOUKI Y VAN MIER, 1997)[58]. 28
FIGURA 12 – ENSAYO DE FLUENCIA CON CARGA CONSTANTE DE 14,5 MPA A LOS 28 Y 90 DÍAS (MEHTA Y MONTEIRO, 1994)[65]. 31
FIGURA 13 – INFLUENCIA DE LA RETRACCIÓN Y DE LA FLUENCIA EN LA FISURACIÓN DE MATERIALES A BASE DE CEMENTO PORTLAND (ADAPTADO DE MEHTA Y MONTEIRO, 1994)[65]. 32
FIGURA 14 - PARCELA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR BISSONNETTE Y PIGEON[66]. 33
FIGURA 15 - PARCELA DE RESULTADOS DE IGARASHI ET AL, (IGARASHI ET AL, 2000)[78]. 42
FIGURA 16 – 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. 43
FIGURA 17 – 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)[79]. 44
FIGURA 18 – RESULTADOS OBTENIDOS POR HOSSAIN Y WEISS EN ENSAYOS DE RETRACCIÓN RESTRINGIDA POR EL MÉTODO DEL ANILLO (HOSSAIN Y WEISS)[80]. 45
FIGURA 19 – CURVA TÍPICA DE LA DEFORMACIÓN EN EL ANILLO EN LOS ENSAYOS DE RETRACCIÓN RESTRINGIDA DE MOKAREM[81]. LAS LÍENAS INTERMITENTES REPRESENTAN EL INTERVALO DE CONFIANZA DE LA MEDIA PARA 95% DE SIGNIFICÂNCIA. 46
FIGURA 20 – MÉTODO DE ENSAYO UTILIZADO POR EL MINISTERIO DE TRANSPORTES DE ALEMANIA PARA EVALUACIÓN DE LA FISURACIÓN. 48
FIGURA 21 – PLACA DE ENSAYO SPS PARA EVALUACIÓN DE LA RETRACCIÓN RESTRINGIDA. 49
FIGURA 22 – COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA ARENA UTILIZADA EN LOS MORTEROS PREPARADOS EN EL LABORATORIO. 53
FIGURA 23 – EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE MINI-ABATIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL GRADO DE SATURACIÓN DEL ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE. 54
FIGURA 24 –DIÂMETRO DE ABERTURA DE LA PASTA DE CEMENTO CON VARIOS CONTENIDOS DE ADITIVO. 55
FIGURA 25 – DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA DE LOS MORTEROS A TRAVÉS DEL USO DE LA MESA DE CONSISTENCIA. 57
FIGURA 26 – RESULTADOS DA CONSISTENCIA DE LOS MORTEROS ESTUDIADOS MEDIDOS EN LA MESA DE FLUIDEZ ("FLOW TABLE"). 58

FIGURA 27 – ILUSTRACIÓN DE LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y RUPTURA CARACTERÍSTICA. 59
FIGURA 28 – EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS MORTEROS EVALUADOS. 59
FIGURA 29 – ESQUEMA DE ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN POR FLEXIÓN MEDIANTE EL USO DE TRES APOYOS. 60
FIGURA 30 – EVOLUCIÓN DE LA RESISTÊNCIA A TRACCIÓN POR FLEXIÓN DE LOS MORTEROS ESTUDIADOS. 61
FIGURA 31 – CICLO DE CARGA UTILIZADO EN LA EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD. 61
FIGURA 32 – EVOLUCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS MORTEROS EVALUDOS EN LA INVESTIGACIÓN. .. 62
FIGURA 33 – EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE RETRACCIÓN LIBRE. 63
FIGURA 34 – RETRACCIÓN LIBRE DE LOS MORTEROS EVALUADOS. 63
FIGURA 35 – DIMENSIONES DE LOS ANILLOS DEL ENSAYO DE RETRACCIÓN RESTRINGIDA. 64
FIGURA 36 – DETALLE DEL MOLDE DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DEL FILME DE TEFLON. 64
FIGURA 37 – MORTEROS QUE FISURARON EN EL ENSAYO DE RETRACCIÓN RESTRINGIDA EN EL DECORRER DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN. 65
FIGURA 38 – APLICACIÓN DEL MODELO DE LA RESISTENCIA A TRACCIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE LA FISURACIÓN DE LOS MORTEROS ESTUDIADOS. 67
FIGURA 39 – APLICACIÓN DEL MODELO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA LA EVALUACIÓN DE LA FISURACIÓN DE LOS MORTEROS ESTUDIADOS. 68
FIGURA 40 - APLICACIÓN DEL MODELO DE LA RELACIÓN RESISTENCIA A TRACCIÓN POR MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA LA EVALUACIÓN DE LA FISURACIÓN DE LOS MORTEROS ESTUDIADOS. 69
FIGURA 41 – APLICACIÓN DEL MODELO DE LA RETRACCIÓN LIBRE PARA LA EVALUACIÓN DE LA FISURACIÓN DE LOS MORTEROS ESTUDIADOS. 70
FIGURA 42 – APLICACIÓN DEL MODELO DE LA EXPRESIÓN RETRACCIÓN LIBRE MENOS LA RELACIÓN RESISTENCIA A TRACCIÓN POR MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA LA EVALUACIÓN DE LA FISURACIÓN DE LOS MORTEROS ESTUDIADOS. 71
FIGURA 43 – 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. 74
FIGURA 44 – DIAGRAMA DE DOSIFICACIÓN PARA RESISTENCIA A COMPRESIÓN. 76
FIGURA 45 – DIAGRAMA DE DOSIFICACIÓN PARA RESISTENCIA A TRACCIÓN POR FLEXIÓN. 77
FIGURA 46 – DIAGRAMA DE DOSIFICACIÓN PARA EL MÓDULO DE ELASTICIDAD. 78
FIGURA 47 – DIAGRAMA DE DOSIFICACIÓN PARA LA RELACIÓN FT/EC. 79
FIGURA 48 – DIAGRAMA DE DOSIFICACIÓN PARA LA RETRACCIÓN LIBRE DE LA FAMILIA DE MORTEROS ESTUDIADAS. 80
FIGURA 49 – DIAGRAMA DE DOSIFICACIÓN PARA LA EXPRESIÓN RETRACCIÓN LIBRE MENOS FT/EC. 81
FIGURA 50 – ABSORCIÓN DE AGUA DE LOS MORTEROS MOLDADOS DURANTE LA PRIMERA FASE. 97
FIGURA 51 – RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LOS MORTEROS MODIFICADOS CON POLÍMERO MOLDADOS DURANTE LA PRIMERA FASE Y ENSAYADOS EN ENSAYO REALIZADO SEGÚN LA NORMA ASTM C349-97. 98
FIGURA 52 – RESISTENCIA A TRACCIÓN POR FLEXIÓN MEDIA DE LOS MORTEROS MODIFICADOS CON POLÍMERO MOLDADOS DURANTE LA PRIMERA FASE Y ENSAYADAS SEGÚN LA NORMA ASTM C348-97. 99
FIGURA 53 – CURVAS CARGA VS DESLOCAMIENTO DE TODAS LAS PROBETAS COM CONTENIDO DE POLÍMERO DE 8% Y RELACIÓN A/C=0,30. 99
FIGURA 54 – MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS MORTEROS. 100
FIGURA 55 – ABSORCIÓN MEDIA DE LOS MORTEROS MOLDADOS DURANTE LA SEGUNDA FASE. 101
FIGURA 56 – RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LOS MORTEROS CON POLÍMERO MOLDADOS DURANTE LA SEGUNDA FASE Y ENSAYADOS SEGÚNA LA NORMA ASTM C349-97. 101
FIGURA 57 – RESISTENCIA A TRACCIÓN POR FLEXIÓN DE LOS MORTEROS CON POLÍMERO MOLDADOS DURANTE LA SEGUNDA FASE Y ENSAYADOS SEGÚN LA NORMA ASTM C348-97. 102
FIGURA 58 – MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS MORTEROS CO POLÍMERO MOLDADOS DURANTE LA SEGUNDA FASE. 103

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 – MEDIDAS ELECTROQUÍMICAS REPRESENTATIVAS DEL DESEMPEÑO DE LOS REPAROS EN TÉRMINOS DE CONTROL DE LA CORROSIÓN (CUSSON Y OTROS, 2004)[49]. 24
TABLA 2 – RESULTADOS OBTENIDOS POR POSTON Y OTROS[8] EN UNA INVESTIGACIÓN ENVOLVIENDO ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO (POSTON ET AL, 2001). 35
TABLA 3 – REQUISITOS GENERALES DE MATERIALES DESTINADOS AL REPARO LOCALIZADO DE ESTRUCTURAS (EMBERSON Y MAYS, 1990)[72]. 37
TABLA 4 – SUMARIO DE LOS REQUISITOS Y CRITERIOS DE DESEMPEÑO SUGERIDOS POR DECTER Y KEELEY. (DECTER Y KEELEY, 1997)[73]. 37
TABLA 5 – REQUISITOS Y CRITERIOS DE DESEMPEÑO SUGERIDOS POR POSTON ET AL (POSTON ET AL, 2001)[8]. 38
TABLA 6 – ALGUNOS DE LOS LÍMITES SUGERIDOS POR MEDEIROS[11] PARA CONTROL Y ESPECIFICACIÓN DE MORTEROS DE REPARO SUPERFICIAL PARA ESTRUCTURAS DE CONCRETO. 38
TABLA 7 – ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE LA HKHA, APUD EMMONS (EMMONS ET AL, 2000)[74]. 39
TABLA 8 – RESUMEN DE REQUISITOS Y CRITERIOS DE DESEMPEÑO PARA MORTEROS APLICADOS A MANO EN LA NORMALIZACIÓN EUROPEA PARA TODOS LOS USOS PREVISTOS (CATARINO ET AL, 2000). 41
TABLA 9 – LEVANTAMIENTO DE DISTINTAS DIMENSIONES UTILIZADAS EN EL ENSAYO DEL ANILLO PARA EVALUACIÓN DE LA TENDENCIA A FISURACIÓN DE CONCRETOS Y MORTEROS. 47
TABLA 10 – CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN. 52
TABLA 11 – CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL CEMENTO UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN. 52
TABLA 12 – CARACTERIZACIÓN DEL POLÍMERO. (SUPLIDA POR EL FABRICANTE) 55
TABLA 13 – CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LOS MORTEROS INDUSTRIALIZADOS UTILIZADOS EN LA PESQUISA. 56
TABLA 14 – CARACTERIZACIÓN DE LA FAMILIA DE MORTEROS ESTUDIADA. 56
TABLA 15 – EDAD DE FISSURACIÓN Y ABERTURA DE FISURA EN EL ENSAYO DE RETRACCIÓN RESTRINGIDA. 65
TABLA 16 – COMPARACIÓN DEL RESULTADO DE LOS MORTEROS QUE FISURARON SEGÚN EL MODELO EMPLEADO CON LOS MORTEROS QUE FIGURARON EN EL PROGRAMA EXPERIMENTAL. 66
TABLA 17 – ECUACIONES EMPLEADAS EN LA EJECUCIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE DOSIFICACIÓN. 75
TABLA 18 – COEFICIENTES PARA OBTENCIÓN DE LOS AJUSTES HECHOS A PARTIR DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA FAMILIA DE MORTEROS ESTUDIADA. 82
TABLA 19 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA VARIABLE RESISTENCIA A TRACCIÓN POR FLEXIÓN PARA 95% DE SIGNIFICANCIA. 98
TABLA 20 – ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA VARIABLE RESISTNCIA A TRACCIÓN POR FLEXIÓN. 102
TABLA 21 – VALORES MEDIOS Y DESVÍOS OBTENIDOS DEL MORTERO DE PROPORCIÓN 1:1,0:0,21. 104
TABLA 22 – VALORES MEDIOS Y DESVÍOS OBTENIDOS DEL MORTERO DE PROPORCIÓN 1:1,5:0,24. 104
TABLA 23 – VALORES MEDIOS Y DESVÍOS OBTENIDOS DEL MORTERO DE PROPORCIÓN 1:2,2:0,30. 105
TABLA 24 – VALORES MEDIOS Y DESVÍOS OBTENIDOS DEL MORTERO DE PROPORCIÓN 1:3,0:0,37. 105
TABLA 25 – VALORES MEDIOS Y DESVÍOS OBTENIDOS DEL MORTERO AI-1. 106
TABLA 26 – VALORES MEDIOS Y DESVÍOS OBTENIDOS DEL MORTERO AI-2. 106
TABLA 27 – VALORES MEDIOS Y DESVÍOS OBTENIDOS DEL MORTERO AI-3. 107

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Justificativa e Importancia

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 el 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 agresivos[1]. La publicación técnica detallada del NIST (National Institute of Standards and Technology), NISTIR 6519[2], 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 importância y que ya fue señalado por Dal Molin[3] es el hecho de que las fisuras afectan el usuario bajo el punto de vista del confort, salubridad y satisfacción psicológica.

---

[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 ingeniería da universidade federal do rio grande do Sul.

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 reparadas[4]. 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 fallas[5].

Reiterando la importancia de la fisuración para el buen desempeño de morteros de reparo, Al-Zahrani et al[6] destacaron la necesidad de conocerse principalmente la resistencia a tracción, la retracción y el módulo de elasticidad de estos materiales.

Según Ibrahim et al[7], considerable esfuerzo del medio técnico y empresarial mundial ha sido aplicado para el desarrollo de técnicas de reparo y de rehabilitación de estructuras deterioradas.

Las dificultades envueltas en la ejecución de reparos localizados con morteros de reparo constituyen un argumento importante para la realización y continuación de investigaciones sobre ese tema.

En el estudio técnico-científico de estos materiales se destacan las siguientes dificultades:

---

[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] AL-ZAHRANI, MM; MASLEHUDDIN, M; AL-DULAIJAN, SU; IBRAHIM, M. Mechanical properties and durability characteristics of polymer and cement-based repair materials. **Cement and Concrete Composites**, V25, 2003, pp 527-533.

[7] IBRAHIM, M.; AL-GAHTANI, AS.; MASLEHUDDIN, M.; ALMUSALLAM, AA. Effectiveness of concrete surface treatment materials in reducing chloride-induced reinforcement corrosion, **Construction and Building Materials**, v. 11, n. 7-8, p. 443-451, 1997.

a) cada una de las diferentes familias de productos existentes en el mercado poseen características muy distintas, lo que dificulta la existencia de un único material representativo;

b) ensayos reales de desempeño requieren reparos representativos expuestos a ambientes normalmente encontrados en servicio durante intervalos de tiempo coherentes con el tiempo de exposición natural; y

c) los materiales de reparo se encuentran en desarrollo continuo, lo que conlleva a que cuando los estudios hayan sido concluidos, muy posiblemente los materiales habrán sufrido cambios importantes[8].

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 problemas[9].

La selección de los productos a ser utilizados en reparos, ha sido regularmente basada en propiedades mecánicas de dudosa coherencia, en lugar de un análisis con criterios adecuados[10].

El mercado nacional posee un elevado número de morteros para reparo, con comportamientos y propiedades muy distintas[11]. Una evaluación crítica de las recomendaciones de reparos y de la selección de materiales para reparo revela limitaciones y contradicciones significativas[12].

---

[8] POSTON, RW; KESNER, K; McDONALD, JE; VAYSBURD, AM; EMMONS, PH. Concrete Repair Material Performance – Laboratory Study, **ACI Materials Journal**. V. 98 No. 2. Mar-Abr 2001.

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

[10] ROBERY, P; SHAW, J. Materials for the repair and protection of concrete. **Construction and Building Materials**. V. 11, no. 5-6, pp. 275-281, 1997.

[11] MEDEIROS, M.H.F. **Estruturas de concreto com corrosão de armaduras por carbonatação: comparação de argamassas de reparo quanto à proteção do aço**. São Paulo, 2002. 193p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica Universidade de São Paulo.

[12] MANGAT, PS.; O'FLAHERTY, FJ. Influence of elastic modulus on stress redistribution and cracking in repair patches. **Cement and Concrete Research**. V. 30, pp 125-136, 2000.

En los Estados Unidos y en Canada esto también representa un problema. Cusson y Mailvaganam afirmaron que la falta de información sobre el desempeño de productos de reparo es uno de los grandes responsables por las fallas en reparos de estructuras de concreto[13].

En Brasil, las iniciativas para la normalización de productos de reparo comenzaron en 1993 por el Comité Brasileño del Cemento, Concreto y Agregados (CB – 18), de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas – ABNT, aunque hasta hoy no ha conseguido grandes avances y no llegó siquiera a la elaboración de un texto base.

De este modo, no existe todavia ningún tipo de normativa nacional que defina o prescriba las características y propiedades a ser atendidas por los morteros de reparo en el país, afectando de esa forma a todos los envueltos en la actividad: productores, los cuales acaban no sabiendo cuales son las propiedades y niveles de desempeño que deben ser alcanzados por su producto, y usuarios, que debido a las contradicciones actuales, pueden acabar haciendo elecciones inapropiadas.

Estos son algunos de los motivos que han impulsado en Europa la creación de las normativas de la serie EN1504, todavía en fase de elaboración. Ese conjunto de normas pretende englobar todas las informaciones principales sobre productos y sistemas para protección y reparo de estructuras de concreto.

Los altos costos asociados a las intervenciones correctivas no dejan de ser un factor que justifique este tipo de estudio[14], hecho ya apuntado en la década del 80 por Sitter[15] 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

---

[13] CUSSON, D; MAILVAGANAM, N. Durability of Concrete Repair Materials, **Concrete International**, V18, no 3, 1996.

[14] 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.

[15] 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).

de ambos países, lo que hace necesario el estudio de técnicas de rehabilitación que garanticen eficacia, seguridad y economía[16].

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.

1.2 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 dosada 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 validadazo cuando el mismo consiga separa los morteros que fisuraron de los que no fisuraron.

El modelo validado hará parte de los parâmetros 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), passarán también a informar el mortero que atienda a las especificaciones exigidas y que tenga la menor tendencia a la fisuración por retracción.

---

[16] 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.

1.3 Investigaciones en el Área

Diversas investigaciones referentes al tema han sido elaboradas en Brasil y en el exterior. A continuación son citadas algunas pesquisas relacionadas al tema.

Silva Jr[17], elaboró una revisión bibliográfica que envolvió mecanismos de degradación del concreto, las características principales de los morteros de reparo, y, una revisión envolviendo el concepto de desempeño.

Medeiros[11] tuvo como foco la caracterización de los principales morteros de reparo industrializados disponibles en el mercado nacional y la verificación de la influencia de polímeros como el EVA y el acrilato en propiedades mecánicas y relacionadas a la durabilidad de estructuras de concreto armado reparadas. Fueron evaluados siete morteros industrializados disponibles en el mercado de São Paulo y seis morteros dosados en el laboratorio por Moreno Jr[18], teniendo como variables el tipo de cemento y el tipo de polímero.

Moreno Jr[18] evaluó la forma en que la naturaleza y proporción de algunos de los constituyentes de los morteros de reparo influencian en la resistencia de adherencia utilizando dos substratos de concreto de resistencias mecánicas distintas en un extenso programa experimental que evaluó tres aditivos superplastificantes, un mismo tipo de cemento de cinco fábricas diferentes, cinco proporciones cemento:arena, dos tipos de polímero en tres proporciones distintas, y tres proporciones de cal hidratada CH-I.

Mitre[19] en su iniciación científica abordó el efecto de ciclos de temperatura y humedad en la adherencia de reparos localizados por medio de cuatro morteros para reparo y diversos tipos de tratamiento superficial en substratos de relaciones a/c distintas.

Dos investigaciones están siendo desarrolladas en la EPUSP que pretenden estudiar el comportamiento electroquímico de morteros y sistemas de reparo; la investigación de

---

[17] SILVA JR., JOSÉ ZACARÍAS RODRÍGUES. **Argamassas para Reparo de Estruturas de Concreto**. São Paulo, 2001, 145p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

[18] MORENO JUNIOR, RAFAEL. **Aderência de argamassas de reparo de estruturas de concreto**. São Paulo, 2002. 202p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica Universidade de São Paulo.

[19] MITRE, MARCOS PEDROSA. **Avaliação da Aderência de Argamassas de Reparo Estrutural Industrializadas e Preparadas em Obra**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Relatório de inciação científica. São Paulo, 2000.

doctorado de Grochoski[20] pretende verificar la eficiencia de varios sistemas de reparo contra la corrosión en una estructura real contaminada con iones cloruro, ya la pesquisa de Bertolo[21] pretende evaluar la protección conferida al acero por los morteros estudiados por Medeiros[11] a través del uso de la espectroscopia de impedancia electroquímica.

Bastos[22] abordo el tema de la retracción y el desarrollo de propiedades mecânicas en morteros mixtos de revestimiento con el objetivo de aproximar el estudio laboratorial con la condición real de aplicación mediante el uso de un equipo capaz de medir la retracción restringida del material en el estado fresco.

En la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Federal de Goiás, fue desarrollada una disertación de maestría en el área[23]. Trató de una evaluación de sistemas de reparo y recuperación para estructuras de concreto sufriendo corrosión de las armaduras, la cual evaluó el comportamiento de un concreto de referencia, un micro-concreto fluido y un mortero con inhibidor de corrosión, con y sin puente de adherencia epóxico frente al ataque de iones cloruro. Los resultados permitieron concluir sobre la inadecuación del concreto de referencia de relación a/c de 0,55 para el reparo de estructuras atacadas por corrosión de armaduras, y de la ineficacia del puente de adherencia de base epóxica, representando este un costo adicional significativo que no presenta mejorías en el desempeño de los reparos.

Cabral[24] estúdio la eficiência de cinco sistemas de reparo frente al combate a la iniciación y propagació de la corrosión del acero por la contaminación de iones cloruro.

---

[20] GROCHOSKI GARCIA, MAURICIO LUIZ. **Avaliação de Comportamento de Sistemas de Reparo para Estruturas de Concreto com Corrosão de Armaduras**. São Paulo, 2002. Plano de Pesquisa de Doutorado Direto FAPESP.

[21] BERTOLO, RENATA SPINELLI. **Reparo de Estruturas de Concreto: Durabilidade quanto à proteção do aço**. São Paulo, 2004, Pré-texto de exame de qualificação.

[22] BASTOS, PEDRO KOPSCHITZ XAVIER. **Retracción e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. Tese (doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002, 172p.

[23] TINÔCO, HÊNIO FERNANDES DA FONSECA. **Avaliação do Desempenho de Sistemas de Reparo e Recuperação para Estruturas de Concreto com Corrosão das Armaduras**. Goiânia, 2001. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás.

[24] CABRAL, ANTÔNIO EDUARDO BEZERRA. **Avaliação da Eficiência de Sistemas de Reparo no Combate à Iniciação e à Propagação da Corrosão do Aço Induzida por Cloretos**. Porto Alegre, 2000. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

En la Universidad Politécnica de Madrid, la tesis de Nepomuceno[25] propone una metodología con base en ensayos electroquímicos para evaluar la capacidad de protección ofrecida por 9 morteros de reparo para estructuras con corrosión de armaduras.

Las investigaciones citadas, a pesar de ser de extrema importancia para la evolución de los criterios de elección de morteros de reparo, no abordaron profundamente una de las propiedades más críticas de desempeño de una intervención por reparo localizado, la fisuración debida a las tensiones generadas por la retracción del mortero de reparo. Es justamente con el sentido de llenar esta laguna que el trabajo aquí propuesto se justifica.

El National Institute of Standards and Technology dos Estados Unidos (NIST) ha organizado dos conferencias tratando el tema del reparo de estructuras. La primera fue realizada en 1995 y verso justamente sobre las pesquisas necesarias para minimizar la fisuración en materiales destinados al reparo de estructuras de concreto. En esa ocasión fueron identificadas las siguientes necesidades para la industria de reparos de concreto:A primeira foi realizada em 1995 e versou justamente das pesquisas necessárias para minimizar a fissuração em materiais destinados ao reparo de estructuras de concreto. Nesta ocasião foram identificadas as seguintes necessidades para a indústria de reparos de concreto:

- La necesidad de ampliar el conocimiento de las causas y propiedades que afectan la fisuración en reparos;
- La necesidad de previsión confiable del desempeño de reparos basados en ensayos de corta duración; y
- La necesidad del desarrollo de modelos matemáticos para la previsión de la vida útilo de los reparos en estructuras de concreto.

El foco de la conferencia del 1999 fue sobre métodos de ensayo y técnicas de modelaje necesarias para prever el desempeño de reparos. Los participantes fueron divididos en tres grupos:

- Grupo 1 – modelaje del desempeño de los materiales;

[25] NEPOMUCENO, ANTÓNIO ALBERTO. **Comportamiento de los Morteros de Reparación Frente a la Carbonatación y a la Penetración de Cloruros en Estructuras de Hormigón Armado Dañadas por Corrosión de Armaduras. Estudio Mediante la Técnica de Resistencia de Polarización**. Madrid, 1992. Tese (doutorado). Universidad Politécnica de Madrid, 223p.

- Grupo 2 – proyecto de reparo, especificación y aplicación; e
- Grupo 3 – materiales y sistemas de reparo

De entre las conclusiones principales de las actividades de estos grupos pueden ser destacadas las siguientes:

- Necesidad del establecimiento de un método de ensayo que sea capaz de evaluar el desempeño en campo de materiales de reparo;
- Creación de grupos de estúdios que busquen tratar los aspectos relacionados al desempeño de materiales de reparo;
- Mejorar la divulgación y la transferência y disponibilidad de información, estableciendo un espacio para la compilación de datos de desempeño de materiales de reparo; y
- Desarrollar directrizes en el uso del "Ring Test" para evaluar la tendência a fisuración de los materiales de reparo.

En Canadá, el Institute for Research in Construction do National Research Council do Canadá (NRC-IRC) ha sido muy activo en el estudio de materiales y ssitemas de reparo. El subprograma de Estructuras de Concreto, dentro del área de pesquisa de Rehabilitación de la Infra-Estructura Urbana tiene como objetivo el desarrollo de métodos para diagnóstico, previsión de desempeño y mantenimiento, de forma que permita una rehabilitación que combine de la mejor forma posible economía y eficacia.

El Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Portugal (LNEC), también se ha interesado en la celebración y apoyo a eventos que tienen como foco el reparo de estructuras, como el 2º Simposio Internacional sobre Patología, Durabilidad y Rehabilitación de Edificios celebrado en el año de 2003, y el Encuentro Nacional sobre Conservación y Rehabilitación de Estructuras (REPAR), celebrado en el año 2000.

En el contexto Ibero-Americano, el trabajo de la Red Rehabilitar se destaca por el intenso trabajo de intercambio y cooperación entre los profesionales más renombrados en el área de inspección, diagnóstico y reparo de estructuras de concreto de 13 países. Las actividades prolíferas de este grupo resultaron en la publicación del "Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón"[26], el cual viene constituyéndose en uno de los principales vehículos técnicos de divulgación del área en toda Ibero-América.

[26] RED REHABILITAR – CYTED. Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón. Reparación, Refuerzo y Protección. Paulo Helene & Fernanda Pereira, editores. São Paulo, 2003, 775p. ISBN 85-903707-1-2.

En América Latina, las actividades de la Asociación Latino-Americana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de las Construcciones (ALCONPAT), que ha organizado desde el año de 1991 y a cada dos años los Congresos de Patología y Control de Calidad de la Construcción (CONPAT), destacando siempre la importancia de la durabilidad de las construcciones nuevas y reparadas.

1.4 Organización y Contenido

El presente trabajo se encuentra dividido de la manera siguiente:

Capítulo 1, que trata sobre la justificativa e importancia del tema, el objetivo de la disertación, las investigaciones relevantes en el área desarrolladas en Brasil y en algunos centros de investigación del mundo, y la organización y contenido del trabajo;

Capítulo 2, trata sobre los aspectos conceptuales del reparo de estructuras y de los morteros de reparo, incluyendo la metodología de ejecución de reparos localizados;

Capítulo 3, que comprende las variables influyentes en la fisuración, los requisitos y critérios de desempeño presentes en la literatura para morteros de reparo y los esfuerzos direccionados hacia la normalización de estos productos. También posee una revisión sobre métodos de ensayo utilizados para la evaluación de la retracción restringida;

Capítulo 4, en el cual es presentado el programa experimental. En éste son descritas las variables envueltas en el trabajo, los materiales utilizados, la metodología utilizada en la investigación y los resultados obtenidos;

Capítulo 5, de análisis y discusión de los resultados del programa experimental;

Capítulo 6, de consideraciones finales de la pesquisa, en el cual se encuentran la conclusiones del trabajo, sugerencias para el proseguimiento de estúdios relacionados al tema y las referencias bibliográficas;

Al final, constan como anexos:

Anexo A, determinación del contenido óptimode polímero.

Anexo B, resultados medios y desvíos de los ensayos realizados en el laboratorio.

2 Morteros de Reparo de Estructuras de Concreto

Las manifestaciones patológicas en las estructuras de concreto se constituyen en señales claras de la necesidad de algún tipo de intervención correctiva para asegurar la vida útil. Pueden ser de varios tipos, siendo que las más comunes son fisuras, flechas excesivas, lixiviación y corrosión de las armaduras.

Para evaluar objetivamente el daño sufrido por una estructura es necesario conocerse el origen, el mecanismo y las causas del problema. Como origen es común adoptar las grandes etapas del ciclo de construcción y la vida de una obra: la Concepción; el Proyecto; los Materiales; la Ejecución y el Uso y Operación. Entre los mecanismos, se puede citar: abrasión excesiva, erosión o cavitación por la acción hidráulica, lixiviación, ataque químico, reacciones químicas propias de los constituyentes del concreto, corrosión del acero, o algún tipo de exposición prolongada a un agente agresivo[27].

La alternativa más adecuada de intervención se escoge en base del diagnóstico, la causa del deterioro, considerando el ambiente en el cual la obra se encuentra, el tipo de elemento que necesita la intervención, la disponibilidad de productos y técnicas de reparo y de la capacidad técnica del equipo de trabajo disponible en el local[28].

Como el foco del presente trabajo es morteros de reparo, únicamente será discutida la técnica que emplea este material, o sea, la de reparo localizado, la cual es utilizada principalmente en el reparo de estructuras con corrosión de armaduras. Otro uso común es en el reparo de cucarachas o deficiencias en el vaciado del concreto.

Las armaduras dentro del concreto armado se encuentran protegidas por dos barreras: una química, compacta y adherente de óxido pasivante, formada por la reacción de iones hierro de las barras de acero con el hidróxido de calcio presente en el concreto[29]; y una física, el recubrimiento de concreto, el cual no sólo sirve como barrera contra los agentes agresivos, pero incluso contra los elementos básicos necesarios para la

---

[27] ACI COMMITTEE 201. "**Guide to Durable Concrete" (ACI 201.2R-01)**. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001, 41pp.

[28] ACI COMMITTEE 222. "**Protection of Metals in Concrete against Corrosion" (ACI 222R-01)**. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001, 41pp.

[29] PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. São Paulo, v. 1, 1ª ed., IPT, 1993.

existencia de la corrosión electroquímica, agua y oxígeno[30]. Esa camada de óxido pasivante garantiza la integridad del acero, siempre que preservado el ambiente alcalino que promueve su estabilidad. El acceso de los agente agresivos que afectan la integridad de esa camada pasivante se da normalmente a través de los poros del concreto. La presencia de fisuras, entonces, se constituye en un camino de fácil acceso para los agentes agresivos.

Las alternativas de intervención para el reparo de estructuras de concreto sufriendo corrosión de armaduras más comúnmente utilizadas son presentadas a continuación:

- no intervenir;
- reparo localizado;
- remoción de todo el concreto contaminado con cloruros o carbonatado;
- sistema de protección catódica;
- extracción electroquímica de cloruros;
- realcalinización;
- uso de inhibidores de corrosión o sistemas de barrera para reducir la cinética del proceso.

Ninguno de los métodos electroquímicos ha sido aplicados en campo en Brasil, hasta la fecha. Por este motivo se hace necesario un mejor entendimiento de la técnica de reparo más comúnmente utilizada.

En la actualidad, encuentranse disponibles una amplia variedad de productos destinados al reparo localizado de concreto, los mismos pueden ser categorizados en tres grupos: morteros de base cemento, morteros de base cemento modificados con polímeros y resinas poliméricas. Estos grupos pueden todavía ser sub-divididos en tipos genéricos de materiales de reparo según Cusson y Mailvaganam[31].

El medio técnico utiliza cada vez más estos morteros industrializados para transferir la responsabilidad del material a las fábricas suplidoras, debido principalmente al hecho de estas exigir dosificaciones muy elaboradas que podrían ser consideradas inviables en las condiciones normalmente encontradas en obra.

---

[30] HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1993.
[31] CUSSON, D; MAILVAGANAM, N. Durability of Repair Materials. **Concrete International**, V18 no 3. March 1996.

Una de las exigencias más importantes para estos morteros es la consistencia en el estado fresco, que debe permitir que sean modelables con la mano. La Figura 1 muestra la consistencia típica de un mortero de reparo.

Figura 1 – Consistencia ideal para morteros de reparo. Al apretar una cierta cantidad de mortero en la mano, el mismo no fluye hacia afuera.

2.1 Materiales Constituyentes

2.1.1 Cemento

El cemento es el aglomerante principal utilizado en los morteros de reparo. El consumo utilizado en estos es mucho mayor al utilizado en la mayoría de las aplicaciones que usan este material, pudiendo incluso sobrepasar la tonelada de cemento por metro cúbico de mortero. Por tanto, resulta muy importante la elección del tipo de cemento que proporcione la mejor resistencia a fisuración.

2.1.2 Arena

La arena tiene un papel muy importante en los morteros de reparo. Cuando comparado con el cemento, se constituye en un material barato de llenado, por tanto tiene una importante función económica[17]. También, es de conocimiento general la gran importância de los agregados en las propiedades finales de concretos y morteros.

La finura y la granulometría de la arena es un parámetro muy importante en la dosificación, como ya verificado por Isa y Helene[32], los cuales obtuvieron reducciones de consumo de cemento del orden de 40% cuando utilizadas granulometrías apropiadas, manteniendo las mismas propiedades mecánicas del mortero.

2.1.3 Aditivos plastificantes

La función principal de estos es la de ocasionar una reducción en la cantidad de agua necesaria de la mezcla para la obtención de una misma trabajabilidad. Estos aditivos son divididos según su poder de reducción de agua en plastificantes y superplastificantes. Los plastificantes convencionales son hechos a base de lignosulfonatos, y son capaces de reducir en hasta 15% del agua de la mezcla para la obtención de una misma trabajabilidad. Ya los superplastificantes son capaces de reducir esta agua en un 30% cuando hechos a base de melamina o naftaleno sulfonatos, y hasta en un 40% cuando producidos a partir de policarboxilatos.

Las propiedades en el estado fresco son generalmente modificados cuando del uso de estos aditivos. Las más importantes son el aumento en la viscosidad que normalmente se traduce en reducción de la segregación, mudanzas en el tiempo de inicio y fin de pega del cemento y la pérdida de consistencia a través del tiempo. Esta última debe ser controlada con el uso de retardadores de pega adecuados[33].

Esta reducción del agua de la mezcla conseguida cuando mantenido un mismo consumo de cemento trae mejorías significativas en prácticamente todas las propiedades físicas y mecánicas de los materiales hechos a base de cemento Portland debido a la reducción de la relación a/c.

2.1.4 Aditivos retenedores de agua

La función de los aditivos retenedores de agua es la de liberar gradualmente el agua interna en estos en la medida en que la humedad de su entorno es reducida,

---

[32] ISA, MM; HELENE, P. **Influência de uma composição de agregados nas propriedades físicas das argamassas de reparo**. 5º Congresso Brasileiro de Cimento, novembro 1999.
[33] ACI COMMITTEE 212. **"Chemical Admixtures for Concrete"** (ACI 212.3R-91). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1999, 31pp.

accionando probablemente de una forma similar a la relatada por Bentur et al[34] cuando del uso de una substitución parcial de agregado grueso con agregados de baja densidad. En el caso de morteros en las que el uso de agregado grueso resulta impracticable, ha sido reportado el uso de aditivos a base de celulosa[35].

2.1.5 Polímeros

La modificación de productos a base de cemento con polímeros no es un concepto nuevo, habiendo sido usado hasta la presente fecha por aproximadamente 80 años. El concepto teórico de la modificación con polímeros consiste en que tanto la hidratación del cemento como la formación de un filme polimérico debido a la coalescencia de las partículas de polímero procedan de modo a generar una matriz monolítica en la cual tanto la fase cemento hidratado como la fase polimérica se entremezclen, y los agregados sean aglomerados en esta combinación de fases[36].

Hoy dia, los polímeros más utilizados para la modificación de matrices de base cemento según el Comité 548 del ACI son[37]:

- copolímeros de estireno butadieno (S-B)
- homopolímeros ester-acrílicos (PAE) y copolímeros, principalmente con estireno (S-A)
- copolímeros de acetato de vinilo (VAC)
- homopolímeros de acetato de vinilo (PVAC)[*]

En el estado fresco la adición de polímero proporciona una mejor trabajabilidad que morteros de referencia. Esto se explica debido a la acción lubrificante de este en la mezcla, a la incorporación de aire, esta debe ser controlada o eliminada con el uso de antiespumantes.

---

[34] BENTUR, A; IGARASHI, S; KOVLER, K. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet-lightweight aggregates, **Cement and Concrete Research**, V31, p1587 – 1591, 2001.

[35] GROCHOSKI, M. **Avaliação do comportamento de aditivos redutores de retracción**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Relatório de inciação científica. São Paulo, 2001. 55pp.

[36] OHAMA, Y. Principle of latex modification and some typical properties of latex-modified mortars and concretes, **ACI Materials Journal**, VXX, no. 6, 1987.

[37] ACI COMMITTEE 548. **"Guide for the Use of Polymers in Concrete"** (ACI 548.1R-97). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1997, 29pp.

[*] Na atualidade tendem ao desuso por apresentarem pouca estabilidade à agua dentro do ambiente alcalino do concreto.

En la Figura 2 se muestra un análisis cualitativo de la importancia del uso de una dosificación adecuada de antiespumante a través de la medida del diámetro de abertura en la mesa de consistencia.

(a) 0,0% de antiespumante, consistencia de 330 mm.

(b) 0,4% de antiespumante, consistencia de 255 mm.

Figura 2 – Efecto de la cantidad de antiespumante en la consistencia de los morteros. Notar la diferencia en la abertura de los dos morteros.

Los morteros modificados con polímero presentan también una gran capacidad de retención de agua. Esto puede ayudar a reducir el riesgo de delaminaciones en reparos localizados debido al secado de la interfaz por la succión del substrato.

La segregación por su vez, es reducida significativamente cuando utilizados estos polímeros. La pega del cemento es generalmente atrasada con aumentos en la relación polímero-cemento.

La modificación de las propiedades físicas y mecánicas cuando del uso de polímeros está bien documentada[36,37,38,39].

Los polímeros evitan la propagación de las fisuras en el compuesto, sirviendo como puente de transferencia de tensiones y también mejorando la interfaz agregado-matriz, consecuentemente pudiendo aumentar significativamente la resistencia a tracción y la energía de fractura.

El módulo de elasticidad de los morteros y concretos modificados con polímeros puede ser significativamente reducido según el tipo y cantidad de polímero utilizado. La retracción libre, por su vez, puede ser ligeramente aumentada[40].

---

[38] OHAMA, Y. Polymer-based admixtures, Cement and Concrete Composites, V20, pp 189-212, 1998.
[39] SCHULZE, J. Influence of water-cement ratio and cement content on the properties of polymer-modified mortars, **Cement and Concrete Research**, V20, 1999.

El coeficiente de expansión térmica puede ser levemente aumentado dependiendo principalmente de la cantidad de polímero utilizada. Sin duda alguna, algunas de las las propiedades afectadas cuando utilizados los polímeros son aquellas relacionadas al transporte de líquidos y gases, hecho por el cual estos han sido una alternativa interesante en el combate a la corrosión en puentes y estructuras destinadas a estacionamientos sujetas a contaminación por el uso de sales de deshielo.

Es conocida la gran influencia del tipo de cura en desempeño de los morteros y concretos modificados con polímeros. La Figura 3 muestra el comportamiento frente a la resistencia a la tracción por flexión de morteros moldados con distintos tipos y cantidades de polímero con relación a la masa del cemento. Es mostrado que la cura más adecuada es aquella que proporciona un grado razonable de hidratación del cemento en las primeras edades, seguido de condiciones secas tal, que permitan la formación del filme polimérico debido a la coalescencia de las partículas de polímero.

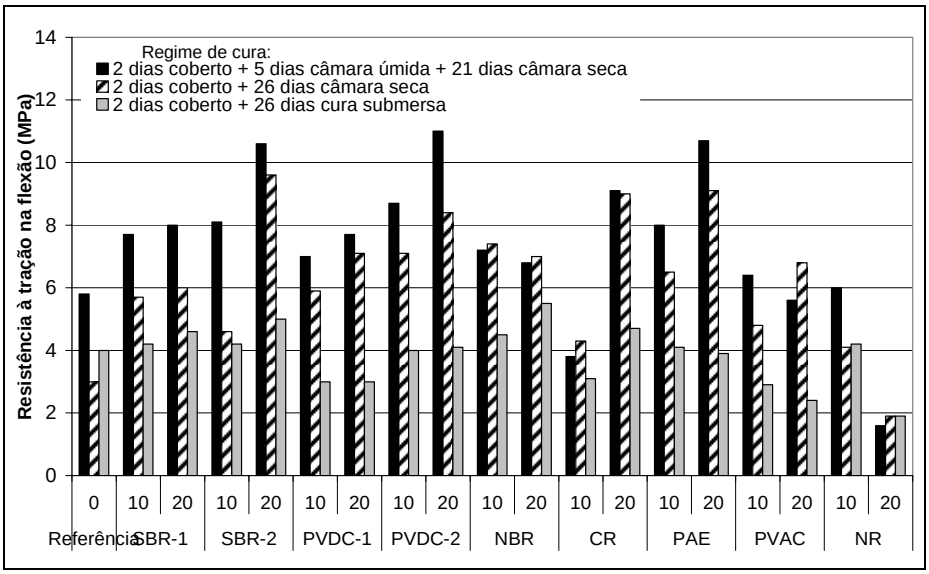


Figura 3 – Influencia del tipo de cura en la resistencia a tracción por flexión de morteros modificados con varios tipos y cantidades de polímero (Ohama, 1998)[36].

La Figura 4 muestra que el efecto de períodos largos de cura seca es mucho menor en la resistencia a compresión de concretos modificados con polímeros cuando comparados frente a concretos de referencia. Según Ohama[38], este comportamiento se debe a la excelente retención de agua que poseen estos compuestos.

---

[40] RIXOM, R; MAILVAGANAM, N. **Chemical admixtures for concrete**. Terceira edição. 437 p.

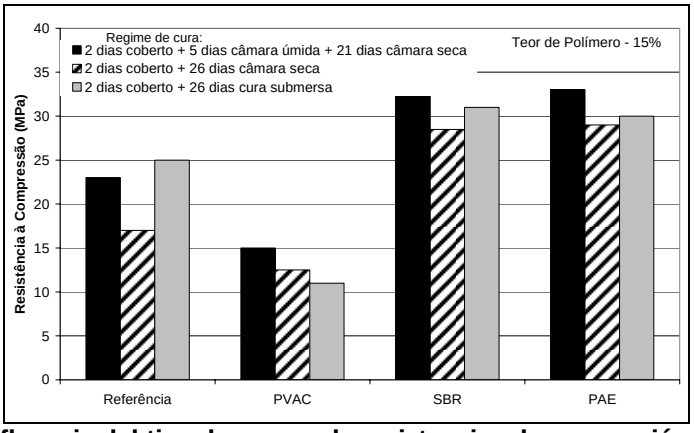


Figura 4 – Influencia del tipo de cura en la resistencia a la compresión de concretos modificados con polímeros (Ohama, 1998)[38].

2.1.6 Fibras de polipropileno

Muchos de los morteros disponibles para el reparo son modificados con fibras de polipropileno. En el estado fresco, la adición de estas fibras tiende a aumentar la consistencia, y también ha sido comprobado el efecto benéfico de estas en reducir la retracción plástica[41]. La reducción en la retracción libre también ha sido documentada[80,42], explicándose esto debido a la posible creación de macro-poros formados en la interfaz fibra-matriz.

2.2 Reparo Tradicional de Estructuras de Concreto

Diferentes técnicas y materiales han surgido para la intervención buscando la corrección de las manifestaciones patológicas comúnmente presentadas en las estructuras existentes. Entre ellas, los reparos localizados con morteros de base cemento modificados con polímeros son ampliamente utilizados, debido a varios motivos, entre ellos, versatilidad del sistema que dispensa de encofrados, costo relativamente bajo y eficacia comprobada, entre otros[27,43,44].

---

[41] WANG, K; SHAH, SP; PHUAKSUK, P. Plastic shrinkage cracking in concrete materials – influence of fly ash and fibers, **ACI Materials Journal**, V98, no. 6, 2001. 458 – 464p.
[42] MESBAH, HA; BUYLE-BODIN, F. Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars, **Construction and Building Materials.** V13, 1999. 439 – 447p.
[43] HELENE, PAULO R. Manual para Reparación, Refuerzo y Protección de las Estructuras de Concreto. México. IMCYC, 1997. 148p.
[44] SOUZA, VICENTE CUSTÓDIO DE MOREIRA; RIPPER, THOMAS. **Patología, Recuperação e Reforço de Estrututas de Concreto**. São Paulo, PINI, 1998. 253p.

El reparo localizado de estructuras con corrosión de armaduras requiere de un estudio detallado. Simplemente la remoción del concreto y la substitución de este por un material de reparo no garantiza la solución del problema, principalmente cuando en el caso de corrosión por la acción de iones cloruro[27].

2.2.1 Metodología de ejecución

Para el suceso de un reparo localizado las siguientes etapas deben ser atendidas y bien ejecutadas: selección de los materiales, demarcación de las áreas, remoción del concreto antiguo, limpieza de las armaduras, preparación del substrato, reconstitución de la sección y cura.

2.2.1.1 Selección de los materiales

La selección de los materiales es una de las etapas más delicadas, debido principalmente al desconocimiento actual de los niveles de desempeño que deben ser alcanzados para el suceso de los reparos localizados y a la gran cantidad de productos y tipos genéricos de materiales con comportamientos muy diferentes destinados para un mismo uso. Medeiros[11] obtuvo diferencias del orden de 3,4 veces la magnitud de la retracción libre de morteros de reparo de base cemento variando desde 0,05% hasta 0,17% a los 28 días, como puede ser visto en la Figura 5.

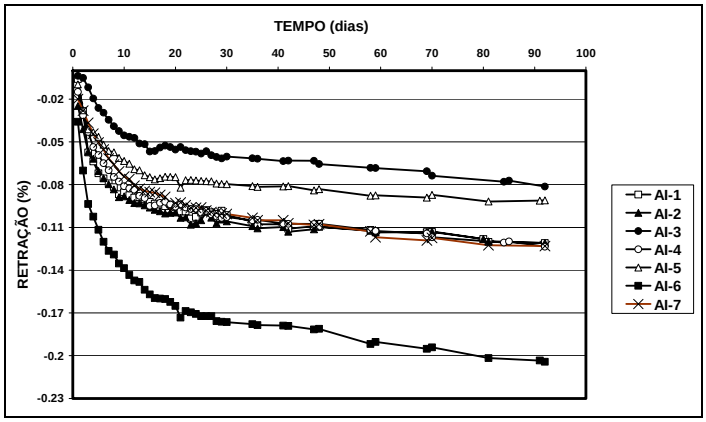


Figura 5 – Retracción libre de una parte de los morteros industrializados para reparo disponibles en São Paulo. (Medeiros, 2002)[11].

Medeiros[11] también obtuvo diferencias igualmente significativas en la resistencia a tracción por flexión (hasta 300%) y en la resistencia a la compresión (hasta 500%). Esas diferencias están presentes en la Figura 6.

Esas grandes diferencias pueden llevar consigo cambios importantes en el comportamiento de estos materiales en lo relacionado a la fisuración. Una investigación por el Alberta Transportation and Utilities[45] evaluó 46 diferentes materiales disponibles para reparo localizado en el mercado canadiense. De estos, sólo el 15% presentaron retracción libre por debajo de 500 μm/m a los 30 días; más del 50% de los productos evaluados presentaron una retracción de 1000 μm/m; e incluso,l varios de los productos evaluados presentaron retracciones mayores de 2500 μm/m. Esta investigación concluye que estas diferencias en los materiales es un gran propiciador a la ocurrencia de fallas, principalmente en lo relacionado a la fisuración.

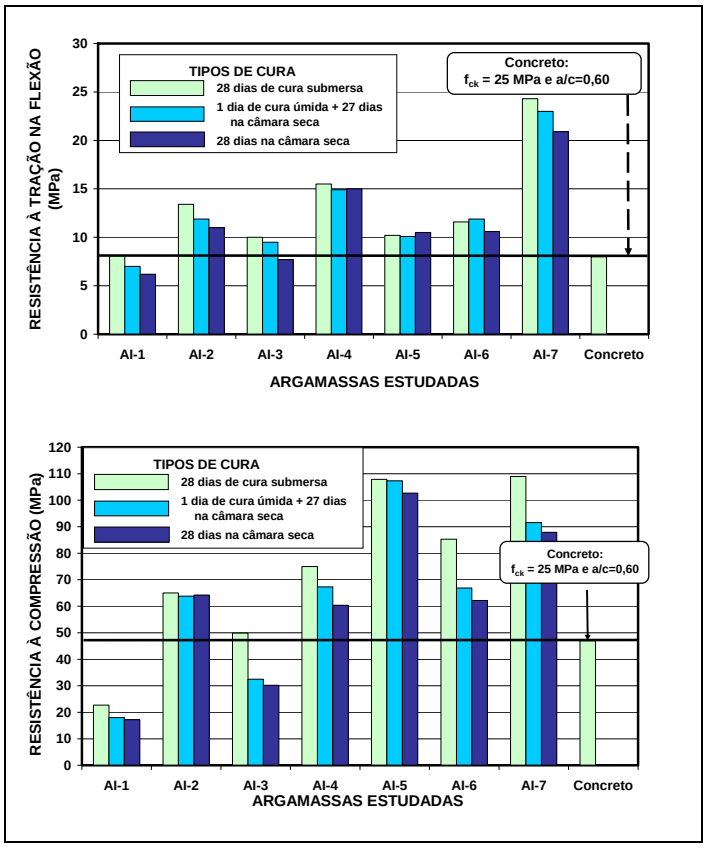


Figura 6 – Resistencia a tracción por flexión y resistencia a compresión de una parcela de los morteros industrializados del mercado de la ciudad de São Paulo evaluados según la norma EN196-1/90. (Medeiros, 2002)[11].

Delante de todas las discrepancias aquí citadas, el presente trabajo pretende contribuir en el conocimiento de las propiedades que influyen en la fisuración por retracción, con

[45] ALBERTA TRANSPORTATION AND UTILITIES. **Alberta concrete patch evaluation program**. Report no. ABTR/RD/RR-87/05. Edmonton, 1997.

el fin de disminuir la incidencia de defectos en los morteros utilizados para el reparo en la ciudad de São Paulo.

2.2.1.2 Demarcación de las áreas a ser reparadas

Cuando definidos los locales a ser reparados, se procede a circunscribir estos dentro de una figura rectangular[46]. Siempre debe utilizarse el sentido común para procurar ajustar al máximo la figura a las características del local reparado; de esta forma se evita el exceso de discontinuidades que resultan en acumulo de tensiones o en figuras estéticamente desagradables, como se muestra en la Figura 7 y en la Figura 8.

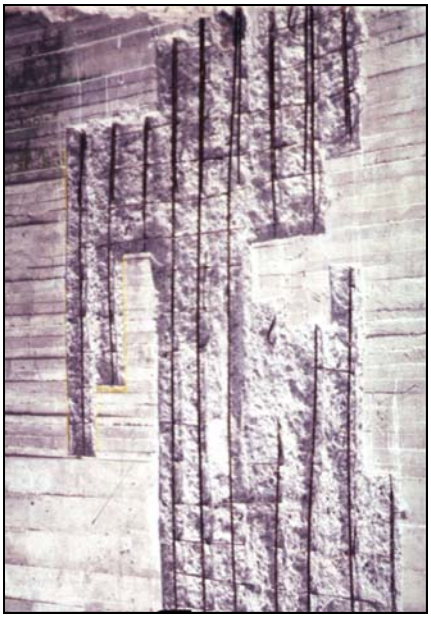


Figura 7 – Delimitación incorrecta. Las discontinuidades causan acumulación de tensiones.

Figura 8 – Resultado estéticamente desagradable en una fachada debido a una demarcación inapropiada.

La demarcación siempre debe ser hecha con disco de corte para garantir un espesor mínimo en todo el perímetro del corte, evitando así la delaminación y deficiencias

[46] HELENE P., LEVI S.M. Metodologia - **Especificações técnicas e composições unitárias para reparos de recuperação e proteção das estruturas de concreto armado de unidades escolares – Relatório 10124, Convênio USP/FDE**. Fundação Desenvolvimento do Ensino do Estado de São Paulo, (1998).

relacionadas a la adherencia[*,47]. Siempre que posible, este corte debe ser hecho como se presenta en la Figura 9, o sea, con un ligero ángulo de modo a que la sección del reparo sea mayor en el interior de la estructura de concreto que en la superfície[27], de este modo se garantiza que el reparo no termine en cero. Mientras tanto, el proyecto de norma europeo de la serie EN1504, permite que el reparo termine en zero en un ángulo de hasta 45º[48], contradiciendo de esta forma la mayor parte de las publicaciones y recomendaciones que pretenden mejorar la adherencia de los reparos localizados.

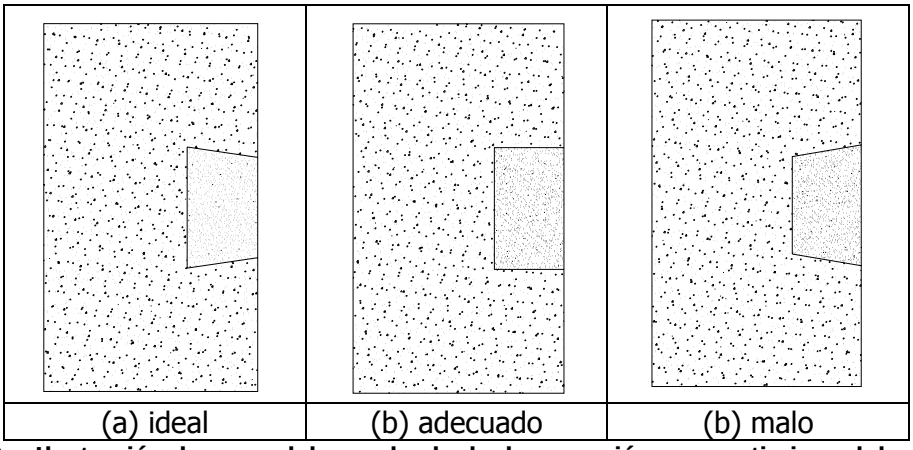


Figura 9 – Ilustración de como debe ser hecha la demarcación para optimizar el desempeño del reparo hecho con mortero.

En el reparo de armaduras con corrosión, debem incluirse las proximidades de las áreas que están sufriendo la corrosión para reducir el riesgo de creación de macro-células o macro-pilas; resultando con que las áreas reparadas pasen a actuar como zonas fuertemente catódicas en relación a las áreas próximas al reparo; pudiendo originar una corrosión más severa que aquella que dio origen al reparo; este fenómeno se encuentra presente en la literatura como incompatibilidad electroquímica. Esta incompatibilidad es un tema bastante controversial, y será abordado en la tesis de doctorado de Grochoski[20]. Tanto Gulikers y van Mier como Morsszeki y Wang, apud

[*] Em português, termo utilizado é "evitar chegar no zero". Em inglês fenômeno conhecido como *featheredging (borda de pluma)*. Acontece quando a profundidade faz-se gradativamente menor até chegar no substrato de concreto.

[47] ACI COMMITTEE 548. "**Standard Specification for Latex Modified Concrete (LMC) Overlays" (ACI 548.4-93)**. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001, 6pp.

[48] prEN 1504 – 10. Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity – Part 10: Site application of products and systems and quality control of the works, Bruselas, 1999, 63p.

Morgan[49] relatan un buen desempeño en relación a este fenómeno cuando utilizados materiales a base de cemento Portland modificados con polímeros.

Morgan[49] ha reportado la eficacia de reparos hechos en 60 puentes canadienses con edades de estos reparos variando entre 8 y 30 años. En otra evaluación de un reparo ejecutado en el edificio de estacionamiento de un hospital contaminado por cloruros debido al uso de sales de deshielo, este mismo autor comprobó la ausencia de inversión de pilas electroquímicas después de 8 años de haber sido completadas las actividades de recuperación.

Una de las evaluaciones del comportamiento electroquímico de reparos más significativas es la investigación de campo conjunta hecha por el NRC-IRC y el Ministerio de Transportes de Ontario (MTO) con cinco fabricantes de sistemas de reparos de estructuras de concreto[50]. Para la investigación fueron evaluados seis sistemas de reparo distintos y un concreto de referencia, en la rehabilitación de los muros de contención de un puente contaminado por iones cloruro debido al uso de sales de deshielo localizado en la ciudad de Renfrew, Notario.

Los resultados de la investigación se encuentran en la Tabla 1. El criterio usado para el establecimiento del desempeño fue:

Potencial de corrosión: Un cambio positivo del valor de potencial entre noviembre de 1999 y noviembre de 2002 recibión un valor de 2 (riesgo de corrosión muy bajo), un cambio negativo menor que 150 mV, recibión un valor de 1 (riesgo de corrosión entre bajo y moderado) y un cambio negativo mayor que 150 mV recibiría un valor de 0 (alto riesgo de corrosión). Estos valores fueron adoptados con base en la norma ASTM C876[51].

---

[49] MORGAN, DR. Compatibility of concrete repair materials and systems. **Construction and Building Materials**, Vol 10, No 1. pp57-67 1996.

[50] CUSSON, D; HOOEGEVEEN, T; QIAN, S. Field performance monitoring and evaluation of concrete repair systems on a highway bridge. In: 5th STRUCTURAL SPECIALTY CONFERENCE OF THE CANADIAN SOCIETY FOR CIVIL ENGINEERING. **Proceedings**. Saskatoon: Canadian Society of Civil Engineering, 2004, pp 1-10.

[51] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel. ASTM C876-91, Philadelphia, USA, 1991..

Diferencia de potencial: Para cuantificar la formación de macro-células de corrosión fue medida la diferencia entre el potencial de corrosión del reparo y el del substrato, luego de aproximadamente 3 años de completadas las actividades de rehabilitación. Un valor menor que 100 mV recibiría 2 puntos, un valor ubicado entre 100 y 150 mV recibiría 1 punto y un valor mayor de 150 mV recibiería 0 puntos.

Resistividad eléctrica: Fue medido el valor de la resistividad eléctrica luego de aproximadamente 3 años de completadas las actividades de rehabilitación. Valores mayores de 20 kΩ-cm recibirían 2 puntos, entre 10 y 20 kΩ-cm recibirían 1 punto, y menores de 10 kΩ-cm, 0 puntos. Estos rangos de valores fueron tomados a partir del trabajo de Bungey[52].

Tabla 1 – Medidas electroquímicas representativas del desempeño de los reparos en términos de control de la corrosión (Cusson y otros, 2004)[50].

Testes seleccionados	Número						
	Ref.	2	3	5	6	10	12
Potencial de corrosión (mV) – Riesgo de corrosión Cambio en el reparo desde '99-'02	-156 (0)	-72 (1)	27 (2)	110 (2)	19 (2)	71 (2)	139 (2)
Diferencia de Potencial (mV) Formación de macro-células de corrosión Diferencia reparo/substrato en Set '02	-18 (2)	-43 (2)	-142 (1)	-102 (1)	-125 (1)	-132 (1)	-102 (1)
Resistividad eléctrica (kΩ-cm) – Riesgo de corrosión Valor medido en Set '02	31 (2)	102 (2)	117 (2)	248 (2)	724 (2)	158 (2)	784 (2)
Puntuación total	4	5	5	5	5	5	5

Como recomendación final, los autores indican el uso de materiales de reparo de baja permeabilidad, resistividad eléctrica y alta resistencia a la tracción para la rehabilitación de estructuras con corrosión de armaduras, desde que la fisuración del material sea prevista, descordando de esta forma de una gran cantidad de trabajos que critican el uso de materiales de reparo de calidades muy superiores a la del substrato.

2.2.1.3 Remoción del concreto antiguo

La remoción del concreto puede ser hecha tanto mediante escarificación mecánica como manual, y debe incluir el removido de todo el concreto en mal estado.

[52] BUNGEY, JH. The Testing of Concrete in Structures, 2da Edição, Chapman & Hall Editors, New York, 1989.

Después de removido el concreto, y principalmente cuando utilizada la remoción mecánica, debe ser especificado el chorro con material abrasivo o con chorro de agua de alta presión, como mínimo de 50 MPa. Este procedimiento garantiza la remoción de una capa de concreto fracturada que se forma durante los procedimientos que envuelven impacto. Han sido reportados varios casos de delaminaciones de reparos debido a la existencia de este plano debilitado que se encuentra a unos 9 mm de la superficie[49,53]. En el caso de corrosión de armaduras por iones cloruro, es necesaria la remoción de los productos de corrosión presentes en el acero, por tanto, debe ser removida una cantidad de concreto por atrás de las barras tal, que permita la limpieza total de las armaduras.

2.2.1.4 Limpieza de la armadura

Las armaduras deben estar siempre totalmente limpias de residuos de concreto y polvo, grasa o productos de corrosión. En el caso de reparo por corrosión de armaduras, el grado de limpieza de las barras será dependiente del origen de la despasivación del acero y del tipo de material de reparo a ser usado.

Cuando la despasivación ocurre debido a la reducción del pH del concreto al redor de las armaduras, la exigencia de limpieza es siempre inferior a aquella que se da por el ataque de iones cloruro. Como regla general, las resinas poliméricas necesitan de una limpieza mucho más rigurosa que los morteros de base cemento, siendo comúnmente exigido el estado de "metal blanco[*]".

Si es evidenciada corrosión de las armaduras después de estas haver sido limpiadas y antes de la colocación del mortero de reparo, se debe analizar si los óxidos formados están bien adheridos a la barra de acero. En caso positivo, normalmente puede procederse a la reconstitución de la sección con el material de reparo escogido sin la

---

[53] HOLL, CH; O'CONNOR, SA. Cleaning and preparing concrete before repair, **Concrete International**, V19, No. 3, pp60-63, 1997.

[*] Diferentes graus de limpeza podem ser conseguidos de acordo com o tipo de equipamento utilizado. Tanto a National Association of Corrosion Engineers (NACE) quanto o International Concrete Repair Institute (ICRI), possuem documentos que tratam o assunto.

necesidad de una otra limpieza, en caso contrario, las barras deben ser nuevamente limpiadas[54].

2.2.1.5 Humedad del substrato

La adherencia de los compuestos a base de cemento Portland en substratos porosos ocurre por dos fenômenos. En el estado fresco, por la adhesión inicial, explicada por la teoría de ligación superficial entre sólidos y líquidos (ecuación de Dupre & Young), y en el estado endurecido por la penetración de la solución aglomerante y posterior precipitación de cristales de portlandita en la interface.[55]. También ha sido reportado en algunos casos el aparecimiento de cristales de C-S-H en la interfaz, y que en el caso de las resinas poliméricas, la adherencia se debe a la existencia de fuerzas de Van de Waals[56].

La condición de humedad del substrato es directamente dependiente del tipo de material escogido para realizar el reparo. Como regla general, la condición óptima de aplicación de los materiales a base de cemento Portland (incluyendo los modificados con polímeros) es la condición de saturado con superficie seca. Si el substrato estuviera seco, podría pasar que el mismo absorba mucha humedad del material de reparo, originando de esta forma un secado en la interfaz que resulta en adherencias muy bajas, mientras tanto, si el substrato estuviera muy húmedo, se origina una región de elevada relación agua/aglomerante en la interfaz, que acaba resultando perjudicial y trae consigo una adherencia débil. Ya para el caso de las resinas poliméricas, el substrato debe estar seco[57], debido a que humedades altas perjudican la adhesión y la posterior coalescencia de las partículas de polímero.

---

[54] ACI COMMITTEE 546. **"Concrete Repair Guide" (ACI 546R-96)**. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001, 41pp.
[55] CARASEK, H. **Aderência de argamassas a base de cimento portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. Tese (doutorado).
[56] XIONG, G; LIU, J; LI, G; XIE, H. A way for improving interfacial transition zone between concrete substrate and repair materials, **Cement and Concrete Research**, V32, pp1877-1881, 2002.
[57] MAILVAGANAM, NP; PYE, GB; ARNOTT, MR. **Surface preparation of the concrete substrate**, Construction Technology Update No. 24. National Research Council of Canada. December 1998.

2.2.1.6 Reconstitución de la sección de la estructura

Luego de completadas las etapas anteriores se procede a la reconstitución de la sección con el material de reparo escogido. El material de reparo debe ser mezclado según las recomendaciones y proporciones dadas por el fabricante.

Especial atención debe ser dispuesta para garantizar una extensión de adherencia adecuada y para evitar la formación de vacíos por atrás de las armaduras, como se muestra en la Figura 10.

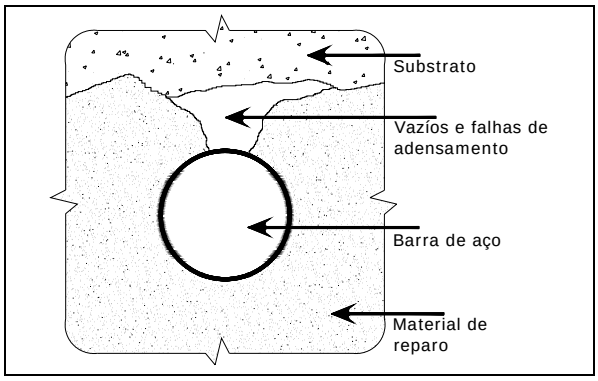


Figura 10 – Posible ocurrencia de vacíos formados por detrás de las armaduras.

Un asunto importante es el espesor máximo de aplicación en aplicaciones horizontales en las que el material de reparo debe resistir su propio peso sin causar detrimentos en la adherencia como en el caso de fondos de vigas o losas. Este ítem ha sido objeto de estudio por el CEN (Comité Europeo de Normalización), aunque no ha llegado todavía en ningún método de ensayo simple que permita esta evaluación[10].

El espesor de aplicación, en sentido general es un asunto controversial. Camadas de espesor menor deben presentar una salida de agua más acelerada debido a la menor relación superficie/volumen[58], y deben ser por tanto, más propensas a fisurar. La investigación hecha por Sadouki y van Mier[59] a través de simulaciones por elementos finitos del crecimiento de fisuras debido a la retracción en sistemas de reparo como el representado en la Figura 11, utilizando dos niveles de resistencia de adherencia y de

[58] ACI COMMITTEE 209. **"Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures"** (ACI 209R-92). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1997, 47pp.
[59] SADOUKI, H; VAN MIER, JG. Simulation of hygral crack growth in concrete repair systems, **Materials and Structures**, V30, pp 518-526, November 1997.

espesores de reparo, concluyó que la fisuración por retracción disminuye con el aumento del espesor del reparo debido a una menor tasa de secado, y que cuando en presencia de resistencias de adherencia bajas, estos cambios volumétricos pueden causar el despegue del material de reparo. Mientras tanto, en campo se percibe el aparecimiento de fisuras de retracción cuando aplicados espesores mayores. Esto puede ser explicado posiblemente por la poca restricción ofrecida por el substrato en este último caso lo que podría facilitar el aparecimiento de fisuras. Por este motivo, la buena práctica recomienda que la aplicación sea hecha en camadas de 2 cm en intervalos de 24 horas.

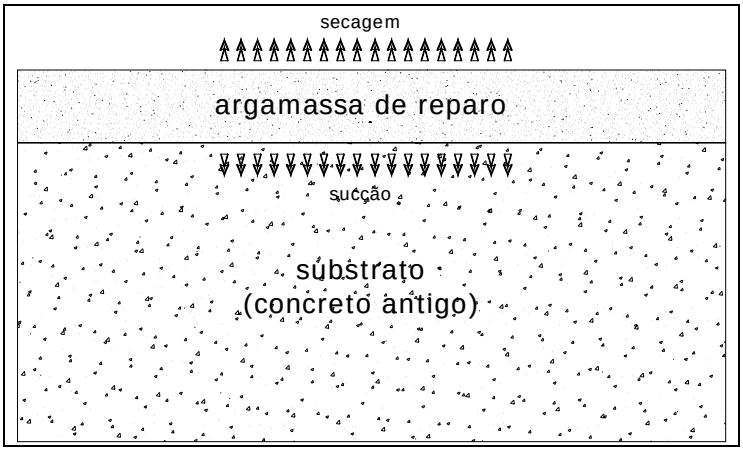


Figura 11 – Representación esquemática del reparo considerado (Sadouki y van Mier, 1997)[59].

2.2.1.7 Cura

La última etapa del reparo localizado es tan importante como las anteriores. La misa es también dependiente del tipo de material escogido. En lo general, las resinas poliméricas no debem ser curadas. Los morteros a base de cemento Portland modificados con polímeros precisan de curado, el cual debe comenzar inmediatamente después del endurecimiento. Debido a la necesidad de la formación del filme polimérico resultante del secado, se torna prudente interrumpir la cura luego de haber alcanzado un cierto grado de hidratación.

3 Fisuración por Retracción en Morteros de Reparo

La durabilidad es un atributo esencial en los componentes y materiales de construcción. La procura de métodos de ensayo, de modelos acelerados y criterios de evaluación de desempeño de materiales y sistemas utilizados en la industria de la construcción civil para prever el comportamiento a largo plazo ha crecido mucho en los últimos años[60]. Aunque existiendo numerosas metodologías de ensayos y especificaciones para materiales de construcción que pretenden evaluar el desempeño del material o componente, es difícil encontrar una correlación entre las metodologías y el comportamiento del material en servicio[61].

En los últimos años han crecido mucho los esfuerzos direccionados al estudo de la fisuración en concretos, morteros y pastas. El estudio de la fisuración resulta bastante complejo, por involucrar muchas variables, tanto del material, como de la condición de exposición. La calidad de la mano de obra y la cura cuando mal ejecutadas pueden ser más significativas en el resultado final que todas las otras variables influyentes en la fisuración.

3.1 Variables influyentes en la fisuración por retracción de morteros de reparo

Ha sido apuntado que el suceso de morteros de reparo en relación a la fisuración por retracción es principalmente una función de las siguientes variables: resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y fluencia[5,8,71].

3.1.1 Resistencia a tracción

Mientras mayor la resistencia a tracción, mayor es la capacidad del material resistir las solicitaciones de tracción impuestas por la restricción del substrato. Por esto existe un interés especial en mejorar la resistencia a tracción de los morteros de reparo. Esto ha sido conseguido con el uso de bajas relaciones a/c y con el uso de polímeros.

---

[60] TULA SANABRIA, L. **Contribuição ao estudo da resistência à corrosão de armaduras de aço inoxidável**. São Paulo, 2000. 259p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica Universidade de São Paulo.

[61] FROHNSDORFF, GEOFFREY; MASTERS, L.W. The Meaning of Durability and Durability Prediction. Durability of Building Materials and Components, ASTM STP 691, P. J. Sereda and G. G. Litvan, Eds. American Society for Testing and Materials, 1980.

Medeiros[11] evaluó morteros del mercado de São Paulo destinados para el mismo tipo de reparo, encontrando morteros con resistências a tracción por flexión variando desde 8 hasta 24 MPa.

3.1.2 Retracción

La retracción ha sido apuntada como una de las propiedades más significativas en la fisuración[62]. Son muchas las variables que influyen en la retracción, y pueden ser separadas en dos grupos: en lo relacionado a la composición de la mezcla y en lo relacionado a la condición de exposición. Las variables más influyentes en relación a la composición de la mezcla son la relación a/c y el volumen de pasta. Ya en cuanto a la condición de exposición tenemos el período de cura, la humedad relativa del ambiente, temperatura, relación superficie/volumen, grado de restricción y viento.

El efecto de todas estas variables dificulta en gran medida el estúdio de la fisuración en ensayos expuestos a ambientes externos. Según Altoubat[63], la tasa y la histora de la evolución de los esfuerzos debidos a la retracción restringida en edades iniciales son factores muy importantes que influyen significativamente en la edad de fisuración y en la tensión en el momento de la falla. Estos parámetros deben ser analizados para poder alcanzarse una previsión precisa de la fisuración debida a la retracción.

Ha sido criticado el uso de morteros de reparo con resistencias muy elevadas, que implícitamente tienden a poseer altos módulos de elasticidad y alta retracción debido a la gran cantidad de pasta. Cusson e Repette[64] especificaron la necesidad del uso de concretos con relación a/c mayor de 0,45 para reducir los efectos de la retracción autógena en muros de contención de puentes canadienses. Por otro lado, ha sido documentada la gran dependencia de la retracción a la relación a/c. Pietra et al[65] estudiaron una familia de concretos de una misma consistencia con relaciones a/c

---

[62] YUAN, Y; LI, G; CAI, Y. Modeling for prediction of restrained shrinkage effect in concrete repair, **Cement and Concrete Research**, V33, 2003 pp347 – 352.

[63] 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.

[64] CUSSON, D; REPETTE, WL. Early-age cracking in reconstructed bridge barrier walls, **ACI Materials Journal**, V97, No. 4, July – August 2000.

[65] PIETRA, I; BARBOSA, P; HELENE, P; FIGUEIREDO, A. Influência da dosagem na retracción por secagem em concretos. In: 45º Congreso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON. **Anais**. Espíritu Santo, Brasil.

variando desde 0,37 hasta 0,54; siendo la magnitud de la retracción menor en los concretos de menor relación a/c.

3.1.3 Módulo de Elasticidad

La mayoría de los investigadores en el tema defiende el uso de materiales de reparo con módulo de elasticidad próximo al de concreto de la estructura reparada para evitar problemas de compatibilidad. El uso de morteros de reparo con módulos de elasticidad muy altos puede resultar en la atracción de cargas muy elevadas, del mismo modo en que el uso de morteros con módulos de elasticidad muy bajos debe ser evitado[49], siendo esta una de las principales desventajas del uso de resinas poliméricas. Mientras tanto, también ha sido recomendado el uso de materiales de reparo de módulos de elasticidad significativamente mayores a los de la estructura, pues estos conseguirían trasnferir las solicitaciones al concreto del substrato[12].

Según Bastos[22] un módulo de elasticidad bajo posibilita una reducción de las tensiones de tracción, aumentando de esta forma la resistencia a la fisuración del material.

3.1.4 Fluencia

La fluencia es el fenómeno mediante el cual los materiales viscoelásticos cuando sometidos a un carga constante a lo largo del tiempo tienden a aumentar la deformación[66]. En la Figura 12 es presentada la curva de un ensayo típico de fluencia de concreto a compresión.

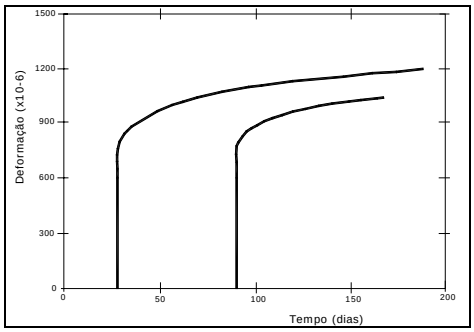


Figura 12 – Ensayo de fluencia con carga constante de 14,5 MPa a los 28 y 90 días (Mehta y Monteiro, 1994)[66].

[66] MEHTA, PK; MONTEIRO PJM. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, Ed Pini 1994. 573p.

La Figura 13 ilustra el retardo en la fisuración causado por el alivio de la tensión debido a la fluencia.

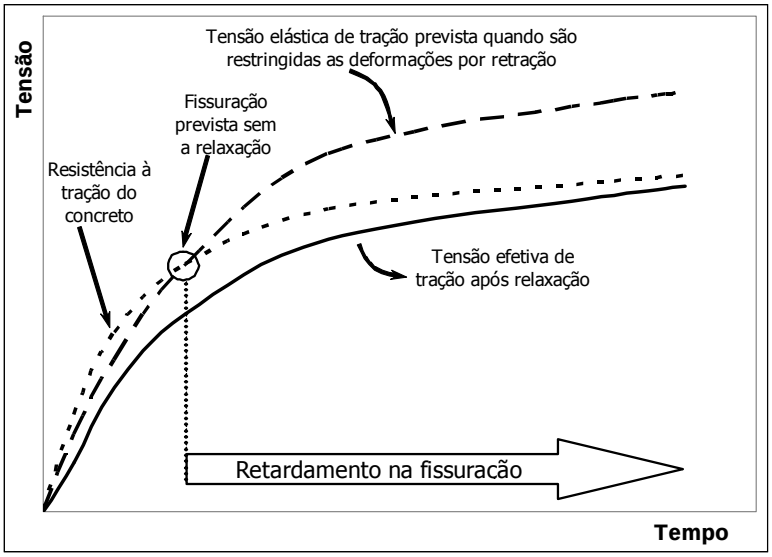


Figura 13 – Influencia de la retracción y de la fluencia en la fisuración de materiales a base de cemento Portland (Adaptado de Mehta y Monteiro, 1994)[66].

Las variables influyentes en la fluencia son las mismas que gobiernan la retracción, siendo la relación a/c uno de los parámetros más significativos, mientras menor la relación a/c, menor la retracción y la fluencia; aunque experimentalmente fue recientemente comprobado que por lo menos en las primeras edades (hasta 5 días) la fluencia bajo tracción fue mayor en las mezclas de menor relación a/c en concretos de relaciones a/c 0,40 y 0,50 utilizados en pavimento de aeropuertos. Todavía, según estos autores, las tensiones de tracción generadas por la restricción del concreto son significativas inmediatamente en los primeros días luego del vaciado, y pueden causar la fisuración del material. El papel de la fluencia a tracción en la reducción de la tensión asociada a los esfuerzos generados por la retracción es substancial, y puede reducir los mismos en hasta 50%[63].

Según Bissonnette y Pigeon[67] el papel de la fluencia bajo tensión es un fenómeno de gran importancia que puede tener un papel muy importante debido a reducir las tensiones resultantes de la retracción libre y fluencia de dos mezclas estudiadas por

[67] BISSONNETTE, B; PIGEON, M. Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, V25, No 5, pp.1075-1085, 1995.

estos investigadores; se puede notar que la retracción libre y la fluencia de las dos mezclas estudiadas por estos investigadores; se puede notar que la retracción libre y la fluencia tienden a bajar con el aumento del período de cura. Los resultados de Østergaard et al[68] también demuestran la gran dependencia de la fluencia a la edad en que comienza el cargamiento.

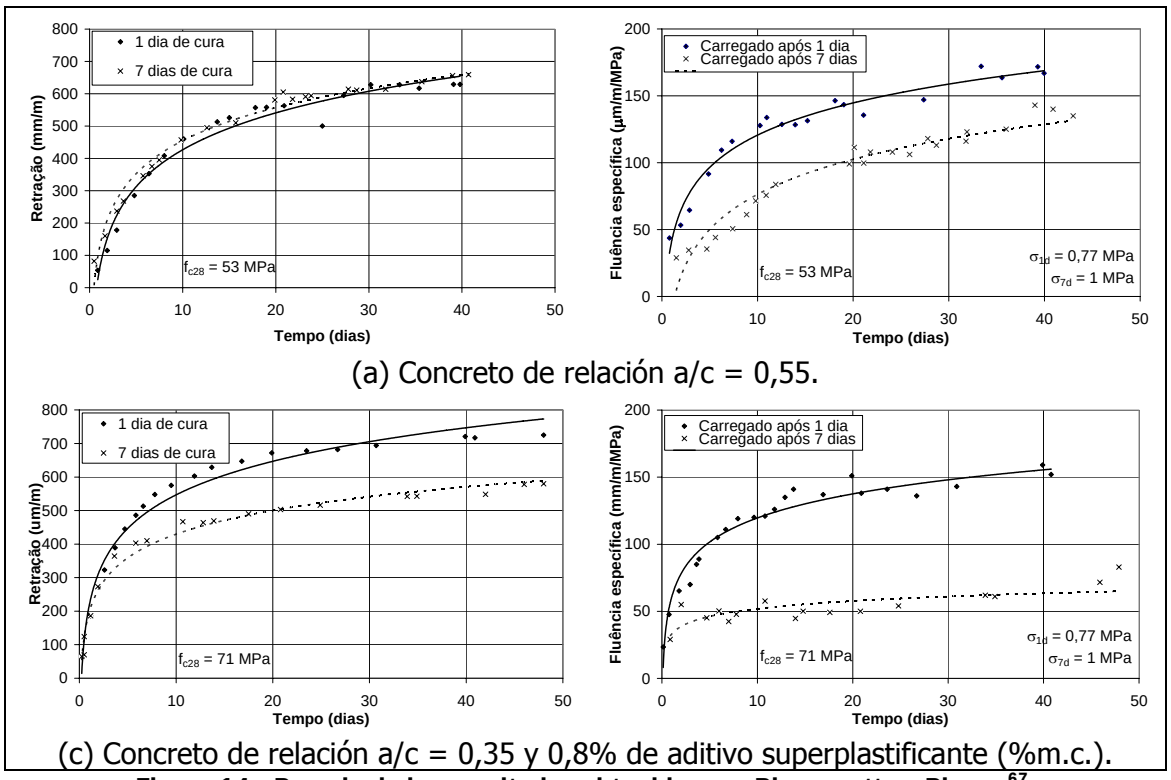


Figura 14 - Parcela de los resultados obtenidos por Bissonnette y Pigeon[67].

Varios investigadores concuerdan en el efecto que la fluencia puede tener en el retardo de la fisuración en reparos localizados[1,6,62,69,70], aunque en la literatura sólo existe un trabajo volcado al área de reparo, intentando analizar la influencia de esta variable en un programa experimental que abarcó ensayos de retracción restringida[8]. Los autores del mismo no consiguieron comprobar la existencia de alguna relación directa entre fluencia y fisuración, muy probablemente por el trabajo haber sido hecho con varios

[68] ØSTERGAARD, L; LANGE, D; ALTOUBAT, S; STANG, H. Tensile basic creep of early-age concrete under constant load. **Cement and Concrete Research**, V31, 2001, pp. 1895-1899.

[69] SOLTEZ, SM. **Cementitious materials for thin patches**. Final Report SPR 304-041. Oregon Department of Transportation Research Group and Federal Highway Administration, June 2001, 43pp.

[70] TULA, L; OLIVEIRA, PSF; HELENE, P. **Grautes para Reparo**. In: VII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y IX Congreso de Control de la Calidad en la Construcción. CONPAT 2003, Trabajos suplementarios. Mérida, Yucatán – México. pp II.85 – II.94. CD ROM.

materiales de formulación desconocida, presentando grandes diferencias en todas las variables influyentes en la fisuración: retracción libre, resistencia a tracción, coeficiente de expansión térmica y módulo de elasticidad. Este trabajo tuvo como objetivo la creación de criterios de desempeño para morteros de reparo y otros materiales. Fue patrocinado por el US Army Engineer Waterways Experiment Station (WES) para ser utilizado por el Batallón de Ingenieros (COE)[5]. Una parcela de los resultados de esta pesquisa están presentados en la Tabla 2.

Con estos resultados, los autores no consiguieron establecer ninguna relación directa entre resistencia a compresión, resistencia a tracción, módulo de elasticidad, coeficiente de expansión térmica, retracción libre o fluencia, en la fisuración. Un factor que debe haber influido negativamente en el sentido de obtenerse resultados más coherentes en este trabajo es el hecho de que hayan sido utilizados distintos tipos de cura en el ensayo de retracción restringida, o sea, conforme la recomendación del fabricante para cada uno de los materiales evaluados, lo que ciertamente inflluyó en la edad de fisuración de los morteros.

Otro inconveniente en este tipo de trabajo es el hecho de que fue realizada utilizando morteros industrializados, de formulaciones desconocidas. Esto termina dificultando en el sentido de poder establecer la influencia de los parámetros de dosificación en la fisuración, y de cierto modo afectando el desarrollo de la formulación de estos productos. En este sentido, las investigaciones de Medeiros[11] y Moreno Jr[18] pretenden llenar esta carencia de informaciones en cuanto a la influencia de parámetros de dosificación.

Tabla 2 – Resultados obtenidos por Poston y otros[8] en una investigación envolviendo ensayos de campo y laboratorio (Poston et al, 2001).

Desempeño em campo	Compresión (MPa)	Tracción directa (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Coef. Expansión Térmica (x 10^{-6}/°F)	Retracción Libre (μm/m) (28 días)	Ensayo del Anillo	Ensayo Placa SPS	Fluencia específica después de 1 año (x 10^{-6}/MPa)	
						Edad de Fisuración (días)	(mm)	Compressión	Tracción
Desempeño satisfactorio									
1	46	3,1	19	10,4	178	6	1.52	65,4	60,9
1	80	2,4	26	14,9	201	140	2.03	37,7	88,3
1	66	2,7	41	13,7	339	15	6.10	70,0	80,5
2	48	5,1	21	16,7	293	>300	4.06	167,8	
3	28	1,5	19	16,6	305	8	10.9	274,6	520,1
3	33	2,2	19	12,4	429	23	8.13	188,6	168,6
Valor medio	50	2,8	24	14,1	291		5.59	134,0	183,7
Desempeño intermedio									
4	44	3,5	26	12,8	479	17	9.40	277,4	210,1
5	50	2,8	22	14,0	391	22	8.38	87,4	120,5
Valor medio	47	3,1	24	13,4	435		8.89	182,4	165,3
Desempeño inadecuado									
6	36	2,8	29	17,8	16	>300	5.33	295,4	10,44
7	30	3,2	19	15,3	1779	4	37.85	505,3	411,1
8	67	2,2	37	16,7	301	7	1.52	126,4	88.2
9	48	0,6	31	14,0	258	10	0	81,5	4020,9
Valor medio	45	2,2	29	16,0	588		11.18	252,2	1132,6

3.1.5 Otras Fisuras en Reparos Localizados

En el estado fresco, las fisuras típicamente asociadas al concreto, como las de retracción plástica, asentamiento plástico y desecación superficial no ocurren comúnmente en los morteros de reparo, debido principalmente a sus características propias en el estado fresco. Mientras tanto, estos morteros están sujetos a sufrir fisuración durante el acabado de la superficie. Esta tendencia a formar fisuras en el acabado aumenta en los morteros que contienen fibras de polipropileno, y aumenta también en la medida en que el mortero va perdiendo su fluidez a través del tiempo.

En el estado endurecido, además de las fisuras causadas por la restricción debido a la retracción, la restricción del substrato asociada a cambios significativos de temperatura puede originar tensiones elevadas de forma a llevar el material de reparo a la falla.

3.1.6 Requisitos y criterios para morteros de reparo presentes en la literatura

Las referencias más completas sobre el tema han sido publicadas en los Estados Unidos[8,71,72,73] e en Europa[74]. Un punto en común entre estos trabajos todos, es el de afirmar sobre la gran dificultad en conseguirse criterios de desempeño adecuados. En la Tabla 3 se presenta una de las primeras referencias existentes sobre requisitos para el desempeño de reparos[73], consiste en una serie de exigencias con fundamentos de base teórica en la tentativa de definir un material para reparo localizado ideal.

Muchas de estas recomendaciones se contraponen con algunas de las recomendaciones actuales[4,7,9,10,26,50]; otras son casi inalcanzables o arbitrarias, como la recomendación de que la retracción libre del mortero de reparo sea menor a la del concreto del substrato.

---

[71] EMMONS, P.H., VAYSBURD, A. M. **"Performance Criteria for Concrete Repair Materials"**, Phase I, "Technical Report REMR CS-47, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mass. 1995. 123p.

[72] McDONALD, JE; VAYSBURD, AM; EMMONS, PH; POSTON, RW; KESNER, K. Selecting durable repair materials: Performance Criteria – Summary, **Concrete International**, V24, no. 1, 2002.

[73] EMBERSON, NK; MAYS, GC. Significance of property mismatch in the patch repair of structural concrete – Part 1: Properties of repair systems, **Magazine of Concrete Research**, V42, no. 152, pp 147 – 160, 1990.

[74] DECTER, MH; KEELEY, C. Durable concrete repair – Importance of compatibility and low shrinkage, **Construction and Building Materials**, V11, No.5-6, pp267 – 273, 1997.

Tabla 3 – Requisitos generales de materiales destinados al reparo localizado de estructuras (Emberson y Mays, 1990)[73].

Propriedad	Relación del material de reparo (R) al substrato de concreto (C)
Retracción	R<C
Coeficiente de fluencia (para reparos en compresión)	R<C
Coeficiente de fluencia (para reparos en tracción)	R>C
Coeficiente de expansión térmica	R=C
Módulo de elasticidad	R=C
Coeficiente de Poisson	R=C
Resistencia a tracción	R>C
Desempeño a fatiga	R>C
Adhesión	R>C
Porosidad y resistividad	R=C
Reactividad química	R<C

En la Tabla 4 son presentados los critérios propuestos por Decter y Keeley[74]. De entre estos, únicamente el relativo a la resistencia de adherencia fue determinado específicamente para morteros de reparo. Los otros límites propuestos fueron adoptados a partir de la normativa de algunos países con base en el buen sentido común. En relación a la fisuración, el límite más interesante sugerido es el de la retracción libre, en este caso limitada a 500 μm/m*.

Tabla 4 – Sumario de los requisitos y criterios de desempeño sugeridos por Decter y Keeley. (Decter y Keeley, 1997)[74].

Requisito de desempeño	Criterio sugerido
Propiedades de resistencia y movimiento	Compatibilidad requerida. Las propiedades deben ser similares a las del substrato de concreto, especialmente las relativas a la deformación
Adherencia	≥0,8 MPa
Retracción libre (28 dias)	<500 μm/m (ASTM C157)
Permeabilidad	Menor al límite inferior de la UK Concrete Society

La Tabla 5 presenta una serie de critérios de desempeño sugeridos para reducir la fisuración por retracción por Poston y otros[8]. Aunque estos no hayan sido soportados totalmente por los resultados experimentales de la investigación, están basados en un análisis criterioso de los resultados.

* μm/m. Unidad más comúnmente empleada en la literatura actual en el caso de la retracción y conocida como *microstrains*. Em português, microdeformações, en español, microdeformaciones.

Tabla 5 – Requisitos y criterios de desempeño sugeridos por Poston et al (Poston et al, 2001)[8].

Requisito de desempeño	Criterio sugerido
Resistencia a la compressión	≥17 MPa (3 días) ≥28 MPa (28 días)
Resistencia a tracción	≥10% de la resistencia a compresión (cura húmeda) ≥8% de la resistencia a compresión (cura especificada por el fabricante)
Retracción libre (28 días)	≤400 μm/m (ASTM C157 modificado)
Retracción restringida	0,25 mm en la placa SPS Ausencia de fisuras de retracción en el ensayo del anillo hasta los 28 días

Medeiros[11] atribuyó algunos límites que en la realidad son una clasificación de los morteros evaluados en su trabajo en intervalos fijados, tomando como base los morteros industrializados y la experiencia de los investigadores envueltos en el trabajo.

Tabla 6 – Algunos de los límites sugeridos por Medeiros[11] para control y especificación de morteros de reparo superficial para estructuras de concreto.

Propiedades			Limites
Límites Esenciales	Consistencia inicial y retención de consistencia		Para aplicación manual: 200±10 mm e ≥95%
	Resistencia a compresión		Alta ≥ 55 MPa Media 45-55 MPa Baja <45 MPa
	Resistencia a tracción por flexión		Alta ≥ 11 MPa Media 9-11 MPa Baja <9 MPa
	Coeficiente de absorción de agua por capilaridad (calculado a 24 horas de ensayo)		Baja 0,5 $kg/m^2 \times h^{-1/2}$ Media 0,5 – 1,0 $kg/m^2 \times h^{-1/2}$ Alta > 1,0 $kg/m^2 \times h^{-1/2}$
	Retracción por secado	7 días	Baja < 0,07% Media 0,07% - 0,10% Alta ≥ 0,10%
		28 días	Baja < 0,07% Media 0,07% - 0,12% Alta ≥ 0,12%
		91 días	Baja < 0,09% Media 0,09% - 0,12% Alta ≥ 0,12%

3.1.7 Normalización

El esfuerzo por la búsqueda de la normalización de los materiales de reparo se ha ido intensificando, con la participación de entidades internacionales y con el esfuerzo conjunto del sector.

El Hong Kong Housing Authority elaboró técnicas destinadas a morteros para reparo de estructuras de concreto, lo que efectivamente causó que los fabricantes de morteros industrializados modifiquen sus formulaciones para alcanzar los criterios establecidos por la norma[75]. En la Tabla 7 se presentan los requisitos y criterios de desempeño exigidos por el HKHA. En este caso, está normalización buscó únicamente dividir los materiales por medio de clases.

Esta clasificación, exige que los materiales de reparo no presenten fisuras de retracción en el ensayo del anillo hasta la edad de 7 días. Hasta esa edad, solo una pequeña parcela de la retracción de los morteros es conocida, por tanto, ese límite no se considera como adecuado para poder evaluar o controlar la propensión a fisuración de materiales de reparo.

Tabla 7 – Especificación técnica de la HKHA, apud Emmons (Emmons et al, 2000)[75].

Características	Morteros de reparo		
	Clase 40	Clase 25	Clase 15
Resistencia a compresión aos 28 días (MPa)	30 - 60	20 - 40	10 - 30
Resistencia a tracción mínima a los 28 días (MPa)	2,0	1,5	1,0
Módulo de elasticidad a los 28 días (GPa)	15 - 25	9 - 15	5 – 9
Resistencia de adherencia mínima (MPa)	2,0	1,5	1,0
Fisuración en el ensayo del anillo (7 días)	0	0	0
Permeabilidad al aire Figg (seg)	200	150	100

[75] EMMONS, PH; VAYSBURD, AM; McDONALD, JE; POSTON, RW; KESNER, KE. Selecting durable repair materials: Performance criteria, **Concrete International**, V22, no. 3, 2000.

En Europa está siendo elaborado un conjunto de normas que engloba productos y sistemas para la protección y reparo de estructuras[76]. Existen ya en ese proyecto algunos de los criterios mínimos que deben ser alcanzados por los morteros de reparo aplicados a mano en las siguientes propiedades: resistencia a compresión, contenido de iones cloruro, absorción capilar, resistencia a la carbonatación, compatibilidad frente a ciclos de hielo-deshielo, compatibilidad térmica y adherencia. Esta importante iniciativa europea en pro de la normalización de materiales y sistemas de reparo para estructuras de concreto data de inicios de la década del 90 con la creación del Technical Committee (TC104). Dentro de este comité, fue creado el Steering Committe 8 (SC8) que por su vez creó 10 grupos de trabajo (WG), cada uno de estos, englobando una técnica de intervención para el reparo destes englobando uma técnica de intervenção para reparo de estructuras distinta.

Este documento normativo permitirá la elección de productos para reparo con base en la aplicación específica requerida. Por ejemplo, los criterios de morteros para reparo localizado de estructuras contaminadas por iones cloruro son más exigentes que los criterios establecidos para estructuras carbonatadas. Las principales dificultades y la trayectoria del WG2 (reparo estructural y no-estructural) desde los inicios del grupo hasta el 1997 fueron publicadas por Robery[10].

En la Tabla 8 puede ser vista una parte de los requisitos y criterios exigidos para morteros aplicados a mano destinados al reparo de estructuras de concreto en el proyecto de norma europeo.

Este proyecto todavia se encuentra en fase de elaboración y posee una gran cantidad de requisitos. En lo tocante a la fisuración, todavía no existe ningún criterio establecido, aunque conste que después de realizadas las actividades de reparo, los locales deben ser monitorados para la evaluación de la fisuración y posterior aceptación o rechazo del reparo.

[76] PrEN 1504. Products and systems for protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Parts 1 to 10.

Tabla 8 – Resumen de requisitos y criterios de desempeño para morteros aplicados a mano en la normalización europea para todos los usos previstos (Catarino et al, 2000)[77].

Propriedad Norma de Ensayo	Requisitos		Observaciones
	Estructurales	No estructurales	
Retracción restringida: prEN 12617-4	> 2,0 MPa	> 1,5 MPa	Resist. de adherencia después del ensayo, c/abertura media de fisuras <0,05mm. Ninguna fisura >0,1mm. Ausencia de delaminación
Resistencia a compresión: prEN 12190	> 30 MPa	> 20 Mpa	-
Resistencia a carbonatación: prEN 13295	dk < dk substrato	dk < dk substrato	No exigido cuando el sistema de reparo incluye algún tipo de protección que dificulte el ingresso del gas
Contenido de cloruros	< 0,05%	< 0,05%	Con relación al peso del especimen
Adherencia por tracción directa: prEN 1542	> 2,0 MPa	> 1,5 MPa	Valores medios. Ausencia de valores individuales inferiores a 75% del valor mínimo exigido

3.2 Evaluación de la retracción restringida

El interes 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 material[78].

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 reacci[ón directa. Con todo, este tipo de ensayo permite obtener información sobre la retracción,

[77] CATARINO, J.; GONÇALVES, A.; RIBEIRO, S. Reparação de estruturas de betão na normalização européia. In: Encontro nacional sobre conservação e reabilitação de estruturas, Lisboa, 2000. **Anais**. Lisboa, 2000. p. 105-113.

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

la fluencia y todavía, la tensión sufrida por el material, en el grado de restricción deseado.

Igarashi et al[79] 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 Figura 15 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).

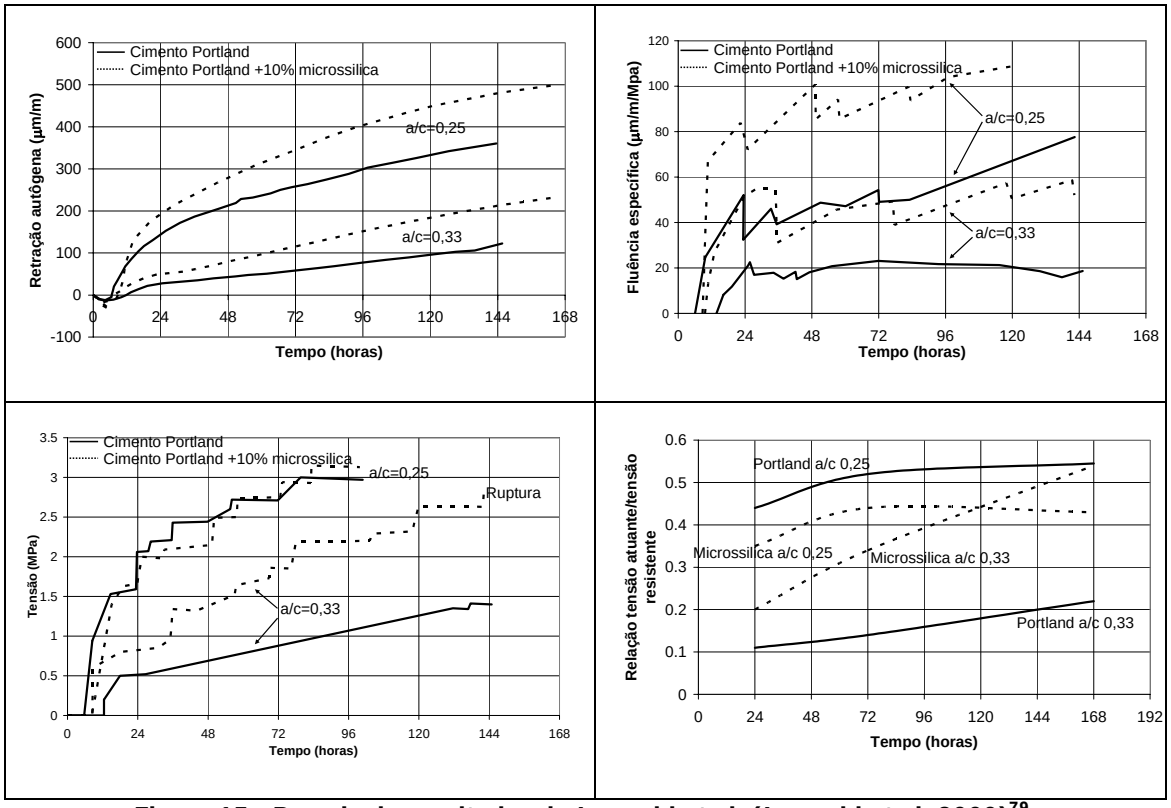


Figura 15 - Parcela de resultados de Igarashi et al, (Igarashi et al, 2000)[79].

Se puede apreciar que las mezclas de menor relación a/c poseen una mayor retracción autógena y que la adición de sílica activa también tiende a aumentar la retracción autógena. La tendencia a fisuración, no se correlacionó con la retracción autógena,

[79] 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.

[*] Uma crítica a este trabalho, é o uso de teores de aditivo superplastificante muito distintos. Nos concretos de relação água/aglomerante de 0,33, o teor de aditivo foi igual a 1,5% (%m.c.). Já no caso dos concretos de relação água/aglomerante de 0,25 o teor de aditivo empregado foi de 5%.

esto es explicado por los autores debido a la influencia de las otras variables, como fluencia y resistencia a tracción.

También han sido usadas probetas en formato de placas restringidas lateralmente y por la base, en este caso contabilizandose 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 consigo 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 (≈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 aparecimiento de la fisura y abertura de la fisura).

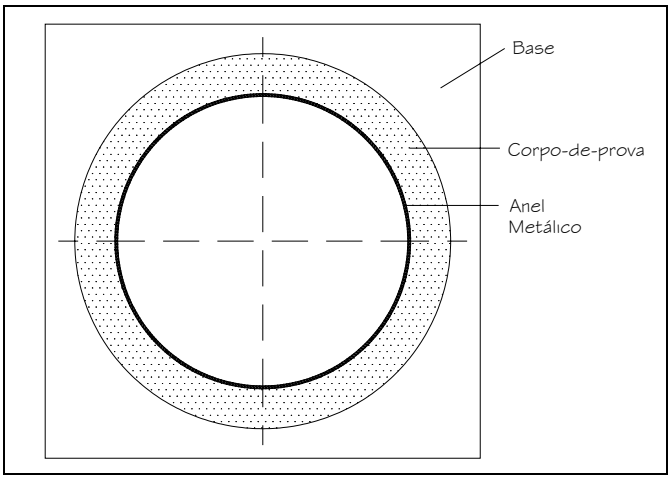


Figura 16 – Probeta utilizada para evaluación de la fisuración. Las dimensiones de esta probeta han sido muy distintas desde los primeros usos de este ensayo por Carlson y Coutinho* hasta la actualidad.

* 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.

Grochoski et al[80] 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 17 pueden ser apreciados algunos de los resultados de este trabajo.

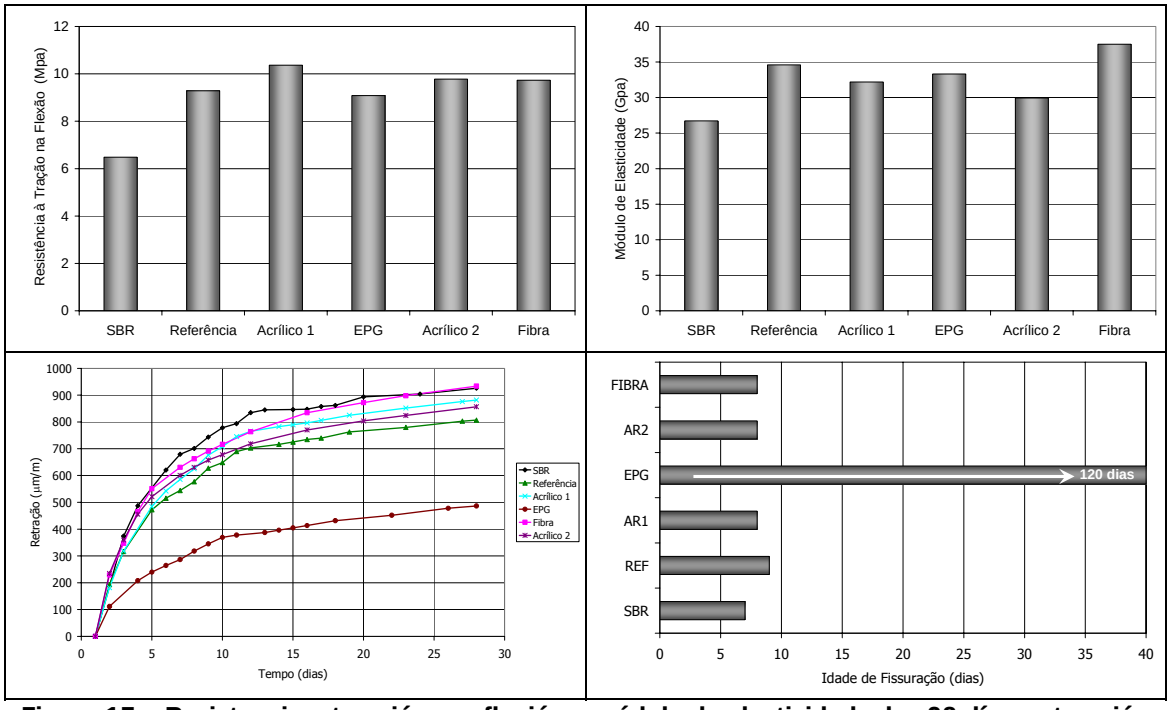


Figura 17 – Resistencia a tracción por flexión y módulo de elasticidad a los 28 días, retracción libre y edad de fisuración de seis morteros de mismas proporciones de mezcla modificados con distintos materiales (Grochoski et al, 2003)[80].

Recientemente este método de ensayo ha sido utilizado con algunas modificaciones y embasamiento matemático que permite estimar el esfuerzo actuante en la probeta[81]. En la Figura 18 se presentan algunos de los resultados de estos investigadores,

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

[81] 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.

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 mesma proporción cemento:arena.

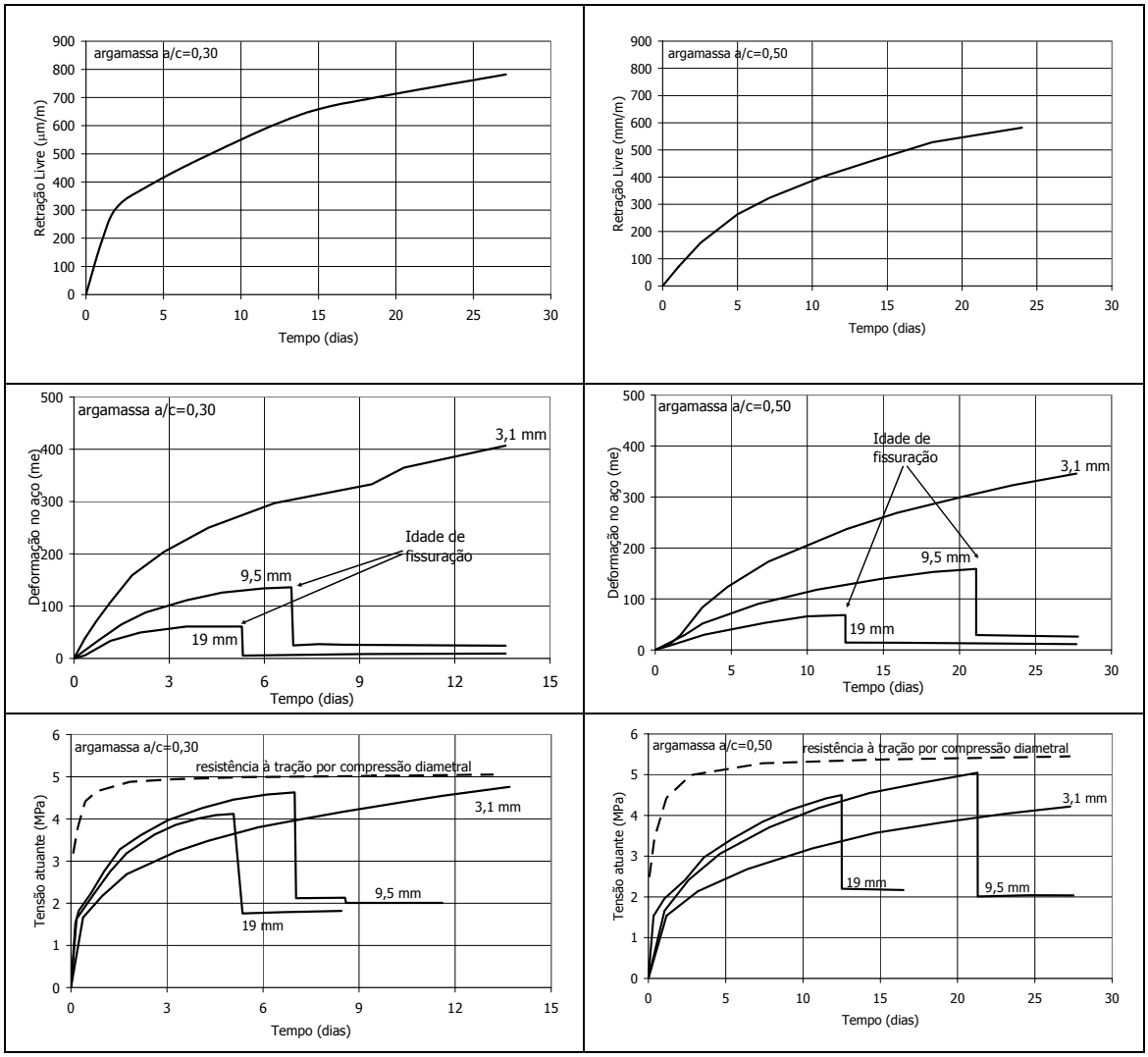


Figura 18 – Resultados obtenidos por Hossain y Weiss en ensayos de retracción restringida por el método del anillo (Hossain y Weiss)[81].

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 aparecimiento 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[63]. Esta afirmación es corroborada por los resultados de Hossain e Weiss[81], que muestran que la fisuración siempre ocurre en un nivel menor al de la resistencia del matgerial, y que la medida en que la edad de fisuración y el espesor del anillo aumentan, esta diferencia se torna todavía mayor.

La determinación de la edad de fisuración en el anillo tiende a ser más precisa mientras menor sea esta edad. Esto puede ser apreciado claramente en los resultados de retracción restringida obtenidos por Mokarem[82]. En la Figura 19 se muestra el valro médio y el intervalo de confianza para un nivel de significancia de 95% en los resultados obtenidos por este investigador.

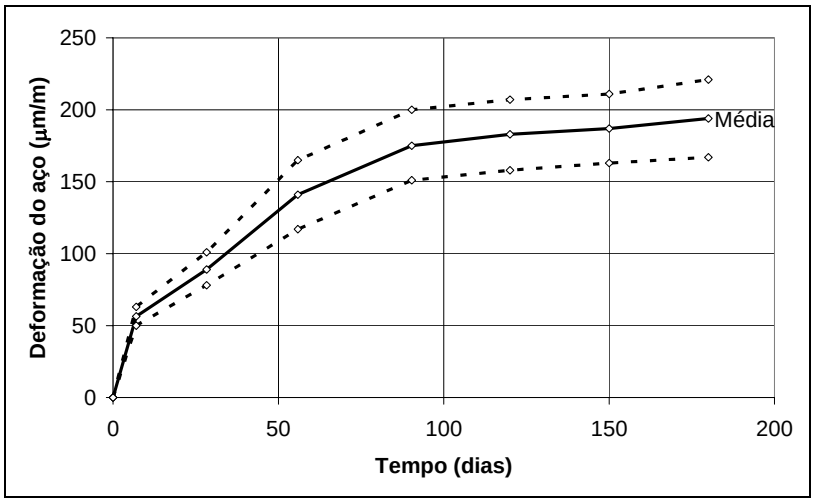


Figura 19 – Curva típica de la deformación en el anillo en los ensayos de retracción restringida de Mokarem[82]. Las líenas intermitentes representan el intervalo de confianza de la media para 95% de significância.

[82] MOKAREM, DW. **Development of concrete shrinkage performance specifications**. Instituto Politécnico e Universidade do Estado de Virginia, Blacksburg, Virginia, 2002 pp236 Tese (doutorado).

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 AASHTO[83] (American Association of State Highway and Trasnportation 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 Tabla 9 es presaentado un levantamiento de distintas dimensiones de esta probeta que han sido utilizadas a través de los años.

Tabla 9 – Levantamiento de distintas dimensiones utilizadas en el ensayo del anillo para evaluación de la tendencia a fisuración de concretos y morteros.

Pesquisadores	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 y Weiss, 2004	300	150	75	3,1 9,5 19,0	Anillo no queda adherido a la base metálica
Grullón, 2004	300	40	70	3,1	Anillo queda adherido a la base metálica

El Ministerio de Transportes de Alemania ha utilizado una probeta lineal para la evaluación de la fisuración de materiales destinados al reparo de concreto en puentes

[83] 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.

y elevados[84]; este ensayo tiene como inconveniente el no proporcionar una restricción adecuada[8]. Después de 90 días se determina el área total de fisuras, la abertura máxima y media de las fisuras y la ocurrencia de separación del material a la base. En la Figura 20 se ilustran las dimensiones de esta probeta.

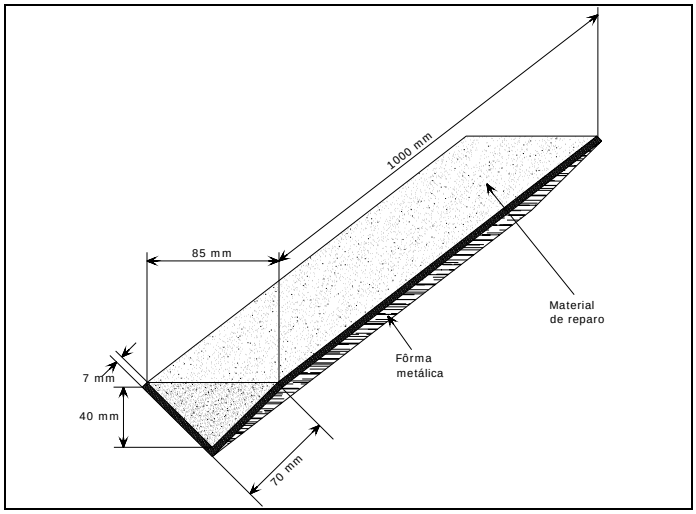


Figura 20 – Método de ensayo utilizado por el Ministerio de Transportes de Alemania para evaluación de la fisuración.

En la primera fase de la investigación para materiales de reparo patrocianada por la US Army[71], fue desarrollado un nuevo método de ensayo para la evaluación de la retracción restringida. El mismo presentó resultados coherentes con el desempeño en campo de los reparos[8]. Fue nombrado como "SPS Test Plate", siendo SPS el nombre de la empresa que condujo la investigación. Consiste en una viga moldada sobre una placa metálica fina poseyendo una camada de epóxi con un poco de arena para optimizar la adherencia. Se mide la flecha vertical en el extremo de la probeta que no se encuentra restringida. La Figura 21 muestra las particularidades del ensayo.

[84] GERMAN FEDERAL MINISTRY OF TRANSPORT, HIGHWAY CONSTRUCTION DEPARTMENT, **Technical test regulations for concrete substitution systems made of cement mortar/concrete with a plastic additive** (PCC), TP BE-PCC, 1990.

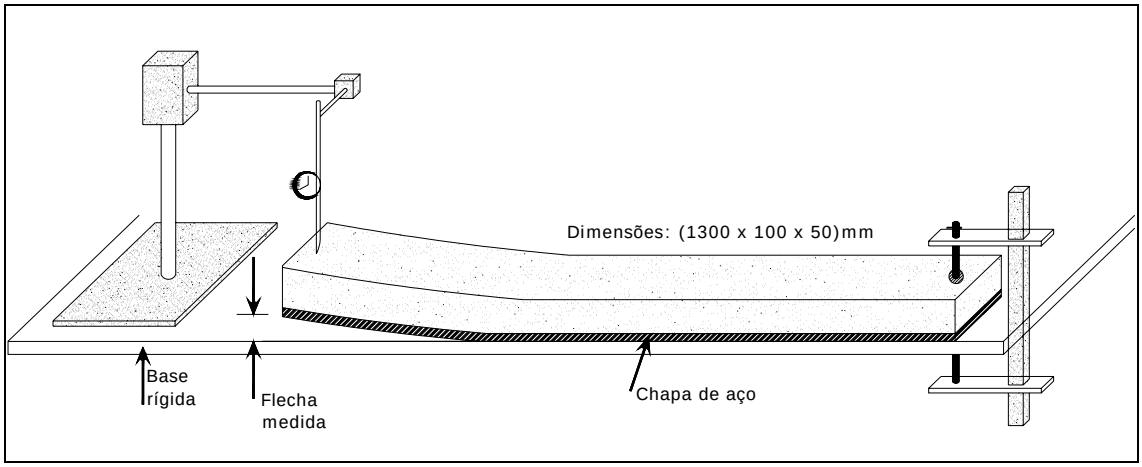


Figura 21 – Placa de ensayo SPS para evaluación de la retracción restringida.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 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, pasibles 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.

4.2 Variables del estudio

4.2.1 Parámetros fijos:

- 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 el Anexo A;
- Cura: Después del moldado, las probetas fueron cubiertas con un plástico y llevadas a un cuarto climatizado con UR≥95% y 23±2°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±4% y 23±2°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-99[85];
- Consistencia: El intervalo de consistencia fijado, medido por el diámetro de abertura fue fijado en 200±15 mm.

4.2.2 Variables independientes.

Son las variables que fueron fijadas con el objetivo de observar la influencia de estas en la fisuración de los morteros:

- Morteros Industrializados – tres morteros de fabricantes y formulaciones distintas, todos de un mismo intervalo de consistencia;
- Morteros Dosados en el Laboratorio – Família 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.

4.2.3 Varibles dependientes

Son las variables que reflejan la variación de las independientes para las propiedades relativas a fisuración que fueron medidas:

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

4.2.4 Variables intervenientes.

Son aquellas que fueron medidas por poder tener algún efecto sobre las variables dependientes, de cualquier forma, no fueron consideradas por creerse que su influencia no sea relevante para las conclusiones de esta investigación. Estas fueron:

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

[85] 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.

4.3 Materiales Empleados

4.3.1 Cemento

El cemento escogido para la investigación fue el CPV-ARI fabricado por el grupo HOLCIM y definido por la norma NBR 5733/91. Presenta como ventajas la mayor facilidad de desmolde en edades iniciales, y una alta tasa de retracción en relación a otros cementos, lo que posibilita el análisis de los resultados inclusive en edades no muy avanzadas. En la Tabla 10 y en la Tabla 11 estás presentadas la caracterización química y física del cemento usado.

Tabla 10 – Caracterización química del cemento utilizado en la investigación.

Ensayos		Métodos de ensayo	Resultados (% en peso)
Pérdida al fuego (ignición)	(PF)	NBR NM 18/04	**2,82**
Dióxido de silicio total	(SiO_2)	NBR NM 11-2/04	**19,02**
Óxido de aluminio	(Al_2O_3)	NBR NM 11-2/04	**4,76**
Óxido de hierro	(Fe_2O_3)	NBR NM 11-2/04	**2,68**
Óxido de calcio total	(CaO)	NBR NM 11-2/04	**65,89**
Óxido de magnesio	(MgO)	NBR NM 11-2/04	**0,42**
Anhídrido sulfúrico	(SO_3)	NBR NM 16/04	**2,78**
Óxido de sodio	(Na_2O)	NBR NM 17/04	**0,01**
Óxido de potasio	(K_2O)	NBR NM 17/04	**0,72**
Anhídrido carbónico	(CO_2)	NBR NM 20/04	**1,80**
Residuo insoluble	(RI)	NBR NM 15/04	**0,47**
Óxido de calcio libre	(CaOl)	NBR NM 13/04	**1,06**
Equivalente alcalino en Na_2O (0,658 x K_2O% + Na_2O%)			**0,48**

Tabla 11 – Caracterización física del cemento utilizado en la investigación.

Ensayos					Método de ensayo	Resultados
Finura – residuo en el tamiz de 75∝m (%)					NBR 11579/91	**0,4**
Masa específica (g/cm^3)[a]					NBR NM 23/01	**3,10**
Área específica (cm^2/g)[a]					NBR NM 76/98	**4.600**[b]
Agua de la pasta de consistencia normal (%)					NBR NM 43/03	**28,0**
Inicio de pega (h:min)					NBR NM 65/03	**03:10**
Fin de pega (h:min)					NBR NM 65/03	**04:15**
Expansibilidad de Le Chatelier – a caliente (mm)					NBR 11582/91	**1,0**
Resistencia a compressión (MPa) - (NBR 7215/96)						
Edad (días)	Probeta nº				Valor medio	Desvío relativo máximo (%)
	1	2	3	4		
3	43,0	43,6	43,6	43,7	**43,5**	1,1
7	48,1	47,8	48,3	49,93	**48,5**	2,9
28	58,6	58,4	58,7	59,9	**58,9**	1,7

a. Ensayo realizado a temperatura de (23±2)ºC
b. 460 m2/kg

4.3.2 Arena

Fue utilizada una arena natural de origen fluvial proveniente de la región de São José dos Campo, comúnmente encontrada en el estado de São Paulo y ampliamente usada en la confección de concretos y morteros.

En la Figura 22 se presenta la composición granulométrica de la arena usada en la investigación, determinada mediante la norma ASTM C136 – 96a. El módulo de finura fue de 1,95, por tanto se trata de una arena fina.

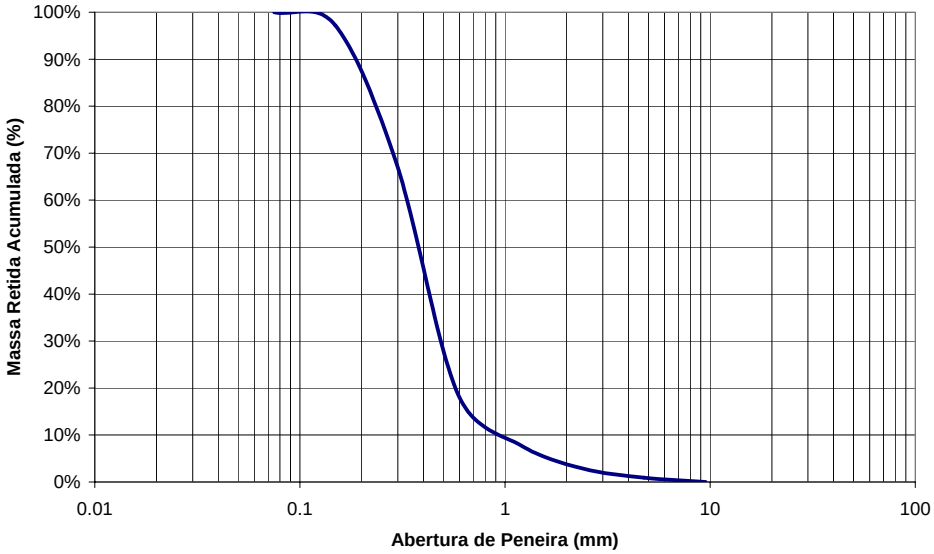


Figura 22 – Composición granulométrica de la arena utilizada en los morteros preparados en el laboratorio.

4.3.3 Aditivo superplastificante

Fue utilizado un aditivo de base naftaleno-sulfonado donado por la Grace Brasil, de nombre comercial Daracem 190. La cantidad recomendada por el fabricante varía de 0,8% a 2% en relación al peso del cemento. La función principal del aditivo fue la de reducir la cantidad de agua para una consistencia determinada, mejorando de esta forma la calidad de la pasta. Otro efecto benéfico del aditivo fue el de aumentar la cohesión de los morteros.

4.3.3.1 Contenido de saturación

El uso de cantidades de aditivos exageradas, puede causar la exudación de los componentes de la mezcla y la incorporación indeseada de aire[86]. Se buscó cual sería el contenido óptimo de aditivo, determinado por el grado de saturación, el cual consiste en la cantidad de aditivo a partir de la cual no ha una mejoría significativa en la plasticidad o reducción de la cantidad de agua para una consistencia determinada[87]. Con todo, el grado de saturación no debe ser usado de forma aislada, debiendo llevarse siempre en cuenta la exudación y la incorporación de aire de la mezcla. El método de ensayo empleado fue el mini-abatimiento, siempre considerando las limitaciones de este método de ensayo reportadas por Hartmann[87] cuando en el caso de pastas muy fluidas. En la Figura 23 se presenta la medida del diámetro de abertura de la pasta en este ensayo.

Figura 23 – Ejecución del ensayo de mini-abatimiento para la determinación del grado de saturación del aditivo superplastificante.

[86] MONTE, R. **Avaliação de metodologias de ensaio destinadas à verificação da eficiência de aditivos superplastificantes em pastas de cimento Portland**. São Paulo, 2003. 102p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica Universidade de São Paulo.
[87] HARTMANN, C. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland**. São Paulo, 2002. 210p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica Universidade de São Paulo.

La Figura 24 muestra el resultado de la determinación del grado de saturación del aditivo. Fueron hechas 6 mezclas de pasta con contenidos de aditivo variando desde 1,2% hasta 2,6%. El contenido de 1,6% se mostró como el óptimo para la combinación aditivo-cemento usada en la pesquisa. A partir del teor de 1,6% se puede notar una cierta reducción en la eficiencia del aditivo (medida por el diámetro de abertura de la pasta de cemento). Además, contenidos mayores de aditivos presentaron tendencia de segregación de los componentes de la pasta e incorporación de aire.

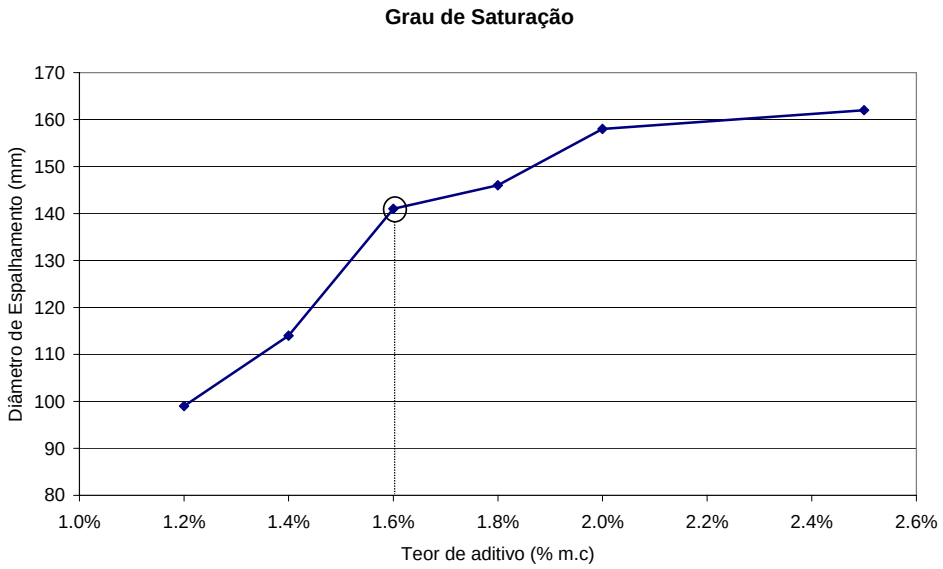


Figura 24 –Diâmetro de abertura de la pasta de cemento con varios contenidos de aditivo.

4.3.4 Polímero

Fue utilizado un copolímero de butilacrilato-estireno proporcionado por la BASF de nombre comercial Acronal 303D, especialmente formulado para el uso en morteros y concretos a base de cemento Portland.

Tabla 12 – Caracterización del polímero. (suplida por el fabricante)

Sólidos (%)	50,0±1,0
pH	4,5-6,5
Temperatura mínima de formación de filme (ºC)	≈20
Tamaño medio de partículas (μm)	≈0,1
Densidad (g/cm3)	1,02

El contenido utilizado fue de 5% de sólidos en relación al peso del cemento. El agua contenida en el polímero fue descontada del agua de amasado. Este contenido de 5% fue escogido con auxilio de un programa experimental preliminar que se encuentra en el Anexo A.

4.3.5 Morteros industrializados

Fueron empleados tres morteros industrializados de nombres comerciales Sikatop 122 de la Sika, Emaco S88tb de la MBT y DenverTec 700 de la Denver Global. Fueron identificados arbitrariamente con los nombres AI-1, AI-2 y AI-3, sin relación alguna con el orden mencionado arriba.

Las relaciones líquido/material seco de cada uno de estos morteros se encuentra en la Tabla 13.

Tabla 13 – Caracterización básica de los morteros industrializados utilizados en la pesquisa.

Mortero	Relación líquido/material seco (kg/kg)	Densidad (kg/dm^3)
AI-1	0,149 (componente A/componente B)	2,19
AI-2	0,105 (água/material seco)	2,25
AI-3	0,151 (componente A/componente B)	2,14

4.4 Dosificación de los morteros preparados en el laboratorio

La composición de los morteros preparados en el laboratório fue determinada utilizando el método de dosificación propuesto por Helene y Terzian[88], variando la proporción cemento:arena de modo a tener una familia de morteros de una misma consistencia, pero de relaciones a/c distintas. En la Tabla 14 es presentada la caracterización de la familia de concretos estudiada.

Tabla 14 – Caracterización de la familia de morteros estudiada.

Cemento: Arena	Proporción unitaria					H(%)	Densidad (kg/dm^3	Aire (%)	Volumen de pasta (l/m^3)	$C_{cimento}$ (kg/m^3
	cemento	arena	agua	polímero	aditivo					
1:1,0	1,00	1,00	0,21	0,05	0,016	11,0	2,21	4,9	612,2	1022,7
1:1,5	1,00	1,50	0,24	0,05	0,016	10,0	2,24	4,5	524,7	834,8
1:2,2	1,00	2,20	0,30	0,05	0,016	9,7	2,23	4,7	451,8	656,1
1:3,0	1,00	3,00	0,37	0,05	0,016	9,5	2,21	5,5	399,6	526,8

[88] HELENE, P; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle de concreto**. São Paulo, Ed PINI, 1993. 233p.

4.5 Ensayos de caracterización

4.5.1 Consistencia

Es considerada una propiedad muy importante de los morteros de reparo. Estos deben ser lo suficientemente secos para que puedan ser aplicados a mano, posibilitando de esta forma que sean auto-portantes, garantizando así su aplicación en reparos en posición vertical. Fue determinada según las directrizes de la norma ASTM C109/C109M-99[85].

Figura 25 – Determinación de la consistencia de los morteros a través del uso de la mesa de consistencia.

En la Figura 26 se presentan los resultados de consistencia de los morteros, medidos por el diámetro de abertura en la mesa de consistencia. El intervalo de consistencia escogido fue de 200±15 mm.

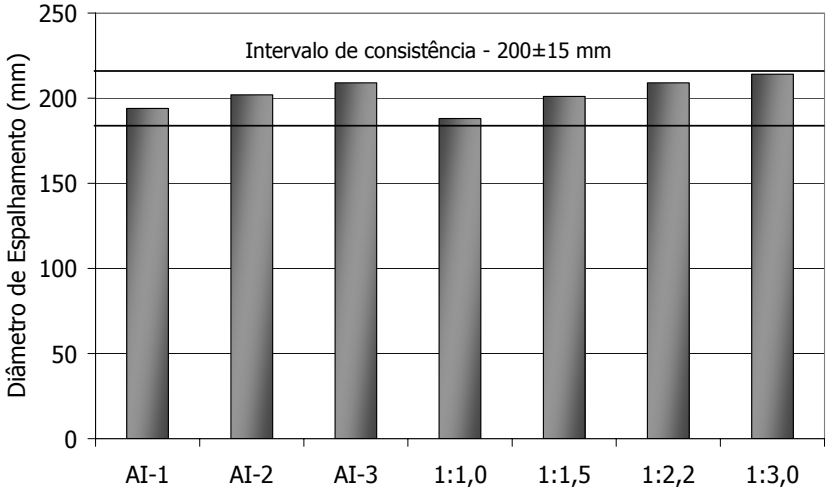


Figura 26 – Resultados da consistencia de los morteros estudiados medidos en la mesa de fluidez ("flow table").

La consistencia medida por el diámetro de abertura no es por sí sólo una garantía de que el mortero será adecuado para la aplicación deseada. En este estudio, a pesar de que todos los morteros atienden a un intervalo estrecho de consistencia (200±15mm), esta equivalencia no fue verificada en la práctica pues el mortero de proporción 1:3,0 no se mostró como adecuado para la aplicación en reparos debido al mismo poseer una tixotropía inadecuada.

4.5.2 Resistencia a Compresión

La resistencia a compresión tradicionalmente ha sido la propiedad más comúnmente reportada para concretos y morteros, debido a su facilidad de obtención y al gran número de características del concreto que se relacionan a la misma[89]. Por la necesidad de la resistencia a compresión para la determinación del módulo de elasticidad, estos ensayos fueron realizados en las mismas idades.

El ensayo fue hecho conforme la ASTM C349-97[90], usando las mitades de las probetas ensayadas a tracción por flexión, delimitando estas mitadas en formato de cubos de arista igual a 4 cm por medio de placas de acero. La Figura 27 ilustra la determinación de la resistencia a compresión de los morteros evaluados.

---

[89] NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. Londres. SIR ISAAC PITMAN & SONS LTD. 1968. 532p.
[90] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure). ASTM C349-97. Philadelphia, USA, 1997.

Se cree que la diferencia entre la resistencia obtenida en estos cubos no sea muy distinta de aquella correspondiente a un cilindro de relación h/d igual a 2, tradicionalmente utilizado en Brasil. El trabajo de Kesler y el de Evans, apud Coutinho[91] en ensayos de compresión de concretos, demuestran que mientras mayor sea la resistencia del concreto menor es la diferencia entre la resistencia obtenida a través del ensayo de cubos y cilindros.

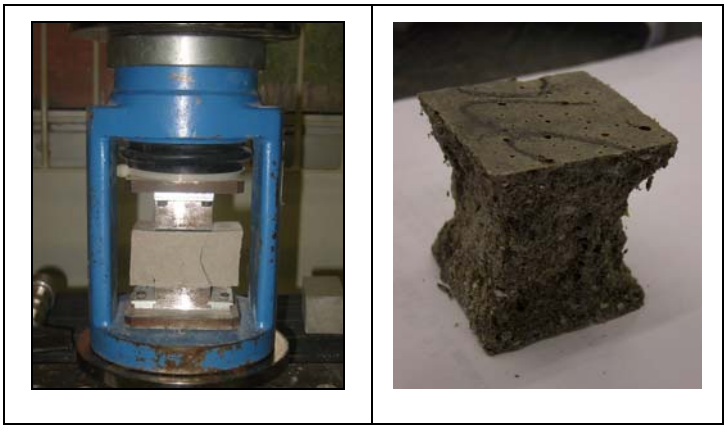


Figura 27 – Ilustración de la determinación de la resistencia a compresión y ruptura característica.

En la Figura 28 son presentados los valores médios de resistencia compresión de los morteros evaluados en la investigación.

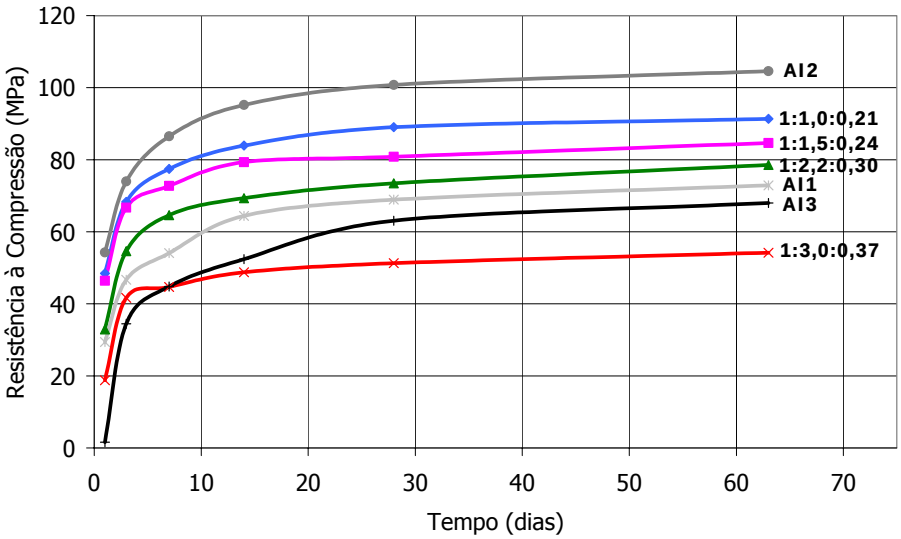


Figura 28 – Evolución de la resistencia a la compresión de los morteros evaluados.

[91] COUTINHO, AS; GONÇALVES, A. **Fabrico e propriedades do betão**. Lisboa, Laboratório Nacional de Ingeniería Civil – LNEC, 1994. Volume 3, 368p.

4.6 Ensayos relacionados a la fissuración

4.6.1 Resistencia a Tracción por Flexión

La resistencia a tracción por flexión fue medida en probetas prismáticas de dimensiones 40 x 40 x 160 mm para cada una de las edades de estudio. La norma usada fue la ASTM C348-97[92], que permite el cálculo de la tensión a través de la expresión:

$f_t = 0{,}0028 \times P$, o de una forma general $f_t = \dfrac{3Pl}{2bd^2}$

f_t – resisteência a tracción por flexión (MPa)
P – carga máxima aplicada (N)
l – luz entre los apoyos inferiores
b – ancho de la probeta
d – altura de la probeta

La Figura 29 muestra el esquema de uso de ese ensayo.

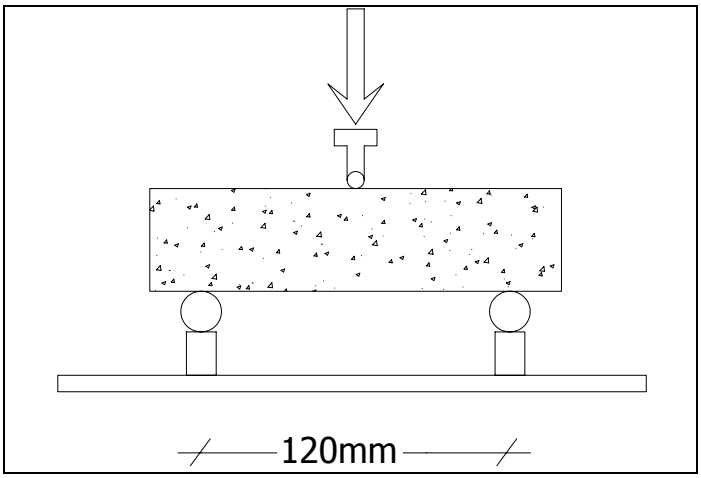


Figura 29 – Esquema de ensayo de resistencia a tracción por flexión mediante el uso de tres apoyos.

[92] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars. ASTM C348-97. Philadelphia, USA, 1997.

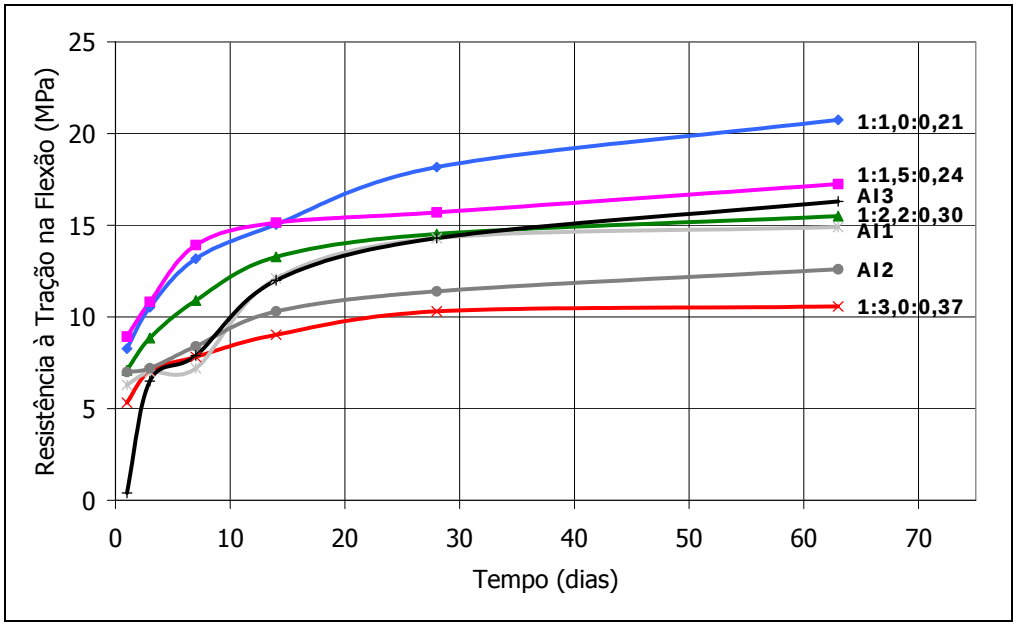


Figura 30 – Evolución de la resistência a tracción por flexión de los morteros estudiados.

4.6.2 Módulo de Elasticidad

En ausencia de una norma específica para la determinación del módulo de elasticidad para el caso de probetas utilizadas en la investigación, fueron empleados los ciclos de carga presentes en la norma NBR 7190/96[93], ya utilizado previamente por Medeiros[11] y Moreno Jr[18] y presentado en la Figura 31. La velocidad de carga usada fue la misma utilizada en la determinación de la resistencia a compresión, e igual a 1000 N/s. La carga fue echa entre 10% y 50% de la carga de ruptura.

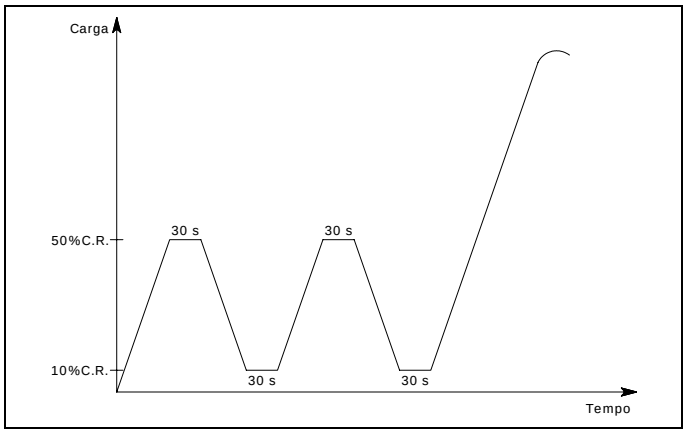


Figura 31 – Ciclo de carga utilizado en la ejecución del ensayo de módulo de elasticidad.

[93] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Projeto de estruturas de madeira. NBR 7190/96. Rio de Janeiro, 1996.

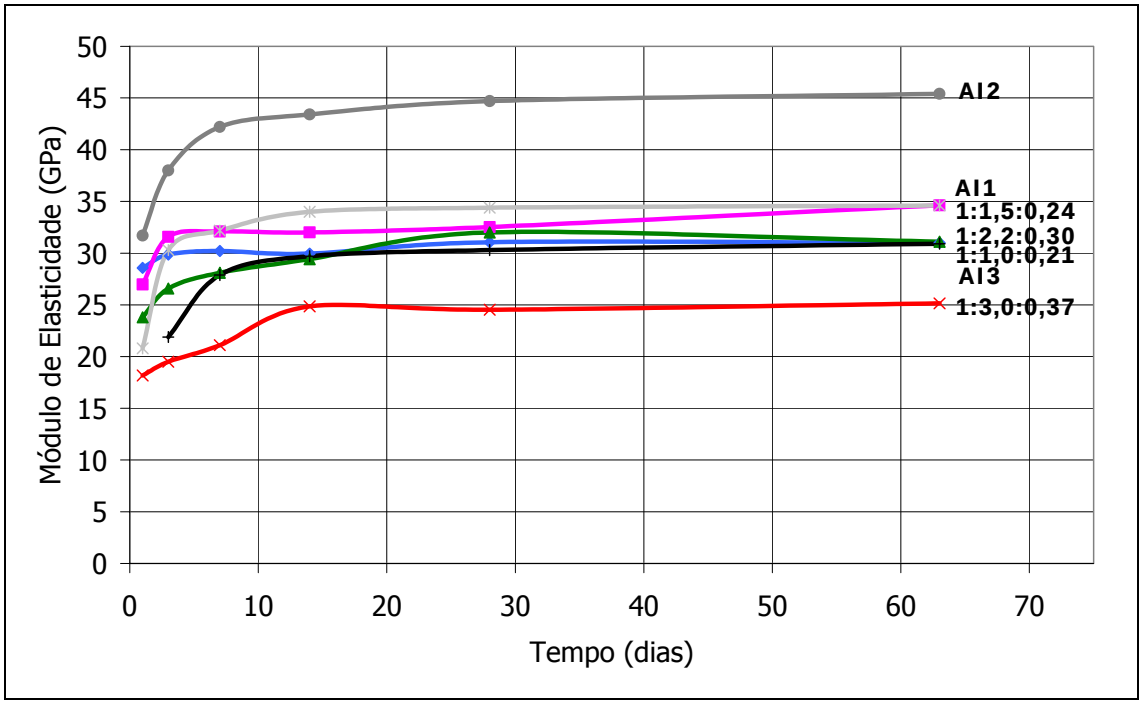


Figura 32 – Evolución del módulo de elasticidad de los morteros evaludos en la investigación.

4.6.3 Retracción Libre

El ensayo de retracción libre evalúa el potencial de variación dimensional del material, excluyendo causas como variaciones de temperatura y existencia de tensiones debido a la restricción. El ensayo fue echo conforme la norma ASTM C157-99[94] que utiliza probetas de 25 x 25 x 285 mm, en ambiente controlado con temperatura de 23°C ±2°C y humedades de 50% ±4%, con lectura inicial 24 horas después del moldado. Transcurridas estas 24 horas las probetas fueron mantenidas en la cámara seca, al contrario de lo prescrito por la norma, siguiendo la modificación de la ASTM C157 hecha por el ICRI[95]. La Figura 33 ilustra la realización de ese ensayo.

[94] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for length change of hydraulic-cement mortar and concrete. ASTM C157/C 157/M-99. Philadelphia, USA, 1999.
[95] INTERNATIONAL CONCRETE REPAIR INSTITUTE. Guide for selecting and specifying materials for repair of concrete surfaces. ICRI No. 03733. Farmington Hills, Mi, 2004.

Figura 33 – Ejecución del ensayo de retracción libre.

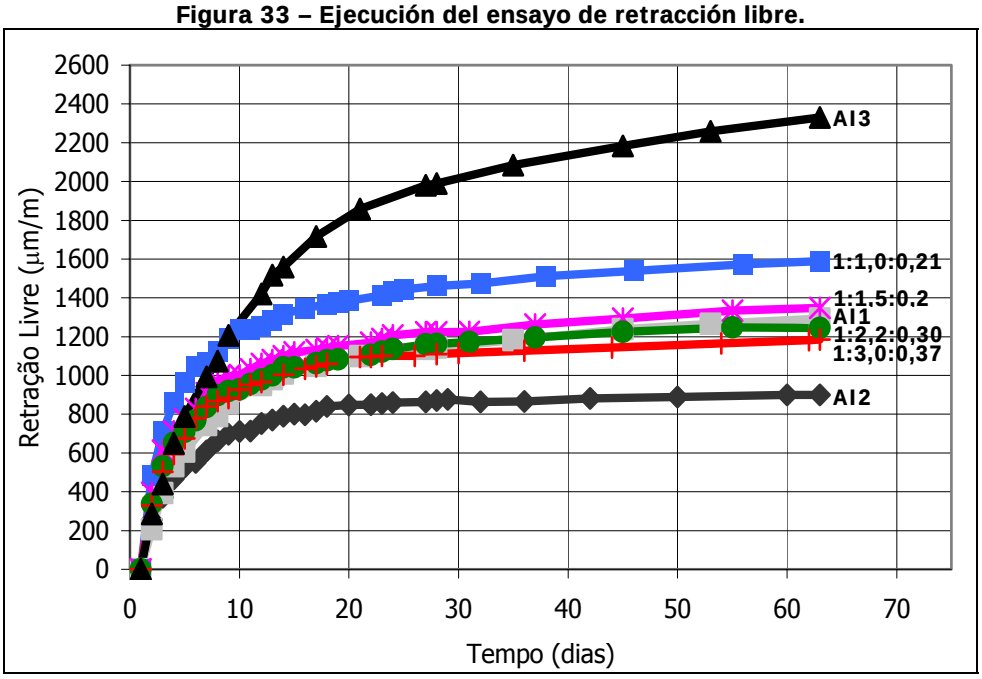


Figura 34 – Retracción libre de los morteros evaluados.

4.6.4 Retracción Restringida

El método de ensayo utilizado fue el ensayo del anillo debido a su gran simplicidad y versatilidad[96]. Consiste en una probeta circular restringida a deformación por un anillo metálico conforme mostrado en la Figura 35.

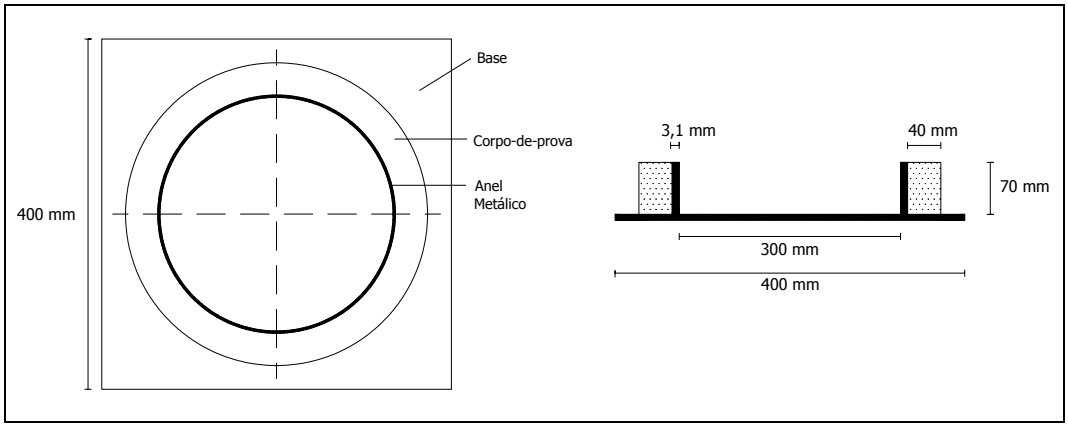


Figura 35 – Dimensiones de los anillos del ensayo de retracción restringida.

Todas los moldes utilizados fueron cubiertos con teflon de modo a garantizar que la restricción sea causada únicamente por el anillo interno de acero, evitando cualquier posible interferencia por parte de la adherencia acero/mortero. La Figura 36 muestra uno de los moldes cubiertos con teflon antes del moldado.

Figura 36 – Detalle del molde después de la aplicación del filme de teflon.

[96] HOSSAIN, A; PEASE, B; WEISS, J. **Quantifying early-age stress Development and Cracking in Low w/c Concrete Using the Restrained Ring Test with Acoustic Emission**. Submitted to the Transportation Research Board for possible presentation and publication.

En la Tabla 15 están presentados los resultados de edad de fisuración y abertura de fisura en el ensayo de retracción restringida. Tres de los morteros evaluados no figuraron en el período de 63 días utilizado para el análisis de tendencia a fisuración de este trabajo. En la Figura 37 se presenta una secuencia fotográfica de los morteros que fisuraron en la investigación. La abertura de las fisuras fue medida en como máximo, 24 horas después de la edad exacta de fisuración.

Tabla 15 – Edad de fissuración y abertura de fisura en el ensayo de retracción restringida.

Mortero	AI1		AI2		AI3		1:1,0		1:1,5		1:2,2		1:3,0	
Edad de aparecimento fisura (dias)	19	19	-	-	7	7	2,5	2,5	27	21	-	-	-	-
Abertura media de fisura (mm)	0,4	0,7	-	-	0,6	0,5	1,4	1,7	0,6	0,4	-	-	-	-

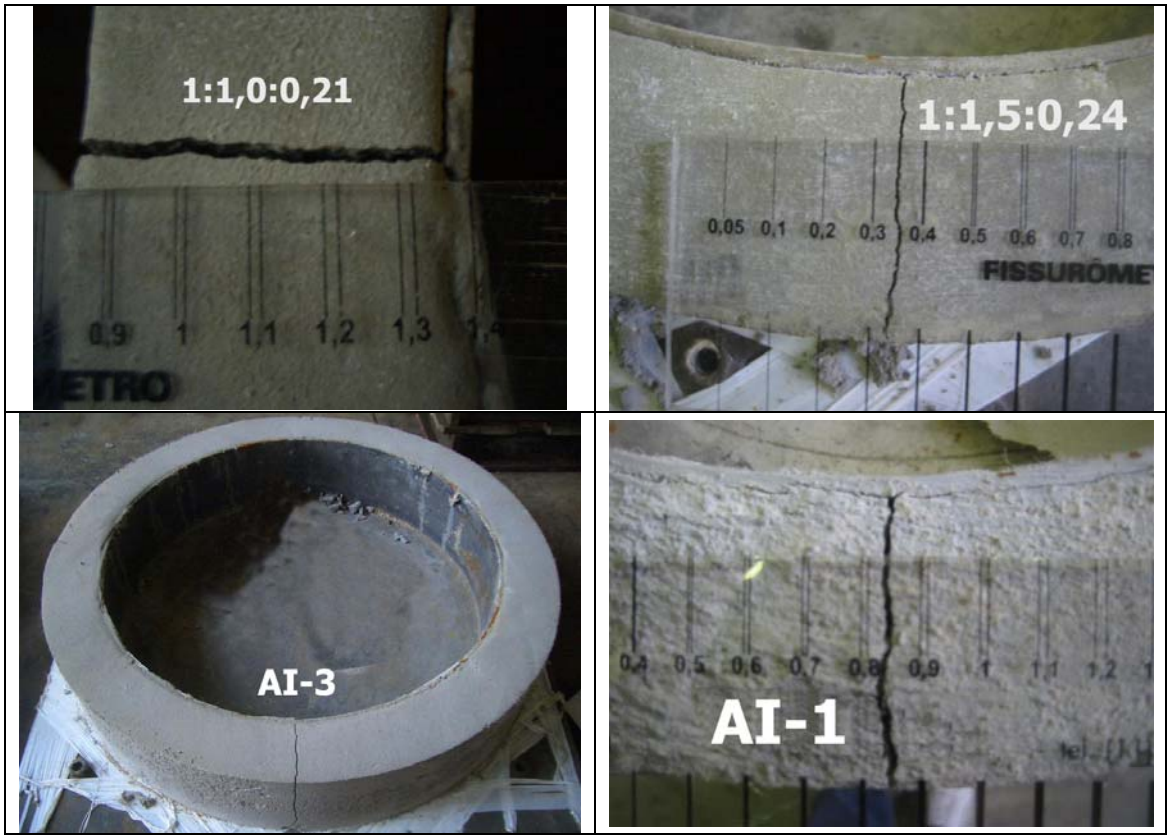


Figura 37 – Morteros que fisuraron en el ensayo de retracción restringida en el decorrer del trabajo de investigación.

5 Análisis y Discusión de los Resultados

5.1 Modelaje de la tendencia a 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 Tabla 16:

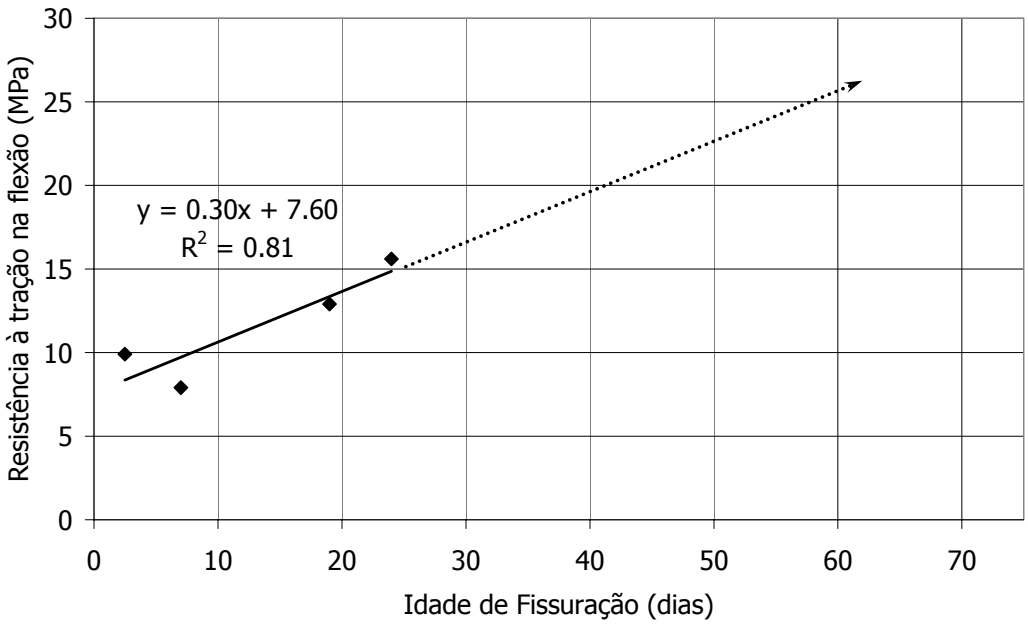
Tabla 16 – Comparación del resultado de los morteros que fisuraron según el modelo empleado con los morteros que figuraron en el programa experimental.

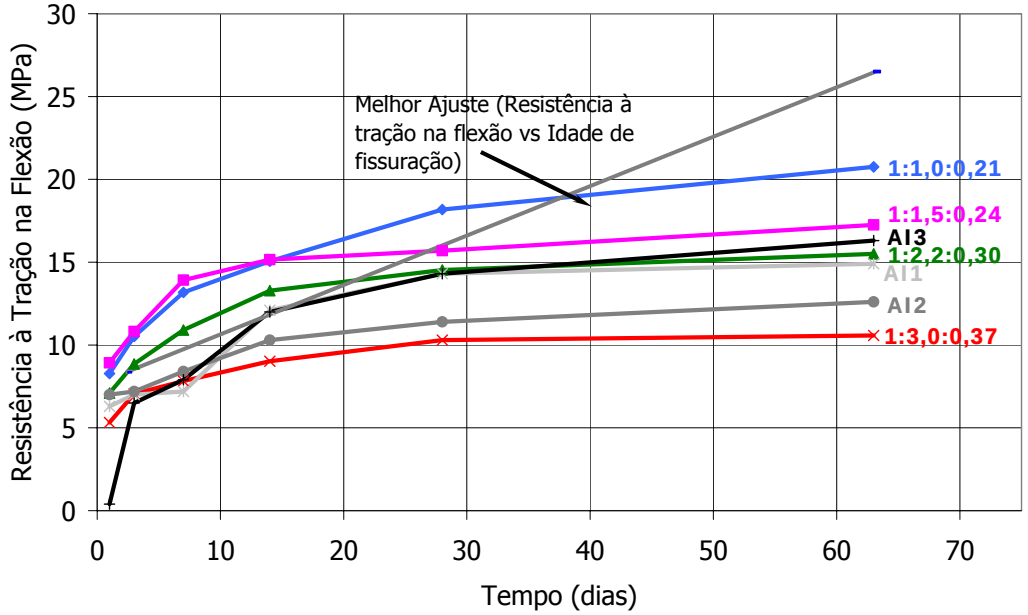
Modelo	Morteros que fisuraron según el ajuste utilizado	Morteros que fisuraron en el programa experimental
X	AI1 – AI3 – 1:1,0 – 1:1,5	AI1 – AI3 – 1:1,0 – 1:1,5

Los modelos que fueron empleados en el análisis fueron:

- f_t vs tiempo: cual es la resistencia a tracción por flexión del morero 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 lka ocasión de la fisuración.

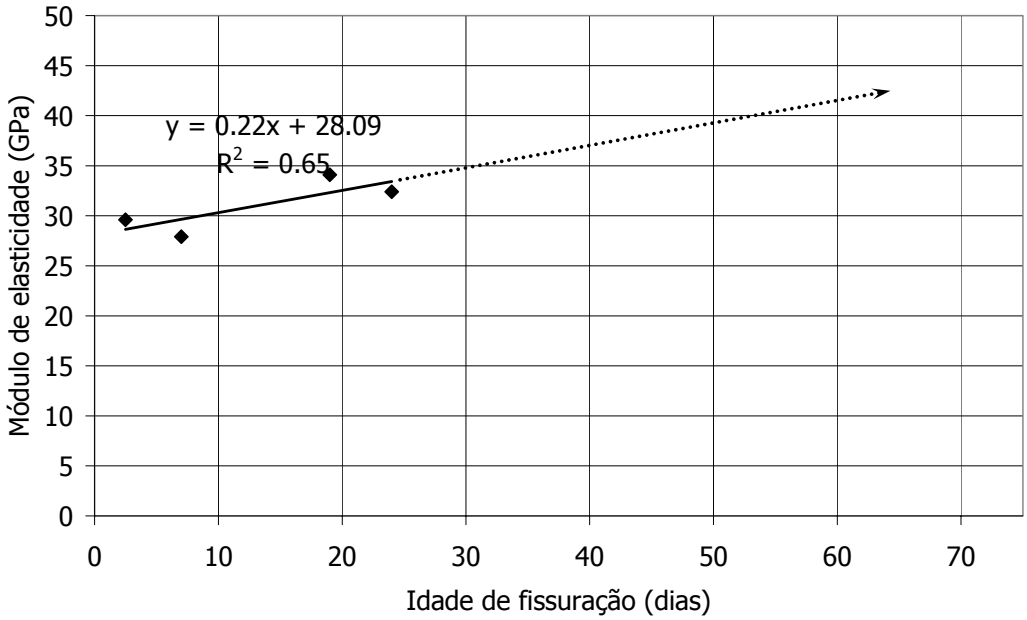
Las figuras 38 hasta la 42 muestran el resultado propiciado por cada uno de los modelos utilizados. Después de ser presentados, serán discutidos individualmente.

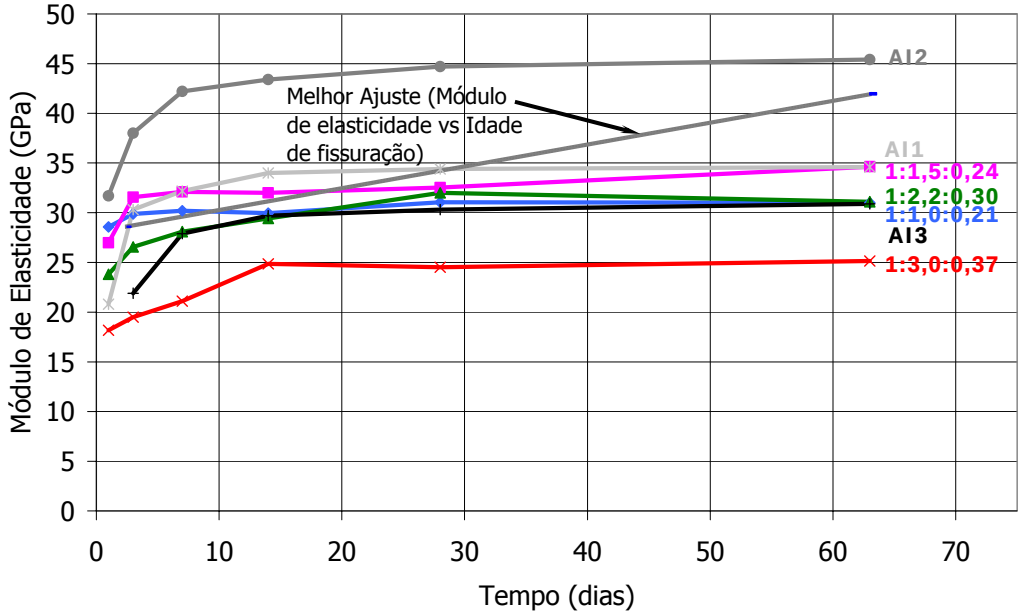




Modelo	Morteros que fisuraron según el ajuste utilizado	Morteros que fisuraron en el programa experimental
f_t vs tiempo	AI1 – AI2 – AI3 – 1:1,0 1:1,5 – 1:2,2 – 1:3,0	AI1 – AI3 – 1:1,0 – 1:1,5

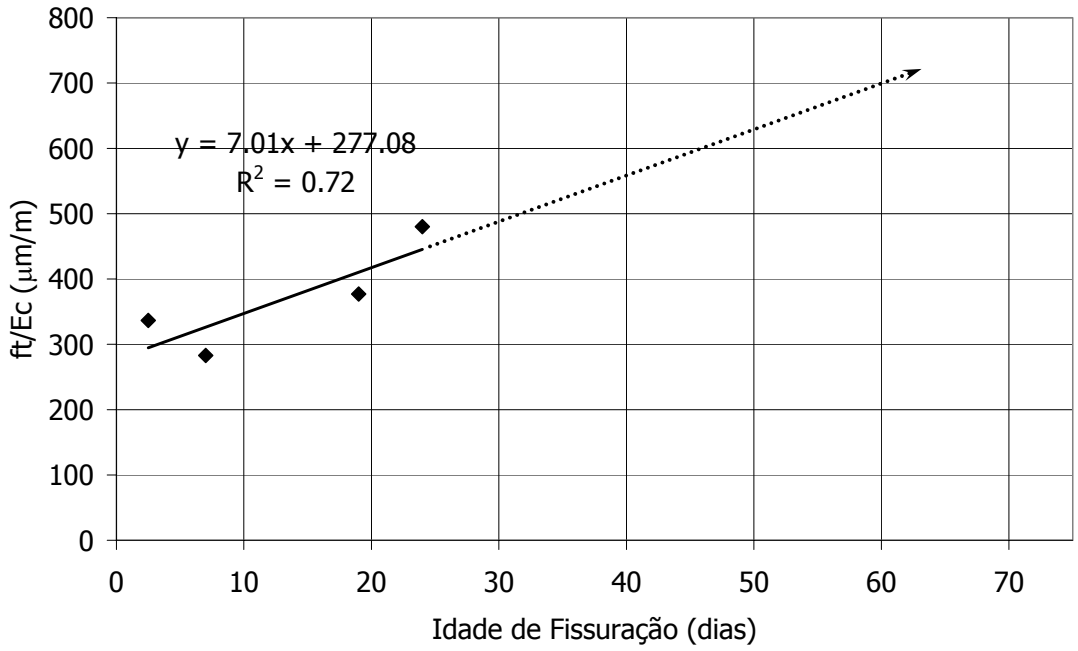
Figura 38 – Aplicación del modelo de la resistencia a tracción para la evaluación de la fisuración de los morteros estudiados.

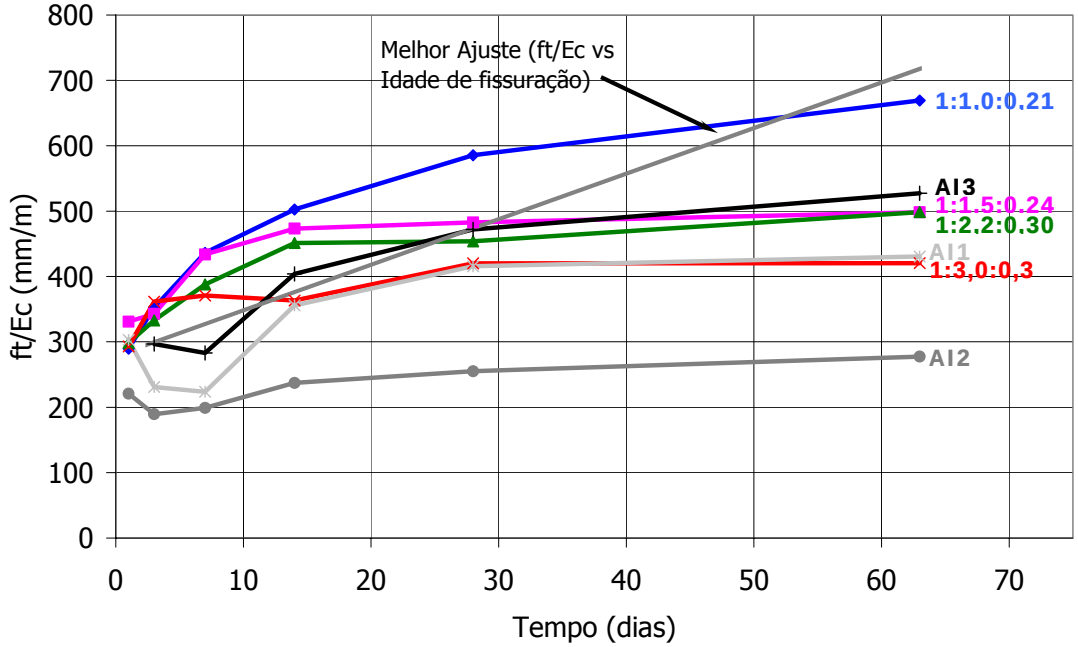




Modelo	Morteros que fisuraron según el ajuste utilizado	Morteros que fisuraron en el programa experimental
E_c vs tiempo	AI1 – AI2 – 1:1,0 – 1:1,5	AI1 – AI3 – 1:1,0 – 1:1,5

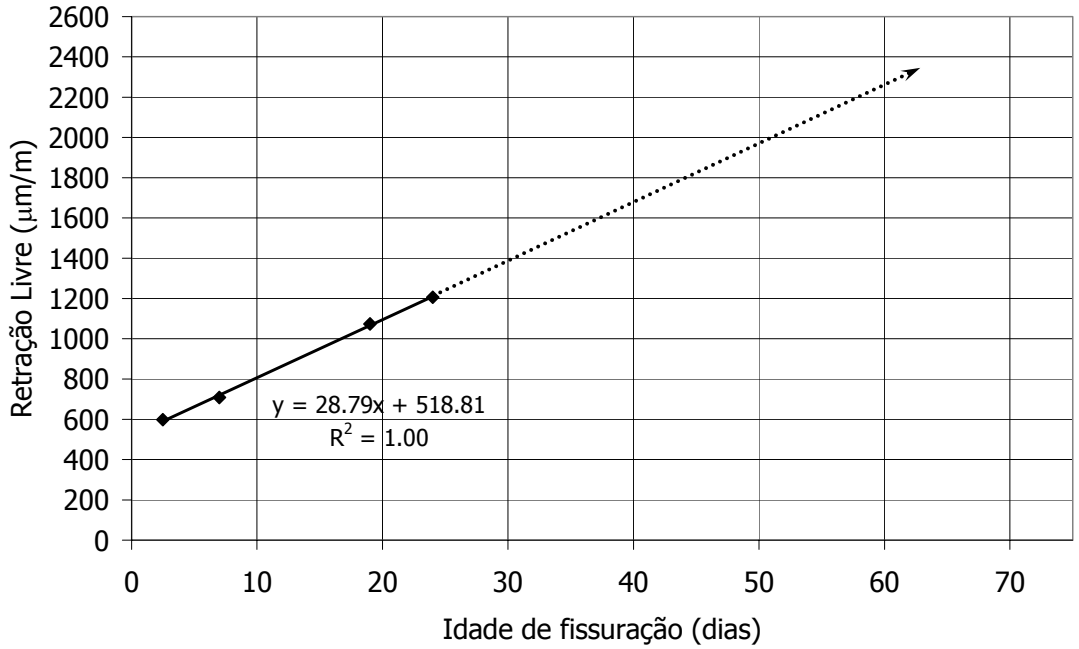
Figura 39 – Aplicación del modelo de módulo de elasticidad para la evaluación de la fisuración de los morteros estudiados.

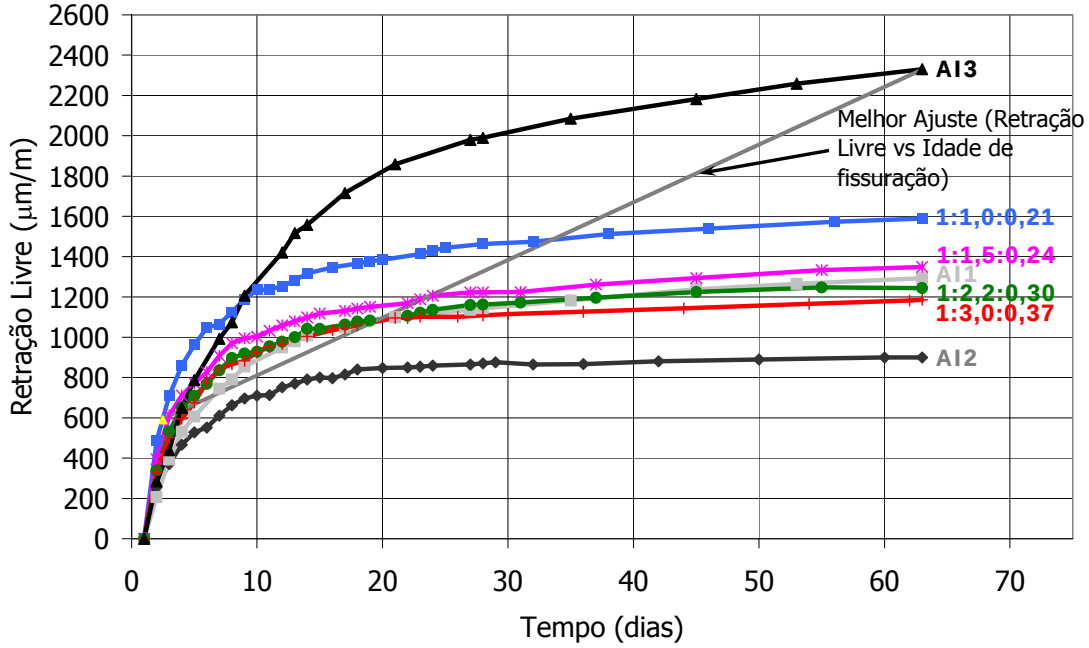




Modelo	Morteros que fisuraram según el ajuste utilizado	Morteros que fisuraron en el programa experimental
f_t/E_c vs tempo	AI1 – AI2 – AI3 – 1:1,0 1:1,5 – 1:2,2 – 1:3,0	AI1 – AI3 – 1:1,0 – 1:1,5

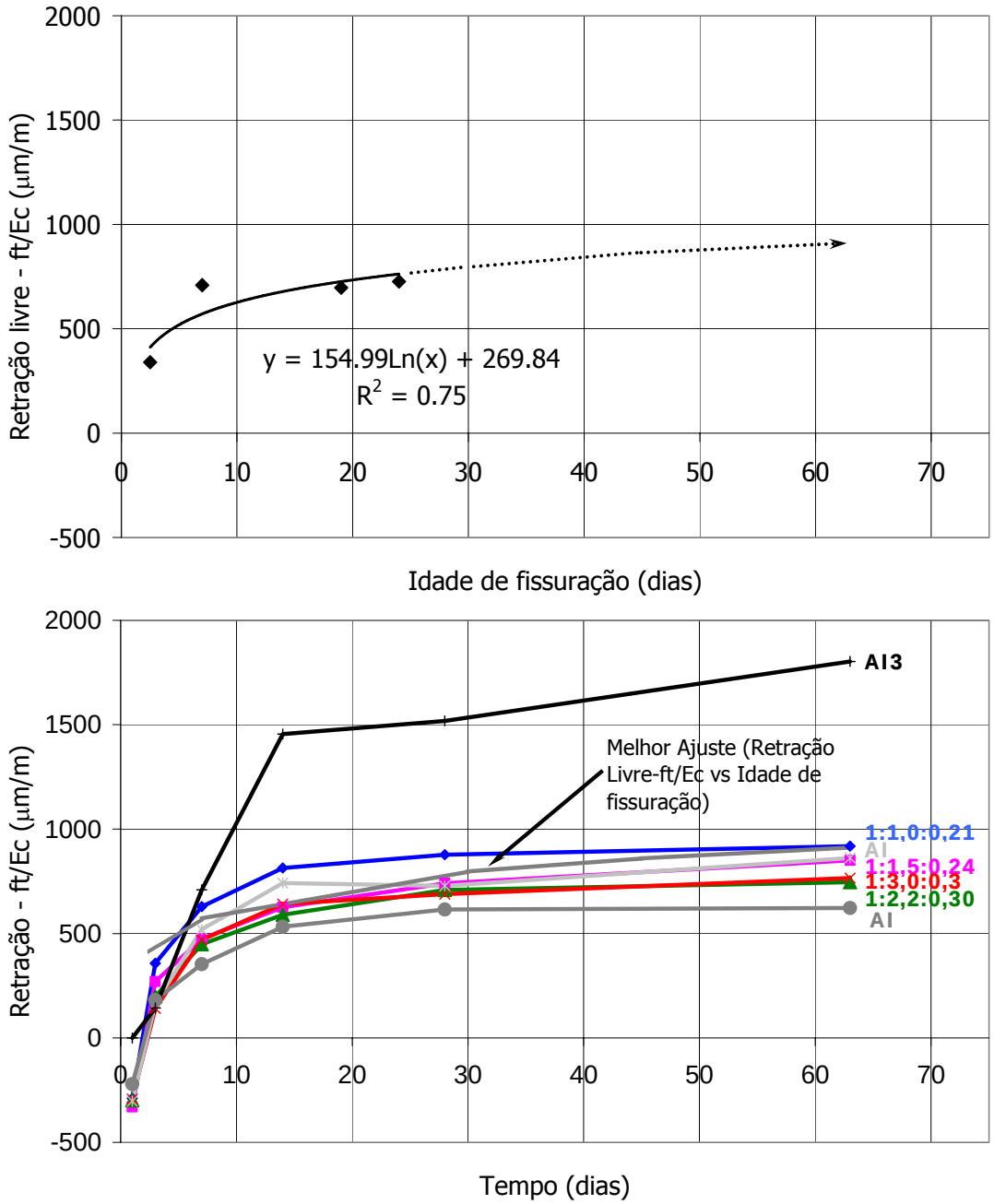
Figura 40 - Aplicación del modelo de la relación resistencia a tracción por módulo de elasticidad para la evaluación de la fisuración de los morteros estudiados.





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

Figura 41 – Aplicación del modelo de la retracción libre para la evaluación de la fisuración de los morteros estudiados.



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

Figura 42 – Aplicación del modelo de la expresión retracción libre menos la relación resistencia a tracción por módulo de elasticidad para la evaluación de la fisuración de los morteros estudiados.

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 obtenido 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 (resistência a tracción por flexión, módulo de elasticidad, retracción libre y resistência a compresión) sean función (aumentan) con el tiempo.

5.1.1 f_t vs tiempo.

En ese modelo el tipo de ajuste más apropiado fue el linear, 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.

5.1.2 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 figurarían en la pesquisa.

5.1.3 f_t/E_c vs tiempo

El coeficiente de correlación del ajuste linear hecho para ese modelo fue de 0,72. Según el mismo, los morteros AI-1 y AI-2 son los únicos que figurarían 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.

5.1.4 ε vs tiempo

El ajuste más apropiado fue el linear, que ofreción 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 fisurarí, 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.

5.1.5 $\varepsilon - f_t/E_c$ vs tiempo

El ajuste más adecuado a ese modelo fue el logarítmico, el cual propición 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 estimad 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[81], 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 43, para edades de cura variando entre 1 y 3 días, donde el aumento del período de cura puede evitar la fisuración del material.

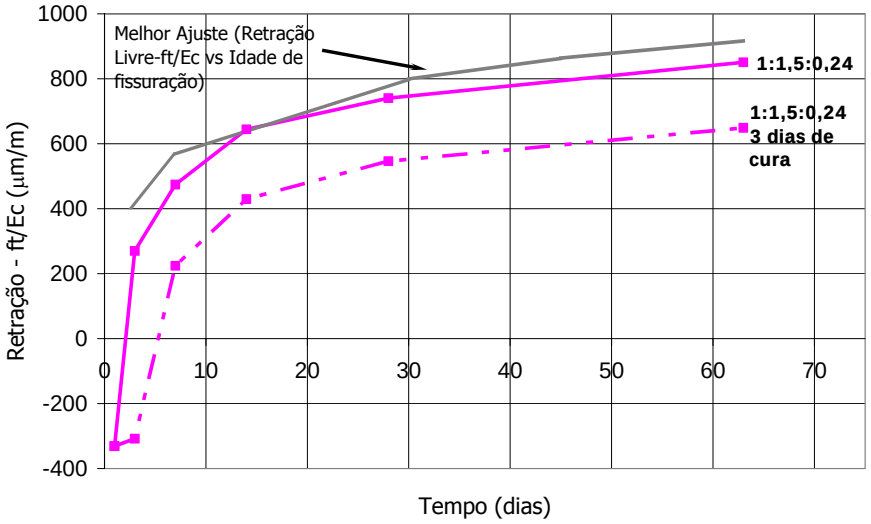


Figura 43 – Efecto del aumento del tiempo de cura en morteros cuya curva de $\varepsilon - f_t/E_c$ se encuentran próximas a la del modelo encontrado.

5.2 Parámetros de dosificación de los morteros preparados en el laboratorio buscando la disminución de la tendência a fisuración

Los morteros de reparo debem alcanzar propiedades mecánicas estructurales (resistencia a compressión, módulo de elasticidad) o de durabilidad (abosrción de

água, permeabilidad). Un estudo 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.

Los resultados medios obtenidos para la resistencia a compresión, módulo de elasticidad, resistencia a tracción por flexión, retracción libre, para la relación entre resistencia a tracción y módulo de elasticidad y para la expresión retracción libre menos la relación resistencia a tracción por módulo de elasticidad, fueron ajustados, unas vezes por el método de los mínimos cuadrados, otra por el mejor ajuste proporcionado por el programa de análisis de datos, obteniendo de esta forma los coeficientes que ofrecen el mejor ajuste. En la Tabla 17 se presentan todas las ecuaciones utilizadas en la elaboración de los diagrama de dosificación.

Tabla 17 – Ecuaciones empleadas en la ejecución de los diagramas de dosificación.

Propiedades	Ley de Comportamiento	Ecuación	Coeficientes
f_{cj} x a/c	Ley de Abrams	$f_{cj} = \frac{k_{1j}}{k_{2j}^{a/c}}$	k_{1j} e k_{2j}
m x a/c	Ley de Lyse	$m = k_3 + k_4 \cdot a/c$	k_3 e k_4
$C_{cimento}$ x m	Ley de Molinari	$C_{cimento} = \frac{1000}{k_5 + k_6 \cdot m}$	k_5 e k_6
f_{tj} x a/c	Conforme NBR6118[97]	$f_{tj} = k_{7j} \cdot k_{8j}^{\frac{-2 \cdot a/c}{3}}$	k_{7j} e k_{8j}
E_{cj} x a/c	Conforme NBR6118[97]	$E_{cj} = k_{9j} \cdot k_{10j}^{\frac{-a/c}{2}}$	k_{9j} e k_{10j}
ε_j x a/c	Mejor ajuste*	$\varepsilon_j = k_{11j} \cdot a/c^{k_{12j}}$	k_{11j} e k_{12j}
f_{tj}/E_{cj} x a/c	Melhor ajuste*	$\frac{f_{tj}}{E_{cj}} = k_{13j} \cdot \exp(k_{14j} \cdot a/c)$	k_{13j} e k_{14j}
ε_j - f_{tj}/E_{cj} x a/c	Melhor ajuste*	$\varepsilon_j - \frac{f_{tj}}{E_{cj}} = k_{15j} \cdot a/c^2 + k_{16j} \cdot a/c + k_{17j}$	k_{15j}, k_{16j} e k_{17j}

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

[97] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2003, 170p.

En la Figura 44 se presenta el diagrama de dosificación para la resistencia a compresión de los morteros estudiados.

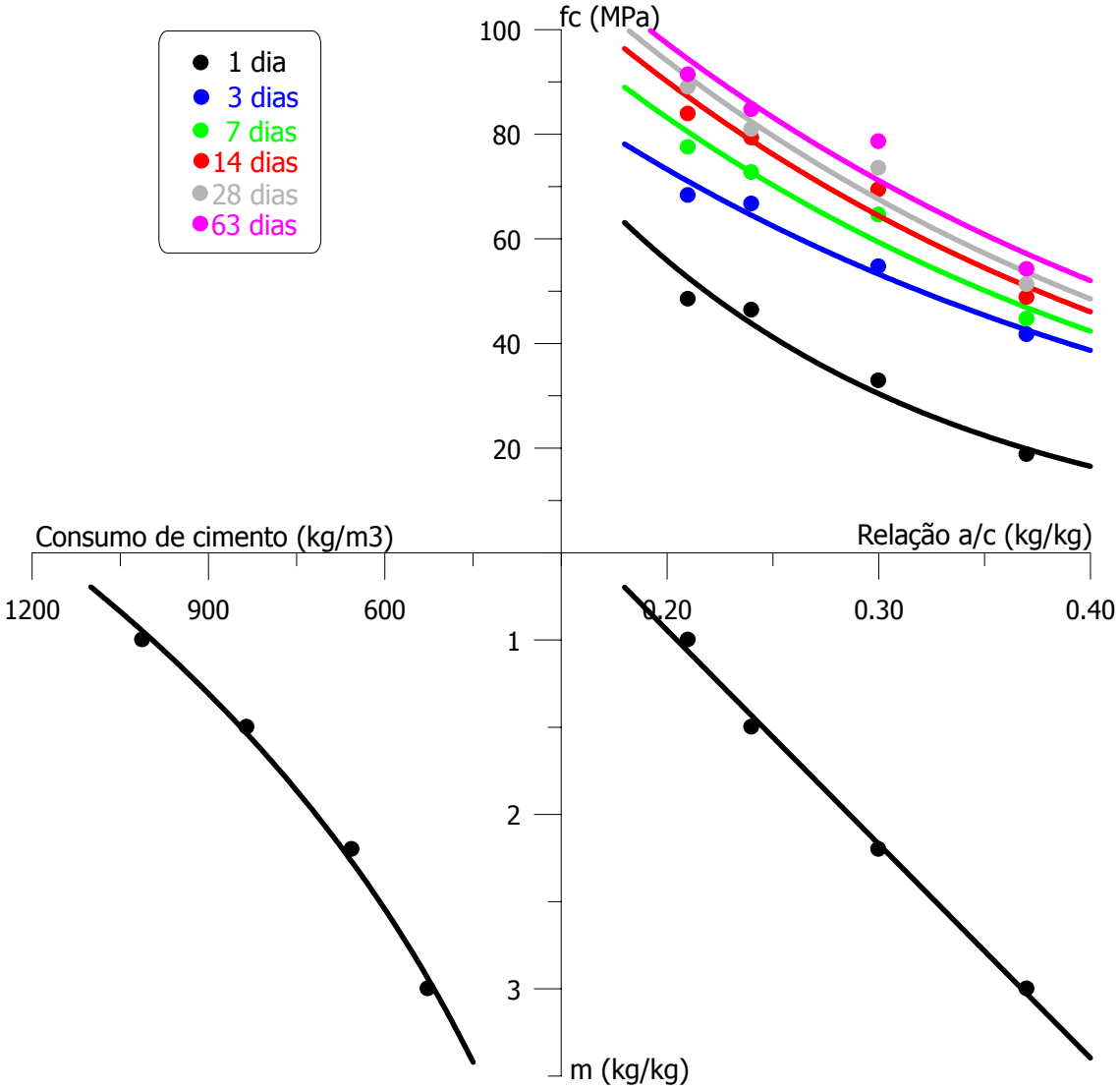


Figura 44 – Diagrama de dosificación para resistencia a compresión.

Aunque la resistencia a compresión no sea una variable importante en la fisuración por retracción, esta propiedad es comúnmente utilizada en la caracterización de morteros y concretos, debido principalmente a sua facilidad de obtención y a la gran correlación de esta con otras propiedades del concreto en el estado endurecido.

En la Figura 45 y en la Figura 46 se presentan los diagramas de dosificación para las variables resistencia a tracción por flexión y módulo de elasticidad, respectivamente.

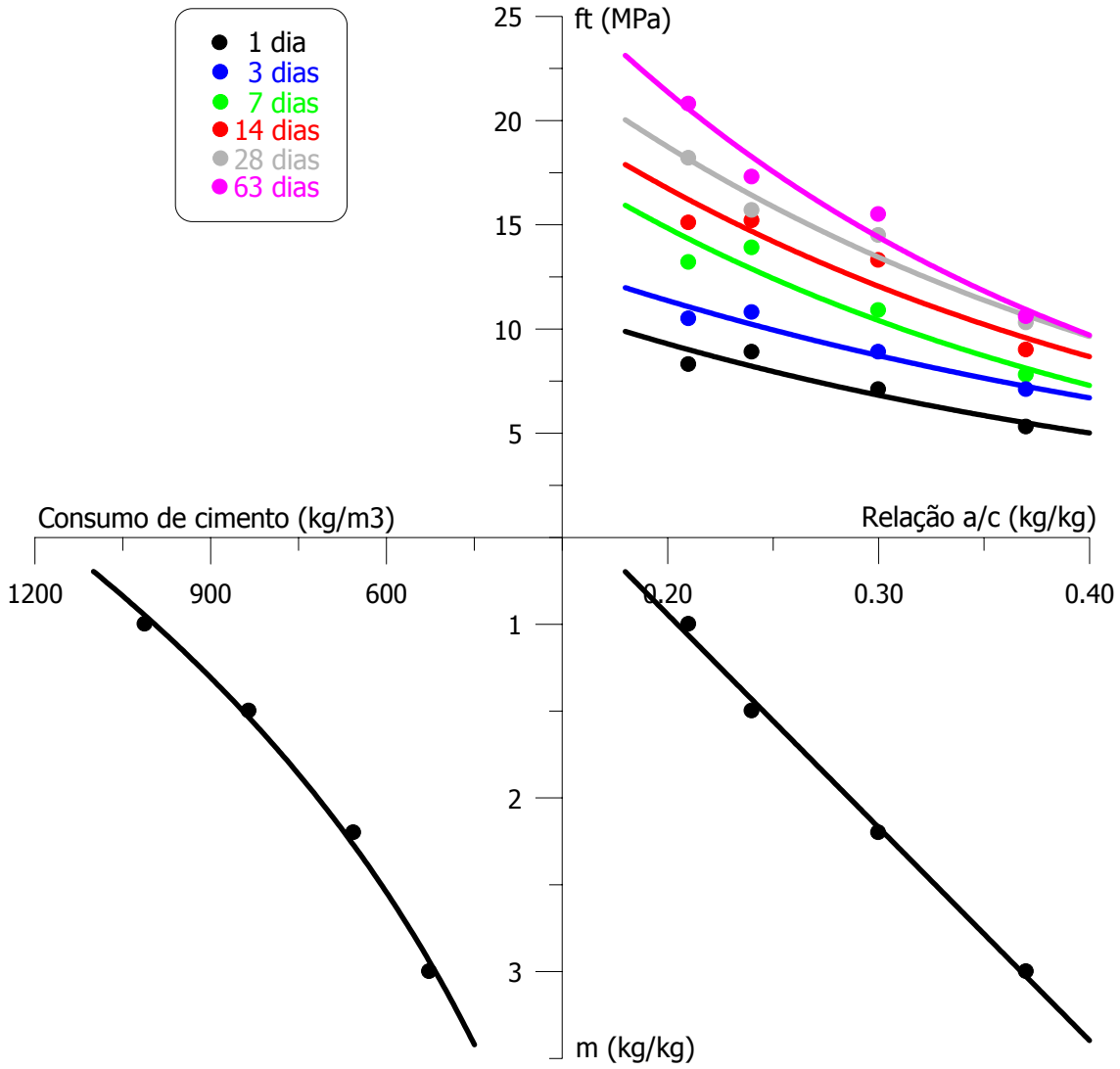


Figura 45 – Diagrama de dosificación para resistencia a tracción por flexión.

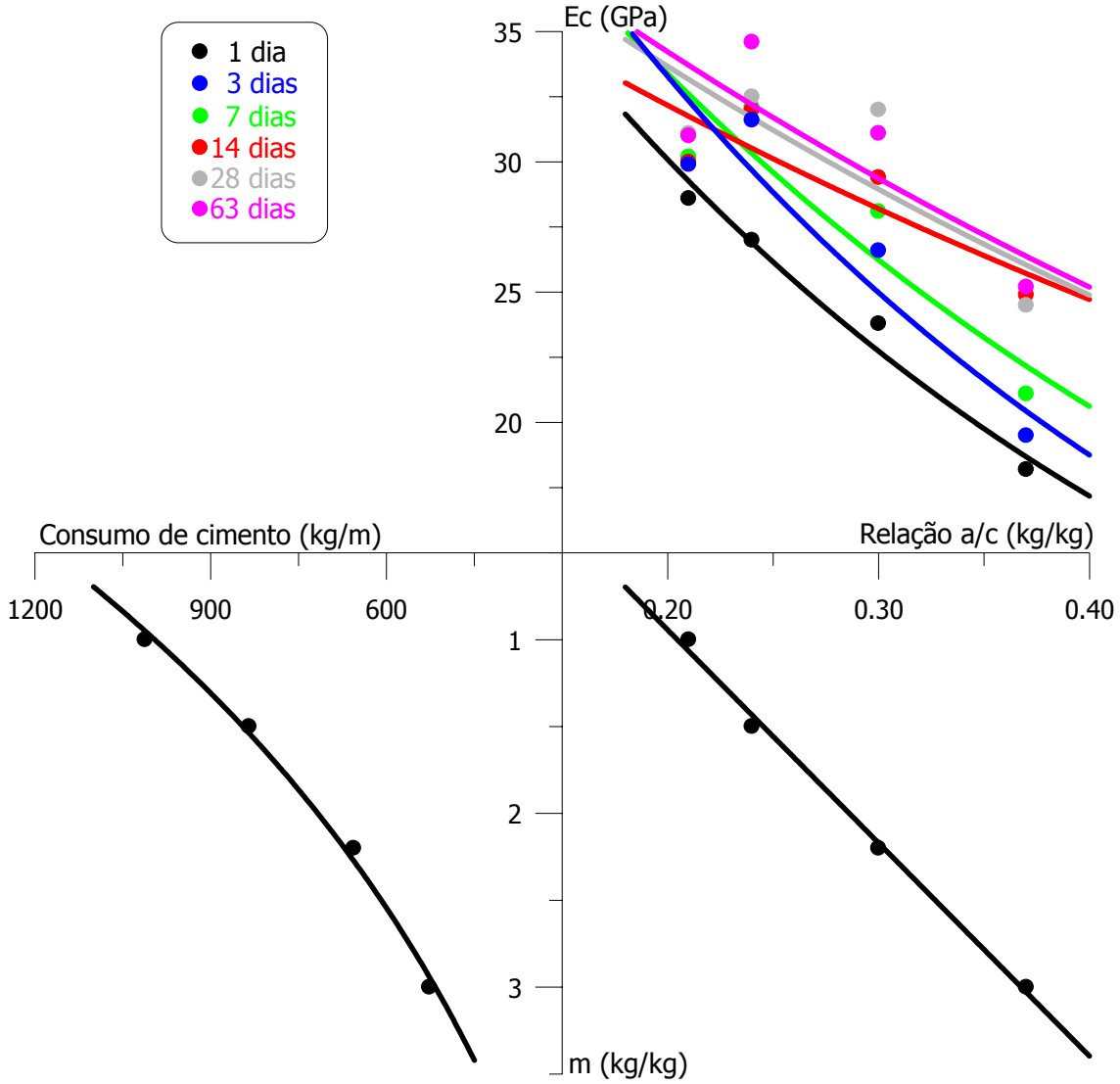


Figura 46 – Diagrama de dosificación para el módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad de la mezcla más rica presentó valores menores de los esperados. Este motivo llevó a que los ensayos fuesen rehechos, mas los resultaros se confirmaron. Se cree que el menor módulo de elasticidad de esta mezcla esté asociado al elevado volumen de pasta y a la pequeña diferencia de la relación a/c de esta mezcla con la de la mezcla 1:1,5.

Ha sido reportada la gran importancia del estudio de las variables módulo de elasticidad y resistencia a tracción de forma combinada. Según Bastos[22] la fisuración por retracción puede ser evitada por medio de una combinación favorable de módulo

de elasticidad y resistencia a tracción del material, o sea, mientras mayor sea la relación f_t/E_c, también conocida como deformabilidad[70] o extensibilidad[22].

En la Figura 47 se presenta el diagrama de dosificación para la relación f_t/E_c de la familia de morteros estudiada. Se puede observar que, excluyendo las edades más avanzadas de 14 a 63 días, en las que la diferencia en la relación f_t/E_c entre la mezcla más rica y la más pobre fue mayor de 100 microdeformaciones, esa relación prácticamente no varia en las primeras edades, mostrando que para morteros con tendencia a fisuración elevada en esas edades, el camino más cierto para minimizarla es la reducción de la retracción libre, posiblemente con aumentos del tiempo de cura.

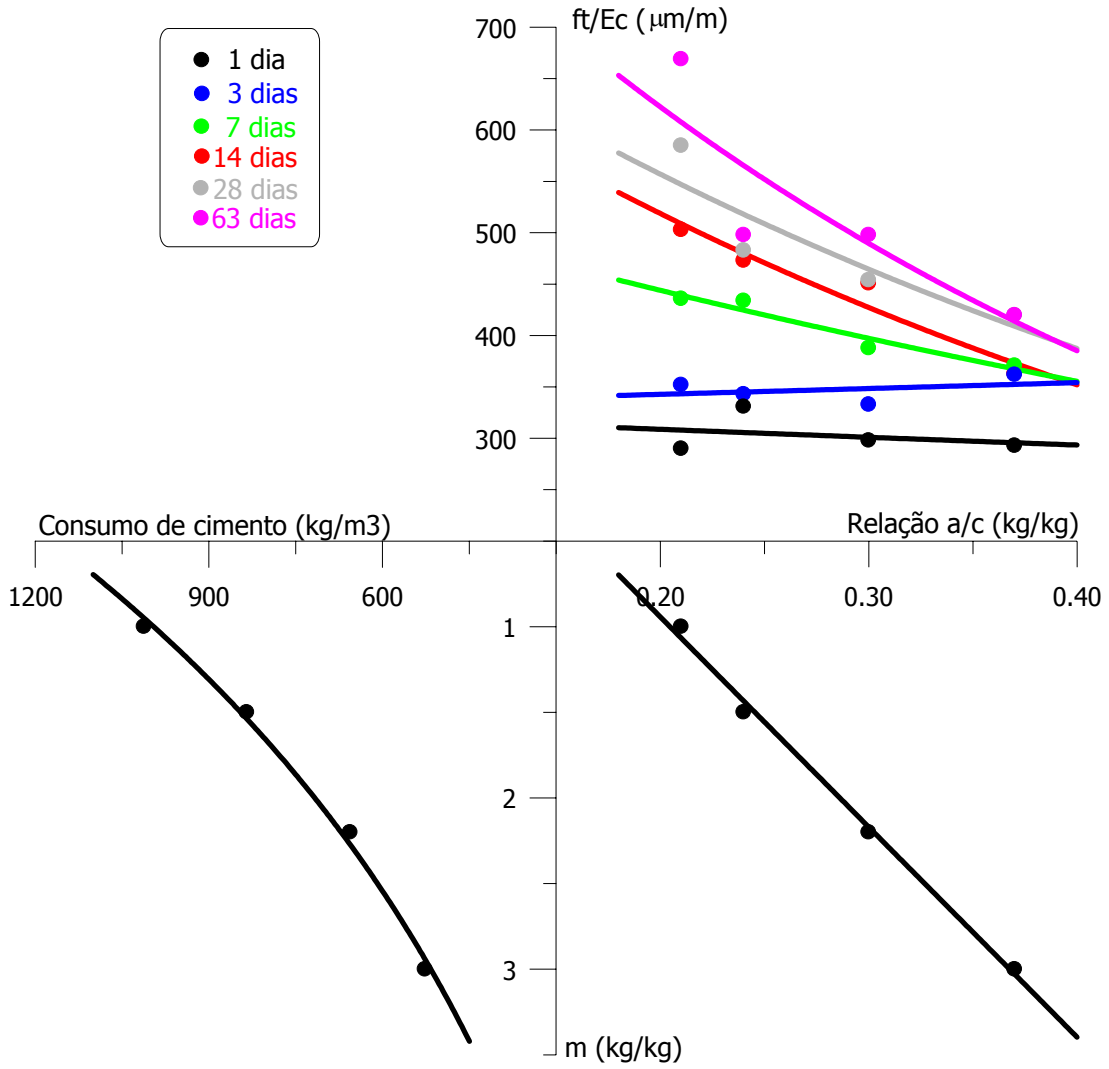


Figura 47 – Diagrama de dosificación para la relación ft/Ec.

En la Figura 48 es presentado el diagrama de dosificación de la retracción libre de la familia de morteros estudiada. En este estudio, la retracción fue menor en las mezclas de mayor relación a/c. Se cree que esto sea explicado por los menores volúmenes de pasta presentes en estas mezclas.

Se verifica que la diferencia entre la retracción de las dos mezclas más pobres es muy pequeña. Probablemente para mezclas más pobres de las estudiadas en este trabajo, la retracción iría aumentar con el aumento de la relación a/c.

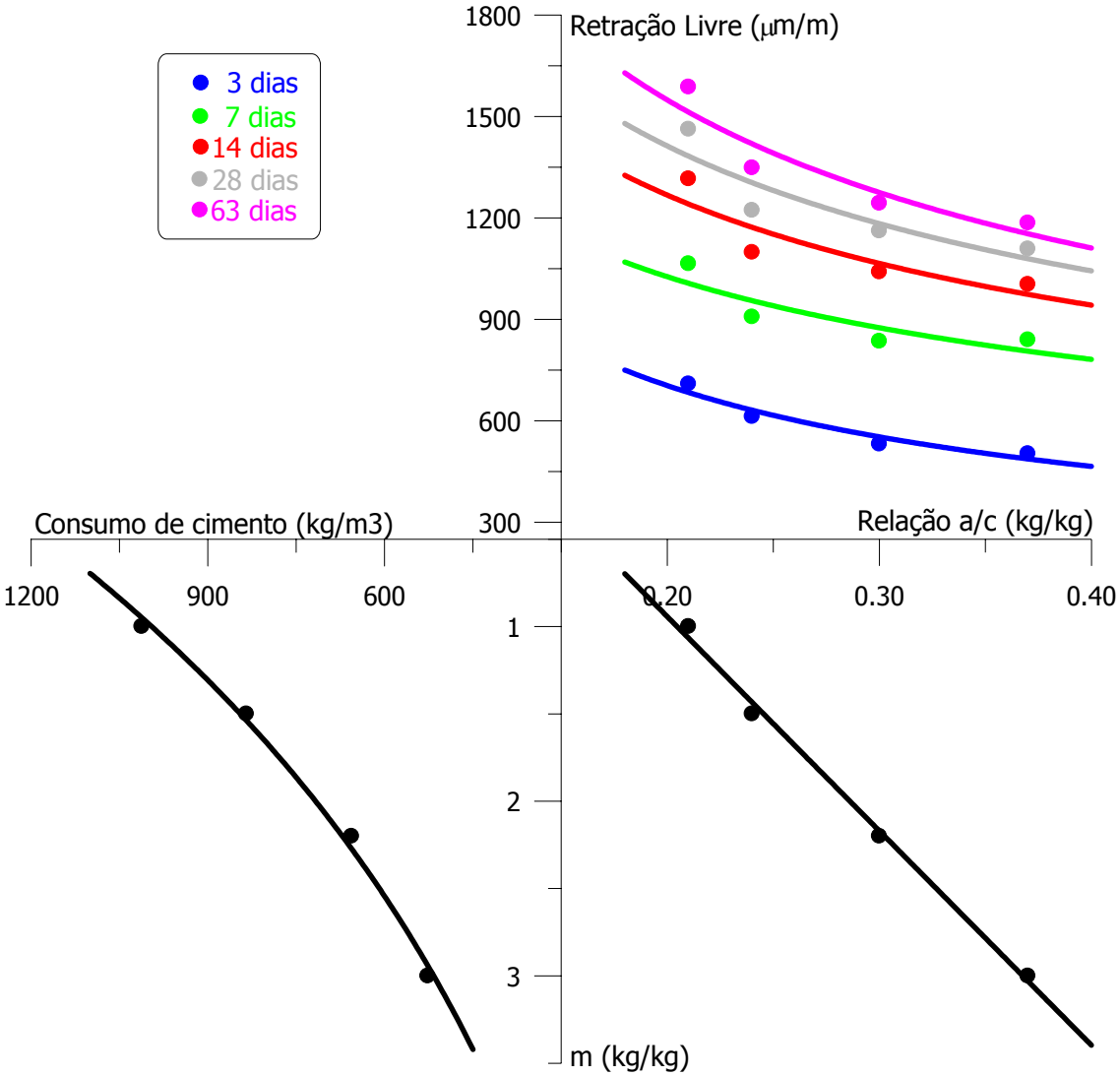


Figura 48 – Diagrama de dosificación para la retracción libre de la familia de morteros estudiadas.

En la Figura 49 es presentado el diagrama de dosificación de la expresión retracción libre menos la relación f_t/E_c. Esta expresión es más adecuada para evaluar el potencial de fisuración de morteros y concretos por involucrar todas las variables más influyentes en la fisuración; mientras menor sea esta diferencia, mayor debe ser la resistencia a fisuración de una mezcla.

El potencial de fisuración de la mezcla más rica es sensiblemente mayor que el de las otras mezclas evaluadas. Puede ser apreciado también, que la mezcla 1:2,2:0,30 se constituye aparentemente en un punto de inflexión a partir del cual el potencial de fisuración aumenta.

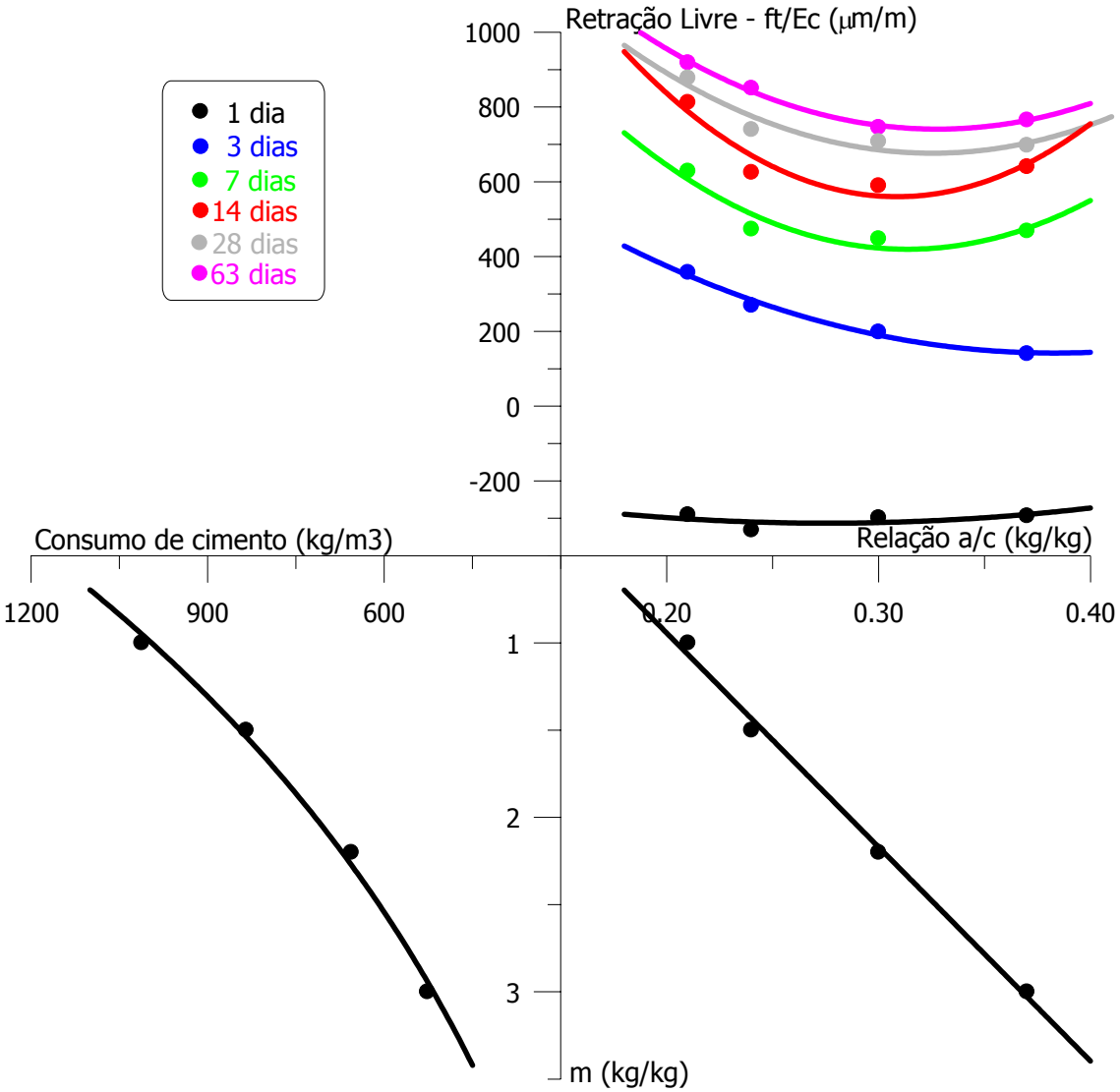


Figura 49 – Diagrama de dosificación para la expresión retracción libre menos ft/Ec.

En la Tabla 18 son presentados los valores de los coeficientes de las ecuaciones utilizadas en la ejecución de los diagramas de dosificación con los respectivos coeficientes de correlación obtenidos en cada uno de los ajustes utilizados.

Tabla 18 – Coeficientes para obtención de los ajustes hechos a partir de los resultados experimentales de la familia de morteros estudiada.

		1	3	7	14	28	63
f_{cj}	k_{1j}	160,1	134,2	153,0	166,3	172,7	170,7
	k_{2j}	231,7	21,4	22,8	23,0	22,3	17,9
	R^2	0,96	0,97	0,94	0,95	0,95	0,92
f_{tj}	k_{7j}	16,2	18,9	28,0	29,5	35,2	45,6
	k_{8j}	70,9	47,7	132,1	82,6	119,1	311,5
	R^2	0,86	0,92	0,89	0,88	0,95	0,96
E_{cj}	k_{9j}	51,1	55,3	51,2	41,1	42,4	45,3
	k_{10j}	216,0	189,5	82,2	12,1	12,0	17,3
	R^2	0,97	0,85	0,81	0,72	0,60	0,62
ε_j	k_{11j}	-	269,0	545,7	636,6	699,1	716,3
	k_{12j}	-	-0,60	-0,39	-0,43	-0,44	-0,48
	R^2	-	0,93	0,75	0,79	0,81	0,87
f_{tj}/E_{cj}	k_{13j}	324,9	331,8	554,6	738,6	800,9	1006,0
	K_{14j}	-0,25	0,16	-1,11	-1,84	-1,82	-2,40
	R^2	0,10	0,11	0,94	0,91	0,82	0,77
f_{tj}/E_{cj}	k_{15j}	2687	6945	17435	23484	12834	13148
	k_{16j}	-1486	-5318	-10934	-14501	-8461	-8621
	k_{17j}	-108	1160	2134	2798	2069	2154
	R^2	0,28	0,99	0,87	0,88	0,89	0,99
m	k_3	-1,5					
	k_4	12,3					
	R^2	1,00					
$C_{cemento}$	k_5	1346,2					
	k_6	-2756,0					
	R^2	0,92					

6 Consideraciones Finales

6.1 Conclusiones sobre los modelos utilizados para la previsión de la propensión a fisuración

- El único modelo que consiguió acusar la fisuración de los morteros que realmente fisuraron en el ensayo de retracción restringida fue el modelo ε_j - f_{tj}/E_{cj}, que considera todas las variables influyentes en la fisuración medidas en el programa experimental.
- Para un estúdio 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.

6.2 Conclusiones sobre la dosificación de morteros de reparo buscando la reducción de la tendencia a fisuración

- 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.

6.3 Transferencia al medio

Es primordial que el conocimiento generado en esta investigación sea transferido al medio técnico, contribuyendo de esta forma al avance tecnológico del sector.

Se pretende publicar trabajos en los siguientes eventos:

- International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR, que será celebrado en África del Sur en el año 2005 y contará con la participación de la comunidad técnica mundial;
- VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción – X Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT 2005, que será celebrado en Asunción, capital de Paraguay.
- 47º Congresso Brasileiro do Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON 47º -, a ser celebrado en Recife, capital del estado de Pernambuco.

También el trabajo será divulgado en revistas técnicas de amplia divulgación nacionales e internacionales.

6.4 Sugestiones para estudios futuros

- Uso de otros métodos de ensayo para evaluación de la retracción restringida.
- Estudio de la tendencia a fisuración de familias de morteros de distintos tipos de cemento, con el objetivo de verificar la existencia de un tipo de cemento que presente una menor tendencia a fisuración.
- Estúdio de la influencia de la composición granulométrica de morteros en la tendencia a fisuración.
- Evaluación del efecto del contenido de polímero acrilato en la tendencia a fisuración de morteros de reparo.
- Validación del modelo propuesto para otras famílias de morteros de reparo.

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 ingeniería 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. AL-ZAHRANI, MM; MASLEHUDDIN, M; AL-DULAIJAN, SU; IBRAHIM, M. Mechanical properties and durability characteristics of polymer and cement-based repair materials. **Cement and Concrete Composites**, V25, 2003, pp 527-533.

7. IBRAHIM, M.; AL-GAHTANI, AS.; MASLEHUDDIN, M.; ALMUSALLAM, AA. Effectiveness of concrete surface treatment materials in reducing chloride-induced reinforcement corrosion, **Construction and Building Materials**, v. 11, n. 7-8, p. 443-451, 1997.

8. POSTON, RW; KESNER, K; McDONALD, JE; VAYSBURD, AM; EMMONS, PH. Concrete Repair Material Performance – Laboratory Study, **ACI Materials Journal**. V. 98 No. 2. Mar-Abr 2001.

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

10. ROBERY, P; SHAW, J. Materials for the repair and protection of concrete. **Construction and Building Materials**. V. 11, no. 5-6, pp. 275-281, 1997.

11. MEDEIROS, M.H.F. **Estruturas de concreto com corrosão de armaduras por carbonatação: comparação de argamassas de reparo quanto à proteção do aço**. São Paulo, 2002. 193p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica Universidade de São Paulo.

12. MANGAT, PS.; O'FLAHERTY, FJ. Influence of elastic modulus on stress redistribution and cracking in repair patches. **Cement and Concrete Research**. V. 30, pp 125-136, 2000.

13. CUSSON, D; MAILVAGANAM, N. Durability of Concrete Repair Materials, **Concrete International**, V18, no 3, 1996.

14. 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.

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

16. 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.

17. SILVA JR., JOSÉ ZACARÍAS RODRÍGUES. **Argamassas para Reparo de Estruturas de Concreto**. São Paulo, 2001, 145p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

18. MORENO JUNIOR, RAFAEL. **Aderência de argamassas de reparo de estruturas de concreto**. São Paulo, 2002. 202p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica Universidade de São Paulo.

19. MITRE, MARCOS PEDROSA. **Avaliação da Aderência de Argamassas de Reparo Estructural Industrializadas e Preparadas em Obra**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Relatório de inciação científica. São Paulo, 2000.

20. GROCHOSKI GARCIA, MAURICIO LUIZ. **Avaliação de Comportamento de Sistemas de Reparo para Estruturas de Concreto com Corrosão de Armaduras**. São Paulo, 2002. Plano de Pesquisa de Doutorado Direto FAPESP.

21. BERTOLO, RENATA SPINELLI. Reparo de Estruturas de Concreto: **Durabilidade quanto à proteção do aço**. São Paulo, 2004, Pré-texto de exame de qualificação.

22. BASTOS, PEDRO KOPSCHITZ XAVIER. **Retracción e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. Tese (doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002, 172p.

23. TINÔCO, HÊNIO FERNANDES DA FONSECA. **Avaliação do Desempenho de Sistemas de Reparo e Recuperação para Estruturas de Concreto com Corrosão das Armaduras**. Goiânia, 2001. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás.

24. CABRAL, ANTÔNIO EDUARDO BEZERRA. **Avaliação da Eficiência de Sistemas de Reparo no Combate à Iniciação e à Propagação da Corrosão do Aço Induzida por Cloretos**. Porto Alegre, 2000. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

25. NEPOMUCENO, ANTÓNIO ALBERTO. **Comportamiento de los Morteros de Reparación Frente a la Carbonatación y a la Penetración de Cloruros en Estructuras de Hormigón Armado Dañadas por Corrosión de Armaduras. Estudio Mediante la Técnica de Resistencia de Polarización**. Madrid, 1992. Tese (doutorado). Universidad Politécnica de Madrid, 223p.

26. RED REHABILITAR – CYTED. **Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón. Reparación, Refuerzo y Protección**. Paulo Helene & Fernanda Pereira, editores. São Paulo, 2003, 775p. ISBN 85-903707-1-2.

27. ACI COMMITTEE 201. "**Guide to Durable Concrete" (ACI 201.2R-01)**. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001, 41pp.

28. ACI COMMITTEE 222. "**Protection of Metals in Concrete against Corrosion" (ACI 222R-01)**. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001, 41pp.

29. PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. São Paulo, v. 1, 1ª ed., IPT, 1993.

30. HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1993.

31. CUSSON, D; MAILVAGANAM, N. Durability of Repair Materials. **Concrete International**, V18 no 3. March 1996.

32. ISA, MM; HELENE, P. Influência de uma composição de agregados nas propriedades físicas das argamassas de reparo. 5º Congresso Brasileiro de Cimento, novembro 1999.

33. ACI COMMITTEE 212. **"Chemical Admixtures for Concrete"** (ACI 212.3R-91). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1999, 31pp.

34. BENTUR, A; IGARASHI, S; KOVLER, K. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet-lightweight aggregates, **Cement and Concrete Research**, V31, p1587 – 1591, 2001.

35. GROCHOSKI, M. **Avaliação do comportamento de aditivos redutores de retracción**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Relatório de inciação científica. São Paulo, 2001. 55pp.

36. OHAMA, Y. Principle of latex modification and some typical properties of latex-modified mortars and concretes, **ACI Materials Journal**, VXX, no. 6, 1987.

37. ACI COMMITTEE 548. **"Guide for the Use of Polymers in Concrete"** (ACI 548.1R-97). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1997, 29pp.

38. OHAMA, Y. Polymer-based admixtures, **Cement and Concrete Composites**, V20, pp 189-212, 1998.

39. SCHULZE, J. Influence of water-cement ratio and cement content on the properties of polymer-modified mortars, **Cement and Concrete Research**, V20, 1999.

40. RIXOM, R; MAILVAGANAM, N. **Chemical admixtures for concrete**. Terceira edição. 437 p.

41. WANG, K; SHAH, SP; PHUAKSUK, P. Plastic shrinkage cracking in concrete materials – influence of fly ash and fibers, **ACI Materials Journal**, V98, no. 6, 2001. 458 – 464p.

42. MESBAH, HA; BUYLE-BODIN, F. Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars, **Construction and Building Materials.** V13, 1999. 439 – 447p.

43. HELENE, PAULO R. Manual para Reparación, Refuerzo y Protección de las Estructuras de Concreto. México. IMCYC, 1997. 148p.

44. SOUZA, VICENTE CUSTÓDIO DE MOREIRA; RIPPER, THOMAS. **Patología, Recuperação e Reforço de Estrututas de Concreto**. São Paulo, PINI, 1998. 253p.

45. ALBERTA TRANSPORTATION AND UTILITIES. **Alberta concrete patch evaluation program**. Report no. ABTR/RD/RR-87/05. Edmonton, 1997.

46. HELENE P., LEVI S.M. Metodologia - **Especificações técnicas e composições unitárias para reparos de recuperação e proteção das estruturas de concreto armado de unidades escolares** – Relatório 10124, Convênio USP/FDE. Fundação Desenvolvimento do Ensino do Estado de São Paulo, (1998).

47. ACI COMMITTEE 548. "**Standard Specification for Latex Modified Concrete (LMC) Overlays" (ACI 548.4-93)**. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001, 6pp.

48. prEN 1504 – 10. **Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and**

evaluation of conformity – Part 10: Site application of products and systems and quality control of the works, Bruselas, 1999, 63p.

49. MORGAN, DR. Compatibility of concrete repair materials and systems. **Construction and Building Materials**, Vol 10, No 1. pp57-67 1996.

50. CUSSON, D; HOOEGEVEEN, T; QIAN, S. Field performance monitoring and evaluation of concrete repair systems on a highway bridge. In: 5th STRUCTURAL SPECIALTY CONFERENCE OF THE CANADIAN SOCIETY FOR CIVIL ENGINEERING. **Proceedings**. Saskatoon: Canadian Society of Civil Engineering, 2004, pp 1-10.

51. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel. ASTM C876-91, Philadelphia, USA, 1991..

52. BUNGEY, JH. **The Testing of Concrete in Structures**, 2da Edição, Chapman & Hall Editors, New York, 1989.

53. HOLL, CH; O'CONNOR, SA. Cleaning and preparing concrete before repair, **Concrete International**, V19, No. 3, pp60-63, 1997.

54. ACI COMMITTEE 546. **"Concrete Repair Guide" (ACI 546R-96)**. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001, 41pp.

55. CARASEK, H. **Aderência de argamassas a base de cimento portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. Tese (doutorado).

56. XIONG, G; LIU, J; LI, G; XIE, H. A way for improving interfacial transition zone between concrete substrate and repair materials, **Cement and Concrete Research**, V32, pp1877-1881, 2002.

57. MAILVAGANAM, NP; PYE, GB; ARNOTT, MR. **Surface preparation of the concrete substrate**, Construction Technology Update No. 24. National Research Council of Canada. December 1998.

58. ACI COMMITTEE 209. **"Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures"** (ACI 209R-92). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1997, 47pp.

59. SADOUKI, H; VAN MIER, JG. Simulation of hygral crack growth in concrete repair systems, **Materials and Structures**, V30, pp 518-526, November 1997.

60. TULA SANABRIA, L. **Contribuição ao estudo da resistência à corrosão de armaduras de aço inoxidável**. São Paulo, 2000. 259p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica Universidade de São Paulo.

61. FROHNSDORFF, GEOFFREY; MASTERS, L.W. **The Meaning of Durability and Durability Prediction**. Durability of Building Materials and Components, ASTM STP 691, P. J. Sereda and G. G. Litvan, Eds. American Society for Testing and Materials, 1980.

62. YUAN, Y; LI, G; CAI, Y. Modeling for prediction of restrained shrinkage effect in concrete repair, **Cement and Concrete Research**, V33, 2003 pp347 – 352.

63. 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.

64. CUSSON, D; REPETTE, WL. Early-age cracking in reconstructed bridge barrier walls, **ACI Materials Journal**, V97, No. 4, July – August 2000.

65. PIETRA, I; BARBOSA, P; HELENE, P; FIGUEIREDO, A. Influência da dosagem na retracción por secagem em concretos. In: 45º Congreso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON. **Anais**. Espírito Santo, Brasil.

66. MEHTA, PK; MONTEIRO PJM. **Concreto: estructura, propriedades e materiais**. São Paulo, Ed Pini 1994. 573p.

67. BISSONNETTE, B; PIGEON, M. Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, V25, No 5, pp.1075-1085, 1995.

68. ØSTERGAARD, L; LANGE, D; ALTOUBAT, S; STANG, H. Tensile basic creep of early-age concrete under constant load. **Cement and Concrete Research**, V31, 2001, pp. 1895-1899.

69. SOLTEZ, SM. **Cementitious materials for thin patches**. Final Report SPR 304-041. Oregon Department of Transportation Research Group and Federal Highway Administration, June 2001, 43pp.

70. TULA, L; OLIVEIRA, PSF; HELENE, P. **Grautes para Reparo**. In: VII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y IX Congreso de Control de la Calidad en la Construcción. CONPAT 2003, Trabajos suplementarios. Mérida, Yucatán – México. pp II.85 – II.94. CD ROM.

71. EMMONS, P.H., VAYSBURD, A. M. **"Performance Criteria for Concrete Repair Materials"**, Phase I, "Technical Report REMR CS-47, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mass. 1995. 123p.

72. McDONALD, JE; VAYSBURD, AM; EMMONS, PH; POSTON, RW; KESNER, K. Selecting durable repair materials: Performance Criteria – Summary, **Concrete International**, V24, no. 1, 2002.

73. EMBERSON, NK; MAYS, GC. Significance of property mismatch in the patch repair of structural concrete – Part 1: Properties of repair systems, **Magazine of Concrete Research**, V42, no. 152, pp 147 – 160, 1990.

74. DECTER, MH; KEELEY, C. Durable concrete repair – Importance of compatibility and low shrinkage, **Construction and Building Materials**, V11, No.5-6, pp267 – 273, 1997.

75. EMMONS, PH; VAYSBURD, AM; McDONALD, JE; POSTON, RW; KESNER, KE. Selecting durable repair materials: Performance criteria, **Concrete International**, V22, no. 3, 2000.

76. PrEN 1504. **Products and systems for protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity.** Parts 1 to 10.

77. CATARINO, J.; GONÇALVES, A.; RIBEIRO, S. Reparação de estruturas de betão na normalização européia. In: Encontro nacional sobre conservação e reabilitação de estruturas, Lisboa, 2000. **Anais**. Lisboa, 2000. p. 105-113.

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

79. 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.

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

81. 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.

82. MOKAREM, DW. **Development of concrete shrinkage performance specifications**. Instituto Politécnico e Universidade do Estado de Virginia, Blacksburg, Virginia, 2002 pp236 Tese (doutorado).

83. 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.

84. GERMAN FEDERAL MINISTRY OF TRANSPORT, HIGHWAY CONSTRUCTION DEPARTMENT, Technical test regulations for concrete substitution systems made of cement mortar/concrete with a plastic additive (PCC), TP BE-PCC, 1990.

85. 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.

86. MONTE, R. **Avaliação de metodologias de ensaio destinadas à verificação da eficiência de aditivos superplastificantes em pastas de cimento**

Portland. São Paulo, 2003. 102p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica Universidade de São Paulo.

87. HARTMANN, C. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland**. São Paulo, 2002. 210p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica Universidade de São Paulo.

88. HELENE, P; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle de concreto**. São Paulo, Ed PINI, 1993. 233p.

89. NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. Londres. SIR ISAAC PITMAN & SONS LTD. 1968. 532p.

90. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure). ASTM C349-97. Philadelphia, USA, 1997.

91. COUTINHO, AS; GONÇALVES, A. **Fabrico e propriedades do betão**. Lisboa, Laboratório Nacional de Ingeniería Civil – LNEC, 1994. Volume 3, 368p.

92. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars. ASTM C348-97. Philadelphia, USA, 1997.

93. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Projeto de estruturas de madeira. NBR 7190/96. Rio de Janeiro, 1996.

94. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for length change of hydraulic-cement mortar and concrete. ASTM C157/C 157/M-99. Philadelphia, USA, 1999.

95. INTERNATIONAL CONCRETE REPAIR INSTITUTE. Guide for selecting and specifying materials for repair of concrete surfaces. ICRI No. 03733. Farmington Hills, Mi, 2004.

96. HOSSAIN, A; PEASE, B; WEISS, J. Quantifying early-age stress Development and Cracking in Low w/c Concrete Using the Restrained Ring Test with Acoustic

Emission. Submitted to the Transportation Research Board for possible presentation and publication.

97. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2003, 170p.

Anexo A

A Determinación del contenido óptimo de polímero

La determinación del contenido óptimo de polímero involucró dos aspectos. Primeramente, el contenido añadido de polímero debe proporcionar buenas propiedades en el estado fresco, permitiendo que el mortero sea trabajado con la mano, y segundo, el contenido debe mejorar las propiedades del mortero en el estado endurecido.

La determinación del contenido óptimo de polímero fue hecha en dos fases. En la primera fase se buscó determinar si existía alguna interacción entre proporción de mezcla y polímero. Fueron moldadas tres probetas de 40 mm x 40 mm x 160 mm para cada uno de las dos mezclas de mortero de composiciones 1:1,0 y 1:2,2 en masa, de misma relación a/c e igual a 0,30 con 5 contenidos de polímeros distintos, 0%, 1%, 3%, 5% y 8%, totalizando 10 mezclas. En la segunda fase fueron moldados tres probetas de 40 mm x 40 mm x 160 mm para la mezcla 1:3,0 y relación a/c de 0,50, con los mismos 5 contenidos de polímero previamente utilizados, totalizando 10 mezclas.

Para la determinaciónd de la absorción de agua, las probetas fueron pesadas a los 14 días de edad en un ambiente con U.R. de 50%. Inmediatamente después de hechas estas lecturas, estos fueron sumergidos en agua durante 24 horas y posteriormente pesados. La razón de que sea utilizado este procedimiento fue la de evitar cualquier efecto de la temperatura prescrita en las normas para la obtención del peso seco en el polímero utilizado.

Antes de que fuesen realizados los ensayos mecánicos, las probetas fueron mantenidas durante 4 horas dentro de un ambiente climatizado con 50% de U.R.

En sentido general, para las mezclas de relación a/c de 0,30 el aumento en el contenido de polímero no influyó para 95% de significancia en la resistencia a tracción por flexión. Ya en el caso de los morteros de relación a/c de 0,50, fue evidenciado un aumento de la resistencia a tracción por flexión con el aumento en el contenido de

polímero. El módulo de elasticidad en ambos casos fue fuertemente influenciado, obteniéndose reducciones importantes con el aumento en el contenido de polímero. La resistencia a compresión por su vez, fue reducida significativamente con el aumento del contenido de polímero. Se cree que esta reducción sería menos significativa con el uso de una cantidad de antiespumante adecuada. En todos los casos, la edad del ensayo fue de diez días.

A.1 Primera fase

La Figura 50 presenta los resultados del ensayo de absorción de agua. Se puede apreciar la reducción en la absorción de água inclusive cuando utilizados bajos contenidos de polímero. A partir del 3%, las mezclas experimentaron una incorporación de aire excesiva, hecho que puede haber perjudicado el desempeño de los morteros con relación a esta propiedad. Como era de esperar, la mezcla de menor volumen de pasta presentó la menor aborción de agua en todos los contenidos de polímero estudiados.

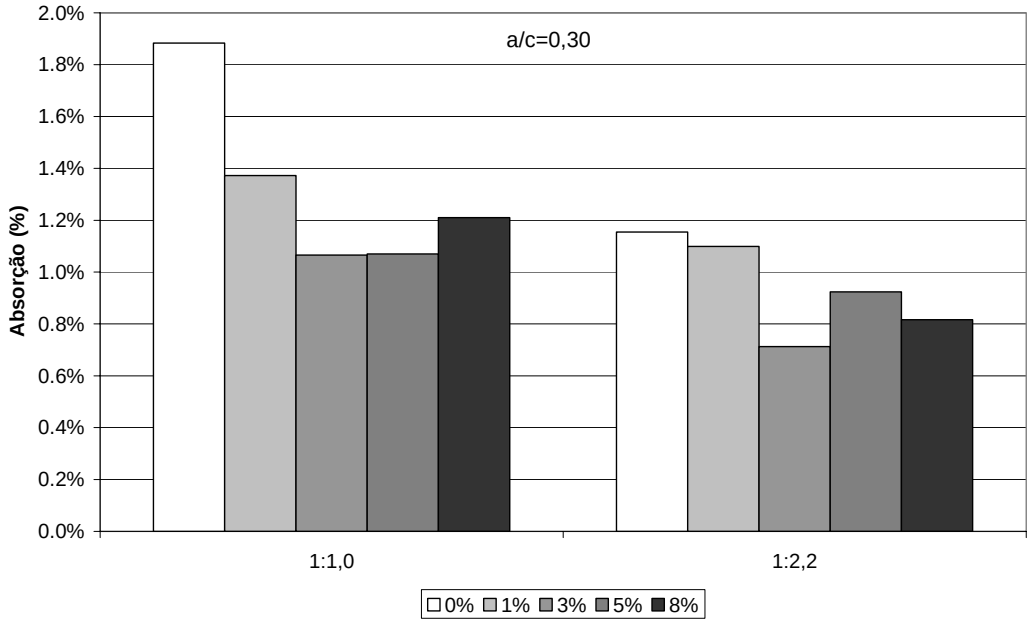


Figura 50 – Absorción de agua de los morteros moldados durante la primera fase.

En la Figura 51 se presentan los resultados de resistencia a compresión. Hubo una caída de aproximadamente 20% cuando el contenido de polímero pasó de 0% a 8%.

Esta reducción significativa puede ser atribuída a la incorporación de aire provocada por la adición de polímero en los contenidos mayores de 3%. Debido a que ambas las proporciones de mezclas analizadas poseen la misma relación a/c, no existen diferencias significativas entre mezclas con el mismo contenido de polímero.

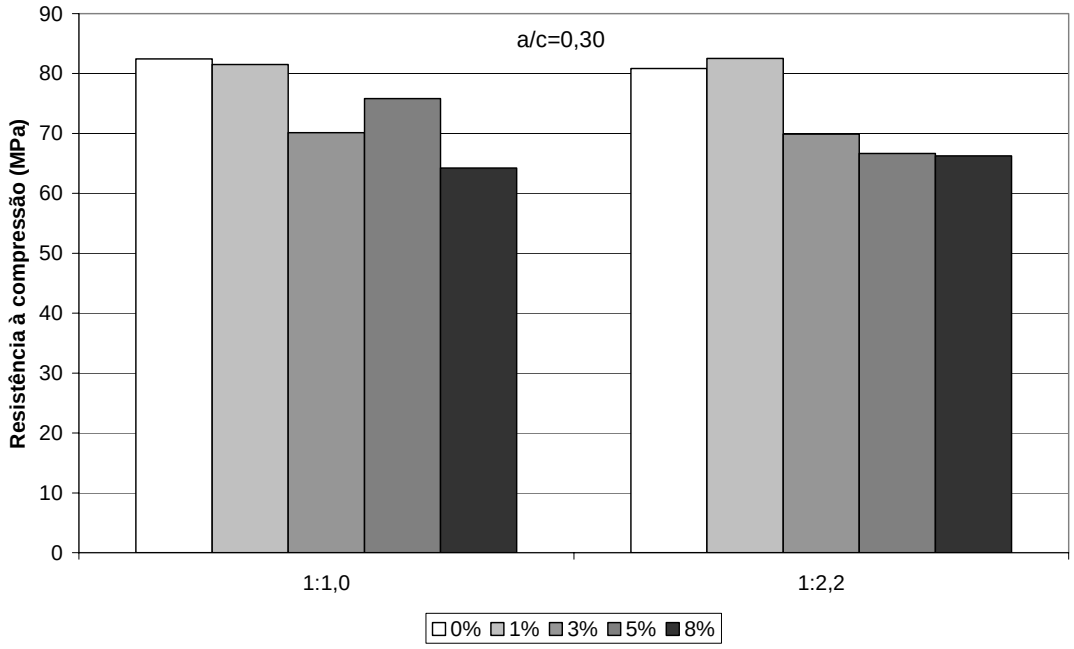


Figura 51 – Resistencia a compresión de los morteros modificados con polímero moldados durante la primera fase y ensayados en ensayo realizado según la norma ASTM C349-97.

Al contrario de lo ocurrido en la resistencia a compresión, el aumento en el contenido de polímero no influyó en la resistencia a tracción por flexión, el análisis de varianza (Tabla 19) de los resultados demostró la inexistencia de diferencia estadística significativa entre las variables, y tampoco de interacciones importantes. En la Figura 52 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 19 – Análisis de varianza de la variable resistencia a tracción por flexión para 95% de significancia.

Análise de Variância						
Fonte	*SQ*	*gl*	*Qm*	*F*	*p*	*F crit*
Traço	14.950	1	14.950	2.130	0.160	4.351
Teor	26.991	4	6.748	0.961	0.450	2.866
Interação	42.723	4	10.681	1.522	0.234	2.866
Resíduo	140.383	20	7.019			

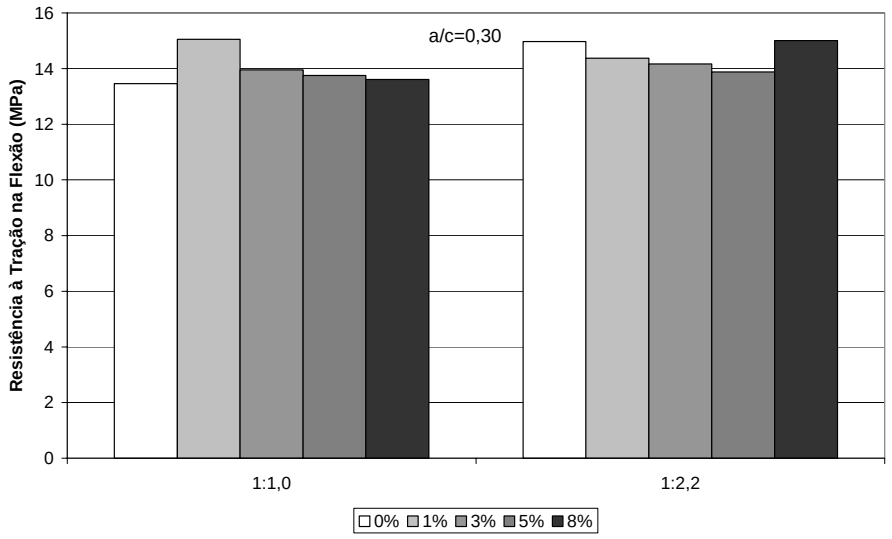


Figura 52 – Resistencia a tracción por flexión media de los morteros modificados con polímero moldados durante la primera fase y ensayadas según la norma ASTM C348-97.

A pesar de que no hayan sido encontradas diferencias significativas en la resistencia a tracción por flexión entre los morteros estudiados, fue verificado un comportamiento distinto cuando utilizado el contenido de 8%. En la Figura 53 se muestran las curvas carga vs deslocamiento (medido por el movimiento vertical del plato de la prensa) de las seis probetas ensayadas.

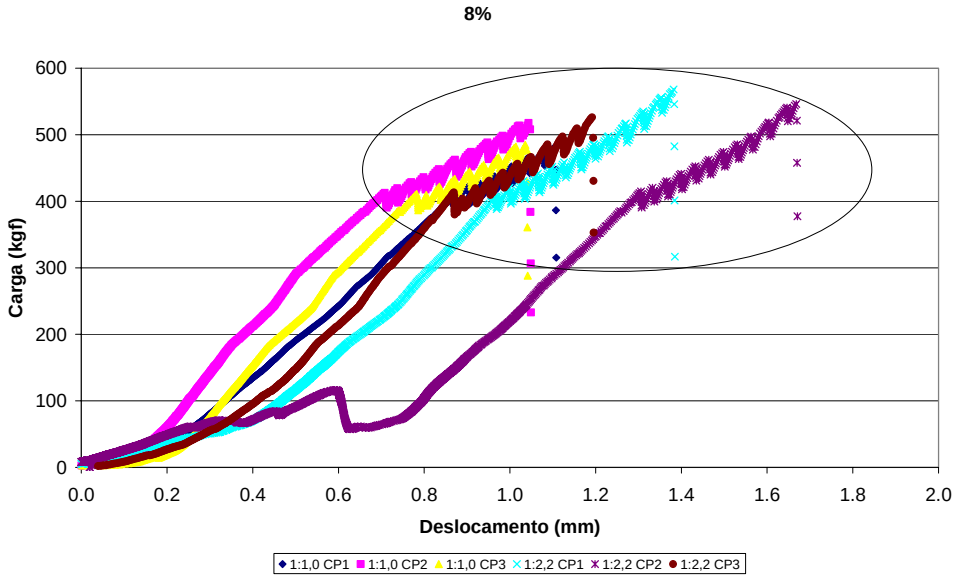


Figura 53 – Curvas carga vs deslocamiento de todas las probetas com contenido de polímero de 8% y relación a/c=0,30.

En la Figura 54 se presentan los resultados medios obtenidos de módulo de elasticidad. Se puede apreciar la tendencia de reducción del módulo de elasticidad con el aumento del contenido de polímero. Con el contenido de 8% fue obtenida una reducción media de 22%. Como era de esperar, la mezcla con menor volumen de pasta presentó un módulo de elasticidad mayor. Cuando usado el contenido de 1% fue observado un aumento significativo del módulo de elasticidad en ambas proporciones de mezcla. Esto puede ser explicado por una posible mejoría en la estructura interna del compuesto.

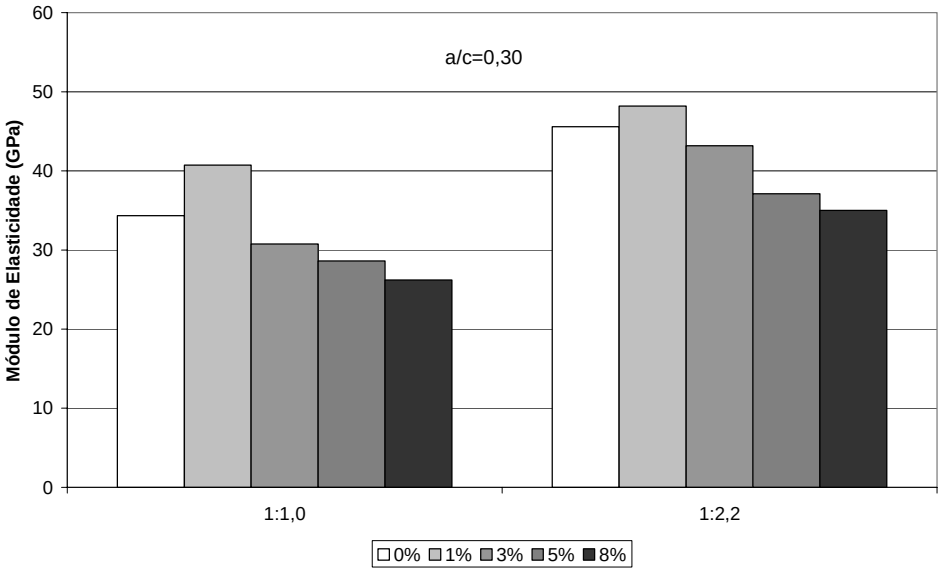


Figura 54 – Módulo de elasticidad de los morteros.

A.2 Segunda fase

En la Figura 55 son prentados los resultados de aborción de agua de los morteros de composición 1:3,0. Únicamente el contenido de 1% consiguió reducir la absorción de agua de los morteros. Esto se debe a la alta relación a/c utilizada y a la incorporación de aire por el polímero.

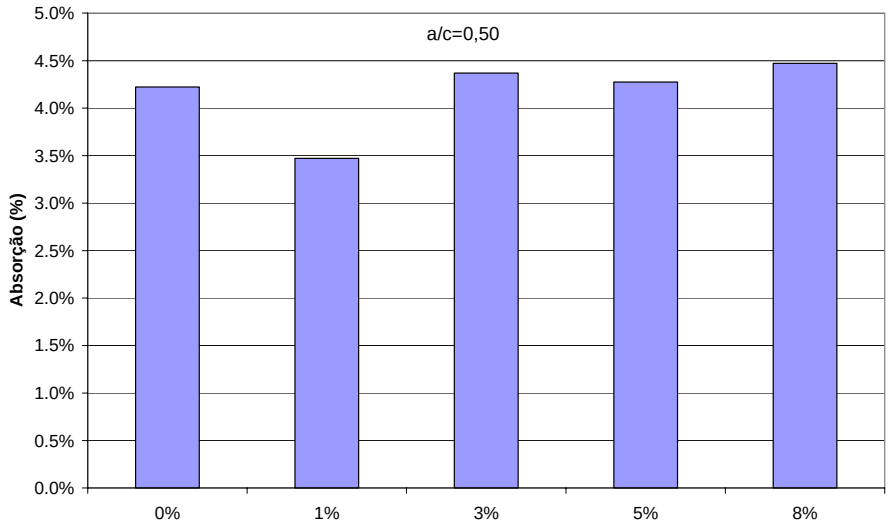


Figura 55 – Absorción media de los morteros moldados durante la segunda fase.

La resistencia a compresión no fue muy afectada con la adición de polímero en los morteros de relación a/c de 0,50. El contenido de 1% presentó un incremento significativo de la resistencia a compresión, lo que puede ser explicado por una mejoría en la estructura interna del compuesto. En los otros contenidos la resistencia fue similar a la mezcla de referencia, posiblemente por el efecto negativo de la incorporación de aire. En la Figura 56 se presentan los resultados medios obtenidos de resistencia a compresión.

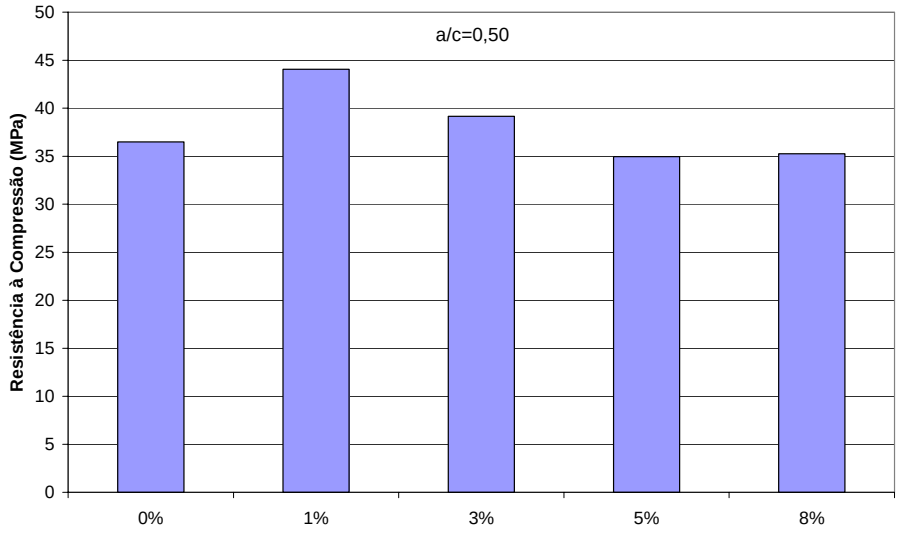


Figura 56 – Resistencia a compresión de los morteros con polímero moldados durante la segunda fase y ensayados segúna la norma ASTM C349-97.

El análisis de varianza de la variable resistencia a tracción por flexión se presenta en la Tabla 20. Para 95% de significancia se descarta la hipótesis de que las medias de resistencia a tracción por flexión de los contenidos de polímero utilizados sean iguales. En la Figura 57 son presentados los resultados médios de resistencia a tracción por flexión obtenidos. Cuando usado el contenido de 8% de polímero, hubo un incremento de 20% en la resistencia a tracción por flexión del compuesto con relación a la mezcla de referencia.

Tabla 20 – Análisis de Varianza de la variable resistncia a tracción por flexión.

Análise de Variância						
Fonte	*SQ*	*gl*	*Qm*	*F*	*p*	*F crit*
Teor de Polímero	3.844	4	0.961	9.216	0.002	3.478
Resíduo	1.043	10	0.104			

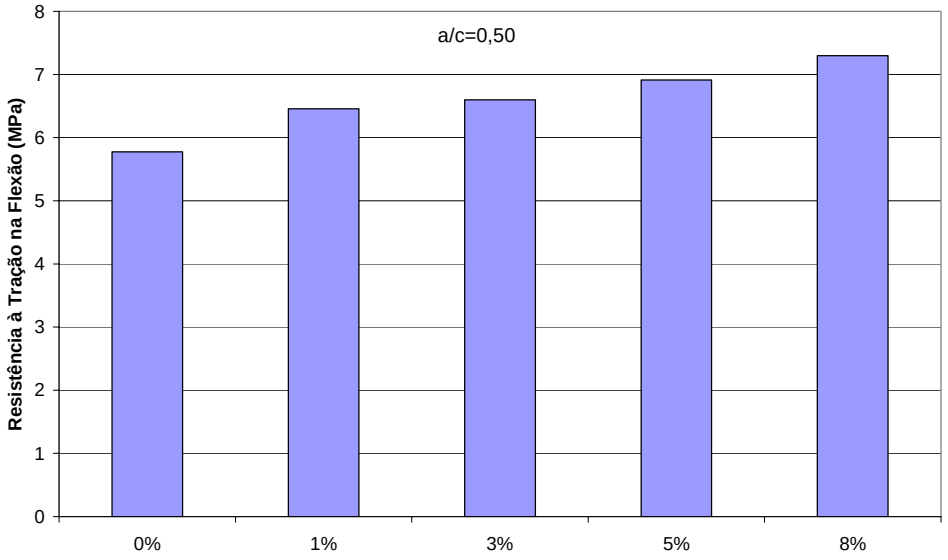


Figura 57 – Resistencia a tracción por flexión de los morteros con polímero moldados durante la segunda fase y ensayados según la norma ASTM C348-97.

Los resultados medios de módulo de elasticidad se presentan en la Figura 58. Se aprecia una reducción en el módulo de elasticidad con el aumento en el contenido de polímero. El contenido de 1% presentó un incremento significativo en el módulo de elasticidad, como ocurrido en la primera fase. Fue obtenida una reducción de 25% cuando usado el contenido de 8%, comparado a la mezcla de referencia.

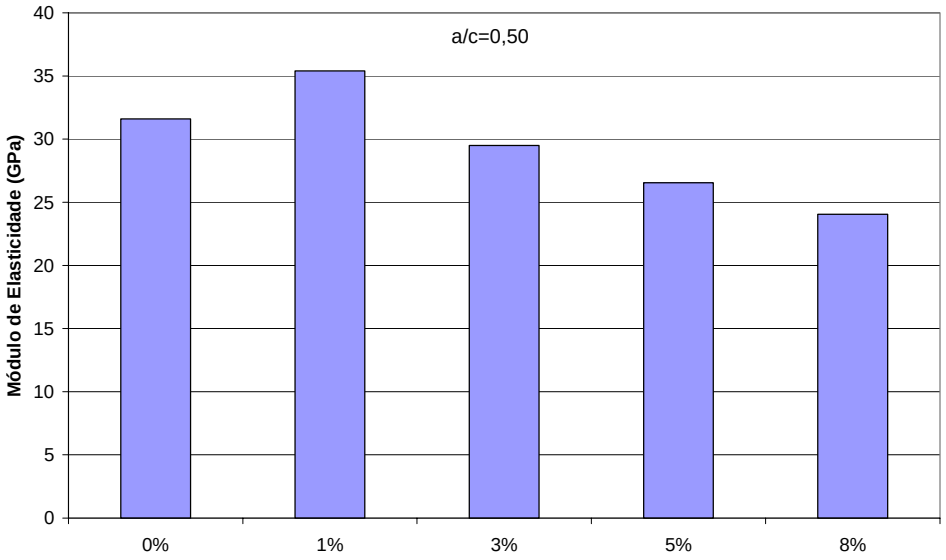


Figura 58 – Módulo de elasticidad de los morteros co polímero moldados durante la segunda fase.

Anexo B

B Resultados

En este anexo al trabajo se presentan los valores medios y los coeficientes de correlación obtenidos a partir de los ensayos realizados en cuatro probetas.

Tabla 21 – Valores medios y desvíos obtenidos del mortero de proporción 1:1,0:0,21.

Edad	Parámetro	fc (MPa)	ft (MPa)	Ec (GPa)	ε (μm/m)
1	Media	48,5	8,3	28,9	0
	Desvío	1,1	0,4	1,4	0
3	Media	68,3	10,5	29,9	710
	Desvío	2,9	0,7	0,7	13
7	Media	77,5	13,2	30,2	1065
	Desvío	3,2	0,3	3,0	28
14	Media	83,9	15,1	30,0	1316
	Desvío	2,2	0,5	0,7	42
28	Media	89,0	18,2	31,1	1463
	Desvío	2,5	0,9	1,3	51
63	Media	91,4	20,8	31,0	1588
	Desvío	1,7	1,6	1,0	67

Tabla 22 – Valores medios y desvíos obtenidos del mortero de proporción 1:1,5:0,24.

Edad	Parámetro	fc (MPa)	ft (MPa)	Ec (GPa)	ε (μm/m)
1	Media	46,4	8,9	27,0	0
	Desvío	2,1	0,6	1,7	0
3	Media	66,7	10,8	31,6	613
	Desvío	3,2	0,6	1,0	4
7	Media	72,7	13,9	32,1	908
	Desvío	2,9	2,0	1,8	12
14	Media	79,3	15,2	32,0	1099
	Desvío	2,3	1,9	1,2	6
28	Media	80,9	15,7	32,5	1223
	Desvío	3,0	0,5	0,9	10
63	Media	84,7	17,3	34,6	1349
	Desvío	3,1	0,8	2,2	8

Tabla 23 – Valores medios y desvíos obtenidos del mortero de proporción 1:2,2:0,30.

Edad	Parámetro	fc (MPa)	ft (MPa)	Ec (GPa)	ε (μm/m)
1	Media	32,9	7,1	23,8	0
	Desvío	0,8	0,4	2,8	0
3	Media	54,7	8,9	26,6	532
	Desvío	2,8	0,7	1,2	8
7	Media	64,6	10,9	28,1	836
	Desvío	2,8	1,1	1,1	10
14	Media	69,4	13,3	29,4	1041
	Desvío	2,9	1,0	2,3	17
28	Media	73,5	14,5	32,0	1162
	Desvío	3,0	1,1	2,1	20
63	Media	78,6	15,5	31,1	1244
	Desvío	2,0	0,7	1,8	31

Tabla 24 – Valores medios y desvíos obtenidos del mortero de proporción 1:3,0:0,37.

Edad	Parámetro	fc (MPa)	ft (MPa)	Ec (GPa)	ε (μm/m)
1	Media	18,8	5,3	18,2	0
	Desvío	1,7	0,4	1,2	0
3	Media	41,7	7,1	19,5	503
	Desvío	0,9	0,3	1,2	4
7	Media	44,7	7,8	21,1	840
	Desvío	1,0	0,6	1,6	10
14	Media	48,8	9,0	24,9	1004
	Desvío	1,1	0,8	1,2	15
28	Media	51,3	10,3	24,5	1109
	Desvío	1,0	0,5	2,3	16
63	Media	54,2	10,6	25,2	1186
	Desvío	1,9	0,1	1,1	27

Tabla 25 – Valores medios y desvíos obtenidos del mortero AI-1.

Edad	Parámetro	fc (MPa)	ft (MPa)	Ec (GPa)	ε (μm/m)
1	Media	29,4	6,3	20,8	0
	Desvío	1,4	0,2	1,2	0
3	Media	46,7	7,0	30,3	396
	Desvío	2,4	0,6	2,5	19
7	Media	54,1	7,2	32,2	744
	Desvío	3,7	0,7	3,0	15
14	Media	64,4	12,1	34,0	1098
	Desvío	1,2	2,1	2,5	19
28	Media	68,9	14,3	34,4	1144
	Desvío	2,2	0,8	3,2	15
63	Media	72,9	14,9	34,6	1293
	Desvío	2,9	0,8	2,7	27

Tabla 26 – Valores medios y desvíos obtenidos del mortero AI-2.

Edad	Parámetro	fc (MPa)	ft (MPa)	Ec (GPa)	ε (μm/m)
1	Media	54,3	7,0	31,7	0
	Desvío	1,2	0,2	0,6	0
3	Media	74,0	7,2	38,0	371
	Desvío	2,0	0,2	2,9	23
7	Media	86,5	8,4	42,2	552
	Desvío	1,5	0,6	3,8	27
14	Media	95,2	10,3	43,4	770
	Desvío	3,5	0,8	2,3	23
28	Media	100,8	11,4	44,7	870
	Desvío	2,4	0,7	5,1	16
63	Media	104,6	12,6	45,4	900
	Desvío	2,9	0,4	2,5	16

Tabla 27 – Valores medios y desvíos obtenidos del mortero AI-3.

Edad	Parámetro	fc (MPa)	ft (MPa)	Ec (GPa)	ε (μm/m)
1	Media	1,6	0,4		0
	Desvío	0,2	0,1		0
3	Media	34,5	6,5	21,9	440
	Desvío	1,8	0,6	0,3	25
7	Media	44,8	7,9	27,9	992
	Desvío	1,2	0,2	2,0	18
14	Media	52,4	12,0	29,7	1859
	Desvío	0,9	2,3	0,5	11
28	Media	63,1	14,3	30,3	1990
	Desvío	1,9	0,2	3,1	13
63	Media	68,0	16,3	30,9	2330
	Desvío	3,6	0,8	2,7	13