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

MANUEL RAMÓN GRULLÓN PEÑA

**ESTUDO DA FISSURAÇÃO ASSOCIADA À
RETRAÇÃO EM ARGAMASSAS PARA REPARO EM
ESTRUTURAS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

São Paulo
2004

MANUEL RAMÓN GRULLÓN PEÑA

**ESTUDO DA FISSURAÇÃO ASSOCIADA À
RETRAÇÃO EM ARGAMASSAS PARA REPARO EM
ESTRUTURAS DE CONCRETO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de atuação:
Engenharia de Construção Civil e
Urbana

Orientador:
Prof. Dr. Paulo Helene

São Paulo
2004

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 16 de Dezembro de 2004

Autor

Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Grullón Peña, Manuel Ramón

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

107p.

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

1. Fissuração 2. Retração 3. Argamassa de reparo 4. Recuperação de estruturas I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil. II.t

Dedico este trabalho aos meus pais, Manolo e Fanny, às minhas irmãs Carol e Gaby, e à minha avó Pianza. Obrigado por tudo. Tudo que eu sou, eu devo a vocês.

“Daqui a alguns anos você estará mais arrependido pelas coisas que não fez do que pelas coisas que fez. Então solte suas amarras. Afaste-se do porto seguro. Agarre o vento em suas velas. Explore. Sonhe. Descubra”.

Mark Twain*

* Mark Twain (1835 – 1910). Escritor, jornalista e humorista americano que conquistou público a nível mundial com as suas divertidas histórias juvenis.

AGRADECIMENTOS

São muitas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para que eu possa concluir mais um capítulo da minha história. Com certeza não vou me lembrar delas todas, mas de qualquer forma neste primeiro parágrafo fica registrado o meu muito obrigado. Minha querida família, por ter sempre me apoiado e me dado todo o amor e carinho possível desse mundo.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Paulo Helene. Sua capacidade de trabalho, responsabilidade e competência são exemplares. É muito mais fácil a execução de um trabalho deste tipo quando ao seu lado.

Agradeço à Profa. Sílvia Selmo e ao Dr. Leonel Tula pelas suas observações e críticas que contribuíram enormemente no desenvolvimento deste trabalho. Ainda a este último, agradeço a oportunidade de ter “estagiado” sob sua orientação.

Meus agradecimentos aos professores das disciplinas cursadas, Milton Vargas, Antônio Figueiredo, Vahan Agopyan, Maria Alba Cincotto, Selmo Kuperman, Maria Helena Santos Taqueda e Vanderley John.

A todos os funcionários do departamento e do CPqDCC, meus amigos, Fátima, Engrácia, Renata, Reginaldo, Dorval, Seu João, Mário e Adílson, pela ajuda, paciência e principalmente pelo companheirismo.

À FAPESP, pelo suporte financeiro.

Agradeço também às empresas Holcim, Denver, MBT, Sika, Basf e Grace Brasil pela doação dos materiais utilizados na pesquisa. À ABCP pela execução das análises química e física do cimento.

Agradeço também a todos os meus amigos da pós, 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, às Tatianas Cervo e Tuchiya, e ao Yoakim. Agradeço especialmente à amiga Lucianinha, pela doçura e pelos caranguejos!, aos meus amigos pernambucanos Ângelo, Aluizio e Flávio, por tudo o que compartilhamos em Sampa, Recife e Floripa.

À Dra. Leontina por ter cuidado até das minhas dores de barriga, e pela pessoa linda que sempre foi comigo.

Algumas pessoas certamente merecem um destaque especial. O Maurício, por toda a ajuda, grande amizade e viagens que fizemos durante esse período. Muito obrigado meu caro! O Marcelinho (a Dominique também), pela amizade especialíssima que fizemos nesses anos, vou ficar com muita saudade! À Ritinha e à Patricinha, que foram (e continuarão sendo) realmente maravilhosas. Adoro vocês e a nossa amizade! À Maria Augusta pelas lindas atenções e à Mariana pelos momentos! Ao meu amigo Humberto Benini, uma pessoa realmente maravilhosa. Aos meus afilhados, Paulo e Ivie. A vocês tenho muito do que agradecer, realmente nem dá para destacar alguma coisa nesse curto espaço dentre tantas coisas e momentos. Só posso dizer que os amo de coração!

Agradeço também a todos os meus amigos que formaram parte dessa minha experiência nesse país maravilhoso, Miguel Paúl, Al Peña, Javier e Reynaldo, Silvia, Pumpy e Tito, Kersten, Joelle Marie e Serginho.

Finalmente, agradeço ao Brasil por ter me acolhido da forma em que o fez, e por todos os ensinamentos, especialmente aos que aprendi fora da Cidade Universitária. Nestas últimas linhas, fica registrado meu eterno agradecimento ao povo brasileiro.

GRULLON P, M. R. Estudo da fissuração associada à retração em argamassas para reparo em estruturas de concreto. São Paulo, 2004. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

RESUMO

A durabilidade das estruturas de concreto tem se tornado um assunto de interesse mundial nas últimas duas décadas. Os custos econômicos associados a reparos de estruturas de concreto são cada vez maiores, e cada vez mais a incidência de insucessos nessas intervenções corretivas que não resultam adequadas é reportada.

No Brasil a técnica de intervenção corretiva mais utilizada é a de reparos localizados com argamassas base cimento modificadas com polímeros. Uma das patologias mais comumente apresentada quando do uso deste tipo de intervenção é a fissuração associada à retração.

O presente trabalho pretende avaliar a influência das variáveis mais importantes e até de alguns parâmetros de dosagem, na fissuração devido à retração de argamassas de reparo. Para tal foi estudada uma família de argamassas com mesma consistência de traços 1:1,0, 1:1,5, 1:2,2 e 1:3,0; utilizando para estas um teor fixo de polímero e de aditivo superplastificante com relação à massa do cimento. Foram também avaliadas três argamassas de base cimento modificadas com polímeros disponíveis no país e comercializadas para o reparo de estruturas de concreto, de modo a classificar e comparar estas quanto à fissuração, em relação àquelas dosadas em laboratório. Para avaliar a tendência à fissuração das argamassas foram realizados ensaios de retração potencial livre, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e retração restringida.

Os resultados obtidos mostram que o modelo $\varepsilon_j - f_{tj}/E_{cj}$ conseguiu acusar a fissuração das argamassas que realmente fissuraram no ensaio de retração restringida. Esse modelo considera todas as variáveis influentes na fissuração medidas no programa experimental. Verificou-se também que para um estudo mais simplificado pode ser utilizado um modelo que considera apenas a retração livre, porém este se coloca sempre a favor da segurança.

Para argamassas de uma mesma família pode-se dizer que há um traço que apresenta a menor tendência à fissuração.

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

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

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA	1
1.2	OBJETIVO	5
1.3	PESQUISAS NA ÁREA	5
1.4	ORGANIZAÇÃO E CONTEÚDO	9
2	ARGAMASSAS DE REPARO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	11
2.1	MATERIAIS CONSTITUINTES.....	13
2.1.1	<i>Cimento.....</i>	<i>13</i>
2.1.2	<i>Agregado miúdo.....</i>	<i>13</i>
2.1.3	<i>Aditivos plastificantes.....</i>	<i>14</i>
2.1.4	<i>Aditivos retentores de água.....</i>	<i>14</i>
2.1.5	<i>Polímeros.....</i>	<i>15</i>
2.1.6	<i>Fibras de polipropileno.....</i>	<i>18</i>
2.2	REPARO TRADICIONAL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO	18
2.2.1	<i>Metodologia de execução.....</i>	<i>19</i>
3	FISSURAÇÃO POR RETRAÇÃO EM ARGAMASSAS DE REPARO	29
3.1	VARIÁVEIS INFLUENTES NA FISSURAÇÃO POR RETRAÇÃO DE ARGAMASSAS DE REPARO	29
3.1.1	<i>Resistência à tração.....</i>	<i>29</i>
3.1.2	<i>Retração.....</i>	<i>30</i>
3.1.3	<i>Módulo de Elasticidade.....</i>	<i>31</i>
3.1.4	<i>Fluência.....</i>	<i>31</i>
3.1.5	<i>Outras Fissuras em Reparos Localizados.....</i>	<i>36</i>
3.1.6	<i>Requisitos e critérios para argamassas de reparo presentes na literatura.....</i>	<i>36</i>
3.1.7	<i>Normalização.....</i>	<i>39</i>
3.2	AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO RESTRINGIDA	41
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	50
4.1	INTRODUÇÃO.....	50
4.2	VARIÁVEIS DO ESTUDO.....	50
4.2.1	<i>Parâmetros fixados:.....</i>	<i>50</i>
4.2.2	<i>Variáveis independentes.....</i>	<i>51</i>
4.2.3	<i>Variáveis dependentes.....</i>	<i>51</i>
4.2.4	<i>Variáveis intervenientes.....</i>	<i>51</i>
4.3	MATERIAIS EMPREGADOS.....	52
4.3.1	<i>Cimento.....</i>	<i>52</i>
4.3.2	<i>Areia.....</i>	<i>53</i>
4.3.3	<i>Aditivo superplastificante.....</i>	<i>53</i>
4.3.4	<i>Polímero.....</i>	<i>55</i>
4.3.5	<i>Argamassas industrializadas.....</i>	<i>56</i>
4.4	DOSAGEM DAS ARGAMASSAS PREPARADAS NO LABORATÓRIO	56
4.5	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	57
4.5.1	<i>Consistência.....</i>	<i>57</i>
4.5.2	<i>Resistência à Compressão.....</i>	<i>58</i>
4.6	ENSAIOS RELACIONADOS À FISSURAÇÃO.....	60
4.6.1	<i>Resistência à Tração na Flexão.....</i>	<i>60</i>
4.6.2	<i>Módulo de Elasticidade.....</i>	<i>61</i>
4.6.3	<i>Retração Livre.....</i>	<i>62</i>
4.6.4	<i>Retração Restringida.....</i>	<i>64</i>

5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	66
5.1	MODELAGEM DA TENDÊNCIA À FISSURAÇÃO.....	66
5.1.1	f_t vs tempo.....	72
5.1.2	E_c vs tempo.....	72
5.1.3	f_t/E_c vs tempo.....	72
5.1.4	ε vs tempo.....	73
5.1.5	$\varepsilon - f_t/E_c$ vs tempo.....	73
5.2	PARÂMETROS DE DOSAGEM DAS ARGAMASSAS PREPARADAS NO LABORATÓRIO VISANDO A DIMINUIÇÃO DA TENDÊNCIA À FISSURAÇÃO	74
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
6.1	CONCLUSÕES SOBRE OS MODELOS UTILIZADOS PARA A PREVISÃO DA PROPENSÃO À FISSURAÇÃO.....	83
6.2	CONCLUSÕES SOBRE A DOSAGEM DE ARGAMASSAS DE REPARO VISANDO A REDUÇÃO DA TENDÊNCIA À FISSURAÇÃO.....	83
6.3	TRANSFERÊNCIA AO MEIO.....	84
6.4	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	ANEXO A.....	96
	ANEXO B.....	104

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CONSISTÊNCIA IDEAL PARA ARGAMASSAS DE REPARO. AO APERTAR UMA CERTA QUANTIDADE DE ARGAMASSA NA MÃO A MESMA NÃO ESCOA PARA FORA.	13
FIGURA 2 – EFEITO DO TEOR DE ANTIESPUMANTE NA CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS. NOTAR A DIFERENÇA NO ESPALHAMENTO DAS DUAS ARGAMASSAS.....	16
FIGURA 3 – INFLUÊNCIA DO TIPO DE CURA NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DE ARGAMASSAS MODIFICADAS COM VÁRIOS TIPOS DE POLÍMERO (OHAMA, 1998) ³⁶	17
FIGURA 4 – INFLUÊNCIA DO TIPO DE CURA NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS MODIFICADOS COM POLÍMEROS (OHAMA, 1998) ³⁸	18
FIGURA 5 – RETRAÇÃO LIVRE DE UMA PARCELA DAS ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS PARA REPARO DISPONÍVEIS EM SÃO PAULO. (MEDEIROS, 2002) ¹¹	19
FIGURA 6 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE UMA PARCELA DAS ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS DO MERCADO DA CIDADE DE SÃO PAULO SEGUNDO A EN196-1/90. (MEDEIROS, 2002) ¹¹	20
FIGURA 7 – DELIMITAÇÃO INCORRETA. AS DESCONTINUIDADES OCASIONAM ACÚMULO DE TENSÕES.....	21
FIGURA 8 – RESULTADO ESTETICAMENTE DESAGRADÁVEL NUMA FACHADA DECORRENTE DE UMA DELIMITAÇÃO INAPROPRIADA.	21
FIGURA 9 – ILUSTRAÇÃO DE COMO DEVE SER FEITA A DELIMITAÇÃO PARA OTIMIZAR O DESEMPENHO DO REPARO FEITO COM ARGAMASSA.	22
FIGURA 10 – POSSÍVEL OCORRÊNCIA DE VAZIOS FORMADOS POR TRÁS DAS ARMADURAS.....	27
FIGURA 11 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO REPARO CONSIDERADO (SADOUKI E VAN MIER, 1997) ⁵⁹	28
FIGURA 12 – ENSAIO DE FLUÊNCIA COM CARREGAMENTO CONSTANTE DE 14,5 MPa AOS 28 E 90 DIAS (MEHTA E MONTEIRO, 1994) ⁶⁶	31
FIGURA 13 – INFLUÊNCIA DA RETRAÇÃO E DA FLUÊNCIA NA FISSURAÇÃO DE MATERIAIS A BASE DE CIMENTO PORTLAND (ADAPTADO DE MEHTA E MONTEIRO, 1994) ⁶⁶	32
FIGURA 14 - PARCELA DOS RESULTADOS OBTIDOS POR BISSONNETTE E PIGEON ⁶⁷	33
FIGURA 15 - PARCELA DOS RESULTADOS DE IGARASHI ET AL, (IGARASHI ET AL, 2000) ⁷⁹	42
FIGURA 16 – CORPO-DE-PROVA UTILIZADO PARA AVALIAÇÃO DA FISSURAÇÃO. AS DIMENSÕES DO CORPO-DE-PROVA TEM SIDO MUITO DISTINTAS DESDE OS PRIMEIROS USOS DO ENSAIO POR CARLSON E COUTINHO ATÉ A ATUALIDADE.....	43
FIGURA 17 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE AOS 28 DIAS, RETRAÇÃO LIVRE E IDADE DE FISSURAÇÃO DE SEIS ARGAMASSAS DE UM MESMO TRAÇO E MODIFICADA COM DISTINTOS MATERIAIS (GROCHOSKI ET AL, 2003) ⁸⁰	44
FIGURA 18 – RESULTADOS OBTIDOS POR HOSSAIN E WEISS EM ENSAIOS DE RETRAÇÃO RESTRINGIDA PELO MÉTODO DO ANEL (HOSSAIN E WEISS) ⁸¹	45
FIGURA 19 – CURVA TÍPICA DA DEFORMAÇÃO NO ANEL NOS ENSAIOS DE RETRAÇÃO RESTRINGIDA DE MOKAREM ⁸² . AS LINHAS TRACEJADAS REPRESENTAM O INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA PARA 95% DE SIGNIFICÂNCIA.	46
FIGURA 20 – MÉTODO DE ENSAIO UTILIZADO PELO MINISTÉRIO DE TRANSPORTES DA ALEMANHA PARA AVALIAÇÃO DA FISSURAÇÃO.....	48
FIGURA 21 – PLACA DE ENSAIO SPS PARA AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO RESTRINGIDA.	49
FIGURA 22 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA UTILIZADA NAS ARGAMASSAS PREPARADAS NO LABORATÓRIO.	53
FIGURA 23 – EXECUÇÃO DO ENSAIO DO MINI-ABATIMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DO GRAU DE SATURAÇÃO DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE.....	54
FIGURA 24 –ESPALHAMENTO DA PASTA DE CIMENTO COM VÁRIOS TEORES DE ADITIVO.	55
FIGURA 25 – DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS ATRAVÉS DO USO DA MESA DE CONSISTÊNCIA.	57
FIGURA 26 – RESULTADOS DA CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS ESTUDADAS MEDIDAS NA MESA DE FLUIDEZ ("FLOW TABLE").....	58

FIGURA 27 – ILUSTRAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E RUPTURA CARACTERÍSTICA. ...	59
FIGURA 28 – EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS AVALIADAS.	59
FIGURA 29 – ESQUEMA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO MEDIANTE O USO DE TRÊS CUTELOS.	60
FIGURA 30 – EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS ARGAMASSAS ESTUDADAS.	61
FIGURA 31 – CICLO DE CARREGAMENTO UTILIZADO NA EXECUÇÃO DO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE. ...	61
FIGURA 32 – EVOLUÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS ARGAMASSAS AVALIADAS NA PESQUISA.	62
FIGURA 33 – EXECUÇÃO DO ENSAIO DE RETRAÇÃO LIVRE.	63
FIGURA 34 – RETRAÇÃO LIVRE DAS ARGAMASSAS AVALIADAS.	63
FIGURA 35 – DIMENSÕES DOS ANÉIS DO ENSAIO DE RETRAÇÃO RESTRINGIDA.	64
FIGURA 36 – DETALHE DA FORMA APÓS APLICAÇÃO DO FILME DE TEFLON.	64
FIGURA 37 – ARGAMASSAS QUE FISSURARAM NO ENSAIO DE RETRAÇÃO RESTRINGIDA NO DECORRER DA PESQUISA.	65
FIGURA 38 – APLICAÇÃO DO MODELO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARA A AVALIAÇÃO DA FISSURAÇÃO DAS ARGAMASSAS ESTUDADAS.	67
FIGURA 39 – APLICAÇÃO DO MODELO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA A AVALIAÇÃO DA FISSURAÇÃO DAS ARGAMASSAS ESTUDADAS.	68
FIGURA 40 - APLICAÇÃO DO MODELO DA RELAÇÃO RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA A AVALIAÇÃO DA FISSURAÇÃO DAS ARGAMASSAS ESTUDADAS.	69
FIGURA 41 – APLICAÇÃO DO MODELO DA RETRAÇÃO LIVRE PARA A AVALIAÇÃO DA FISSURAÇÃO DAS ARGAMASSAS ESTUDADAS.	70
FIGURA 42 - APLICAÇÃO DO MODELO DA EXPRESSÃO RETRAÇÃO LIVRE MENOS A RELAÇÃO RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA A AVALIAÇÃO DA FISSURAÇÃO DAS ARGAMASSAS ESTUDADAS.	71
FIGURA 43 – EFEITO DO AUMENTO DO TEMPO DE CURA EM ARGAMASSAS CUJA CURVA DE $\varepsilon - F_t/E_c$ SE ENCONTRAM PRÓXIMAS À DO MODELO ENCONTRADO.	74
FIGURA 44 – DIAGRAMA DE DOSAGEM PARA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.	76
FIGURA 45 – DIAGRAMA DE DOSAGEM PARA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.	77
FIGURA 46 – DIAGRAMA DE DOSAGEM PARA MÓDULO DE ELASTICIDADE.	78
FIGURA 47 – DIAGRAMA DE DOSAGEM PARA A RELAÇÃO F_t/E_c	79
FIGURA 48 – DIAGRAMA DE DOSAGEM PARA A RETRAÇÃO LIVRE DA FAMÍLIA DE ARGAMASSAS ESTUDADAS.	80
FIGURA 49 – DIAGRAMA DE DOSAGEM PARA A EXPRESSÃO RETRAÇÃO LIVRE MENOS A RELAÇÃO F_t/E_c	81
FIGURA 50 – ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS ARGAMASSAS MOLDADAS DURANTE A PRIMEIRA FASE.	97
FIGURA 51 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS MODIFICADAS COM POLÍMERO MOLDADAS DURANTE A PRIMEIRA FASE E ENSAIADAS EM ENSAIO REALIZADO SEGUNDO A NORMA ASTM C349-97.	98
FIGURA 52 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO MÉDIA DAS ARGAMASSAS MODIFICADAS COM POLÍMERO MOLDADAS DURANTE A PRIMEIRA FASE E ENSAIADAS SEGUNDO A NORMA ASTM C348-97.	99
FIGURA 53 – CURVAS CARGA VS DESLOCAMENTO DE TODOS OS CORPOS-DE-PROVA COM TEOR DE POLÍMERO DE 8% E RELAÇÃO A/C=0,30.	99
FIGURA 54 – MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS ARGAMASSAS.	100
FIGURA 55 – ABSORÇÃO MÉDIA DAS ARGAMASSAS MOLDADAS DURANTE A SEGUNDA FASE.	101
FIGURA 56 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS COM POLÍMERO MOLDADAS DURANTE A SEGUNDA FASE E ENSAIADAS SEGUNDO A NORMA ASTM C349-97.	101
FIGURA 57 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS ARGAMASSAS COM POLÍMERO MOLDADAS DURANTE A SEGUNDA FASE E ENSAIADAS SEGUNDO A NORMA ASTM C348-97.	102
FIGURA 58 – MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS ARGAMASSAS COM POLÍMERO MOLDADAS DURANTE A SEGUNDA FASE.	103

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MEDIDAS ELETROQUÍMICAS REPRESENTATIVAS DO DESEMPENHO DOS REPAROS EM TERMOS DE CONTROLE DA CORROSÃO (CUSSON E OUTROS, 2004) ⁵⁰	24
TABELA 2 – RESULTADOS OBTIDOS POR POSTON E OUTROS ⁸ NUMA PESQUISA ENVOLVENDO ENSAIOS DE CAMPO E LABORATÓRIO (POSTON ET AL, 2001).....	35
TABELA 3 – REQUISITOS GERAIS DE MATERIAIS DESTINADOS A REPARO LOCALIZADO DE ESTRUTURAS (EMBERSON E MAYS, 1990) ⁷³	37
TABELA 4 – SUMÁRIO DOS REQUISITOS E CRITÉRIOS DE DESEMPENHO SUGERIDOS POR DECTER E KEELEY. (DECTER E KEELEY, 1997) ⁷⁴	37
TABELA 5 – REQUISITOS E CRITÉRIOS DE DESEMPENHO SUGERIDOS POR POSTON ET AL (POSTON ET AL, 2001) ⁸	38
TABELA 6 – ALGUNS DOS LIMITES SUGERIDOS POR MEDEIROS ¹¹ PARA CONTROLE E ESPECIFICAÇÃO DE ARGAMASSAS DE REPARO SUPERFICIAL PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO.	38
TABELA 7 – ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DA HKHA, APUD EMMONS (EMMONS ET AL, 2000) ⁷⁵	39
TABELA 8 – RESUMO DE REQUISITOS E CRITÉRIOS DE DESEMPENHO PARA ARGAMASSAS APLICADAS À MÃO NA NORMALIZAÇÃO EUROPÉIA PARA TODOS OS USOS PREVISTOS (CATARINO ET AL, 2000).	41
TABELA 9 – LEVANTAMENTO DE DISTINTAS DIMENSÕES UTILIZADAS NO ENSAIO DO ANEL PARA AVALIAÇÃO DA PROPENSÃO À FISSURAÇÃO DE CONCRETOS E ARGAMASSAS.	47
TABELA 10 – CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO UTILIZADO NA PESQUISA.	52
TABELA 11 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO CIMENTO UTILIZADO NA PESQUISA.	52
TABELA 12 – CARACTERIZAÇÃO DO POLÍMERO. (FORNECIDO PELO FABRICANTE).....	55
TABELA 13 – CARACTERIZAÇÃO BÁSICA DAS ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS UTILIZADAS NA PESQUISA.	56
TABELA 14 – CARACTERIZAÇÃO DAS FAMÍLIA DE ARGAMASSAS ESTUDADA.	56
TABELA 15 – IDADE DE FISSURAÇÃO E ABERTURA DA FISSURA NO ENSAIO DE RETRAÇÃO RESTRINGIDA.	65
TABELA 16 – COMPARAÇÃO DO RESULTADO DAS ARGAMASSAS QUE FISSURARAM SEGUNDO O MODELO EMPREGADO COM AS ARGAMASSAS QUE FISSURARAM NO PROGRAMA EXPERIMENTAL.	66
TABELA 17 – EQUAÇÕES EMPREGADAS NA EXECUÇÃO DOS DIAGRAMAS DE DOSAGEM.	75
TABELA 18 – COEFICIENTES PARA OBTENÇÃO DOS AJUSTES FEITOS A PARTIR DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA FAMÍLIA DE ARGAMASSAS ESTUDADA.	82
TABELA 19 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VARIÁVEL RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA 95% DE SIGNIFICÂNCIA.	98
TABELA 20 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VARIÁVEL RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	102
TABELA 21 – VALORES MÉDIOS E DESVIOS OBTIDOS DA ARGAMASSA DE TRAÇO 1:1,0:0,21.	104
TABELA 22 – VALORES MÉDIOS E DESVIOS OBTIDOS DA ARGAMASSA DE TRAÇO 1:1,5:0,24.	104
TABELA 23 – VALORES MÉDIOS E DESVIOS OBTIDOS DA ARGAMASSA DE TRAÇO 1:2,2:0,30.	105
TABELA 24 – VALORES MÉDIOS E DESVIOS OBTIDOS DA ARGAMASSA DE TRAÇO 1:3,0:0,37.	105
TABELA 25 – VALORES MÉDIOS E DESVIOS OBTIDOS DA ARGAMASSA AI-1.....	106
TABELA 26 – VALORES MÉDIOS E DESVIOS OBTIDOS DA ARGAMASSA AI-2.....	106
TABELA 27 – VALORES MÉDIOS E DESVIOS OBTIDOS DA ARGAMASSA AI-3.....	107

1 INTRODUÇÃO

1.1 *Justificativa e Importância*

Nos últimos 20 anos, tanto no Brasil como em muitos outros países adiantados a sociedade e a engenharia tem percebido que as estruturas de concreto não são eternas, como um dia se acreditou. A interação com o meio ambiente ao longo da extensa etapa de uso e operação das edificações ocasiona sua deterioração, fato que vem preocupando o meio técnico tanto no âmbito internacional como no nacional.

As mudanças volumétricas nas argamassas e concretos de cimento Portland devido à retração constituem um dos maiores causadores de deterioração prematura das estruturas de concreto. Devido às restrições existentes e inevitáveis, estas mudanças provocam tensões de tração que podem ocasionar a fissuração do material. Esta predisposição à fissuração tem sido apontada como um dos maiores inconvenientes das argamassas estruturais e do concreto, por formar uma rede de microfissuras interconectadas que se constitui num caminho de fácil acesso dos agentes agressivos¹. O relatório detalhado do NIST (National Institute of Standards and Technology), NISTIR 6519², afirma que um dos fatores mais importantes que afetam o transporte iônico através do concreto é a presença de fissuras.

Um outro fator que não deixa de ter grande importância, e que já foi apontado por Dal Molin³ é o fato das fissuras atingirem o usuário sob o ponto de vista de conforto, salubridade e satisfação psicológica.

Vários autores e autoridades vem fazendo alertas sobre o grande número de insucessos nas intervenções das estruturas de concreto, especialmente no caso de estruturas com corrosão de armaduras. O resumo do “workshop” sobre desempenho

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

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

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

de materiais de reparo organizado pelo NIST concluiu que a grande propensão à fissuração destes é um dos fatores críticos que afetam a durabilidade de estruturas reparadas⁴. O corpo de engenheiros da U.S. ARMY (Forças Armadas dos Estados Unidos) chegou a uma conclusão similar quando classificou a alta taxa de insucessos em reparos como inaceitável, sendo a fissuração a primeira causa destes insucessos⁵.

Reiterando a importância da fissuração para o bom desempenho de argamassas de reparo, Al-Zahrani et al⁶ destacaram a necessidade de se conhecer principalmente a resistência à tração, a retração e o módulo de elasticidade destes materiais.

Segundo Ibrahim et al⁷, considerável esforço do meio técnico e empresarial mundial tem sido aplicado para o desenvolvimento de técnicas de reparo e de reabilitação das estruturas deterioradas.

As dificuldades envolvidas na execução de reparos localizados com argamassas de reparo constituem um argumento importante para a realização e continuação de pesquisas sobre esse tema.

No estudo técnico-científico destes materiais se destacam as seguintes dificuldades:

- a) cada uma das diferentes famílias de produtos existentes no mercado possui características muito diferentes, o que dificulta a existência de um único material representativo;
- b) ensaios reais de desempenho requerem reparos representativos expostos a ambientes normalmente encontrados em serviço durante intervalos de tempo coerentes com o tempo de exposição natural; e

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.

c) os materiais de reparo encontram-se em desenvolvimento contínuo, o que acarreta que quando os estudos tenham sido completados, muito possivelmente os materiais terão sofrido mudanças importantes⁸.

Nos Estados Unidos, a importância dos materiais de reparo evidencia-se com o fato do mercado desses produtos ter tido uma taxa de crescimento entre 30% e 50% maior que o de novas construções no período compreendido entre 1980 e 2000, o que tem originado uma avalanche de novos produtos, dificultando a seleção e aumentando a potencialidade de ocorrência de problemas⁹.

A seleção dos produtos a serem utilizados em reparos, tem sido regularmente baseada em propriedades mecânicas de duvidosa coerência, ao invés de uma análise com critérios adequados¹⁰.

O mercado nacional possui um elevado número de argamassas para reparo, com comportamentos e propriedades muito diferentes¹¹. Uma avaliação crítica das recomendações de reparos e de seleção de materiais revela limitações e contradições significativas¹².

Nos Estados Unidos e no Canadá isto também representa um problema. Cusson e Mailvaganam afirmaram que a falta de informação sobre o desempenho de produtos de reparo é um dos grandes responsáveis pelas falhas em reparo de estruturas de concreto¹³.

No Brasil, as iniciativas para a normalização de produtos de reparo começaram em 1993 pelo Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (CB – 18), da

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.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, porém até hoje não conseguiu grandes avanços e não chegou sequer à elaboração de um texto base.

Desse modo, não existe ainda nenhum tipo de normativa nacional que defina ou prescreva as características e propriedades a serem atendidas pelas argamassas de reparo no Brasil, afetando dessa forma a todos os envolvidos na atividade: produtores, os quais acabam não sabendo quais propriedades e níveis de desempenho devem ser atingidos pelo seu produto, e usuários, que devido às contradições atuais, podem acabar fazendo escolhas inapropriadas.

Estes são alguns dos motivos que tem impulsionado na Europa a criação das normativas da série EN1504, ainda em fase de elaboração. Esse conjunto de normas pretende englobar todas as informações principais sobre produtos e sistemas para proteção e reparo de estruturas de concreto.

Os altos custos associados a intervenções corretivas não deixam de ser um fator que justifique este tipo de estudo¹⁴, fato já alertado na década de 80 por Sitter¹⁵ que mostrou os altos custos envolvidos nessas intervenções em estruturas de concreto.

Segundo o NRC-IRC (Institute for Research in Construction – National Research Council of Canada), os custos devidos ao envelhecimento da infra-estrutura dos Estados Unidos e do Canadá são altos de tal forma que podem afetar a eficiência econômica de ambos países, o que faz necessário o estudo de técnicas de reabilitação que garantam eficácia, segurança e baixos custos¹⁶.

A importância do estudo da fissuração devido à retração não só se limita ao caso de argamassas de reparo. Todos os elementos de elevada relação superfície/volume e todos os elementos que sofrem fissuração devido à retração restringida podem ser beneficiados com este trabalho.

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).

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.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é verificar a influência dos fatores mais relevantes na fissuração por retração de argamassas de reparo. Para tal serão avaliadas algumas propriedades das argamassas de reparo utilizando três argamassas industrializadas e uma família de mesma consistência dosada no laboratório do CPqDCC da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

As propriedades medidas serão resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração e retração livre. Paralelamente serão moldados corpos-de-prova em formato de anéis onde será avaliada a retração restringida dessas argamassas. As argamassas que fissuraram, fornecem pares de pontos (propriedade; idade de fissuração) que servirão para alimentar os modelos escolhidos para a avaliação da tendência à fissuração. Esses modelos serão testados quando plotados junto com as propriedades analisadas em função do tempo de todas as argamassas, sendo validado quando conseguir separar as argamassas que fissuraram das que não fissuraram.

O modelo validado fará parte dos parâmetros de dosagem apresentados no capítulo 5.2. Esses parâmetros, que possibilitam a escolha de uma argamassa que atenda às especificações de um dado caso de reparo (como por exemplo, um f_{ck} mínimo e uma determinada absorção de água máxima) passarão também a fornecer a argamassa que atenda às especificações e que tenha a menor tendência à fissuração por retração.

1.3 Pesquisas na Área

Diversas pesquisas referentes ao tema tem sido elaboradas no Brasil e no exterior. A continuação citam-se algumas pesquisas relacionadas.

Silva Jr¹⁷, fez uma revisão bibliográfica que abrangeu mecanismos de degradação do concreto, as características principais das argamassas de reparo, e ainda, uma revisão envolvendo o conceito de desempenho.

Medeiros teve como foco a caracterização das principais argamassas de reparo industrializadas disponíveis no mercado nacional e a verificação da influência 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.

polímeros como o EVA e o acrilato em propriedades mecânicas e relacionadas à durabilidade de estruturas de concreto armado reparadas. Foram avaliadas sete argamassas industrializadas disponíveis no mercado de São Paulo e seis argamassas dosadas no laboratório por Moreno Jr¹⁸, tendo como variáveis o tipo de cimento e o tipo de polímero.

Moreno Jr avaliou a forma em que a natureza e proporção de alguns dos constituintes das argamassas de reparo influenciam na resistência de aderência de dois substratos de concreto de resistências mecânicas distintas num extenso programa experimental que avaliou três aditivos superplastificantes, um mesmo tipo de cimento de cinco fábricas distintas, cinco proporções cimento:areia, dois tipos de polímero em três teores distintos, e três teores de cal hidratada CH-I.

Mitre¹⁹ na sua iniciação científica abordou o efeito de ciclos de temperatura e umidade na aderência de reparos localizados por meio de quatro argamassas para reparo e diversos tipos de tratamento superficial em substratos de relação a/c distintas.

Duas pesquisas estão sendo desenvolvidas na EPUSP visando o comportamento eletroquímico de argamassas e sistemas de reparo; a pesquisa de doutorado de Grochoski²⁰ pretende verificar eficiência de vários sistemas de reparo contra a corrosão numa estrutura real contaminada com íons cloreto, já a pesquisa de Bertolo²¹ visa avaliar a proteção do aço oferecida pelas argamassas estudadas por Medeiros através do uso da espectroscopia de impedância eletroquímica.

Bastos²² abordou o tema da retração e o desenvolvimento de propriedades mecânicas em argamassas mistas de revestimento com o objetivo de aproximar o estudo

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 iniciação 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. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. Tese (doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002, 172p.

laboratorial com a condição real de aplicação mediante o uso de um equipamento capaz de medir a retração restringida do material no estado fresco.

Já na Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás foi desenvolvida uma dissertação de mestrado na área²³. Tratou-se de uma avaliação de sistemas de reparo e recuperação para estruturas de concreto com corrosão das armaduras, a qual avaliou o comportamento de um concreto de referência, um micro-concreto fluido, e uma argamassa com inibidor, com e sem ponte de aderência epóxi frente ao ataque de íons cloreto. Os resultados permitiram concluir sobre a inadequação do concreto de referência de relação a/c de 0,55 para o reparo de estruturas atacadas pela corrosão de armaduras, e da ineficiência da ponte de aderência de base epóxi, representando este um custo adicional significativo que não apresenta melhorias no desempenho dos reparos.

Cabral²⁴ avaliou a eficiência de cinco sistemas de reparo no combate à iniciação e propagação da corrosão do aço por cloretos.

Na Universidad Politécnica de Madrid, a tese de Nepomuceno²⁵ propôs uma metodologia com base em ensaios eletroquímicos para avaliar a capacidade de proteção oferecida por 9 argamassas de reparo para estruturas com corrosão das armaduras.

As pesquisas citadas, apesar de serem de extrema importância para a evolução dos critérios de escolha de argamassas de reparo, não abordaram profundamente uma das propriedades mais críticas de desempenho de uma intervenção por reparo localizado, a fissuração devido às tensões geradas pela retração da argamassa de reparo. É justamente no intuito de preencher esta lacuna que o trabalho aqui proposto se justifica.

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.

O National Institute of Standards and Technology dos Estados Unidos (NIST) tem organizado duas conferências tratando o tema de reparo de estruturas. A primeira foi realizada em 1995 e versou justamente das pesquisas necessárias para minimizar a fissuração em materiais destinados ao reparo de estruturas de concreto. Nesta ocasião foram identificadas as seguintes necessidades para a indústria de reparos de concreto:

- A necessidade de ampliar o conhecimento das causas e propriedades que afetam a fissuração em reparos;
- A necessidade da previsão confiável do desempenho de reparos baseados em testes de curta duração; e
- A necessidade do desenvolvimento de modelos matemáticos para a previsão a vida útil dos reparos em estruturas de concreto.

O foco da conferência do 1999 foi sobre métodos de ensaio e técnicas de modelagem necessárias para prever o desempenho de reparos. Os participantes foram divididos em três grupos:

- Grupo 1 – modelagem do desempenho dos materiais;
- Grupo 2 – projeto de reparo, especificação e aplicação; e
- Grupo 3 – materiais e sistemas de reparo

Dentre as conclusões principais das atividades destes grupos podem ser destacadas as seguintes:

- Necessidade do estabelecimento de um método de ensaio que seja capaz de avaliar o desempenho em campo de materiais de reparo;
- Criação de grupos de estudos que visem tratar os aspectos relacionados ao desempenho de materiais de reparo;
- Melhorar a divulgação e a transferência e disponibilidade de informação, estabelecendo um espaço para a compilação de dados de desempenho de materiais de reparo; e
- Desenvolver diretrizes no uso do “Ring Test” para avaliar a resistência à fissuração dos materiais de reparo.

No Canadá, o Institute for Research in Construction do National Research Council do Canadá (NRC-IRC) tem sido muito ativo no estudo de materiais e sistemas de reparo. O subprograma de Estruturas de Concreto, dentro da área de pesquisa de Reabilitação da Infra-estrutura Urbana tem como objetivo o desenvolvimento de métodos para diagnóstico, previsão de desempenho e manutenção, de forma que permita uma reabilitação que combine da melhor forma possível economia e eficácia.

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC), também tem se interessado na celebração e apoio a eventos que tem como foco o reparo de estruturas, como o 2º Simpósio Internacional sobre Patologia, Durabilidade e Reabilitação de Edifícios celebrado no ano de 2003, e o Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas (REPAR), celebrado no ano 2000.

No contexto Ibero-Americano, o trabalho da Rede Reabilitar se destaca pelo intenso trabalho de intercâmbio e cooperação entre os profissionais mais renomados na área de inspeção, diagnóstico e reparo de estruturas de concreto de 13 países. As atividades profícuas desse grupo resultaram na publicação do "Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón"²⁶, o qual vem se constituindo num dos principais veículos técnicos de divulgação da área em toda Ibero-América.

Na América Latina, as atividades da Associação Latino-Americana de Controle da Qualidade, Patologia e Recuperação das Construções (ALCONPAT), que tem organizado desde o ano 1991 e a cada dois anos os Congressos de Patologia e Controle de Qualidade da Construção (CONPAT), destacando sempre a importância da durabilidade das construções novas e reparadas.

1.4 Organização e Conteúdo

O presente trabalho se encontra dividido da seguinte forma:

Capítulo 1, que trata sobre a justificativa e importância do tema, o objetivo da dissertação, as pesquisas relevantes na área desenvolvidas no Brasil e em alguns centros de pesquisa do mundo, e a organização e conteúdo do trabalho;

Capítulo 2, trata sobre os aspectos conceituais do reparo de estruturas e das argamassas de reparo, incluindo a metodologia de execução de reparos localizados;

Capítulo 3, que compreende as variáveis influentes na fissuração, os requisitos e critérios de desempenho presentes na literatura para argamassas de reparo e os

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.

esforços direcionados para a normalização destes produtos. Também possui uma revisão sobre métodos de ensaio utilizados para a avaliação da retração restringida;

Capítulo 4, no qual é apresentado o programa experimental. Neste são descritas as variáveis envolvidas no trabalho, os materiais empregados, a metodologia utilizada na pesquisa e os resultados obtidos;

Capítulo 5, de análise e discussão dos resultados do programa experimental;

Capítulo 6, de considerações finais da pesquisa, no qual se encontram as conclusões do trabalho, sugestões para prosseguimento dos estudos relacionados ao tema e as referências bibliográficas;

Ao final, constam como anexos:

Anexo A, determinação do teor ótimo do polímero.

Anexo B, resultados médios e desvios dos ensaios realizados no laboratório.

2 Argamassas de Reparo de Estruturas de Concreto

As manifestações patológicas nas estruturas de concreto se constituem em sinais claros da necessidade de algum tipo de intervenção corretiva para assegurar a vida útil. Podem ser de vários tipos, sendo que as mais comuns são fissuras, flechas excessivas, lixiviação e corrosão das armaduras.

Para avaliar objetivamente o dano sofrido por uma estrutura é necessário se conhecer a origem, o mecanismo e as causas do problema. Como origem é comum adotar as grandes etapas do ciclo de construção e vida de uma obra: a Concepção; o Projeto; os Materiais; a Execução e o Uso e Operação. Entre os mecanismos, pode-se citar: abrasão excessiva, erosão ou cavitação pela ação hidráulica, lixiviação, ataque químico, reações químicas próprias dos constituintes do concreto, corrosão do aço, ou algum tipo de exposição prolongada a um agente agressivo²⁷.

A alternativa mais adequada de intervenção escolhe-se com base no diagnóstico, na causa da deterioração, considerando o ambiente no qual a obra se encontra, o tipo de elemento que precisa da intervenção, a disponibilidade de produtos e técnicas de reparo e da capacidade técnica da equipe de trabalho disponível²⁸.

Como o escopo do presente trabalho é argamassas de reparo, somente será discutida a técnica que emprega este material, ou seja, a de reparo localizado, a qual é utilizada principalmente no reparo de estruturas com corrosão de armaduras. Outro uso comum é no reparo de bicheiras ou ninhos de concretagem.

As armaduras dentro do concreto armado encontram-se protegidas por duas barreiras: uma química, compacta e aderente de óxido passivante, formada pela reação de íons ferro das barras de aço com o hidróxido de cálcio presente no concreto²⁹; e uma física, o cobrimento de concreto, o qual não só serve como barreira contra os agentes agressivos, mas inclusive contra os elementos básicos necessários para a existência de

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.

corrosão eletroquímica, água e oxigênio³⁰. Essa camada de óxido passivante garante a manutenção da integridade do aço, sempre que preservado o ambiente alcalino que promove sua estabilidade. O acesso dos agentes agressivos que afetam a integridade dessa camada passivante se dá normalmente através dos poros do concreto. A presença de fissuras então, proporciona um caminho de fácil acesso para os agentes agressivos.

As alternativas de intervenção para reparo de estruturas de concreto sofrendo corrosão de armaduras mais comumente utilizadas apresentam-se a seguir:

- não intervir;
- reparo localizado;
- remoção de todo o concreto contaminado com cloretos ou carbonatado;
- sistema de proteção catódica;
- extração eletroquímica de cloretos;
- realcalinização;
- uso de inibidores de corrosão ou sistemas de barreira para reduzir a cinética do processo.

Nenhum dos métodos eletroquímicos têm sido aplicados em campo ainda no Brasil. Por este motivo faz-se necessário um melhor entendimento da tecnologia de reparo mais comumente utilizada.

Na atualidade, encontram-se disponíveis uma ampla variedade de produtos destinados ao reparo localizado de concreto, os mesmos podem ser categorizados em três grupos: argamassas de base cimento, argamassas de base cimento modificado com polímeros e resinas poliméricas. Estes grupos podem ainda ser sub-divididos em tipos genéricos de materiais de reparo segundo Cusson e Mailvaganam³¹.

O meio técnico utiliza cada vez mais estas argamassas para transferência da responsabilidade do material para as fábricas fornecedoras devido principalmente a estas exigirem dosagens muito elaboradas que poderiam ser consideradas inviáveis nas condições normalmente encontradas em 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.

Uma das exigências mais importantes para estas argamassas é a consistência no estado fresco, que deve permitir que sejam moldáveis com a mão. A Figura 1 mostra a consistência típica de uma argamassa de reparo.

Figura 1 – Consistência ideal para argamassas de reparo. Ao apertar uma certa quantidade de argamassa na mão a mesma não escoa para fora.

2.1 Materiais Constituintes

2.1.1 Cimento

O cimento é o aglomerante principal utilizado nas argamassas de reparo. O consumo utilizado nestas é muito maior ao utilizado na maioria das aplicações que utilizam este material, podendo ultrapassar a tonelada de cimento por metro cúbico de argamassa. Portanto, resulta muito importante a escolha do tipo de cimento que proporcione a melhor resistência à fissuração.

2.1.2 Agregado miúdo

A areia tem um papel muito importante nas argamassas de reparo. Quando comparado com o cimento constitui num material barato de enchimento, portanto tem uma função econômica importante. Também, é de conhecimento geral a grande importância dos agregados nas propriedades finais de concretos e argamassas.

A finura e granulometria do agregado miúdo é um parâmetro muito importante na dosagem, como verificado por Isa e Helene³², os quais obtiveram uma redução de consumo de cimento da ordem de 40% quando do emprego de uma granulometria mais apropriada, mantendo as mesmas propriedades físicas da argamassa.

2.1.3 Aditivos plastificantes

A função principal destes é a de produzir uma redução na quantidade de água necessária na mistura para a obtenção de uma mesma trabalhabilidade. Os aditivos são divididos segundo o seu poder de redução de água em plastificantes e superplastificantes. Os plastificantes convencionais são feitos a base de lignossulfonatos, e são capazes de reduzir até 15% da água de amassamento para uma mesma trabalhabilidade. Já os superplastificantes são capazes de reduzir a água de amassamento em 30% quando produzidos a base de melamina ou naftaleno sulfonatos, e até 40% no caso dos policarboxilatos.

As propriedades no estado fresco são geralmente modificadas quando do uso destes aditivos. As mais importantes são aumento na viscosidade que normalmente se traduz em redução da segregação, mudanças na pega do cimento e na perda de abatimento através do tempo. Esta última deve ser controlada com o uso de retardadores de pega adequados³³.

Esta redução de água de amassamento conseguida quando mantido o consumo de cimento traz significativas melhoras em praticamente todas as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos a base de cimento Portland devido à redução da relação a/c.

2.1.4 Aditivos retentores de água

A função dos aditivos retentores de água é a de liberar gradativamente a água interna nestes na medida em que a umidade do seu entorno é reduzida, agindo

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.

provavelmente da mesma forma relatada por Bentur et al³⁴ quando do uso de substituição parcial de agregados graúdos com agregados de baixa densidade. No caso de argamassas nas que o uso de agregado graúdo resulta impraticável, tem sido reportado o uso de aditivos a base de celulose³⁵.

2.1.5 Polímeros

A modificação de produtos a base de cimento com polímeros não é um conceito novo, tendo sido usado até a presente data por aproximadamente 80 anos. O conceito teórico da modificação com polímeros consiste em que tanto a hidratação do cimento como a formação do filme polimérico pela coalescência das partículas de polímero procedam de modo a gerar uma matriz monolítica na qual tanto a fase de cimento hidratado como a fase polimérica se interpenetrem, e os agregados sejam aglomerados nesta combinação de fases³⁶.

Hoje em dia, os polímeros mais utilizados para a modificação de matrizes de base cimento segundo o Comitê 548 do ACI são³⁷:

- copolímeros de estireno butadieno (S-B)
- homopolímeros ester-acrílicos (PAE) e copolímeros, principalmente com estireno (S-A)
- copolímeros de acetato de vinilo (VAC)
- homopolímeros de acetato de vinilo (PVAC)*

No estado fresco a adição de polímeros proporciona uma melhor trabalhabilidade que argamassas de referência. Isto se explica devido à ação lubrificante deste na mistura, à incorporação de ar e ao efeito dispersante dos surfactantes³⁸. No que diz ao respeito da incorporação de ar, esta deve ser controlada ou eliminada com o 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 retração**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Relatório de iniciação 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 água dentro do ambiente alcalino do concreto.

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

Na Figura 2 mostra-se uma análise qualitativa através da medida do diâmetro de espalhamento da importância do uso de uma dosagem adequada de antiespumante.

Figura 2 – Efeito do teor de antiespumante na consistência das argamassas. Notar a diferença no espalhamento das duas argamassas.

Argamassas modificadas com polímeros apresentam também uma grande capacidade de retenção de água. Isto pode ajudar a reduzir o risco de delaminações em reparos localizados devido à secagem da interface pela sucção do substrato.

A segregação por sua vez, é reduzida significativamente quando do uso de polímeros. A pega do cimento é geralmente atrasada com aumentos na relação polímero-cimento. A modificação nas propriedades físicas e mecânicas quando do uso de polímeros é bem documentada^{36,37,38,39}.

Os polímeros evitam a propagação das fissuras no compósito, servindo como ponte de transferência de tensões e ainda melhorando a interface agregado-matriz, conseqüentemente podendo aumentar significativamente a resistência à tração e a energia de fratura.

O módulo de elasticidade das argamassas e concretos modificados com polímeros pode ser significativamente reduzido segundo o tipo e teor do polímero empregado. A retração livre por sua vez, pode ser ligeiramente aumentada⁴⁰.

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.

O coeficiente de expansão térmica pode ser levemente aumentado dependendo principalmente do teor de polímero empregado. Sem dúvida, algumas das propriedades mais afetadas quando do uso de polímeros são as propriedades relativas ao transporte de líquidos e gases, fato pelo qual estes tem sido uma alternativa interessante para combater a corrosão em pontes e estruturas destinadas a estacionamento sujeitas ao uso de sais de degelo.

Sabe-se da grande influência do tipo de cura no desempenho das argamassas e concretos modificados com polímeros. A Figura 3 mostra o comportamento na resistência à tração na flexão de argamassas moldadas com distintos tipos e teores em relação à massa do cimento de adições poliméricas. Mostra-se que a cura mais adequada é aquela que proporciona um grau razoável de hidratação do cimento nas primeiras idades, seguido de condições secas tal, que permitam a formação do filme polimérico devido à coalescência das partículas de polímero.

Figura 3 – Influência do tipo de cura na resistência à tração na flexão de argamassas modificadas com vários tipos de polímero (Ohama, 1998).

A Figura 4 mostra que o efeito de períodos longos de cura seca é muito menor na resistência à compressão de concretos modificados com polímeros quando comparados a concretos de referência. Segundo Ohama, este comportamento deve-se à excelente retenção de água que possuem estes compósitos.

Figura 4 – Influência do tipo de cura na resistência à compressão de concretos modificados com polímeros (Ohama, 1998).

2.1.6 Fibras de polipropileno

Muitas das argamassas disponíveis para reparo são modificadas com fibras de polipropileno. No estado fresco, a adição destas fibras tende a aumentar a consistência, e também tem sido comprovado o efeito benéfico destas em reduzir a retração plástica⁴¹. A redução na retração livre também tem sido documentada^{80,42}, explicando-se isto devido à possível criação de macro-poros formada na interface fibra-matriz.

2.2 Reparo Tradicional de Estruturas de Concreto

Diferentes técnicas e materiais têm surgido para intervenção visando a correção das manifestações patológicas comumente apresentadas nas estruturas existentes. Dentre elas, os reparos localizados com argamassas poliméricas de base cimento são amplamente utilizados, devido a vários motivos, entre eles, versatilidade do sistema que dispensa fôrmas, custo relativamente baixo e eficiência comprovada, entre outros^{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.

O reparo localizado de estruturas com corrosão das armaduras requer um estudo detalhado. Simplesmente a remoção do concreto e a substituição deste pelo material de reparo não garante solução ao problema, principalmente quando no caso de corrosão pela ação de íons cloreto.

2.2.1 Metodologia de execução

Para o sucesso de um reparo localizado as seguintes etapas devem ser atendidas e bem sucedidas: seleção dos materiais, delimitação das áreas, remoção do concreto velho, limpeza das armaduras, preparação do substrato, reconstituição da seção e cura.

2.2.1.1 Seleção dos materiais

A seleção dos materiais é uma das etapas mais delicadas, devido principalmente ao desconhecimento atual dos níveis de desempenho que devem ser atingidos para o sucesso dos reparos localizados e à grande quantidade de produtos e tipos genéricos de materiais com comportamentos muito diferentes destinados para o mesmo uso. Medeiros¹¹ obteve diferenças da ordem de 3,4 vezes na magnitude da retração livre de argamassas de reparo de base cimento variando desde 0,05% até 0,17% aos 28 dias, como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – Retração livre de uma parcela das argamassas industrializadas para reparo disponíveis em São Paulo. (Medeiros, 2002).

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

Medeiros também obteve diferenças igualmente significativas na resistência à tração na flexão (até 300%) e na resistência à compressão (até 500%). Essas diferenças estão apresentadas na Figura 6.

Essas grandes diferenças podem acarretar mudanças importante no comportamento desses materiais quanto à fissuração. Uma pesquisa feita pelo Alberta Transportation and Utilities⁴⁵ avaliou 46 distintos materiais disponíveis para reparo localizado no mercado canadense. Destes, somente 15% apresentaram retração livre menor do que 0,05% aos 30 dias; mais do 50% dos produtos avaliados apresentaram uma retração de 0,10% na mesma idade, e ainda vários dos produtos apresentaram retrações maiores do que 0,25%. Esta pesquisa concluiu que estas diferenças nos materiais é um grande propiciador à ocorrência de insucessos, principalmente quanto à fissuração.

Figura 6 – Resistência à tração na flexão e resistência à compressão de uma parcela das argamassas industrializadas do mercado da cidade de São Paulo segundo a EN196-1/90. (Medeiros, 2002).

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

Diante de todas as discrepâncias aqui citadas, o presente trabalho visa contribuir para o conhecimento das propriedades que influem na retração por fissuração, com o intuito de melhorar a deficiência das argamassas utilizadas em reparos no país.

2.2.1.2 Delimitação das áreas a serem reparadas

Uma vez definidos os locais a serem reparados, procede-se a circunscrever estes dentro de uma figura geométrica retangular⁴⁶. Sempre deve utilizar-se o bom senso para procurar ajustar ao máximo possível a figura às características do local reparado; dessa forma evita-se o excesso de descontinuidades que resultam em acúmulo de tensões ou mesmo em figuras esteticamente desagradáveis, como se apresenta na Figura 7 e na Figura 8.

Figura 7 – Delimitação incorreta. As descontinuidades ocasionam acúmulo de tensões.

Figura 8 – Resultado esteticamente desagradável numa fachada decorrente de uma delimitação inapropriada.

A delimitação sempre deve ser feita com disco-de-corte para garantir uma espessura mínima em todo o perímetro do corte, evitando assim a delaminação e deficiências

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).

com relação à aderência^{*,47}. Quando possível, este corte deve ser feito como mostra a Figura 9, ou seja, com um ligeiro ângulo de modo a que a seção do reparo seja maior no interior da estrutura de concreto do que na superfície, desse modo se garante que o reparo não termine no zero. Entretanto, o projeto de norma europeu da série EN1504, permite que o reparo termine no zero num ângulo de até 45°⁴⁸, contradizendo a maioria de publicações e recomendações que visam melhorar a aderência dos reparos localizados.

Figura 9 – Ilustração de como deve ser feita a delimitação para otimizar o desempenho do reparo feito com argamassa.

Em reparo de armaduras com corrosão, devem-se incluir as proximidades das áreas que estão sofrendo a corrosão para reduzir o risco da criação de macro-células ou macro-pilhas; ocasionando com que as áreas reparadas passem a atuar como zonas fortemente catódicas em relação às áreas próximas ao reparo; podendo ocasionar uma corrosão mais severa do que aquela que deu origem ao reparo, fenômeno presente na literatura como incompatibilidade eletroquímica. Esta incompatibilidade eletroquímica é um tema bastante controverso, e será abordada na tese de doutoramento de Grochoski.

* 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.

Tanto Gulikers e van Mier quanto Morsszeki e Wang, apud Morgan relatam bom desempenho quanto a este fenômeno quando do uso de materiais a base de cimento Portland modificados com polímeros.

Morgan⁴⁹ tem reportado o sucesso de reparos feitos em 60 pontes no Canadá com idades destes reparos variando entre 8 e 30 anos. Numa outra avaliação de um reparo executado no edifício de estacionamento de um hospital contaminado por cloretos devido ao uso de sais de degelo, este mesmo autor comprovou a ausência de inversão de pilhas eletroquímicas após 8 anos de completadas as atividades de recuperação.

Uma das avaliações do comportamento eletroquímico de reparos mais significativas é a pesquisa de campo conjunta feita pelo NRC-IRC e o Ministério de Transportes de Ontário (MTO) com cinco fornecedores de sistemas para reparos de estruturas de concreto⁵⁰. Para a pesquisa, foram avaliados 6 sistemas de reparo distintos e um concreto de referência, na reabilitação dos guarda-corpos de uma ponte contaminada por cloretos devido ao uso de sais de degelo localizada na cidade de Renfrew, Ontário.

Os resultados da pesquisa estão apresentados na Tabela 1. O critério utilizado para o estabelecimento do desempenho foi:

Potencial de corrosão: Uma mudança positiva do valor de potencial entre novembro do 1999 e novembro de 2002 recebeu um valor de 2 (risco de corrosão muito baixo), uma mudança negativa menor do que 150 mV, recebeu um valor de 1 (risco de corrosão de baixo a moderado) e uma mudança negativa maior do que 150 mV receberia um valor de 0 (alto risco de corrosão). Estes valores foram tomados com base na norma ASTM C876⁵¹.

Diferença de potencial: Para quantificar a formação de macro-células de corrosão foi medida a diferença entre o potencial de corrosão do reparo e o do substrato após

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..

aproximadamente 3 anos de completadas as atividades de reabilitação. Um valor menor do que 100 mV receberia 2 pontos, um valor entre 100 e 150 mV receberia 1 ponto e um valor maior a 150 mV receberia 0 pontos.

Resistividade elétrica: Foi medido o valor de resistividade elétrica após aproximadamente 3 anos de completadas as atividades de reabilitação. Valores maiores do que 20 kΩ-cm receberiam 2 pontos, entre 10 e 20 kΩ-cm receberiam 1 ponto, y menores de 10 kΩ-cm, 0 pontos. Estas faixas de valores foram tomadas do trabalho de Bungey⁵².

Tabela 1 – Medidas eletroquímicas representativas do desempenho dos reparos em termos de controle da corrosão (Cusson e outros, 2004).

Testes selecionados	Número						
	Ref.	2	3	5	6	10	12
Potencial de corrosão (mV) – Risco de corrosão Mudança no reparo desde '99-'02	-156 (0)	-72 (1)	27 (2)	110 (2)	19 (2)	71 (2)	139 (2)
Diferença de Potencial (mV) – Formação de macro-células de corrosão Diferença reparo/substrato em Set '02	-18 (2)	-43 (2)	-142 (1)	- 102 (1)	- 125 (1)	- 132 (1)	-102 (1)
Resistividade elétrica (kΩ-cm) – Risco de corrosão Valor medido em Set '02	31 (2)	102 (2)	117 (2)	248 (2)	724 (2)	158 (2)	784 (2)
Pontuação total	4	5	5	5	5	5	5

Como recomendação final, os autores indicam o uso de materiais de reparo de baixa permeabilidade, resistividade elétrica e de alta resistência à tração para a reabilitação de estruturas com corrosão de armaduras desde que a fissuração do material seja prevista, discordando assim de uma grande quantidade de trabalhos, que criticam o uso de materiais de reparo de qualidade muito superior às do substrato.

2.2.1.3 Remoção do concreto velho

A remoção do concreto pode ser feita tanto com escarificação mecânica quanto manual, e deve incluir a remoção de todo concreto em mal estado.

Após a remoção do concreto, e principalmente quando do uso de remoção mecânica, deve ser especificado o jateamento com material abrasivo ou com jato de água de alta

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

pressão, no mínimo de 50 MPa. Este procedimento garante a remoção de uma capa de concreto fraturada que se forma durante os procedimentos que envolvem impacto. Têm sido reportados diversos casos de delaminação de reparos devido à existência deste plano enfraquecido que se localiza a uns 9mm da superfície^{49,53}. No caso de corrosão de armaduras por íons cloreto, é necessária a remoção dos produtos de corrosão presentes no aço, portanto deve ser removida uma espessura de concreto por trás das barras tal que permita a limpeza das mesmas.

2.2.1.4 Limpeza da armadura

As armaduras devem sempre ser deixadas totalmente limpas de resíduos de concreto e poeira, graxa ou produtos de corrosão. No caso de reparo por corrosão de armaduras o grau de limpeza das barras será dependente da origem da despassivação do aço e do tipo de material de reparo a ser utilizado.

Quando a despassivação dá-se pela redução do pH do concreto ao redor das armaduras, a exigência de limpeza é inferior àquela que se dá pelo ataque de íons cloreto. Por via de regra, as resinas poliméricas normalmente precisam de uma limpeza muito mais rigorosa, do que as argamassas de base cimento, sendo comumente exigido o estado de "metal branco*".

Se for evidenciada corrosão das armaduras após estas terem sido limpas e antes de ser colocada a argamassa de reparo, deve se analisar se os óxidos formados estão bem aderidos à barra de aço. Se estiverem bem aderidos, normalmente pode-se proceder ao preenchimento com material de reparo sem necessidade de uma outra limpeza; caso contrário, as barras devem ser limpas novamente⁵⁴.

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.

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

2.2.1.5 Umidade do substrato

A aderência dos compostos à base de cimento Portland em substratos porosos dá-se por dois fenômenos. No estado fresco pela adesão inicial, explicada pela teoria de ligação superficial entre sólidos e líquidos (equação de Dupré & Young), e no estado endurecido pela penetração da solução aglomerante e posterior precipitação de cristais de portlandita na interface⁵⁵. Tem sido reportado ainda em alguns casos, o aparecimento de cristais de C-S-H na interface, e que no caso de resinas poliméricas, a aderência deve-se à existência de forças de Van der Waals⁵⁶. A condição de umidade do substrato é diretamente dependente do tipo de material escolhido para realizar o reparo.

Como regra geral, a condição ótima de aplicação dos materiais a base de cimento Portland (incluindo os modificados com polímeros) é a condição de saturado com superfície seca. Se o substrato estiver seco, pode acontecer que o mesmo absorva muita umidade do material de reparo, originando uma secagem na interface que resulta em aderências muito baixas; no entanto, se o substrato estiver excessivamente úmido origina-se uma região de elevada relação água/aglomerante na interface, que acaba resultando prejudicial e trazendo consigo uma aderência fraca. Já para o caso das resinas poliméricas o substrato deve estar seco⁵⁷, devido a que umidades altas prejudicam na coalescência das partículas de polímero.

2.2.1.6 Reconstituição da seção da estrutura

Depois de completadas as etapas anteriores procede-se à reconstituição da seção com o material de preenchimento escolhido. O material de reparo deve-ser misturado segundo as recomendações e proporções dadas pelo fabricante.

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.

Especial atenção deve ser disposta para garantir uma extensão de aderência adequada e para evitar a formação de vazios por trás das armaduras como mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Possível ocorrência de vazios formados por trás das armaduras.

Um assunto importante é o da espessura máxima de aplicação em aplicações horizontais nas que o material de reparo deve resistir seu próprio peso sem detrimientos na aderência como no caso de fundo de lajes e vigas. Este item tem sido objeto de estudo pelo CEN (Comitê Europeio de Normalização), porém sem se ter chegado ainda num método de ensaio simples que permita esta avaliação.

A espessura de aplicação no sentido geral é um assunto de certa forma controverso. Camadas de espessura menor devem apresentar uma saída de água mais acelerada devido à menor relação superfície/volume⁵⁸, e devem ser portanto mais propensas a fissurar. A pesquisa feita por Sadouki e van Mier⁵⁹ fazendo simulações por elementos finitos do crescimento de fissuras devido à retração em sistemas de reparo como o apresentado na Figura 11, utilizando dois níveis de resistência de aderência e de espessura de reparo concluiu que a fissuração por retração diminui com o aumento na espessura do reparo devido à menor taxa de secagem, e que quando em presença de resistências de aderência baixas, estas mudanças volumétricas podem ocasionar o destacamento do material de reparo. Entretanto, no campo percebe-se o aparecimento de fissuras de retração quando da aplicação de espessuras grandes. Isto é explicado

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.

possivelmente devido à pouca restrição oferecida pelo substrato. Por este motivo a boa prática recomenda que a aplicação seja feita em camadas de 2 cm espaçadas em 24 h.

Figura 11 – Representação esquemática do reparo considerado (Sadouki e van Mier, 1997).

2.2.1.7 Cura

A última etapa do reparo localizado é tão importante quanto as anteriores. A mesma é também dependente do tipo de material escolhido. No geral, as resinas poliméricas não devem ser curadas com água. As argamassas à base de cimento Portland modificadas com polímeros precisam de cura, a qual deve começar imediatamente após o endurecimento. Devido à necessidade da formação do filme polimérico decorrente da secagem, torna-se prudente interromper a cura após atingido certo grau de hidratação.

3 Fissuração por Retração em Argamassas de Reparo

A durabilidade é um atributo essencial nos componentes e materiais de construção. A procura de métodos de ensaio, de modelos acelerados e critérios de avaliação de desempenho de materiais e sistemas utilizados na indústria da construção civil para prever o comportamento a longo prazo tem crescido muito nos últimos anos⁶⁰. Mesmo existindo numerosas metodologias de ensaios e especificações para materiais de construção que visam avaliar o desempenho do material ou componente, é difícil encontrar correlação entre elas, sobretudo entre as metodologias e o comportamento do material em serviço⁶¹.

Nos últimos anos tem crescido muito os esforços direcionados ao estudo da fissuração em concretos e argamassas. O estudo da fissuração resulta bastante complexo, por envolver muitas variáveis, tanto do material, como quanto da condição da exposição. A qualidade da mão de obra e a cura quando mal executadas podem ser mais significativas no resultado final que todas as outras variáveis influentes na fissuração.

3.1 Variáveis influentes na fissuração por retração de argamassas de reparo

Tem sido apontado que o sucesso de argamassas de reparo quanto à fissuração por retração é principalmente uma função das seguintes variáveis: resistência à tração, retração, módulo de elasticidade e fluência^{5,8,71}.

3.1.1 Resistência à tração

Quanto maior a resistência à tração maior a capacidade do material resistir às solicitações de tração impostas pela restrição do substrato. Por isto existe um interesse especial em melhorar a resistência à tração nas argamassas para reparo. Isto tem sido conseguido com baixas relações a/c e com o uso de polímeros. Medeiros avaliou argamassas do mercado de São Paulo destinadas para o mesmo tipo de reparo com

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.

resistências à tração na flexão variando desde 8 até 24 MPa. A resistência à tração pode ser aumentada com o uso de relações a/c baixas e com a modificação com polímeros.

3.1.2 Retração

A retração tem sido apontada como uma das propriedades mais significativas na fissuração⁶². São muitas as variáveis que influem na retração, e podem ser separadas em dois grupos: quanto à composição da mistura e quanto à condição de exposição. As variáveis mais influentes no tocante à composição da mistura são a relação a/c e o volume de pasta. Já quanto à condição de exposição temos o período de cura, a umidade relativa do ambiente, temperatura, relação superfície/volume, grau de restrição e vento.

O efeito de todas estas variáveis dificulta em grande medida o estudo da fissuração em ensaios expostos a ambientes externos. Segundo Altoubat⁶³, a taxa e a história da evolução dos esforços devidos à retração restringida em idades iniciais são fatores muito importantes que influenciam significativamente a idade de fissuração e a tensão no momento da falha. Estes parâmetros devem ser analisados para se poder atingir uma previsão precisa da fissuração devida à retração.

Tem sido criticado o uso de argamassas de reparo com resistências muito elevadas, que implicitamente tendem a possuir altos módulo de elasticidade e alta retração devido à grande quantidade de pasta. Cusson e Repette⁶⁴ especificaram a necessidade do uso de concretos com relação a/c maior do que 0,45 para reduzir os efeitos da retração autógena em guarda-corpos de pontes canadenses. Por outro lado, tem sido documentada a grande dependência da retração à relação a/c. Pietra et al⁶⁵ estudaram

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 retração por secagem em concretos. In: 45º Congresso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON. **Anais**. Espírito Santo, Brasil.

uma família de concretos de mesma consistência com relações a/c variando desde 0,37 até 0,54; sendo a magnitude da retração menor nos concretos de menor relação a/c.

3.1.3 Módulo de Elasticidade

A maioria dos pesquisadores no tema, defende o uso de materiais de reparo com módulo de elasticidade próximo ao do concreto da estrutura reparada para evitar problemas de compatibilidade. A utilização de argamassas de reparo com módulos de elasticidade muito altos pode resultar na atração de cargas muito elevadas, do mesmo modo em que o uso de materiais com módulos muito baixos deve ser evitado, sendo esta uma das principais desvantagens do uso de resinas poliméricas. Entretanto, também tem sido recomendado o uso de materiais de reparo de módulo de elasticidade significativamente maiores aos da estrutura, pois estes conseguem transferir as solicitações ao concreto do substrato.

Segundo Bastos um módulo de elasticidade baixo possibilita uma diminuição das tensões de tração, aumentando desse modo a resistência à fissuração do material.

3.1.4 Fluência

A fluência é o fenômeno mediante o qual os materiais viscoelásticos quando submetidos a um carregamento constante ao longo do tempo tendem a aumentar a deformação⁶⁶. Na Figura 12 apresenta-se a curva de um ensaio típico de fluência de concreto à compressão.

Figura 12 – Ensaio de fluência com carregamento constante de 14,5 MPa aos 28 e 90 dias (Mehta e Monteiro, 1994).

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

A Figura 13 ilustra o retardamento na fissuração ocasionado pelo alívio da tensão devido à fluência.

Figura 13 – Influência da retração e da fluência na fissuração de materiais a base de cimento Portland (Adaptado de Mehta e Monteiro, 1994).

As variáveis influentes na fluência são as mesmas que governam a retração, sendo a relação a/c um dos parâmetros mais significativos, quanto menor a relação a/c , menor a retração e a fluência; porém experimentalmente foi recentemente comprovado que pelo menos nas primeiras idades (até 5 dias) a fluência sob tração foi maior nos traços de menor relação a/c em concretos de relações a/c 0,40 e 0,50 utilizados para pavimentos de aeroportos. Ainda segundo estes autores, as tensões de tração geradas pela restrição restringida do concreto são significativas logo nos primeiros dias após a concretagem, e podem ocasionar a fissuração do material. O papel da fluência à tração na redução da tensão associada aos esforços gerados pela retração é substancial, e pode reduzir os mesmos em até 50%.

Segundo Bissonnette e Pigeon⁶⁷ o papel da fluência sob tensão é um fenômeno de grande importância, que pode ter um papel muito importante devido a reduzir as tensões decorrentes da retração restringida em reparos. Na Figura 14 são apresentados os resultados de retração livre e fluência de dois dos traços estudados

⁶⁷ BISSENETTE, 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.

por estes pesquisadores; pode-se notar que a retração livre e a fluência tendem a reduzir com o aumento do período de cura. Os resultados de Østergaard et al.⁶⁸ também demonstram a grande dependência da fluência à idade em que começa o carregamento.

Figura 14 - Parcela dos resultados obtidos por Bissonnette e Pigeon.

Vários pesquisadores concordam no efeito que a fluência pode ter no retardamento da fissuração em reparos localizados^{1,6,62,69,70}, porém na literatura só existe um trabalho voltado à área de reparo tentando analisar a influência desta variável num programa experimental envolvendo ensaios de retração restringida. Os autores do mesmo não conseguiram comprovar a existência de alguma relação direta entre fluência e fissuração, muito provavelmente pelo trabalho ter sido feito com vários materiais de formulação desconhecida apresentando grandes diferenças em todas as variáveis

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.

influentes na fissuração: retração livre, resistência à tração, coeficiente de expansão térmica e módulo de elasticidade. Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de critérios de desempenho para argamassas de reparo e outros materiais. Foi patrocinado pela US Army Engineer Waterways Experiment Station (WES) para ser utilizado pelo Batalhão de Engenheiros (COE). Uma parcela dos resultados desta pesquisa estão apresentados na Tabela 2.

Com estes resultados, os autores não conseguiram estabelecer nenhuma relação direta entre resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, coeficiente de expansão térmica, retração livre ou fluência na fissuração. Um fator que deve ter influenciado negativamente no sentido de obter resultados mais coerentes neste trabalho é o fato de terem sido utilizados distintos tipos de cura no ensaio de retração restringida, ou seja, conforme a recomendação do fabricante para cada um dos materiais avaliados, o que certamente influenciou na idade de fissuração das argamassas.

Outro inconveniente neste tipo de pesquisa é o fato destas serem feitas utilizando argamassas industrializadas, de formulações desconhecidas. Isto acaba dificultando no sentido de poder estabelecer a influência dos parâmetros de dosagem na fissuração, e de certo modo afetando o desenvolvimento na formulação destes produtos. Neste sentido, as pesquisas de Medeiros e Moreno Jr tentam preencher essa carência de informações quanto à influência de parâmetros de dosagem.

Tabela 2 – Resultados obtidos por Poston e outros numa pesquisa envolvendo ensaios de campo e laboratório (Poston et al, 2001).

Tabela 2 - Resultados obtidos por F. Botten e outros em sua pesquisa envolvendo ensaios de campo e laboratório (F. Botten et al., 2001)									
Desempenh o em campo	Compressão (MPa)	Tração direta (MPa)	Módulo de Elasticidad e (GPa)	Coef. Expansão Térmica (x 10 ⁻⁶ /°F)	Retração Livre (μm/m) (28 dias)	Ensaio do Anel	Ensaio Placa SPS	Fluência específica depois de 1 ano (x 10 ⁻⁶ /MPa)	
						Idade de Fissuração (dias)	(mm)	Compressão	Tração
Desempenho satisfatório									
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
Média	50	2,8	24	14,1	291		5.59	134,0	183,7
Desempenho intermediário									
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
Média	47	3,1	24	13,4	435		8.89	182,4	165,3
Desempenho inadequado									
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
Média	45	2,2	29	16,0	588		11.18	252,2	1132,6

3.1.5 Outras Fissuras em Reparos Localizados

No estado fresco, as fissuras tipicamente associadas ao concreto, como as de retração plástica, assentamento plástico e dessecação superficial não acontecem comumente nas argamassas de reparo, devido principalmente às suas características próprias no estado fresco. Entretanto, estas argamassas são sujeitas a sofrer fissuração durante o acabamento (sarrafeamento) da superfície. Esta tendência à formação de fissuras de sarrafeamento aumenta com argamassas contendo fibras de polipropileno, e aumenta também na medida em que a argamassa vai perdendo sua fluidez através do tempo.

No estado endurecido, além das fissuras ocasionadas pela restrição devido à retração, a restrição do substrato associada a mudanças significativas de temperatura pode originar tensões elevadas de forma a levar o material de reparo à falha.

3.1.6 Requisitos e critérios para argamassas de reparo presentes na literatura

As referências mais completas sobre o tema tem sido publicadas nos Estados Unidos^{8,71,72,73} e na Europa⁷⁴. Um ponto em comum nestes trabalhos todos é o de afirmar as grandes dificuldades envolvidas em se conseguir critérios de desempenho adequados. Na Tabela 3 apresenta-se uma das primeiras referências existentes sobre requisitos para o bom desempenho de reparos, consiste numa série de exigências com fundamentos de base teórica na tentativa de definir um material para reparo localizado ideal.

Muitas destas recomendações se contrapõem com algumas das recomendações atuais^{4,7,9,10,26,50}; outras são quase inatingíveis ou arbitrárias, como a recomendação de que a retração livre da argamassa de reparo seja menor à do concreto do 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.

Tabela 3 – Requisitos gerais de materiais destinados a reparo localizado de estruturas (Emberson e Mays, 1990).

Propriedade	Relação do material de reparo (R) ao substrato de concreto (C)
Retração	$R < C$
Coeficiente de fluência (para reparos em compressão)	$R < C$
Coeficiente de fluência (para reparos em tração)	$R > C$
Coeficiente de expansão térmica	$R = C$
Módulo de elasticidade	$R = C$
Coeficiente de Poisson	$R = C$
Resistência à tração	$R > C$
Desempenho à fadiga	$R > C$
Adesão	$R > C$
Porosidade e resistividade	$R = C$
Reatividade química	$R < C$

Na Tabela 4 são apresentados os critérios propostos por Decter e Keeley. Dentre estes, somente o relativo à resistência de aderência foi determinado especificamente para argamassas de reparo. Os outros limites propostos foram adotados de normativas de alguns países com base no bom senso. Quanto à fissuração, o limite mais interessante sugerido é o da retração livre, no caso limitada a $500 \mu\text{m}/\text{m}^*$.

Tabela 4 – Sumário dos requisitos e critérios de desempenho sugeridos por Decter e Keeley. (Decter e Keeley, 1997).

Requisito de desempenho	Critério sugerido
Propriedades de resistência e movimento	Compatibilidade requerida. As propriedades devem ser similares às do substrato de concreto, especialmente as relativas à deformação
Aderência	$\geq 0,8 \text{ MPa}$
Retração livre (28 dias)	$< 500 \mu\text{m}/\text{m}$ (ASTM C157)
Permeabilidade	Menor ao limite inferior da UK Concrete Society

A Tabela 5 apresenta uma série de critérios de desempenho sugeridos para reduzir a fissuração por retração por Poston e outros. Mesmo que estes não tenham sido suportados totalmente pelos resultados experimentais da pesquisa, estão baseados num julgamento criterioso dos resultados.

* $\mu\text{m}/\text{m}$. Unidade mais comumente empregada na literatura atual no caso da retração e conhecida como *microstrains*. Em português, microdeformações.

Tabela 5 – Requisitos e critérios de desempenho sugeridos por Poston et al (Poston et al, 2001).

Requisito de desempenho	Critério sugerido
Resistência à compressão	≥ 17 MPa (3 dias) ≥ 28 MPa (28 dias)
Resistência à tração	$\geq 10\%$ da resistência à compressão (cura úmida) $\geq 8\%$ da resistência à compressão (cura especificada pelo fabricante)
Retração livre (28 dias)	≤ 400 $\mu\text{m/m}$ (ASTM C157 modificado)
Retração restringida	0,25mm na placa SPS Ausência de fissuras de retração no ensaio do anel até os 28 dias

Medeiros¹¹ atribuiu alguns limites que na verdade são uma classificação das argamassas avaliadas em faixas balizadas tomando como base as argamassas industrializadas e a experiência dos pesquisadores envolvidos no trabalho.

Tabela 6 – Alguns dos limites sugeridos por Medeiros¹¹ para controle e especificação de argamassas de reparo superficial para estruturas de concreto.

Propriedades		Limites
Limites Essenciais	Consistência inicial e retenção de consistência	Para aplicação manual: 200 ± 10 mm e $\geq 95\%$
	Resistência à compressão	Alta ≥ 55 MPa Média 45-55 MPa Baixa < 45 MPa
	Resistência a tração na flexão	Alta ≥ 11 MPa Média 9-11 MPa Baixa < 9 MPa
	Coeficiente de absorção de água por capilaridade (calculado a 24 horas de ensaio)	Baixa $0,5 \text{ kg/m}^2 \times \text{h}^{-1/2}$ Média $0,5 - 1,0 \text{ kg/m}^2 \times \text{h}^{-1/2}$ Alta $> 1,0 \text{ kg/m}^2 \times \text{h}^{-1/2}$
	Retração por secagem	7 dias Baixa $< 0,07\%$ Média $0,07\% - 0,10\%$ Alta $\geq 0,10\%$
		28 dias Baixa $< 0,07\%$ Média $0,07\% - 0,12\%$ Alta $\geq 0,12\%$
		91 dias Baixa $< 0,09\%$ Média $0,09\% - 0,12\%$ Alta $\geq 0,12\%$

3.1.7 Normalização

O esforço na busca da normalização nos materiais de reparo vem se intensificando, com a participação de entidades e com o esforço conjunto do setor.

O Hong Kong Housing Authority elaborou um conjunto de especificações técnicas destinadas a argamassas para reparo de estruturas de concreto, o que efetivamente ocasionou que os fornecedores de argamassas industrializadas modifiquem suas formulações para atingir os critérios estabelecidos pela norma⁷⁵. Na Tabela 7 apresentam-se os requisitos e critérios de desempenho exigidos pelo HKHA. Neste caso, esta normalização buscou unicamente dividir os materiais segundo classes.

Essa classificação, exige que os materiais de reparo não apresentem fissuras de retração no ensaio do anel até a idade de 7 dias. Até essa idade, só uma pequena parcela da retração das argamassas é conhecida, portanto esse limite não se considera adequado para poder avaliar a propensão à fissuração de materiais de reparo.

Tabela 7 – Especificação técnica da HKHA, apud Emmons (Emmons et al, 2000).

Características	Materiais de reparo		
	Classe 40	Classe 25	Classe 15
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	30 - 60	20 - 40	10 - 30
Resistência à tração mínima aos 28 dias (MPa)	2,0	1,5	1,0
Módulo de elasticidade aos 28 dias (GPa)	15 - 25	9 - 15	5 - 9
Resistência de aderência mínima (MPa)	2,0	1,5	1,0
Fissuração no ensaio do anel (7 dias)	0	0	0
Permeabilidade ao ar 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.

Na Europa está sendo elaborado um conjunto de normas que engloba produtos e sistemas para a proteção e reparo de estruturas⁷⁶. Existem já nesse projeto alguns dos critérios mínimos que devem ser atingidos pelas argamassas de reparo aplicadas à mão nas seguintes propriedades: resistência à compressão, conteúdo de íons cloreto, absorção capilar, resistência à carbonatação, compatibilidade frente a ciclos de gelo-degelo, compatibilidade térmica e aderência. Esta importante iniciativa europeia em prol da normalização de materiais e sistemas de reparo para estruturas de concreto data de inícios da década do 90 com a criação do Technical Committee (TC104). Dentro deste comitê, foi criado o Steering Committee 8 (SC8) que por sua vez criou 10 grupos de trabalho (WG), cada um destes englobando uma técnica de intervenção para reparo de estruturas distinta.

Este documento normativo permitirá a escolha de produtos para reparo com base na aplicação específica requerida. Por exemplo, os critérios de argamassas para reparo localizado de estruturas contaminadas por íons cloreto são mais exigentes do que o reparo localizado de estruturas carbonatadas. As principais dificuldades e a trajetória do WG2 (reparo estrutural e não-estrutural) desde os inícios do grupo até o 1997 foram publicadas por Robery.

Na Tabela 8 pode ser vista uma parcela dos requisitos e critérios exigidos para argamassas aplicadas à mão destinadas para o reparo de estruturas de concreto no projeto de norma europeu.

Esse projeto está ainda em fase de elaboração e possui uma grande quantidade de requisitos. Quanto à fissuração, ainda não existe um critério estabelecido, entretanto já consta que após a execução das atividades de reparo, os locais devem ser monitorados para a avaliação da fissuração e posterior aceitação ou rejeição do 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.

Tabela 8 – Resumo de requisitos e critérios de desempenho para argamassas aplicadas à mão na normalização europeia para todos os usos previstos (Catarino et al, 2000)⁷⁷.

Propriedade Norma de Ensaio	Requisitos		Observações
	Estruturais	Não estruturais	
Retração restringida: prEN 12617-4	> 2,0 MPa	> 1,5 MPa	Resist. de aderência após o ensaio, c/abertura média de fissuras <0,05mm. Nenhuma fissura >0,1mm. Ausência de delaminação
Resistência à compressão: prEN 12190	> 30 MPa	> 20 MPa	-
Resistência à carbonatação: prEN 13295	dk < dk substrato	dk < dk substrato	Não exigido quando o sistema de reparo inclui algum tipo de proteção que dificulte o ingresso do gás
Teor de cloretos	< 0,05%	< 0,05%	Com relação à massa do corpo-de-prova
Aderência por tração direta: prEN 1542	> 2,0 MPa	> 1,5 MPa	Valores médios. Ausência de valores individuais inferiores a 75% do valor mínimo exigido

3.2 Avaliação da retração restringida

O interesse por métodos de avaliação da retração restringida tem crescido muito nos últimos anos, principalmente devido a estes permitirem a avaliação direta da potencialidade de fissuração de um material⁷⁸.

Corpos-de-prova em formato de barras tem sido amplamente utilizados com sucesso por vários pesquisadores. Infelizmente, o alto custo associado a estes é um fator limitante do seu uso. Também tem sido reportada a dificuldade de atingir uma restrição adequada, como ocorre freqüentemente em ensaios de determinação de resistência à tração direta. Contudo, este tipo de ensaio permite obter informação

⁷⁷ CATARINO, J.; GONÇALVES, A.; RIBEIRO, S. Reparação de estruturas de betão na normalização europeia. 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.

sobre a retração, a fluência e ainda a tensão sofrida pelo material, no grau de restrição desejado.

Igarashi et al⁷⁹ utilizaram esta configuração de ensaio na avaliação da propensão à fissuração devido à retração autóloga de misturas de concreto de alta resistência*. Na Figura 15 apresenta-se uma parcela dos resultados destes autores. Neste estudo o ensaio de retração restringida era interrompido no momento em que a carga responsável pela restrição do corpo-de-prova era igual a 80% da capacidade da célula de carga empregada (5000N).

Figura 15 - Parcela dos resultados de Igarashi et al, (Igarashi et al, 2000).

Pode-se apreciar que os traços de menor relação a/c possuem uma maior retração autóloga e que a adição de sílica ativa também tende a aumentar a retração autóloga. A propensão à fissuração, no entanto, não se correlacionou com a retração

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%.

autógena, isto é explicado pelos autores devido à influência das outras variáveis, como fluência e resistência à tração.

Também tem sido utilizados corpos-de-prova em formatos de placas restringidos lateralmente e pela base, nesse caso contabilizando-se o diâmetro médio de abertura das fissuras e a área total de fissuras, numa determinada idade. Têm a vantagem de apresentar formato parecido com o formato das peças encontradas normalmente em serviço; como desvantagem não se consegue sempre uma restrição adequada nas bordas.

Há mais de 50 anos os corpos-de-prova em formato de anel tem sido utilizados com sucesso. O anel interno restringe a deformação do material, podendo ocasionar a fissuração. Antigamente, a espessura deste anel interno era grande de tal forma, que a restrição proporcionada pelo anel ao corpo-de-prova era praticamente total. Hoje em dia, persegue-se o uso de anéis de espessuras reduzidas ($\approx 12,5$ mm) o qual permite a deformação do anel metálico. Esta informação adicional proporciona uma saída quantitativa da retração restringida (deformação sofrida pelo anel), e não apenas qualitativa (idade do aparecimento da fissura e abertura da fissura).

Figura 16 – Corpo-de-prova utilizado para avaliação da fissuração. As dimensões do corpo-de-prova tem sido muito distintas desde os primeiros usos do ensaio por Carlson e Coutinho* até a atualidade.

* Algumas pessoas atribuem a criação do ensaio a Coutinho, pesquisador português autor do trabalho intitulado: "The influence of the type of cement on its cracking tendency" numa publicação da RILEM no ano de 1958. Carlson utilizou o ensaio desde o ano de 1939, e no 1940 publicou o trabalho: "Attempts to measure the cracking tendency of concrete" no ACI Journal.

Grochoski et al⁸⁰ utilizaram este ensaio para avaliar a influência de diversos tipos de adições em argamassas de uma mesma matriz, ($a/c=0,45$) e proporção cimento areia (1:2,5) na fissuração. Foram utilizados duas resinas poliméricas acrílicas (AR1 e AR2), látex de estireno-butadieno (SBR), fibra de polipropileno de baixo módulo (Fibra) e éter de polipropileno glicol (EPG). A argamassa modificada com EPG mostrou um desempenho muito superior devido à baixa retração desta. A modificação com SBR propiciou o pior desempenho das argamassas, provavelmente devido à retração ligeiramente maior e a uma relação resistência à tração/módulo de elasticidade menor. Na Figura 17 podem ser apreciados alguns dos resultados deste trabalho.

Figura 17 – Resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade aos 28 dias, retração livre e idade de fissuração de seis argamassas de um mesmo traço e modificada com distintos materiais (Grochoski et al, 2003).

Recentemente este método de ensaio tem sido utilizado com algumas modificações e embasamento matemático que permite estimar o esforço atuante no corpo-de-prova⁸¹. Na Figura 18 apresentam-se alguns dos resultados destes pesquisadores, avaliando a

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

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.

deformação sofrida por três anéis de espessuras distintas (3,1mm, 9,5mm, 19mm), e duas argamassas. Pode ser apreciado que quanto menor a espessura do anel, maior será a deformação do mesmo, e portanto menor o grau de restrição, o que se traduz em tensões menores. As misturas foram preparadas com cimento Portland tipo I, e uma mesma proporção cimento areia.

Figura 18 – Resultados obtidos por Hossain e Weiss em ensaios de retração restringida pelo método do anel (Hossain e Weiss).

É interessante notar que a argamassa de relação $a/c=0,30$ experimentou maior retração e maior propensão à fissuração, além de uma menor resistência à tração por compressão diametral do que a argamassa de relação $a/c=0,50$. Outra crítica a esse trabalho é o fato de ter sido usado na argamassa de $a/c=0,30$, 3% de

superplastificante em relação à massa do cimento, o que pode ter criado diferenças significativas entre os dois traços.

Sob um carregamento contínuo, a relaxação e o acúmulo de danos podem promover o aparecimento de fissuras num nível menor ao da resistência à tração. Um valor da relação tensão atuante/tensão resistente de 0,8 é tipicamente encontrado em concretos e argamassas. Devido a este motivo, o fator redutor de resistência de 0,8 pode ser aplicado numa análise da fissuração por retração baseado em conceitos unicamente de resistência. Esta afirmação é corroborada pelos resultados de Hossain e Weiss, que mostram que a fissuração sempre ocorre num nível menor ao da resistência do material, e que a medida que a idade de fissuração e a espessura do anel aumentam, esta diferença se torna ainda maior.

A determinação da idade de fissuração no anel tende a ser mais precisa quanto menor for esta idade. Isto pode ser apreciado claramente nos resultados de retração restringida obtidos por Mokarem⁸². Na Figura 19 mostra-se a média e o intervalo de confiança para um nível de significância de 95% nos resultados por ele obtidos.

Figura 19 – Curva típica da deformação no anel nos ensaios de retração restringida de Mokarem. As linhas tracejadas representam o intervalo de confiança da média 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).

O ensaio do anel tem sido feito em corpos-de-prova de dimensões muito distintas, o que dificulta a comparação entre os resultados disponíveis na literatura. Nesse sentido, a implementação do projeto de norma da AASHTO⁸³ (American Association of State Highway and Transportation Officials) deve contribuir em prol do consenso do meio científico e técnico mundial. Este projeto de norma preconiza o uso de extensômetros para a avaliação da deformação sofrida pelo anel de aço. Na Tabela 9 apresenta-se um levantamento de distintas dimensões que tem sido utilizadas.

Tabela 9 – Levantamento de distintas dimensões utilizadas no ensaio do anel para avaliação da propensão à fissuração de concretos e argamassas.

Pesquisadores	Diâmetro Interno (mm)	Espessura do corpo-de-prova (mm)	Altura	Espessura do anel	Característica adicional
Carlson e Reading, 1940	125	34	-	-	-
Coutinho, 1958	405 125	80 25	-	-	-
AASHTO, 2000	300	75	150	12,0	Anel não fica aderido à base metálica
Poston et al, 2001	254	32	102	25,4	Anel fica aderido à base metálica
Grochoski et al, 2003	300	40	70	3,1	Anel fica aderido à base metálica
Hossain e Weiss, 2004	300	150	75	3,1 9,5 19,0	Anel não fica aderido à base metálica
Grullon, 2004	300	40	70	3,1	Anel fica aderido à base metálica

O Ministério de Transportes da Alemanha tem utilizado um corpo-de-prova linear para a avaliação da fissuração de materiais destinados ao reparo de concreto em pontes e

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.

viadutos⁸⁴, porém o ensaio tem como inconveniente o de não proporcionar uma restrição adequada. Após 90 dias determina-se a área total de fissuras, a abertura máxima e média das fissuras e a ocorrência de descolamento à base. Na Figura 20 ilustram-se as dimensões deste corpo-de-prova.

Figura 20 – Método de ensaio utilizado pelo Ministério de Transportes da Alemanha para avaliação da fissuração.

Na primeira fase da pesquisa para materiais de reparo patrocinada pela US Army foi desenvolvido um novo método de ensaio para avaliação de retração restringida. O mesmo apresentou resultados coerentes com o desempenho em campo de reparos. Foi nomeado como “SPS Test Plate”, sendo SPS o nome da empresa que conduz a pesquisa. Consiste numa viga moldada sobre uma placa metálica fina possuindo uma camada de epóxi com um pouco de areia para melhorar a aderência. Mede-se a flecha vertical no extremo do corpo-de-prova que não se encontra restringido. A Figura 21 mostra as particularidades do ensaio.

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 ensaio SPS para avaliação da retração restringida.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

Para atingir o objetivo proposto, escolheu-se estudar uma família de argamassas dosadas no laboratório, todas com uma mesma consistência no estado fresco, e portanto passíveis de serem utilizadas para a mesma finalidade.

Foram também avaliadas três argamassas industrializadas, de mesma consistência e destinadas ao mesmo uso. Buscou-se reunir um conjunto de informações que possibilite explicar de que forma as propriedades mecânicas dessas argamassas e a sua retração influem na potencialidade ou propensão à fissuração.

Neste capítulo são apresentadas as variáveis envolvidas no trabalho, os materiais empregados, os métodos de ensaio utilizados e os resultados brutos obtidos.

4.2 Variáveis do estudo

4.2.1 Parâmetros fixados:

- Teor de aditivo superplastificante: Foi utilizado um teor constante e ótimo em relação à massa do cimento, o qual foi pré-determinado através do grau de saturação;
- Teor de polímero: Foi utilizado um copolímero acrílico-estireno num teor constante em relação à massa do cimento. O teor utilizado foi escolhido com a ajuda de um programa experimental preliminar que se encontra no Anexo A;
- Cura: Após a moldagem os corpos-de-prova foram cobertos com um plástico e levados a uma câmara climatizada com $UR \geq 95\%$ e $23 \pm 2^\circ\text{C}$ (câmara úmida) até completadas 24 horas de idade. Após este tempo estes corpos-de-prova foram levados a uma câmara climatizada com $UR 50 \pm 4\%$ e $23 \pm 2^\circ\text{C}$ (câmara seca), onde foram mantidos até as idades de ensaio. Este tipo de cura foi escolhido devido a representar uma condição comumente encontrada na prática, além de permitir que os ensaios de retração restringida fossem realizados num intervalo de tempo menor;
- Cimento CPV ARI PLUS: Escolhido por ter uma rápida evolução das propriedades mecânicas;
- Agregado miúdo: Foi escolhida uma areia de origem natural fluvial, comumente empregada na confecção de concretos e argamassas no estado de São Paulo.

- Argamassadeira: Foi utilizada uma mesma argamassadeira de capacidade nominal de 20 litros. Essa argamassadeira cumpre com os requisitos da norma ASTM C109/C109M-99⁸⁵;
- Consistência: A faixa de consistência medida pelo diâmetro de espalhamento foi fixada numa faixa igual a 200 ± 15 mm.

4.2.2 Variáveis independentes.

São as variáveis que foram fixadas com o intuito de se observar a influência destas na fissuração das argamassas:

- Argamassas Industrializadas – três argamassas de fornecedores e formulações distintas, mas todas de uma mesma faixa de consistência;
- Argamassas Dosadas no Laboratório – Família de argamassas de mesma consistência e igual à das argamassas industrializadas, com proporção cimento:areia em massa iguais a 1:1,0; 1:1,5, 1:2,2 e 1:3,0;
- Idade – Foram adotadas as idades de 1, 3, 7, 14, 28 e 63 como referência para medida das variáveis dependentes.

4.2.3 Variáveis dependentes

São as variáveis que refletem a variação das independentes para as propriedades relativas à fissuração avaliadas:

- Resistência à tração na flexão;
- Módulo de elasticidade;
- Retração livre;
- Retração restringida pelo método do anel;
- Relação a/c.

4.2.4 Variáveis intervenientes.

São aquelas que foram medidas por poderem ter alguma influência sobre as variáveis dependentes, entretanto, não foram consideradas por se acreditar que sua influência não seja relevante às conclusões. Estas foram:

- Massa específica;
- Teor de ar aprisionado;
- Umidade relativa do 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 Materiais Empregados

4.3.1 Cimento

O cimento escolhido para a pesquisa foi o CPV-ARI fabricado pelo grupo HOLCIM e definido pela norma NBR 5733/91. Apresenta como vantagens a maior facilidade de desmoldagem em idades iniciais, e uma alta taxa de retração em relação a outros cimentos, o que possibilita a análise dos resultados mesmo em idades não muito avançadas. Na Tabela 10 e na Tabela 11 são apresentadas a caracterização química e física do cimento utilizado na pesquisa.

Tabela 10 – Caracterização química do cimento utilizado na pesquisa.

Ensaio	Métodos de ensaio	Resultados (% em massa)
Perda ao fogo (PF)	NBR NM 18/04	2,82
Dióxido de silício total (SiO_2)	NBR NM 11-2/04	19,02
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	NBR NM 11-2/04	4,76
Óxido de ferro (Fe_2O_3)	NBR NM 11-2/04	2,68
Óxido de cálcio total (CaO)	NBR NM 11-2/04	65,89
Óxido de magnésio (MgO)	NBR NM 11-2/04	0,42
Anidrido sulfúrico (SO_3)	NBR NM 16/04	2,78
Óxido de sódio (Na_2O)	NBR NM 17/04	0,01
Óxido de potássio (K_2O)	NBR NM 17/04	0,72
Anidrido carbônico (CO_2)	NBR NM 20/04	1,80
Resíduo insolúvel (RI)	NBR NM 15/04	0,47
Óxido de cálcio livre (CaOI)	NBR NM 13/04	1,06
Equivalente alcalino em Na_2O ($0,658 \times \text{K}_2\text{O}\% + \text{Na}_2\text{O}\%$)		0,48

Tabela 11 – Caracterização física do cimento utilizado na pesquisa.

Ensaio		Método de ensaio	Resultados			
Finura – resíduo na peneira de 75 μ m (%)		NBR 11579/91	0,4			
Massa específica (g/cm ³) _a		NBR NM 23/01	3,10			
Área específica (cm ² /g) _a		NBR NM 76/98	4.600_b			
Água da pasta de consistência normal (%)		NBR NM 43/03	28,0			
Início de pega (h:min)		NBR NM 65/03	03:10			
Fim de pega (h:min)		NBR NM 65/03	04:15			
Expansibilidade de Le Chatelier – a quente (mm)		NBR 11582/91	1,0			
Resistência à compressão (MPa) - (NBR 7215/96)						
Idade (dias)	Corpo-de-prova n°				Média	Desvio 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. Ensaio realizado à temperatura de $(23\pm 2)^\circ\text{C}$

b. 460 m²/kg

4.3.2 Areia

Foi utilizada uma areia natural de origem fluvial proveniente da região de São José dos Campos, comumente encontrada no estado de São Paulo e amplamente utilizada na confecção de concretos e argamassas.

Na Figura 22 apresenta-se a composição granulométrica da areia utilizada na pesquisa, determinado mediante a norma ASTM C136 – 96a. O módulo de finura foi de 1,95, portanto se trata de uma areia fina.

Figura 22 – Composição granulométrica da areia utilizada nas argamassas preparadas no laboratório.

4.3.3 Aditivo superplastificante

Foi utilizado um aditivo de base naftaleno-sulfonado doado pela Grace Brasil de nome comercial Daracem 190. O teor recomendado pelo fabricante varia de 0,8% a 2% em relação à massa do cimento. A função principal do aditivo foi a de reduzir a quantidade de água para uma consistência determinada, melhorando desta forma a qualidade da pasta. Um outro efeito benéfico do aditivo foi o de aumentar a coesão da mistura.

4.3.3.1 Teor de saturação

O uso de teores de aditivos exagerados pode ocasionar a exsudação dos componentes da mistura e incorporação de ar⁸⁶. Buscou-se qual seria o teor ótimo de aditivo, determinado pelo grau de saturação, que consiste na quantidade de aditivo a partir da qual não há melhora significativa na plasticidade ou redução da quantidade de água para uma consistência determinada⁸⁷. Contudo, o grau de saturação não deve ser utilizado de forma isolada, devendo-se levar sempre em consideração a exsudação e a incorporação de ar da mistura. O método de ensaio empregado foi o mini-abatimento, sempre considerando as limitações do ensaio reportadas por Hartmann⁸⁷ quando no caso de pastas muito fluidas. Na Figura 23 apresenta-se a medição do espalhamento da pasta no ensaio do mini-abatimento.

Figura 23 – Execução do ensaio do mini-abatimento para a determinação do grau de saturação do 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.

A Figura 24 mostra o resultado da determinação do grau de saturação do aditivo. Foram feitas 6 misturas com teores de aditivo variando desde 1,2% até 2,6%. O teor de 1,6% mostrou-se como o teor ótimo para a combinação aditivo-cimento utilizada na pesquisa. A partir do teor de 1,6% nota-se uma certa diminuição na eficiência do aditivo (medida pelo espalhamento da pasta de cimento). Além disto, teores maiores a este apresentaram tendência de segregação dos componentes da pasta e incorporação de ar.

Figura 24 –Espalhamento da pasta de cimento com vários teores de aditivo.

4.3.4 Polímero

Foi utilizado um copolímero de butilacrilato-estireno fornecido pela BASF de nome comercial Acronal 303D, especialmente formulado para o uso em argamassas e concretos a base de cimento Portland.

Tabela 12 – Caracterização do polímero. (fornecido pelo fabricante)

Sólidos (%)	50,0±1,0
pH	4,5-6,5
Temperatura mínima de formação de filme (°C)	≈20
Tamanho médio de partículas (µm)	≈0,1
Densidade (g/cm3)	1,02

O teor utilizado foi de 5% de sólidos em relação à massa de cimento. A água contida no polímero foi descontada da água de amassamento. Este teor de 5% foi escolhido com auxílio de um programa experimental preliminar que se encontra no Anexo A.

4.3.5 Argamassas industrializadas

Foram empregadas três argamassas industrializadas de nomes comerciais Sikatop 122 da Sika, Emaco S88tb da MBT e DenverTec 700 da Denver Global. Foram identificadas arbitrariamente com os nomes AI-1, AI-2 e AI-3, sem relação alguma com a ordem mencionada acima.

As relações líquido/material seco de cada uma destas argamassas encontra-se na Tabela 13.

Tabela 13 – Caracterização básica das argamassas industrializadas utilizadas na pesquisa.

Argamassa	Relação líquido/material seco (kg/kg)	Densidade (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 Dosagem das argamassas preparadas no laboratório

A composição das argamassas preparadas no laboratório foi determinada utilizando o método de dosagem proposto por Helene e Terzian⁸⁸, variando a proporção cimento:areia de modo a se ter uma família de argamassas de uma mesma consistência mas de relações a/c distintas. Na Tabela 14 é apresentada a caracterização da família de argamassas estudada.

Tabela 14 – Caracterização das família de argamassas estudada.

Traço	Traço unitário					H(%)	Densidade (kg/dm ³)	Ar (%)	Volume de pasta (l/m ³)	C _{cimento} (kg/m ³)
	cimento	areia	água	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 Ensaios de caracterização

4.5.1 Consistência

Considera-se uma propriedade muito importante das argamassas de reparo. Estas devem ser suficientemente secas para que possam ser aplicadas à mão, possibilitando assim que elas se auto-suportem, garantindo sua aplicação mesmos em reparos na posição vertical. Foi determinada seguindo as diretrizes da norma ASTM C109/C109M-99.

Figura 25 – Determinação da consistência das argamassas através do uso da mesa de consistência.

Na Figura 26 apresentam-se os resultados da consistência das argamassas, medidas pelo diâmetro de espalhamento na mesa de consistência. A faixa de consistência escolhida foi de 200 ± 15 mm.

Figura 26 – Resultados da consistência das argamassas estudadas medidas na mesa de fluidez (“flow table”).

A consistência medida pelo diâmetro de espalhamento não é por si só uma garantia que a argamassa será adequada para a aplicação desejada. No estudo apesar de todas atenderem a um intervalo estreito ($200 \pm 15 \text{ mm}$), essa equivalência não foi verificada na prática pois a argamassa de traço 1:3,0 não se mostrou adequada à aplicação em reparos devido à tixotropia inadequada.

4.5.2 Resistência à Compressão

A resistência à compressão tradicionalmente tem sido a propriedade mais comumente reportada para concretos e argamassas, devido à sua facilidade de obtenção e ao grande número de características do concreto a ela relacionada⁸⁹. Pela necessidade da resistência à compressão para a determinação do módulo de elasticidade, estes ensaios foram realizados nas mesmas idades.

O ensaio foi feito conforme a ASTM C349-97⁹⁰, usando as metades dos corpos-de-prova ensaiados à tração na flexão, delimitando estas metades em formato de cubos de aresta igual a 4 cm por meio de placas de aço. A Figura 27 ilustra a determinação da resistência à compressão das argamassas avaliadas.

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.

Acredita-se que a diferença entre a resistência obtida nestes cubos não seja muito distinta daquela correspondente a um cilindro de relação h/d igual a 2, tradicionalmente utilizado no Brasil. O trabalho de Kesler e o de Evans, apud Coutinho⁹¹ em ensaios de compressão de concretos, demonstram que quanto maior a resistência do concreto é menor a diferença entre a resistência obtida através do ensaio de cubos e cilindros.

Figura 27 – Ilustração da determinação da resistência à compressão e ruptura característica. Na Figura 28 são apresentados os valores médios de resistência à compressão das argamassas avaliadas na pesquisa.

Figura 28 – Evolução da resistência à compressão das argamassas avaliadas.

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

4.6 Ensaios relacionados à fissuração

4.6.1 Resistência à Tração na Flexão

A resistência à tração na flexão foi medida em corpos-de-prova prismáticos de dimensões 40 x 40 x 160 mm para cada uma das idades do estudo. A norma utilizada foi a ASTM C348-97⁹², que permite o cálculo da tensão com a expressão:

$$f_t = 0,0028 \times P, \text{ ou de uma forma geral } f_t = \frac{3Pl}{2bd^2}$$

f_t – resistência à tração na flexão (MPa)

P – carga máxima aplicada (N)

l – vão entre os cutelos inferiores

b – largura do corpo-de-prova

d – altura do corpo-de-prova

A Figura 29 mostra o esquema de realização desse ensaio.

Figura 29 – Esquema do ensaio de resistência à tração na flexão mediante o uso de três cutelos.

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 – Evolução da resistência à tração na flexão das argamassas estudadas.

4.6.2 Módulo de Elasticidade

Em ausência de uma norma específica para a determinação do módulo de elasticidade para o caso dos corpos-de-prova utilizados na pesquisa, serão empregados os ciclos de carregamento presentes na norma NBR 7190/96⁹³, já utilizado previamente por Medeiros e Moreno Jr e apresentado na Figura 31. A velocidade de carregamento utilizada foi a mesma utilizada na determinação da resistência à compressão, e igual a 1000 N/s. O carregamento foi feito entre 10% e 50% da carga de ruptura.

Figura 31 – Ciclo de carregamento utilizado na execução do ensaio de módulo de elasticidade.

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

Figura 32 – Evolução do módulo de elasticidade das argamassas avaliadas na pesquisa.

4.6.3 Retração Livre

O ensaio de retração livre avalia a potencialidade de variação dimensional do material excluindo causas como variações de temperatura e existência de tensões devido à restrição. O ensaio foi feito conforme a norma ASTM C157-99⁹⁴ que utiliza corpos-de-prova de 25 x 25 x 285 mm, em ambiente controlado com temperatura de 23°C ±2°C e umidades de 50% ±4%, com leitura inicial 24 horas após a moldagem. Após estas 24 horas os corpos-de-prova foram mantidos na câmara seca, ao contrário do prescrito na norma, seguindo a modificação da ASTM C157 feita pelo ICRI⁹⁵. A Figura 33 ilustra a realização desse ensaio.

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 – Execução do ensaio de retração livre.

Figura 34 – Retração livre das argamassas avaliadas.

4.6.4 Retração Restringida

O método de ensaio utilizado foi o ensaio do anel devido à sua grande simplicidade e versatilidade⁹⁶. Consiste em um corpo-de-prova circular restringido à deformação por um anel metálico conforme mostrado na Figura 35.

Figura 35 – Dimensões dos anéis do ensaio de retração restringida.

Todas as fôrmas empregadas foram cobertas com teflon de modo a garantir que a restrição seja ocasionada unicamente pelo anel interno de aço, evitando qualquer possível interferência por parte da aderência aço-argamassa. A Figura 36 mostra uma das fôrmas cobertas com teflon antes da moldagem.

Figura 36 – Detalhe da forma após aplicação do 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.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados de idade de fissuração e abertura de fissura no ensaio de retração restringida. Houve três argamassas que não fissuraram durante o período de 63 dias utilizado para a avaliação da propensão à fissuração. Na Figura 37 é apresentada uma seqüência fotográfica das argamassas que fissuraram na pesquisa. A abertura das fissuras foi medida em no máximo 24 horas após a idade exata de fissuração.

Tabela 15 – Idade de fissuração e abertura da fissura no ensaio de retração restringida.

Argamassa	AI1		AI2		AI3		1:1,0		1:1,5		1:2,2		1:3,0	
Idade de aparecimento fissura (dias)	19	19	-	-	7	7	2,5	2,5	27	21	-	-	-	-
Abertura média de fissura (mm)	0,4	0,7	-	-	0,6	0,5	1,4	1,7	0,6	0,4	-	-	-	-

Figura 37 – Argamassas que fissuraram no ensaio de retração restringida no decorrer da pesquisa.

5 Análise e Discussão dos Resultados

5.1 Modelagem da tendência à fissuração

Para avaliar a propensão à fissuração das argamassas estudadas com base nas variáveis medidas, buscou-se modelar as propriedades das argamassas que fissuraram em relação ao tempo.

Para que um modelo seja considerado adequado, quando colocado junto às curvas de todas as argamassas o mesmo deve conseguir separar as argamassas que fissuraram das que não fissuraram no ensaio de retração restringida. Ou seja, o modelo deve fornecer um resultado similar ao apresentado na Tabela 16:

Tabela 16 – Comparação do resultado das argamassas que fissuraram segundo o modelo empregado com as argamassas que fissuraram no programa experimental.

Modelo	Argamassas que fissuraram segundo o ajuste utilizado	Argamassas que fissuraram no programa experimental
X	AI1 – AI3 – 1:1,0 – 1:1,5	AI1 – AI3 – 1:1,0 – 1:1,5

Os modelos que foram empregados para a análise foram:

- f_t vs tempo: qual a resistência à tração na flexão da argamassa na ocasião da fissuração;
- E_c vs tempo: qual o módulo de elasticidade da argamassa na ocasião da fissuração;
- f_t/E_c vs tempo: qual o valor da relação f_t/E_c da argamassa na ocasião da fissuração;
- ε vs tempo: qual a retração livre do material na ocasião da fissuração;
- $\varepsilon - f_t/E_c$ vs tempo: qual a diferença entre a deformação associada à retração livre e a deformabilidade máxima calculada pela relação f_t/E_c na ocasião da fissuração.

As figuras 38 até 42 mostram o resultado fornecido por cada um dos modelos utilizados. Após apresentados serem, serão discutidos individualmente.

Modelo	Argamassas que fissuraram segundo o ajuste utilizado	Argamassas que fissuraram no programa experimental
f_t vs tempo	AI1 – AI2 – AI3 – 1:1,0 1:1,5 – 1:2,2 – 1:3,0	AI1 – AI3 – 1:1,0 – 1:1,5

Figura 38 – Aplicação do modelo da resistência à tração para a avaliação da fissuração das argamassas estudadas.

Modelo	Argamassas que fissuraram segundo o ajuste utilizado	Argamassas que fissuraram no programa experimental
E_c vs tempo	AI1 – AI2 – 1:1,0 – 1:1,5	AI1 – AI3 – 1:1,0 – 1:1,5

Figura 39 – Aplicação do modelo do módulo de elasticidade para a avaliação da fissuração das argamassas estudadas.

Figura 40 - Aplicação do modelo da relação resistência à tração por módulo de elasticidade para a avaliação da fissuração das argamassas estudadas.

Figura 41 – Aplicação do modelo da retração livre para a avaliação da fissuração das argamassas estudadas.

Figura 42 - Aplicação do modelo da expressão retração livre menos a relação resistência à tração por módulo de elasticidade para a avaliação da fissuração das argamassas estudadas.

Dos modelos utilizados para a análise, unicamente aquele que considerou a retração livre, resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade de forma conjunta conseguiu distinguir as argamassas que fissuraram das que não fissuraram.

Os modelos obtidos a partir das outras propriedades (f_t , E_c , f_t/E_c , ε), embora tenham apresentado coeficientes de correlação elevados, não conseguiram prever os resultados obtidos no programa experimental, ou seja, esses modelos indicaram tanto a fissuração de argamassas que não fissuraram quanto o contrário. Acredita-se que até certo ponto estes altos coeficientes de correlação estejam associados ao fato de todas as propriedades medidas (resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, retração livre e resistência à compressão) serem função (aumentam) do tempo.

5.1.1 f_t vs tempo.

Nesse modelo o tipo de ajuste mais apropriado foi o linear, que forneceu um coeficiente de correlação de 0,81. Segundo esse modelo, todas as argamassas avaliadas deveriam ter fissurado até os 40 dias. Também, a argamassa AI-2 seria uma das de maior tendência à fissuração, embora tenha sido comprovado exatamente o contrário durante o programa experimental, o que demonstra a inadequação do modelo na previsão da tendência à fissuração.

5.1.2 E_c vs tempo

O coeficiente de correlação obtido quando utilizado esse modelo foi de 0,65, ou seja, o menor dentre todos os ajustes utilizados. Entretanto, conseguiu um resultado aparentemente satisfatório, por ter separado várias das argamassas que fissuraram das que não fissuraram.

Apesar disso, a previsão da tendência à fissuração através desse modelo julga-se como inapropriada devido a que segundo ele, a argamassa de maior propensão dentre as avaliadas seria a uma das argamassas que não fissuraram na pesquisa.

5.1.3 f_t/E_c vs tempo

O coeficiente de correlação do ajuste linear feito para esse modelo foi de 0,72. Segundo o ajuste, as argamassas AI-1 e AI-2 são as únicas que fissurariam no período

estudado, ou seja, até os 63 dias de idade. A inadequação desse modelo fica demonstrada com o fato dele ter acusado à maior resistência à fissuração à argamassa de traço 1:1,0, ou seja, à argamassa que fissurou com apenas 2,5 dias de idade, e ainda a maior propensão à fissuração à argamassa AI-2, ou seja, uma das que não fissurou na pesquisa.

5.1.4 ε vs tempo

O ajuste mais apropriado foi o linear, que forneceu um elevado coeficiente de correlação de 1,00. Esse modelo conseguiu acusar a fissuração de todas as argamassas que efetivamente falharam. O problema é que apenas indicou que a melhor das argamassas em relação à retração (AI-2) não fissuraria, podendo, assim, ser considerado um modelo muito à favor da segurança, que pode ser utilizado quando se quer fazer um estudo mais simplificado, considerando apenas uma variável que influencie na fissuração.

5.1.5 $\varepsilon - f_t/E_c$ vs tempo

O ajuste mais adequado a esse modelo foi o logarítmico, o qual forneceu um coeficiente de correlação de 0,75. Esse modelo foi o único que conseguiu separar as argamassas que fissuraram das que não fissuraram.

Teoricamente, a diferença entre a deformação devido à retração e a deformação fornecida pela relação f_t/E_c deveria ser igual a zero na idade de fissuração de cada uma das argamassas. Acredita-se que a grande defasagem encontrada entre a deformação por retração e a deformação fornecida pela relação f_t/E_c seja principalmente função de ter sido medido o módulo de elasticidade à compressão, da diferença entre a retração entre os corpos-de-prova utilizados para a determinação da retração livre e os corpos-de-prova utilizados para a determinação da retração restringida, de diferentes relações volume/superfície, e ainda pelo efeito da fluência.

Segundo esse modelo a fissuração devido à retração não acontece de forma linear, ou seja, a deformação residual que o material pode resistir aumenta com o tempo. Isto parece concordar com os resultados obtidos por Hossain e Weiss, que mostram que a

relação entre a tensão resistente e a atuante na idade de fissuração foi maior nos corpos-de-prova submetidos a um maior grau de restrição.

Assumindo que o ensaio de retração restringida empregado corresponde a uma determinada condição de restrição possivelmente encontrada na prática, ele pode ajudar a mostrar a influência da cura na fissuração. Argamassas que apresentem curvas de $\varepsilon - f_t/E_c$, muito próximas à do modelo encontrado, podem deixar de fissurar com um simples aumento no tempo de cura. Como exemplo, pode-se citar a argamassa de traço 1:1,5:0,24, apresentada na Figura 43, para idades de cura variando entre 1 e 3 dias, onde o acréscimo do período de cura evita a fissuração do material.

Figura 43 – Efeito do aumento do tempo de cura em argamassas cuja curva de $\varepsilon - f_t/E_c$ se encontram próximas à do modelo encontrado.

5.2 Parâmetros de dosagem das argamassas preparadas no laboratório visando a diminuição da tendência à fissuração

As argamassas de reparo devem atingir propriedades mecânicas estruturais (resistência à compressão, módulo de elasticidade) ou de durabilidade (absorção de água, permeabilidade). Um estudo detalhado desse tipo permitiria, a partir de

exigências mínimas estabelecidas para a argamassa, a escolha do traço que apresente uma menor tendência à fissuração.

Os resultados médios obtidos para a resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão, retração livre, para a relação entre resistência à tração e módulo de elasticidade e para a expressão retração livre menos a relação resistência à tração por módulo de elasticidade foram ajustadas aos resultados experimentais médios obtidos, ora pelo método dos mínimos quadrados, ora pelo melhor ajuste fornecido pelo programa de análise de dados, obtendo dessa forma os coeficientes que fornecem o melhor ajuste. Na Tabela 17 são apresentadas todas as equações utilizadas para a elaboração dos diagramas de dosagem.

Tabela 17 – Equações empregadas na execução dos diagramas de dosagem.

Propriedades	Lei de Comportamento	Equação	Coeficientes
$f_{cj} \times a/c$	Lei de Abrams	$f_{cj} = \frac{k_{1j}}{k_{2j}^{a/c}}$	k_{1j} e k_{2j}
$m \times a/c$	Lei de Lyse	$m = k_3 + k_4 \cdot a/c$	k_3 e k_4
$C_{cimento} \times m$	Lei de Molinari	$C_{cimento} = \frac{1000}{k_5 + k_6 \cdot m}$	k_5 e k_6
$f_{tj} \times a/c$	Conforme NBR6118 ⁹⁷	$f_{tj} = k_{7j} \cdot k_{8j}^{\frac{-2 \cdot a/c}{3}}$	k_{7j} e k_{8j}
$E_{cj} \times a/c$	Conforme NBR6118	$E_{cj} = k_{9j} \cdot k_{10j}^{\frac{-a/c}{2}}$	k_{9j} e k_{10j}
$\varepsilon_j \times a/c$	Melhor ajuste*	$\varepsilon_j = k_{11j} \cdot a/c^{k_{12j}}$	k_{11j} e k_{12j}
$f_{tj}/E_{cj} \times a/c$	Melhor ajuste*	$\frac{f_{tj}}{E_{cj}} = k_{13j} \cdot \exp(k_{14j} \cdot a/c)$	k_{13j} e k_{14j}
$\varepsilon_j - f_{tj}/E_{cj} \times a/c$	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}

*Equação que fornece o melhor coeficiente de correlação ajustada pelo programa de análise de dados.

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

Na Figura 44 é apresentado o diagrama de dosagem para a resistência à compressão das argamassas estudadas.

Figura 44 – Diagrama de dosagem para resistência à compressão.

Embora a resistência à compressão não seja uma variável importante na fissuração por retração, esta propriedade é comumente utilizada na caracterização de argamassas e concretos, devido principalmente à sua facilidade de obtenção, e à grande correlação desta com as outras propriedades do concreto no estado endurecido.

Na Figura 45 e na Figura 46 são apresentados os diagramas de dosagem para as variáveis resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade, respectivamente.

Figura 45 – Diagrama de dosagem para resistência à tração na flexão.

Figura 46 – Diagrama de dosagem para módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade do traço mais rico apresentou valores menores do que os esperados. Esse motivo levou a que os ensaios fossem refeitos, porém os resultados foram confirmados. Acredita-se que o menor módulo desse traço esteja associado ao elevado volume de pasta e à pequena diferença de relação a/c desse traço com o traço 1:1,5.

Tem sido reportada a importância do estudo das variáveis módulo de elasticidade e resistência à tração de forma combinada. Segundo Bastos a fissuração pode ser evitada quando da combinação favorável do módulo de elasticidade e da resistência à

tração do material, ou seja, quanto maior for a relação f_t/E_c , também conhecida como deformabilidade ou extensibilidade.

Na Figura 47 é apresentado o diagrama de dosagem para a relação f_t/E_c da família de argamassas estudadas. Pode-se observar que excluindo as idades mais avançadas de 14 a 63 dias, onde a diferença da relação f_t/E_c entre o traço mais rico e mais pobre foi maior do que 100 microdeformações, essa relação praticamente não varia nas primeiras idades, mostrando que para argamassas com tendência à fissuração elevada nessas idades, o caminho para minimizá-la é diminuir a retração livre dessas argamassas, possivelmente com o aumento do tempo de cura.

Figura 47 – Diagrama de dosagem para a relação f_t/E_c .

Na Figura 48 é apresentado o diagrama de dosagem da retração livre da família de argamassas estudadas. Nesse estudo, a retração foi menor nos traços de maior relação a/c. Acredita-se que isto seja explicado pelos menores volumes de pasta presentes nestes traços.

Verifica-se que a diferença entre a retração dos dois traços mais pobres é muito pequena. Provavelmente para traços mais pobres dos estudados nesse trabalho, a retração iria aumentar com o aumento da relação a/c.

Figura 48 – Diagrama de dosagem para a retração livre da família de argamassas estudadas.

Na Figura 49 é apresentado o diagrama de dosagem da expressão retração livre menos a relação f_t/E_c . Esta expressão é mais adequada para avaliar o potencial de fissuração de argamassas e concretos por envolver todas as variáveis mais influentes na fissuração; quanto menor for essa diferença, maior deve ser a resistência à fissuração de uma mistura.

O potencial de fissuração do traço mais rico é sensivelmente maior do que o das outras misturas avaliadas. Pode ser apreciado também, que o traço 1:2,2:0,30 se constitui aparentemente num ponto de inflexão a partir do qual o potencial de fissuração aumenta.

Figura 49 – Diagrama de dosagem para a expressão retração livre menos a relação f_t/E_c .

Na Tabela 18 são apresentados os valores dos coeficientes das equações utilizadas na execução dos diagramas de dosagem com os respectivos coeficientes de correlação obtidos para cada um dos ajustes feitos.

Tabela 18 – Coeficientes para obtenção dos ajustes feitos a partir dos resultados experimentais da família de argamassas estudada.

		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					
$C_{cimento}$	k_5	1346,2					
	k_6	-2756,0					
	R^2	0,92					

6 Considerações Finais

6.1 *Conclusões sobre os modelos utilizados para a previsão da propensão à fissuração*

- O único modelo que conseguiu acusar a fissuração das argamassas que realmente fissuraram no ensaio de retração restringida foi o modelo $\varepsilon_j - f_{tj}/E_{cj}$, que considera todas as variáveis influentes na fissuração medidas no programa experimental.
- Para um estudo mais simplificado pode ser utilizado o modelo que considera apenas a retração livre, pois trata-se de um modelo que acusou a fissuração de todas as argamassas que efetivamente fissuraram e de mais duas, intermediárias entre as que fissuraram e a que é significativamente melhor dentre as que não fissuraram.
- O modelo considerado o mais adequado nesse estudo também consegue mostrar que para argamassas com curvas muito próximas ao modelo, ou seja, com moderada tendência à fissuração, podem deixar de fissurar com um simples aumento no período de cura.

6.2 *Conclusões sobre a dosagem de argamassas de reparo visando a redução da tendência à fissuração*

- Para argamassas de uma mesma consistência pode-se dizer que há um traço que apresenta a menor tendência à fissuração, podendo essa propriedade contribuir para estudos mais abrangentes sobre o comportamento de argamassas de reparo.
- Quando determinadas as exigências mecânicas mínimas que deve atingir uma argamassa de reparo um estudo desse tipo permite a escolha da argamassa de menor tendência à fissuração.

- Para argamassas com tendência à fissuração elevada apenas nas primeiras idades, o caminho para minimizá-la é diminuir a retração livre dessas argamassas, na medida em que a relação f_t/E_c praticamente não varia.

6.3 *Transferência ao meio*

É primordial que o conhecimento gerado nessa pesquisa seja transferido ao meio técnico, contribuindo dessa forma ao avanço tecnológico do setor.

Pretende-se publicar trabalhos nos seguintes eventos:

- International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR, que será celebrado em África do Sul no ano de 2005 e contará com a participação da comunidade técnica mundial;
- VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción – X Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT 2005, que será celebrado na cidade de Assunção, no Paraguai.
- 47º Congresso Brasileiro do Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON 47º -, a ser celebrado na cidade de Recife.

Também o trabalho será divulgado em revistas técnicas de ampla divulgação nacionais e internacionais.

6.4 *Sugestões para estudos futuros*

- Uso de outros métodos de ensaio para a avaliação da retração restringida.
- Estudo da propensão à fissuração de família de argamassas de distintos tipos de cimento, no intuito de se verificar a existência de um tipo de cimento que apresente uma menor tendência à fissuração.
- Estudo da influência da composição granulométrica de argamassas na propensão à fissuração.
- Avaliação do efeito do teor de polímero acrilato na propensão à fissuração de argamassas de reparo.
- Validação do modelo proposto para outras famílias de argamassas de reparo.

Referências Bibliográficas

1. MEHTA, PK. Durability – Critical issues for the future, **Concrete International**, V19, no 7, pp 27-33, 1997.
2. NISTIR 6519. **Effect of drying-shrinkage cracks and flexural cracks on concrete bulk permeability**. National Institute of Standards and Technology, Technology Administration, US Department of Commerce. Kenneth Snyder, 39p, Maio 2000.
3. DAL MOLIN, DENISSE CARPENA COITINHO. **Fissuras em estruturas de concreto armado. Análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1998, 199p. Dissertação (mestrado). Escola de engenharia da universidade federal do rio grande do Sul.
4. NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY – NISTIR 6402. **Predicting the performance of concrete repair materials**. Summary of Workshop, Reported by VAYSBURD, AM; CARINO, NJ; BISSONETTE, B. April 1999, Durham, New Hampshire. 46p.
5. US ARMY CORPS OF ENGINEERING. **Performance Criteria for Dimensionally Compatible Repair Materials**. By McDONALD, JE; VAYSBURD, AM; POSTON, RW. High Performance Materials and Systems Research Program. Information Bulletin 00-1. 2000.
6. 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 Estrutural Industrializadas e Preparadas em Obra.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Relatório de iniciação 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. **Retração 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 retração.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Relatório de iniciação 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. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas 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**, 2^{da} 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 retração por secagem em concretos. In: 45º Congresso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON. **Anais**. Espírito Santo, Brasil.
66. MEHTA, PK; MONTEIRO PJM. **Concreto: estrutura, 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 europeia. 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: 15^{ava} 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 Engenharia 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 Determinação do teor ótimo de polímero

A determinação do teor ótimo de polímero envolveu dois aspectos. Primeiramente, o teor adicionado de polímero deve proporcionar boas propriedades no estado fresco, permitindo que a argamassa seja manipulada na mão, e segundo, o teor deve melhorar as propriedades da argamassa no estado endurecido.

A determinação do teor ótimo de polímero foi feita em duas fases. Na primeira fase procurou-se determinar se existia alguma interação entre traço e polímero. Foram moldados três corpos-de-prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm para cada um dos dois traços de argamassa 1:1,0 e 1:2,2 em massa, de mesma relação a/c e igual a 0,30 com 5 teores de polímero distintos, 0%, 1%, 3%, 5% e 8%, totalizando 10 misturas. Na segunda fase foram moldados três corpos-de-prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm para o traço de 1:3,0 em massa, e uma relação a/c de 0,50 com os mesmos 5 teores de polímero estudados previamente, totalizando 10 misturas.

Para a determinação da absorção de água, os corpos-de-prova foram pesados aos 14 dias de idade num ambiente com U.R. de 50%. Imediatamente após as leituras, estes foram submersos em água durante 24 horas e posteriormente pesados. A razão de ter sido utilizado este procedimento é a de evitar qualquer efeito da temperatura prescrita nas normas para obtenção da massa seca no polímero empregado.

Antes de serem realizados os ensaios mecânicos, os corpos-de-prova foram mantidos durante 4 horas dentro de ambiente climatizado com 50% de U.R.

Em sentido geral, para os traços de relação a/c de 0,30 o aumento no teor de polímero não influenciou para 95% de significância na resistência à tração na flexão. Já no caso das argamassas de relação a/c de 0,50 foi evidenciado um acréscimo da resistência à tração na flexão com o aumento no teor de polímero. O módulo de elasticidade em ambos os casos foi fortemente influenciado, obtendo reduções importantes com aumento no teor de polímero. A resistência à compressão foi reduzida significativamente com aumentos no teor de polímero. Acredita-se que esta redução

seria menos significativa com o uso de uma dosagem de antiespumante adequada. Em todos os casos a idade de ensaio foi de dez dias.

A.1 Primeira fase

A Figura 50 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água. Pode-se apreciar a redução na absorção de água mesmo quando do uso de baixos teores de polímero. A partir do teor de 3%, as misturas experimentaram uma incorporação de ar excessiva, fato que pode ter prejudicado o desempenho das argamassas com relação a esta propriedade. Como era de esperar, o traço de menor volume de pasta apresentou uma menor absorção de água em todos os teores estudados.

Figura 50 – Absorção de água das argamassas moldadas durante a primeira fase.

Na Figura 51 apresentam-se os resultados de resistência à compressão. Houve uma queda de aproximadamente um 20% quando o teor passou de 0% a 8%. Esta redução significativa pode ser atribuída à incorporação de ar provocada pela adição de polímero nos teores maiores a 3%. Devido a ambos os traços analisados possuírem a mesma relação a/c, não existiram diferenças significativas entre misturas com o mesmo teor de polímero.

Figura 51 – Resistência à compressão das argamassas modificadas com polímero moldadas durante a primeira fase e ensaiadas em ensaio realizado segundo a norma ASTM C349-97.

Ao contrário do ocorrido na resistência à compressão, o aumento no teor de polímero não influenciou na resistência à tração na flexão; a análise de variância (Tabela 19) dos resultados demonstrou a inexistência de diferença estatística significativa entre as variáveis, e nem de interações importantes. Na Figura 52 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 19 – Análise de variância da variável resistência à tração na flexão para 95% de significância.

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 – Resistência à tração na flexão média das argamassas modificadas com polímero moldadas durante a primeira fase e ensaiadas segundo a norma ASTM C348-97.

Apesar de não terem sido encontradas diferenças na resistência à tração na flexão entre as argamassas estudadas, foi verificado um comportamento distinto quando utilizado o teor de 8%. Na Figura 53 são mostrados as curvas carga vs deslocamento (medido pelo deslocamento vertical do prato da prensa) dos seis corpos-de-prova ensaiados.

Figura 53 – Curvas carga vs deslocamento de todos os corpos-de-prova com teor de polímero de 8% e relação a/c=0,30.

Na Figura 54 são apresentados os resultados médios de módulo de elasticidade. Pode-se observar a tendência de redução do módulo de elasticidade com o aumento do teor de polímero. Com o teor de 8%, foi obtida uma redução média de 22%. Como era de esperar, o traço com maior teor de agregado apresentou um módulo de elasticidade maior. Quando utilizado o teor de 1% foi observado um aumento significativo do módulo de elasticidade em ambos os traços. Isto pode-ser explicado por uma melhoria na estrutura interna do compósito.

Figura 54 – Módulo de elasticidade das argamassas.

A.2 Segunda fase

Na Figura 55 apresentam-se os resultados de absorção de água das argamassas de traço 1:3,0. Unicamente o teor de 1% conseguiu reduzir a absorção de água das argamassas. Isto deve-se à alta relação a/c utilizada e à incorporação de ar do polímero.

Figura 55 – Absorção média das argamassas moldadas durante a segunda fase.

A resistência à compressão não foi muito afetada com a adição do polímero nas argamassas de relação $a/c=0,50$. O teor de 1% apresentou um incremento significativo da resistência à compressão, o que pode ser explicado por uma melhoria na estrutura interna do compósito. Nos outros teores a resistência foi similar ao traço de referência provavelmente ao efeito negativo da incorporação de ar. Na Figura 56 apresentam-se os resultados médios de resistência à compressão obtidos.

Figura 56 – Resistência à compressão das argamassas com polímero moldadas durante a segunda fase e ensaiadas segundo a norma ASTM C349-97.

A análise de variância da variável resistência à tração na flexão apresenta-se na Tabela 20. Para 95% de significância descarta-se a hipótese de que as médias de resistência à tração na flexão dos teores de polímero utilizados sejam iguais. Na Figura 57 apresentam-se os resultados médios de resistência à tração na flexão obtidos. Quando utilizado o teor de 8% de polímero, houve um acréscimo de 20% na resistência à tração na flexão do compósito quando comparado com a mistura de controle.

Tabela 20 – Análise de Variância da variável resistência à tração na flexão.

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 – Resistência à tração na flexão das argamassas com polímero moldadas durante a segunda fase e ensaiadas segundo a norma ASTM C348-97.

Os resultados médios de módulo de elasticidade apresentam-se na Figura 58. Aprecia-se uma redução no módulo de elasticidade com o aumento do teor de polímero. O teor de 1% apresentou um incremento significativo no módulo de elasticidade, como ocorrido na primeira fase. Foi obtida uma redução de 25% quando utilizado o teor de 8% comparado ao traço de referência.

Figura 58 – Módulo de elasticidade das argamassas com polímero moldadas durante a segunda fase.

Anexo B

B Resultados

Nesse anexo ao trabalho são apresentados os valores médios e coeficientes variação obtidos a partir dos ensaios realizados em quatro corpos-de-prova.

Tabela 21 – Valores médios e desvios obtidos da argamassa de traço 1:1,0:0,21.

Idade	Parâmetro	fc (MPa)	ft (MPa)	Ec (GPa)	ε ($\mu\text{m}/\text{m}$)
1	Média	48,5	8,3	28,9	0
	Desvio	1,1	0,4	1,4	0
3	Média	68,3	10,5	29,9	710
	Desvio	2,9	0,7	0,7	13
7	Média	77,5	13,2	30,2	1065
	Desvio	3,2	0,3	3,0	28
14	Média	83,9	15,1	30,0	1316
	Desvio	2,2	0,5	0,7	42
28	Média	89,0	18,2	31,1	1463
	Desvio	2,5	0,9	1,3	51
63	Média	91,4	20,8	31,0	1588
	Desvio	1,7	1,6	1,0	67

Tabela 22 – Valores médios e desvios obtidos da argamassa de traço 1:1,5:0,24.

Idade	Parâmetro	fc (MPa)	ft (MPa)	Ec (GPa)	ε ($\mu\text{m}/\text{m}$)
1	Média	46,4	8,9	27,0	0
	Desvio	2,1	0,6	1,7	0
3	Média	66,7	10,8	31,6	613
	Desvio	3,2	0,6	1,0	4
7	Média	72,7	13,9	32,1	908
	Desvio	2,9	2,0	1,8	12
14	Média	79,3	15,2	32,0	1099
	Desvio	2,3	1,9	1,2	6
28	Média	80,9	15,7	32,5	1223
	Desvio	3,0	0,5	0,9	10
63	Média	84,7	17,3	34,6	1349
	Desvio	3,1	0,8	2,2	8

Tabela 23 – Valores médios e desvios obtidos da argamassa de traço 1:2,2:0,30.

Idade	Parâmetro	fc (MPa)	ft (MPa)	Ec (GPa)	ε ($\mu\text{m/m}$)
1	Média	32,9	7,1	23,8	0
	Desvio	0,8	0,4	2,8	0
3	Média	54,7	8,9	26,6	532
	Desvio	2,8	0,7	1,2	8
7	Média	64,6	10,9	28,1	836
	Desvio	2,8	1,1	1,1	10
14	Média	69,4	13,3	29,4	1041
	Desvio	2,9	1,0	2,3	17
28	Média	73,5	14,5	32,0	1162
	Desvio	3,0	1,1	2,1	20
63	Média	78,6	15,5	31,1	1244
	Desvio	2,0	0,7	1,8	31

Tabela 24 – Valores médios e desvios obtidos da argamassa de traço 1:3,0:0,37.

Idade	Parâmetro	fc (MPa)	ft (MPa)	Ec (GPa)	ε ($\mu\text{m/m}$)
1	Média	18,8	5,3	18,2	0
	Desvio	1,7	0,4	1,2	0
3	Média	41,7	7,1	19,5	503
	Desvio	0,9	0,3	1,2	4
7	Média	44,7	7,8	21,1	840
	Desvio	1,0	0,6	1,6	10
14	Média	48,8	9,0	24,9	1004
	Desvio	1,1	0,8	1,2	15
28	Média	51,3	10,3	24,5	1109
	Desvio	1,0	0,5	2,3	16
63	Média	54,2	10,6	25,2	1186
	Desvio	1,9	0,1	1,1	27

Tabela 25 – Valores médios e desvios obtidos da argamassa AI-1.

Idade	Parâmetro	fc (MPa)	ft (MPa)	Ec (GPa)	ε ($\mu\text{m/m}$)
1	Média	29,4	6,3	20,8	0
	Desvio	1,4	0,2	1,2	0
3	Média	46,7	7,0	30,3	396
	Desvio	2,4	0,6	2,5	19
7	Média	54,1	7,2	32,2	744
	Desvio	3,7	0,7	3,0	15
14	Média	64,4	12,1	34,0	1098
	Desvio	1,2	2,1	2,5	19
28	Média	68,9	14,3	34,4	1144
	Desvio	2,2	0,8	3,2	15
63	Média	72,9	14,9	34,6	1293
	Desvio	2,9	0,8	2,7	27

Tabela 26 – Valores médios e desvios obtidos da argamassa AI-2.

Idade	Parâmetro	fc (MPa)	ft (MPa)	Ec (GPa)	ε ($\mu\text{m/m}$)
1	Média	54,3	7,0	31,7	0
	Desvio	1,2	0,2	0,6	0
3	Média	74,0	7,2	38,0	371
	Desvio	2,0	0,2	2,9	23
7	Média	86,5	8,4	42,2	552
	Desvio	1,5	0,6	3,8	27
14	Média	95,2	10,3	43,4	770
	Desvio	3,5	0,8	2,3	23
28	Média	100,8	11,4	44,7	870
	Desvio	2,4	0,7	5,1	16
63	Média	104,6	12,6	45,4	900
	Desvio	2,9	0,4	2,5	16

Tabela 27 – Valores médios e desvios obtidos da argamassa AI-3.

Idade	Parâmetro	fc (MPa)	ft (MPa)	Ec (GPa)	ε ($\mu\text{m/m}$)
1	Média	1,6	0,4		0
	Desvio	0,2	0,1		0
3	Média	34,5	6,5	21,9	440
	Desvio	1,8	0,6	0,3	25
7	Média	44,8	7,9	27,9	992
	Desvio	1,2	0,2	2,0	18
14	Média	52,4	12,0	29,7	1859
	Desvio	0,9	2,3	0,5	11
28	Média	63,1	14,3	30,3	1990
	Desvio	1,9	0,2	3,1	13
63	Média	68,0	16,3	30,9	2330
	Desvio	3,6	0,8	2,7	13