

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Influência do consumo de água, do teor de adição de
microfibras de polipropileno e do tipo de cimento no fenômeno
da retração por secagem em concretos empregados em pisos**

Juliana Alves de Lima Senisse

Orientadoras: Denise C. C. Dal Molin e Ana Luiza Abitante

Porto Alegre
2010

Juliana Alves de Lima Senisse

**INFLUÊNCIA DO CONSUMO DE ÁGUA, DO TEOR DE ADIÇÃO
DE MICROFIBRAS DE POLIPROPILENO, E DO TIPO DE
CIMENTO NO FENÔMENO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM EM
CONCRETOS EMPREGADOS EM PISOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia na modalidade Acadêmico. Orientação: Prof.a. Dr. Denise Carpena Coitinho Dal Molin e Prof.a. Dr. Ana Luiza Abitante.

Porto Alegre

2010

S477i Senisse, Juliana Alves de Lima

Influência do consumo de água, do teor de adição de microfibras de polipropileno, e do tipo de cimento no fenômeno da retração por secagem em concretos empregados em pisos / Juliana Alves de Lima Senisse. – 2010.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2010.

Orientação: Prof^a. D^a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Prof^a. Dr^a. Ana Luiza Abitante

1. Pisos de concreto. 2. Concreto – Ensaios. I. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. II. Abitante, Ana Luiza, orient. III. Título.

CDU-691.32(043)

JULIANA ALVES DE LIMA SENISSE

**INFLUÊNCIA DO CONSUMO DE ÁGUA, DO TEOR DE ADIÇÃO
DE MICROFIBRAS DE POLIPROPILENO, E DO TIPO DE
CIMENTO NO FENÔMENO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM EM
CONCRETOS EMPREGADOS EM PISOS**

Porto Alegre, 30 de março de 2010

Prof.a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dra. pela Universidade de São Paulo
Orientadora

Prof.a. Ana Luiza Abitante
Dra. pela UFRGS
Orientadora

Prof. Dr. Luis Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof.a. Eugênicia Fonseca da Silva (UnB)
Dra. COPPE/UFRJ

Prof. Jairo José de Oliveira Andrade (PUC-RS)
Dr. PPGEC/UFRGS

Prof.a. Ângela Borges Masuero (UFRGS)
Dra. PPGEM/UFRGS

Eu dedico este trabalho aos meus amados pais Márcia e Kléber, a minha super irmã Carolina e ao meu amor André.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Kléber, um grande homem, um herói, um exemplo a ser seguido, pela educação, pelo apoio, e por minha formação como ser humano. À minha mãe, Márcia, uma grande guerreira, pela educação, pelo incentivo e pela força. Aos meus pais agradeço pelo amor e carinho em todos os momentos e pela confiança depositada em mim, em todas as etapas da minha vida. Muito obrigada, eu amo muito vocês!

À minha irmã, Carolina, pela cumplicidade, pelo carinho e pela torcida em todos os momentos. Manona, te amo!

Ao amor da minha vida, André, pelo amor e carinho, pela cumplicidade, pelo apoio nos momentos mais difíceis, por estar sempre ao meu lado e por ser esta pessoa tão especial em que eu posso confiar e amar para sempre. Meu amor, eu te amo muito!

Um agradecimento especial às minhas orientadoras professoras Denise Dal Molin e Ana Luiza Abitante, pela orientação, pela dedicação, pelo conhecimento transmitido, pelo apoio e pela amizade; fatores, os quais tornaram as atividades mais tranquilas e prazerosas.

Aos professores do NORIE, Ângela B. Masuero, Carlos T. Formoso, Luis C. Bonin e Miguel A. Satler, pelos conhecimentos transmitidos.

Ao professor João Masuero pelo conhecimento e auxílio durante o planejamento e execução da pesquisa.

Aos colegas e amigos Lucília Bernardino e Paulo Salvador, pelo conhecimento e auxílio durante o planejamento dos experimentos.

Aos laboratoristas Airton, Gilmar e Alexandre pelo auxílio prestado durante a realização da pesquisa.

Ao CIENTEC, principalmente aos laboratoristas Zé Vilson e Nelson, pela ajuda durante a realização dos experimentos.

Aos alunos de iniciação científica Guilherme Almeida, Diego de Campos, Mauro Mario, Anderson Müller e Raquel Wielewicky pelo auxílio durante a moldagem e execução dos experimentos, sempre tornando todas as atividades de laboratório mais divertidas.

As grandes amigas e colegas de turma do NORIE Ana Paula, Camila, Fernanda, Giovana, Juliana, Letícia, Laís e Lucila, pela força, companheirismo e amizade. Sempre tornando os

momentos mais difíceis em tarefas simples e prazerosas. Amigas! Sem dúvida, vocês foram uma das maiores conquistas desta etapa da minha vida. Adoro Vocês!

Aos demais colegas do NORIE, Luciana, Franciele, Cristiane e Daniel, pelo conhecimento e apoio durante toda a execução da pesquisa; estando sempre dispostos a ajudar, quando dúvidas surgiam no decorrer da pesquisa.

Agradeço a CAPES e ao Cnpq pelo auxílio financeiro, que possibilitou a minha total dedicação ao estudos.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para que a pesquisa acontecesse da melhor maneira possível. Muito Obrigada!!

“A alegria está na luta, no sofrimento envolvido.
Não na vitória propriamente dita.”

Provérbio Budista

RESUMO

SENISSE, J. A. L. **Influência do consumo de água, da adição de microfibras de polipropileno e do tipo de cimento nas variações dimensionais de concretos empregados em pisos.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Mudanças volumétricas presentes na matriz cimentícia, oriundas dos processos de hidratação e de secagem do compósito cimentício, geram uma tendência de fissuração no material. Em pisos de concreto, a presença de tal manifestação patológica, decorrente do fenômeno da retração por secagem, é extremamente preocupante. Desta forma, a realização de esforços visando avaliar a influência de materiais constituintes do traço do concreto e seus proporcionamentos, com o intuito de reduzir a tendência de fissuração do material, gerada pelo fenômeno da retração por secagem, é extremamente válida. Para isto, foram avaliados fatores controláveis como o consumo de água (175l/m^3 ; 190l/m^3 ; 205l/m^3), o teor de adição de microfibras de polipropileno (0g/m^3 ; 300g/m^3 ; 600g/m^3 ; 900g/m^3), o tipo de cimento (CP IV; CP V-ARI) e a idade, variável para cada ensaio realizado. Os ensaios empregados para esta avaliação foram o de resistência à compressão uniaxial, resistência à tração na flexão, retração por secagem livre e retração por secagem restringida. Os resultados dos ensaios mecânicos demonstraram a influência significativa do tipo de cimento e da idade avaliada na resistência do concreto. O teor de adição de microfibras de polipropileno exerceu uma pequena influência, porém significativa, com incrementos de 5% nos resultados mecânicos do ensaio de resistência à compressão uniaxial para os traços com teores de adição de 300g/m^3 e 600g/m^3 . No entanto para o ensaio de resistência à tração na flexão, tal variável não se demonstrou significativa. O fator consumo de água não influenciou significativamente nos resultados correspondentes aos ensaios mecânicos, uma vez que a relação a/c manteve-se constante para todos os concretos estudados. No ensaio de retração por secagem livre, o tipo de cimento não demonstrou significância relevante para os resultados obtidos. Comportamento este, também observado para o teor de adição de microfibras de polipropileno, o qual não reduziu a magnitude da retração por secagem livre. Diferentemente do observado para a variável consumo de água, a qual influenciou significativamente nos dados obtidos, demonstrando a existência de uma relação direta entre a mesma e o fenômeno estudado. No ensaio de retração por secagem restringida, a tendência de fissuração dos concretos estudados foi influenciada significativamente pelo consumo de água presente na mistura. Conjuntamente, os resultados obtidos neste ensaio demonstraram que o teor de adição de microfibras de polipropileno é uma variável que deve ser proporcionada como os demais materiais constituintes do traço do concreto, ou seja, a quantidade incorporada no compósito cimentício não pode ser um valor determinado, semelhante para qualquer tipo de concreto.

Palavras-chave: pisos de concreto, retração por secagem livre, retração por secagem restringida, tendência de fissuração.

ABSTRACT

SENISSE, J. A. L. **Influência do consumo de água, da adição de microfibras de polipropileno, e do tipo de cimento nas variações dimensionais de concretos empregados em pisos.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Influence of water consumption, the addition content of polypropylene staple fibers and the kind of cement in the volumetric changes of concretes used in floors

Volumetric changes present in the cement paste matrix, coming from the processes of hydration and drying of cementitious composites, generate a cracking tendency in the material. In the concrete floor, this cracking tendency is extremely worrying. In this sense, efforts to evaluate the influence of important parameters in the mixture proportions of concrete, for decrease the cracking tendency due to drying shrinkage, it's extremely valid. So, parameters were assessed like the consumption of water (175l/m³; 190l/m³; 205l/m³), the addition content of polypropylene staple fiber (0g/m³; 300g/m³; 600g/m³; 900g/m³), the type of cement (CP IV; CP V-ARI) and age, different for each test performed. The tests performed for this assessment were the compressive strength, flexural tensile strength, unrestrained drying shrinkage and restrained drying shrinkage. The results of mechanical tests shown the significant influence of the kind of cement and age assessed in the strength of concrete. The addition content of polypropylene staple fiber exerted little influence on the results of mechanical tests, but it was significant, with increases of 5% in the results of compressive strength for the mixtures with addition levels of 300g/m³ e 600g/m³. However for the flexural tensile strength, this parameter didn't show significant. The water consumption didn't influence significantly the results of mechanical tests, since the ratio a/c was constant for all concretes studied. In the unrestrained drying shrinkage, the kind of cement didn't show importance for the results. This behavior also observed for the addition content of polypropylene staple fiber, which didn't reduce the magnitude of free drying shrinkage. However, the water consumption influenced significantly in the results, demonstrating the existence of a direct relationship between it and the phenomenon studied. In the restrained drying shrinkage, the cracking tendency of the concrete studied was significantly affected by the consumption of water present in the mixture. Together, the results of this test showed that the addition content of polypropylene staple fiber is a parameter that should be provided as the others materials of the concrete mixture, i.e., the amount of polypropylene staple fiber incorporated into the cementitious composite can't be a value fixed, similar to any type of concrete mixture.

Keywords: concrete floor, unrestrained drying shrinkage, restrained drying shrinkage, cracking tendency.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS.....	17
LISTA DE EQUAÇÕES.....	18
LISTA DE SIGLAS.....	19
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	20
1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 CONTEXTO DA PESQUISA.....	24
1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	27
1.3 OBJETIVOS.....	30
1.3.1 Objetivos Secundários.....	30
1.4 HIPÓTESES.....	30
1.5 LIMITAÇÕES.....	31
1.6 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	31
1.7 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	33
2 O FENÔMENO RETRAÇÃO.....	34
2.1 ENRIJECIMENTO, PEGA E ENDURECIMENTO – CONCEITOS.....	34
2.2 RETRAÇÃO NAS PRIMEIRAS IDADES.....	37
2.2.1 Fases da Retração nas Primeiras Idades.....	41
2.2.1.1 Fase líquida (fase de suspensão).....	41
2.2.1.2 Fase de transição de suspensão para sólido poroso – Formação do patamar de percolação.....	41
2.2.1.3 Fase de endurecimento (<i>Hardening Shrinkage</i>).....	43
2.3 RETRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO.....	43

2.3.1	Retração por Secagem ou Retração Hidráulica.....	46
2.3.1.1	Mecanismos geradores da retração por secagem.....	51
2.3.1.2	Fatores intervenientes na retração por secagem em concretos.....	56
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	63
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	65
3.1.1	Determinação das Variáveis de Resposta do Projeto Experimental	66
3.1.2	Escolha dos Fatores Controláveis no Projeto Experimental.....	67
3.1.3	Matriz Experimental.....	69
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	71
3.2.1	Cimento	71
3.2.2	Agregados	73
3.2.2.1	Agregado miúdo	73
3.2.2.2	Agregado graúdo.....	74
3.2.3	Microfibras de Polipropileno	76
3.2.4	Água	77
3.2.5	Aditivo.....	77
3.3	DOSAGEM EXPERIMENTAL.....	78
3.3.1	Determinação da Quantidade de Material Empregada na Produção dos Concretos.....	80
3.3.2	Produção dos Concretos.....	83
3.3.3	Moldagem dos Corpos-de-prova.....	85
3.3.4	Procedimento de Cura	87
3.4	MÉTODOS DE ENSAIO	87
3.4.1	Propriedades Mecânicas.....	87
3.4.1.1	Resistência à compressão uniaxial (NBR 5739/94).....	87
3.4.1.2	Resistência à tração na flexão (NBR 12142/94).....	88
3.4.2	Retração por Secagem	88
3.4.2.1	Retração por secagem livre (ASTM C-157/93).....	89
3.4.2.2	Retração por secagem restringida (AASHTO PP34-99/05).....	91
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	98
4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL	98
4.1.1	Efeito do Tipo de Cimento (T _{cim}) na Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto	101
4.1.2	Efeito do Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno (Fib) na Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto.....	102
4.1.3	Efeito da Idade na Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto	105

4.1.4	Efeito da Interação TcimxCag na Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto	105
4.1.5	Efeito da Interação TcimxFib na Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto.....	107
4.1.6	Efeito da Interação CagxFib na Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto	108
4.1.7	Efeito da interação CagxId na Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto	109
4.1.8	Efeito da Interação FibxIdade na Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto	110
4.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	111
4.2.1	Efeito do Tipo de Cimento (Tcim) na Resistência à Tração na Flexão do Concreto	113
4.2.2	Efeito da Idade (Id) na Resistência à Tração na Flexão do Concreto	114
4.2.3	Efeito da Interação TcimxCag na Resistência à Tração na Flexão do Concreto	115
4.2.4	Efeito da Interação TcimxId na Resistência à Tração na Flexão do Concreto	116
4.2.5	Efeito da Interação CagxFib na Resistência à Tração na Flexão do Concreto	117
4.2.6	Efeito da Interação CagxId na Resistência à Tração na Flexão do Concreto	119
4.2.7	Efeito da Interação FibxId na Resistência à Tração na Flexão do Concreto.....	119
4.3	RETRAÇÃO POR SECAGEM LIVRE	120
4.3.1	Efeito do Consumo de Água (Cag) na Retração por Secagem Livre do Concreto	128
4.3.2	Efeito do Teor de Adição de Microfibras de PP (Fib) na Retração por Secagem Livre do Concreto 129	
4.3.3	Efeito da Idade (Id) na Retração por Secagem Livre do Concreto	130
4.3.4	Efeito da Interação TcimxFib na Retração por Secagem Livre do Concreto.....	131
4.4	RETRAÇÃO POR SECAGEM RESTRINGIDA	132
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	138
5.1	CONCLUSÕES.....	138
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	140
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: delineamento da pesquisa.....	32
Figura 2: representação esquemática dos tempos de pega e endurecimento da pasta de cimento (adaptado de SILVA, 2007).....	36
Figura 3: relações entre o tempo de pega, a permeabilidade, a porosidade e a resistência da pasta de cimento (adaptado de SOROKA, 1979 apud MEHTA; MONTEIRO, 2006)....	37
Figura 4: representação esquemática da relação entre a retração química e a retração autógena. (a) sem exsudação. (b) com exsudação (adaptado de Tazawa, 1998 apud Lam, 2005).....	39
Figura 5: representação esquemática das etapas da pasta de cimento, segundo a Teoria de Percolação de Acker (1988) (adaptado de BARCELO, MORENVILLE; CLAVAUD, 2005; SILVA, 2007)	42
Figura 6: distribuição das tensões (adaptado de BISSCHOP, 2002 apud LAM, 2005).....	47
Figura 7: representação esquemática da formação de fissuras (adaptado de BAZANT, 1982 apud WITTMANN; BELTZUNG; ZHAO, 2009)	48
Figura 8: representação esquemática da configuração das fissuras, devido à retração hidráulica em pisos (adaptado de CHODOUNSKY; VIECELI, 2007)	50
Figura 9: representação esquemática de um capilar não saturado (adaptado de HUA; ACKER; EHRLACHER, 1995)	53
Figura 10: representação do fenômeno de pressão de disjunção, adaptado de Wittmann; Beltzung, Zhao (2009)	55
Figura 11: relação entre a retração relativa última e o volume da pasta de cimento (BISSONNETTE; PIERRE; PIGEON, 1999).....	57
Figura 12: programa experimental – ensaios mecânicos e retração por secagem livre	64
Figura 13: programa experimental - ensaio de retração por secagem restringida	65
Figura 14: fibras de polipropileno utilizadas na pesquisa	76
Figura 15: diagrama de dosagem - cimento CP IV.....	79
Figura 16: diagrama de dosagem - cimento CP V-ARI	80
Figura 17: tufo ou grumos de microfibras de polipropileno. (a) e (b): corpos-de-prova cilíndricos (9,5x19cm), correspondentes ao ensaio de resistência à compressão uniaxial. (c) e (d): corpos-de-prova prismáticos (7,5x7,5x28,5 cm), correspondentes ao ensaio de retração por secagem livre	84
Figura 18: fôrma cilíndrica de 9,5 x 19 cm.....	85
Figura 19: fôrma prismática de 10 x 10 x 35 cm.....	85
Figura 20: fôrma prismática de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm.....	86

Figura 21: fôrma circular (anel).....	86
Figura 22: armazenamento dos corpos-de-prova após a moldagem	86
Figura 23: execução do ensaio de resistência à tração na flexão	88
Figura 24: variação unidimensional - deformação referência (inicial)	90
Figura 25: processo de secagem – câmara climatizada	91
Figura 26: leitura da variação unidimensional (retração por secagem livre)	91
Figura 27: equipamento do ensaio de retração restringida, baseado na norma AASHTO PP34-99 (2005)	92
Figura 28: processo de lixamento da superfície interna do anel de aço	93
Figura 29: marcação do posicionamento de colagem	93
Figura 30: limpeza da superfície (exata) de colagem.....	93
Figura 31: extensômetro sujeito a esforços de compressão	93
Figura 32: extensômetro sujeito a esforços de tração.....	93
Figura 33: colagem do terminal elétrico.....	93
Figuras 34: extensômetros elétricos, terminais e fios soldados (posicionamento dos extensômetros frente a esforços de compressão e de tração).....	94
Figura 35: instrumentação completa do anel.....	94
Figura 36: instrumentação e selamento concluídos – anel interno	95
Figura 37: detalhes de proteção e selamento	95
Figura 38: molde finalizado.....	95
Figura 39: processo de concretagem dos CP's.....	96
Figura 40: processo de cura inicial.....	96
Figura 41: representação esquemática do processo de secagem	96
Figura 42: processo de secagem dos corpos-de-prova correspondentes ao ensaio de retração por secagem restringida	97
Figura 43: efeito isolado do tipo de cimento na resistência à compressão uniaxial do concreto	101
Figura 44: efeito isolado do teor de adição de microfibras de PP na resistência à compressão uniaxial do concreto	102
Figura 45: influência das microfibras de PP na resistência à compressão uniaxial, para os traços produzidos com cimento pozolânico e consumo de água de 175 l/m ³	103
Figura 46: efeito da presença de aditivo na resistência à compressão, para os traços produzidos com cimento pozolânico e consumo de água de 190l/m ³	104
Figura 47: efeito isolado da idade na resistência à compressão uniaxial do concreto	105

Figura 48: efeito da interação entre o tipo de cimento e o consumo de água sobre a resistência à compressão uniaxial do concreto. (a) resistência à compressão (MPa) x consumo de água (l/m^3). (b) resistência à compressão (MPa) x tipo de cimento.....	106
Figura 49: efeito da interação entre o tipo de cimento e o teor de adição de microfibras de PP sobre a resistência à compressão uniaxial do concreto. (a) resistência à compressão (MPa) x teor de adição de microfibras de PP (g/m^3). (b) resistência à compressão (MPa) x tipo de cimento	107
Figura 50: efeito da interação entre o consumo de água e o teor de adição de microfibras de PP sobre a resistência à compressão uniaxial do concreto. (a) resistência à compressão (MPa) x teor de adição de microfibras de PP (g/m^3). (b) resistência à compressão (MPa) x consumo de água (l/m^3).....	108
Figura 51: efeito da interação entre o consumo de água e a idade sobre a resistência à compressão uniaxial do concreto. (a) resistência à compressão (MPa) x consumo de água (l/m^3). (b) resistência à compressão (MPa) x idade (dias).....	109
Figura 52: efeito da interação entre o teor de adição de microfibras de PP e a idade sobre a resistência à compressão uniaxial do concreto. (a) resistência à compressão (MPa) x teor de adição de microfibras de PP (g/m^3). (b) resistência à compressão (MPa) x idade (dias).....	111
Figura 53: efeito do tipo de cimento na resistência à tração na flexão.....	114
Figura 54: efeito da idade na resistência à tração na flexão	115
Figura 55: efeito da interação entre o tipo de cimento e o consumo de água sobre a resistência à tração na flexão do concreto. (a) resistência à tração na flexão (MPa) x consumo de água (l/m^3). (b) resistência à tração na flexão (MPa) x tipo de cimento..	116
Figura 56: efeito da interação entre o tipo de cimento e a idade sobre a resistência à tração na flexão do concreto. (a) resistência à tração na flexão (MPa) x idade (dias). (b) resistência à tração na flexão (MPa) x tipo de cimento	117
Figura 57: efeito da interação entre o consumo de água e o teor de adição de microfibras de PP sobre a resistência à tração na flexão do concreto. (a) resistência à tração na flexão (MPa) x teor de adição de microfibras de PP (g/m^3). (b) resistência à tração na flexão (MPa) x consumo de água (l/m^3)	118
Figura 58: efeito da interação entre o consumo de água e a idade sobre a resistência à tração na flexão do concreto. (a) resistência à tração na flexão (MPa) x consumo de água (l/m^3). (b) resistência à tração na flexão (MPa) x idade (dias).....	119
Figura 59: efeito da interação entre o teor de adição de microfibras de PP e a idade sobre a resistência à tração na flexão do concreto. (a) resistência à tração na flexão (MPa) x	

teor de adição de microfibras de PP (g/m^3). (b) resistência à tração na flexão (MPa) x idade (dias)	120
Figura 60: valores médios da retração por secagem livre – cimento pozolânico. (a) consumo de água de $175 \text{ l}/\text{m}^3$. (b) consumo de água de $190 \text{ l}/\text{m}^3$. (c) consumo de água de $205 \text{ l}/\text{m}^3$	122
Figura 61: valores médios da retração por secagem livre – cimento de alta resistência inicial. (a) consumo de água de $175 \text{ l}/\text{m}^3$. (b) consumo de água de $190 \text{ l}/\text{m}^3$. (c) consumo de água de $205 \text{ l}/\text{m}^3$	124
Figura 62: efeito isolado do consumo de água na retração por secagem livre do concreto	128
Figura 63: efeito isolado do teor de adição de microfibras de PP sobre a retração por secagem livre do concreto	129
Figura 64: efeito isolado da idade na retração por secagem livre do concreto	130
Figura 65: efeito da interação entre o tipo de cimento e o teor de adição de microfibras de PP sobre a retração por secagem livre do concreto. (a) retração por secagem livre (μm) x teor de adição de microfibras de PP (g/m^3). (b) retração por secagem livre (μm) x tipo de cimento	131
Figura 66: valores médios diários da retração por secagem restringida do concreto. (a) traços com consumo de água de $175 \text{ l}/\text{m}^3$. (b) traços com consumo de água de $190 \text{ l}/\text{m}^3$. (c) traços com consumo de água de $205 \text{ l}/\text{m}^3$	134
Figura 67: abertura das fissuras nos traços sem adição de microfibras de PP. (a) consumo de água de $175 \text{ l}/\text{m}^3$. (b) consumo de água de $190 \text{ l}/\text{m}^3$. (c) consumo de água de $205 \text{ l}/\text{m}^3$	134
Figura 68: abertura das fissuras nos traços com adição de $450 \text{ g}/\text{m}^3$ de microfibras de PP. (a) consumo de água de $190 \text{ l}/\text{m}^3$. (b) consumo de água de $205 \text{ l}/\text{m}^3$	136
Figura 69: abertura das fissuras nos traços com adição de $900 \text{ g}/\text{m}^3$ de microfibras de PP. (a) consumo de água de $175 \text{ l}/\text{m}^3$. (b) consumo de água de $190 \text{ l}/\text{m}^3$	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: classificação dos pisos de concreto, segundo a ACI 302.1R (ACI, 2004).....	26
Tabela 2: especificações de projetos de pisos de concreto	69
Tabela 3: matriz experimental empregada na pesquisa.....	70
Tabela 4: número de corpos-de-prova empregados em cada ensaio	71
Tabela 5: composição dos cimentos utilizados na pesquisa	72
Tabela 6: caracterização química dos cimentos estudados	72
Tabela 7: caracterização física dos cimentos estudados	73
Tabela 8: caracterização mecânica dos cimentos estudados	73
Tabela 9: caracterização física do agregado miúdo	74
Tabela 10: caracterização física do agregado graúdo.....	75
Tabela 11: especificação das microfibras de polipropileno	77
Tabela 12: caracterização físico-química do aditivo químico plastificante utilizado na pesquisa	77
Tabela 13: resultados da dosagem experimental - CP IV	78
Tabela 14: resultados da dosagem experimental - CP V-ARI	79
Tabela 15: resultados obtidos na verificação do comportamento do concreto fresco – cimento CP IV	81
Tabela 16: traços dos concretos empregados na pesquisa	82
Tabela 17: resultados médios do ensaio de resistência à compressão uniaxial	99
Tabela 18: análise de variância (ANOVA) – resistência à compressão uniaxial	100
Tabela 19: resultados médios do ensaio de resistência à tração na flexão	112
Tabela 20: análise de variância (ANOVA) – resistência à tração na flexão	113
Tabela 21: resultados médios da retração por secagem livre (μm) dos concretos estudados	125
Tabela 22: análise de variância (ANOVA) – retração por secagem livre	127
Tabela 23: número de fissuras encontradas em cada traço de concreto.....	137

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	52
Equação 2.....	53
Equação 3.....	53
Equação 4.....	91

LISTA DE SIGLAS

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI: American Concrete Institute

ANAPRE: Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho

ASTM: American Society for Testing and Materials

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo

EPUSP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

LACER: Laboratório de Cerâmica

NBR: Norma Brasileira Regulamentada

NM: Asociación Mercosur de Normalización

NORIE: Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

RS: Rio Grande do Sul

SENGE: Sociedade Engenharia do Rio Grande do Sul

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

α : teor de argamassa

μm : micro metro (10^6 metros)

γ : tensão da superfície da água, na interface entre a fase líquida/fase gasosa (N/m)

ρ : pressão na fase líquida (MPa)

ρ_0 : pressão na fase gasosa (ar seco + vapor d'água) (MPa)

$^{\circ}\text{C}$: grau Celsius

ΔP : variação de pressão entre a fase gasosa úmida e a fase líquida

Θ : ângulo de contato entre a superfície sólida e a fase líquida

%: porcentagem ou percentagem

(1:m): quantidade de cimentos:agregados, em massa

Al_2O_3 : óxido de alumínio

a/c: relação água/cimento

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CH: hidróxido de cálcio ou cal hidratada

CaCO_3 : carbonato de cálcio

CAD: concreto de alto desempenho

Cag: consumo de água (l/m^3)

CaO: óxido de cálcio

CAR: concreto de alta resistência

cm: centímetro

CO_2 : dióxido de carbono ou gás carbônico

CP II: cimento Portland composto

CP II-E: cimento Portland composto com adição de escória

CP II-F: cimento Portland composto com adição de filer

CP II-Z: cimento Portland composto com adição pozolânica

CP IV: cimento Portland pozolânico

CP V-ARI: cimento Portland de alta resistência inicial

CP V-ARI RS: cimento Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos

CP's: corpos-de-prova

C_3S : silicato tricálcico

C-S-H: silicato de cálcio hidratado

fck: resistência à compressão (MPa)

fctm,k: resistência à tração na flexão (MPa)

Fe_2O_3 : óxido de ferro (III) (óxido férrico)

Fib: teor de adição de microfibras de polipropileno (g/m^3)

g/cm^2 : grama/centímetro quadrado

g/cm^3 : grama/centímetro cúbico

g/m^3 : grama/metro cúbico

H: teor de materiais secos (%)

h:min: hora:minuto

Id: idade

J/mol*K: Joule/mol*Kelvin

K: Kelvin

kg: kilograma

kg/m^3 : kilograma/metro cúbico

K_2O : óxido de potássio

l: comprimento

l/m^3 : litro/metro cúbico

m: metro

milhões de fibras/kg: milhões de fibras/kilogramas

MgO: óxido de magnésio

mm: milímetro

MnO: óxido de manganês

MPa: Mega Pascal

m^2/kg : metro quadrado/kilogramas

m^3/mol : metro cúbico/mol

N: Newton

Na_2O : óxido de sódio

N/m: Newton/metro

pH: potencial hidrogeniônico

PP: polipropileno

PVC: Policloreto de Vinila

P_2O_5 : pentóxido de difósforo

r: raio de curvatura (m)

r_0 : raio de acesso

R: constante ideal dos gases (8,314 J/mol.K)

R^2 : coeficiente de determinação

SiO_2 : óxido de silício ou dióxido de (mono)silício ou anidrido silícico

SO_3 : óxido de enxofre VI ou trióxido de (mono)enxofre ou anidrido sulfúrico

SrO: óxido de estrôncio

sup/vol: relação superfície exposta ao ambiente/volume

T: temperatura (K)

Tcim: tipo de cimento

TiO_2 : óxido de titânio

UR: umidade relativa

V: volume molar da água (m^3/mol)

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados em todo o mundo. Devido a sua elevada empregabilidade, este material está sujeito a deparar-se com diferentes situações, principalmente relacionadas à escolha de seus materiais constituintes, o meio em que está inserido e a natureza do elemento estrutural. Contudo, a interação inadequada entre estes parâmetros pode gerar diversos tipos de manifestações patológicas, as quais prejudicam severamente a durabilidade das estruturas.

A elevada utilização de concretos de cimento Portland auxilia no contínuo aprimoramento dos parâmetros de desempenho físico e químico destes materiais. Segundo Acker e Ulm (2001), conjuntamente a estes fatores é possível realizar um aperfeiçoamento das propriedades relacionadas à composição e a produção dos concretos, permitindo ao compósito uma caracterização mais precisa e eficiente.

Em elementos como pisos de concreto, pode-se dizer que a presença de manifestações patológicas é recorrente. Tal problemática pode estar relacionada, além de outros fatores, com o proporcionamento incorreto dos materiais constituintes do traço de concreto, o qual gera manifestações patológicas como a fissuração (HSIE; TU; SONG, 2008).

Segundo o manual americano ACI 302.1R (ACI, 2004), direcionado para pisos de concreto, manifestações patológicas como a fissuração e o empenamento (*curling*) das placas de concreto, podem ser causados pelas mudanças volumétricas decorrentes do fenômeno da retração. Segundo recomendações deste guia, este fenômeno ocorre até o momento em que não exista mais água, calor ou ambos para serem liberados para o ambiente externo. Além deste fator, a taxa de secagem destas estruturas nunca será a mesma em toda a sua espessura, permitindo com que haja variação na intensidade do fenômeno da retração.

Assim, percebe-se que a presença da fissuração nos pisos de concreto pode estar relacionada a diferentes fatores, como as propriedades dos materiais empregados e a composição do traço de concreto. No entanto, cabe ressaltar que as técnicas construtivas utilizadas podem auxiliar no aparecimento de tal manifestação patológica.

Neste sentido, a realização de esforços, visando, por exemplo, o correto proporcionamento dos materiais constituintes do concreto, com a finalidade de minimizar a tendência de fissuração devido ao fenômeno da retração é extremamente válido, uma vez que auxilia na manutenção da vida útil das estruturas (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Alguns estudos têm sido realizados com o intuito de um maior entendimento sobre a influência de cada um dos parâmetros controláveis constituintes do traço do concreto, na magnitude do fenômeno da retração, visando à redução da intensidade da deformação unidimensional livre e da tendência de fissuração dos materiais cimentícios. Pesquisas realizadas por Bissonnette, Pierre e Pigeon (1999), Mokarem, Weyers e Lane (2005), Hsie, Tu e Song (2008), Wittmann, Beltzung e Zhao (2009) são alguns exemplos de trabalhos, os quais buscam um maior entendimento sobre este fenômeno, bem como de suas consequências prejudiciais nas estruturas de concreto.

No entanto, no Brasil, poucas são as pesquisas desenvolvidas nesta área de conhecimento, as quais têm por objetivo, principalmente, a redução da tendência de fissuração dos compósitos cimentícios, empregados em pisos, devido ao fenômeno da retração. Desta forma, o presente estudo pretende iniciar a busca pelo aprimoramento do conhecimento científico relacionado à composição do traço do concreto utilizado nestes elementos, para que a definição dos parâmetros de dosagem não seja baseada, simplesmente, em conhecimentos práticos.

1.1 CONTEXTO DA PESQUISA

A retração do concreto foi primeiramente observada em meados do século XX, quando Le Chatelier iniciou um registro sistemático sobre as propriedades do cimento, descrevendo o fenômeno da autodessecação, definido como o processo de hidratação do cimento que ocorre, continuamente, ao longo do tempo. O pesquisador constatou, com seus estudos, uma distinção existente entre o volume absoluto (retração química) e o volume aparente (retração autógena) de uma pasta de cimento (JENSEN; HANSEN, 2001; SILVA, 2007).

A partir deste momento, diversos pesquisadores começaram a estudar a retração ocorrida ao longo do tempo nas matrizes cimentícias, sobretudo, a partir da década de 40, quando trabalhos sobre retração por secagem foram fortemente intensificados. Como é o caso da investigação pioneira de Powers e Brownyard (1948), cujos estudos mostraram a possibilidade de apresentar cálculos teóricos sobre a composição da fase da pasta de cimento endurecida, assim permitindo que pesquisadores como Coppeland e Bragg (1955)

desenvolvessem um método para medição do fenômeno da autodessecação (JENSEN; HANSEN, 2001).

Nos últimos anos, muitas pesquisas foram desenvolvidas com o intuito de um maior entendimento sobre o fenômeno da retração por secagem. Dentre estas, pode-se mencionar o estudo de Ababneh et al. (2001), o qual analisou a influência da relação a/c e da taxa de volume de agregados frente à retração por secagem e à difusão de umidade (secagem); Zhang e Li (2001), Ma, Tan e Wu (2002), Ma et al. (2004) e, Banthia e Gupta (2006) estudaram a influência da geometria e do tipo de fibra de polipropileno, quando adicionadas à composição de materiais cimentícios, frente à tendência de fissuração devido ao fenômeno da retração; Benboudjema, Meftah e Torrenti (2005) avaliaram efeitos estruturais provenientes da fissuração decorrente da retração por secagem; Yurtdas e Burion (2006) analisaram a influência da relação a/c nas propriedades mecânicas de materiais cimentícios submetidos a diferentes processos de secagem; e Bisschop e van Mier (2008) investigaram o efeito do agregado no processo de secagem de compósitos cimentícios.

Logo, devido ao grande número de pesquisas internacionais, evidencia-se a existência de uma busca contínua pelo aprimoramento do conhecimento científico relacionado aos mecanismos geradores e aos fatores intervenientes do fenômeno da retração, em todos os seus tipos. Tais investigações têm como finalidade promover uma redução nos efeitos gerados por este fenômeno, como por exemplo, a fissuração das estruturas de concreto.

Quando se fala em pisos de concreto, os efeitos decorrentes das variações volumétricas, como é o caso, por exemplo, da fissuração e do empenamento (*curling*) das placas, são manifestações patológicas fortemente presentes (ACI 302.1R, 2004). Segundo o Comitê 302 do ACI, os pisos de concreto são classificados em nove categorias, tabela 1, de acordo com a sua utilização, tipo de tráfego, aspecto estético desejado, e tipo de tratamento e acabamento superficial requeridos.

Tabela 1: classificação dos pisos de concreto, segundo a ACI 302.1R (ACI, 2004)

Classe	Tipo de tráfego previsto	Uso	Considerações Especiais	Técnicas de acabamento
1. Pisos de camada única (Monolítico)	Superfície exposta - tráfego de pedestres.	Prédios comerciais, oficinas, igrejas, múltiplas residências; Uso decorativo.	Acabamento uniforme, uso de agregados anti-derrapantes em áreas específicas, cura. Agregado mineral colorido, pigmento colorido ou agregado exposto, estampado ou decorativo, layout de juntas artísticas, cura.	Normal, com pá metálica, anti-derrapante onde necessário. Como requerido.
2. Pisos de camada única (Monolítico)	Superfície revestida - tráfego de pedestres.	Prédios comerciais, igrejas, múltiplas residências; Uso como capa/revestimento de piso.	Placa plana e nivelada compatível com aplicação do revestimento, cura. Disposição de juntas segundo o revestimento aplicado.	Leve acabamento com pá metálica.
3. Pisos de camada dupla	Superfície exposta ou revestida - tráfego de pedestres.	Capa (não)aderida sobre a placa base para construções comerciais ou não industriais (determinado pelo tipo de construção ou cronograma).	Placa base - uniforme, plana, cura. Capa não aderida - isolamento sobre placa base, espessura mínima 75 mm reforçada, cura. Capa aderida - tamanho adequado do agregado, espessura mínima 19 mm, cura.	Placa base - acabamento sobre face não aderida (limpeza, superf. texturada sobre face aderida). Capa - superfície exposta (acabamento normal com pá metálica); superfície revestida (leve acabamento com pá metálica).
4. Pisos de camada única (Monolítico)	Superfície exposta ou coberta - tráfego de pedestres e/ou veículos leves.	Institucional ou comercial.	Placa plana e nivelada compatível com aplicação do revestimento, agregados anti-derrapantes em áreas específicas, cura. Disposição de juntas segundo o revestimento aplicado.	Normal, com pá metálica.
5. Pisos de camada única (Monolítico)	Superfície exposta - tráfego de veículos industriais (rodas pneumáticas, levemente rígidas).	Pisos industriais para produção, processamento e estocagem.	Boa uniformidade de sub-base, disposição de juntas, resistência à abrasão, cura.	Intenso acabamento com pá metálica.
6. Pisos de camada única (Monolítico)	Superfície exposta - tráfego de veículos industriais pesados (rodas rígidas, com intenso carregamento sobre rodas).	Pisos industriais sujeitos a tráfego pesado; podendo ser sujeitos a impacto.	Boa uniformidade de sub-base, disposição de juntas, transferência de carga, resistência à abrasão, cura.	Endurecedor superficial à base de agregados minerais ou metálicos; acabamento intenso com pá metálica.
7. Pisos de camada dupla	Superfície exposta - tráfego de veículos industriais pesados (rodas rígidas, com intenso carregamento sobre rodas).	Camada dupla de piso aderido sujeito à tráfego pesado e impacto.	Placa base - sub-base uniforme, reforço, paginação de juntas, superfície nivelada, cura Capa não aderida - composto mineral ou metálico com granulometria contínua. Espessura mínima 19 mm. Endurecedor de superfície à base de agregado inercial ou metálico aplicado para superfície plana de alta resistência, cura.	Limpeza, leve textura da superfície da placa base para subsequente aderência da capa. Desempeno especial da superfície da base (opcional). Acabamento com pá metálica.
8. Pisos de camada dupla	Idem as classes 4, 5 e 6.	Capa (não)aderida - pisos novos ou velhos ou onde sistema construtivo ou prazos exigir.	Isolamento sobre placa base, espessura mínima de 100 mm, resistência à abrasão, cura.	Idem as classes 4, 5 e 6.
9. Pisos de camada única (Monolítico) ou Capa	Superfície exposta (extremamente plana ou com padrões de planicidade críticos) Veículos transportadores de materiais especiais ou tolerâncias específicas para robótica.	Corredores estreitos, armazéns (cargas elevadas), estúdios de televisão, ringues de gelo, ginásios - Orientações de projeto (Norma ACI 360R).	Especificações da qualidade do concreto variadas. Endurecedores não podem ser usados sem aplicações especiais e grandes cuidados de instalação aplicados. FF 50 e FL 25 (pisos superplanos). Cura.	Seguir rigidamente as técnicas de acabamento indicadas na seção 8.9.

Influência do consumo de água, do teor de adição de microfibras de polipropileno e do tipo de cimento no fenômeno da retração por secagem em concretos empregados em pisos.

Uma característica a ser considerada em pisos, a qual contribui para a intensidade do fenômeno da retração, é a elevada área de contato existente entre a estrutura de concreto e o ambiente externo. Comparando com outros tipos de elementos de concreto, como por exemplo, vigas e pilares, esta particularidade contribui, consideravelmente, para o acentuado valor do gradiente de umidade, bem como para as elevadas taxas de variação de temperatura a que o concreto é submetido (OLIVEIRA, 2000; TOLEDO FILHO et al., 2005).

Neste sentido, evidencia-se a importância do controle da fissuração e do empenamento das placas de concreto causados pelas mudanças volumétricas (retração) que ocorrem no material cimentício. Tais manifestações patológicas podem ser minimizadas não só com o emprego de conceitos ligados à tecnologia do concreto, pela realização de uma definição correta dos parâmetros de dosagem do compósito, mas também com a escolha correta dos materiais constituintes, os quais podem auxiliar na redução da intensidade deste fenômeno, como por exemplo, o emprego de fibras sintéticas.

Atualmente, é frequente a utilização de fibras sintéticas na composição do concreto empregado em estruturas de pisos, uma vez que elas podem auxiliar na redução da magnitude da retração e, principalmente, minimizar as fissuras causadas pela retração quando ocorre uma restrição ao movimento. Segundo Laning (1992), além de ser um material inerte, as fibras sintéticas adicionadas ao concreto melhoram propriedades como: a resistência ao impacto e a integridade pós-fissuração destes compósitos.

Desta forma, o emprego de um correto proporcionamento dos materiais constituintes do traço do concreto, aliado à utilização de materiais, os quais possam propiciar uma redução da intensidade do fenômeno da retração (como por exemplo, o emprego de microfibras de polipropileno), possivelmente propiciará ao compósito cimentício uma minimização da ocorrência deste fenômeno, assim reduzindo os efeitos prejudiciais impostos pelo mesmo.

1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Propriedades como durabilidade, dureza, resistência química, resistência ao impacto e resistência à abrasão devem ser os principais atributos de qualquer um dos tipos de piso de concreto (FARNY, 2001). Segundo o ACI 302.1R (ACI, 2004), a qualidade de um piso de concreto, independente do seu tipo, está diretamente associada à existência de uma superfície resistente, durável, lisa e relativamente livre de fissuras.

Em grande parte dos pisos industriais de concreto inexistente a presença de qualquer tipo de revestimento, o qual tem como uma de suas funções auxiliar na proteção da estrutura. Logo,

a própria superfície do concreto fica susceptível às solicitações do tráfego presente, acentuando as condições de deterioração da estrutura, o aparecimento de fissuras e o empenamento das bordas das placas de concreto. Tais manifestações patológicas contribuem para a redução da funcionalidade e do valor estético destas estruturas (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

Segundo Farny (2001) e o manual da ACI 302.1R (ACI, 2004), as principais manifestações patológicas presentes em pisos de concreto são:

- a) fissuração – causada por restrições (internas ou externas) durante as mudanças volumétricas do material. Normalmente são provocadas por uma combinação de fenômenos como a retração por secagem, retração plástica, contração térmica, empenamento da estrutura e/ou aplicação de cargas. A fissuração, devido ao fenômeno da retração, é fortemente influenciada pelo proporcionamento dos materiais constituintes do traço do concreto e por características de projeto, como por exemplo, a ausência de juntas;
- b) desgaste superficial por abrasão / formação de pó (*dusting*) – caracterizado pela saída de material pulverulento da superfície do concreto. Esta manifestação patológica é afetada diretamente pelas características dos materiais constituintes do traço de concreto e o seu proporcionamento, pelos procedimentos de execução e pelo processo de cura;
- c) borrachudo (*crusting*) – caracterizado pelo enrijecimento prematuro da superfície do concreto; grandes deformações são geradas na superfície da estrutura;
- d) delaminação (*delamination/blister*) – manifestação patológica associada ao selamento prematuro da superfície, realizado anteriormente à exsudação e à saída de ar do concreto;
- e) empenamento (*curling*) – caracterizado pela distorção das bordas das placas de concreto, provocado pela presença de um gradiente de umidade e por variações de temperatura entre as faces superior e inferior da estrutura;
- f) esborcinamento das juntas (*spalling*) – caracterizado como uma imperfeição superficial, decorrente da quebra das bordas das juntas devido a diferentes fatores, como a expansão do concreto, a não aderência entre duas camadas de pisos, ao impacto de cargas e incêndios;

- g) descoloração – modificação da coloração da placa de concreto, devido à presença de aditivos com cloreto de cálcio, aos álcalis do concreto, ao processo de cura inadequado ou inapropriado, a variações na relação a/c da superfície do concreto e a mudanças no traço do concreto.

Uma causa comum à ocorrência de manifestações patológicas em pisos de concreto é a realização inadequada do processo de cura do elemento. A ausência ou ineficiência de tal procedimento, em desacordo com as necessidades exigidas pela presença de vento e nível de temperatura, reduzem fortemente a vida útil de uma estrutura como um piso de concreto (ACI 302.1R, 2004).

Dentre as diferentes causas de deterioração presentes neste tipo de elemento, optou-se em estudar a retração por secagem e os seus efeitos prejudiciais, como a fissuração. Esta escolha deve-se à grande preocupação dos profissionais envolvidos com o projeto e a execução de pisos de concreto em relação à presença de tal manifestação patológica.

Segundo especialista da área, as mudanças volumétricas provenientes do fenômeno da retração são responsáveis por, aproximadamente, 95% da fissuração ocorrida em pisos de concreto (informação verbal)¹. Assim, acredita-se que com a obtenção de um maior conhecimento científico, relacionado às propriedades e características de concretos proporcionados para pisos, possa-se reduzir a intensidade da retração, bem como a fissuração gerada por ele.

Dados da Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho (ANAPRE) evidenciam a ausência de informações vinculadas a esta área de conhecimento. No ano de 2008, dos 35 milhões de m² de pisos e pavimentos de concreto produzidos, cerca de 22,5 milhões de m² apresentaram algum tipo de manifestação patológica relacionada a falhas, tanto de projeto como de execução (informação verbal)². Em outras palavras, aproximadamente 65% dos pisos e pavimentos de concreto executados no ano de 2008 apresentaram manifestações patológicas prejudiciais.

Neste sentido, esta pesquisa busca avaliar a influência de alguns materiais constituintes do concreto e seus proporcionamentos, como o tipo de cimento (CP IV e CP V-ARI), o consumo de água (175l/m³, 190l/m³ e 205l/m³) e o teor de adição de microfibras de

29_____

¹ Informação fornecida por Públio Firme Rodrigues, em palestra no Concrete Congress, South America 2008, em São Paulo/SP, em agosto de 2008.

² Notícia fornecida por Wagner Gasparetto, presidente da Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho (ANAPRE) em palestra no Concrete Congress, South America 2008, em São Paulo/SP, em agosto de 2008.

polipropileno (0g/m^3 , 300g/m^3 , 600g/m^3 e 900g/m^3), frente ao fenômeno da retração por secagem ao longo do tempo. Assim, a realização de esforços visando melhorar o comportamento do concreto, no sentido de aumentar a sua capacidade de resistir às tensões geradas pela retração, as quais causam deformações e, conseqüentemente, podem gerar fissuração nos compósitos cimentícios, são extremamente válidos e necessários.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a influência de alguns materiais constituintes do concreto e seus proporcionamentos, frente ao fenômeno de retração por secagem ao longo do tempo, a partir da análise da retração por secagem livre e da retração por secagem restringida.

1.3.1 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários desta pesquisa consistem em:

- a) avaliar a influência do tipo de cimento, do consumo de água, do teor de adição de microfibras de polipropileno e da idade sobre a resistência à compressão uniaxial, dos concretos proporcionados para pisos;
- b) avaliar a influência do tipo de cimento, do consumo de água, do teor de adição de microfibras de polipropileno e da idade sobre a resistência à tração na flexão, dos concretos proporcionados para pisos;
- c) avaliar a influência do tipo de cimento, do consumo de água, do teor de adição de microfibras de polipropileno e da idade sobre a retração por secagem livre ao longo do tempo, dos concretos proporcionados para pisos;
- d) avaliar a influência do consumo de água e do teor de adição de microfibras de polipropileno sobre a retração por secagem restringida ao longo do tempo, dos concretos proporcionados para pisos;
- e) verificar a existência de correlação entre os ensaios de retração por secagem livre e retração por secagem restringida.

1.4 HIPÓTESES

Como hipótese a ser testada nesta pesquisa tem-se que a variável consumo de água será um fator que influenciará diretamente na magnitude do fenômeno da retração livre, enquanto

a variável correspondente ao teor de adição de microfibras de polipropileno influenciará significativamente na tendência de fissuração devido ao fenômeno da retração por secagem restringida, dos concretos estudados.

Para isso foram realizados ensaios laboratoriais de retração por secagem livre e retração por secagem restringida, nos concretos estudados com diferentes consumos de água e teores de adição de microfibras de polipropileno.

1.5 LIMITAÇÕES

Em virtude do tempo limitado, dos recursos disponíveis e da infraestrutura laboratorial existente para a realização da pesquisa, foi necessário reduzir a matriz experimental para o ensaio de retração por secagem restringida. Para isso, optou-se em diminuir o número de combinações entre as variáveis estudadas, desta forma propiciando uma redução no número de corpos-de-prova (anéis) correspondentes a este ensaio, passando de vinte e quatro (24) para nove (9) corpos-de-prova.

1.6 DELINEAMENTO DA PESQUISA

A importância da realização de um delineamento da pesquisa está relacionada à possibilidade de esquematizar um modelo conceitual e operativo do estudo, propiciando a execução de uma análise comparativa entre a visão teórica e os resultados obtidos da realidade (GIL, 2002).

O delineamento da pesquisa está demonstrado, esquematicamente, em ordem cronológica de acontecimentos na figura 1. A pesquisa foi desenvolvida em três grandes etapas: a revisão bibliográfica, a qual acompanha o decorrer da pesquisa, a realização do programa experimental e a análise dos resultados.

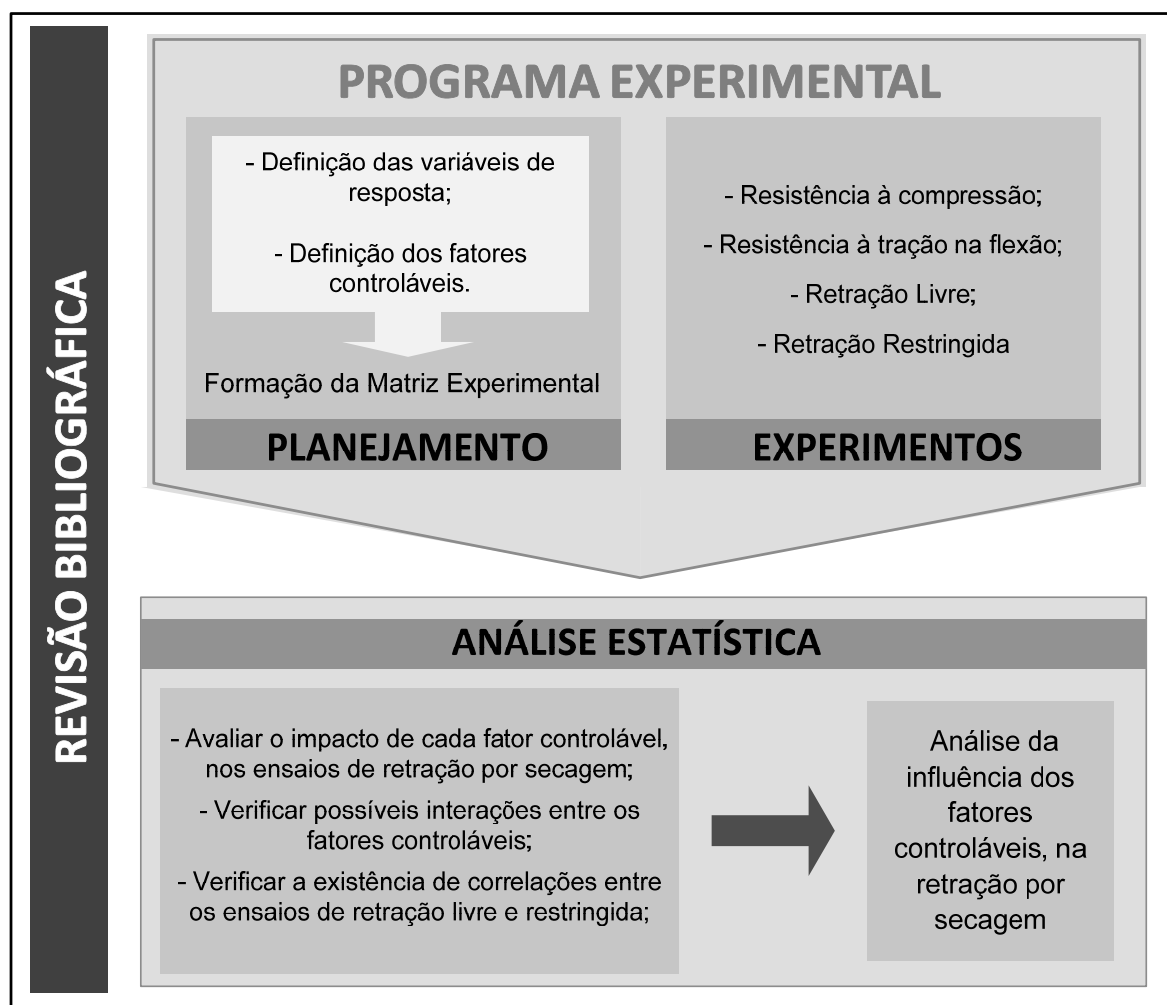


Figura 1: delineamento da pesquisa

Como pode ser visto na figura 1, a etapa referente ao programa experimental abrange as atividades relacionadas ao planejamento experimental e à execução dos experimentos, descritas nos itens 3.1 e 3.4, respectivamente. Segundo Ribeiro e Ten Caten (2001) e Marconi e Lakatos (2002), a execução de um planejamento experimental correto tem por objetivo otimizar os recursos e o tempo empregados na pesquisa, viabilizando-a tanto técnica, quanto economicamente.

Após a definição do planejamento e da matriz experimental, passou-se para a segunda fase do programa experimental, a etapa de execução dos experimentos. Os ensaios de resistência à compressão uniaxial (item 3.4.1.1), resistência à tração na flexão (item 3.4.1.2), retração por secagem livre (item 3.4.2.1) e retração por secagem restringida (item 3.4.2.2) foram realizados conforme as prescrições de suas respectivas normas, podendo ser estas normas brasileiras ou internacionais.

Concluída a etapa do programa experimental, e com posse de todos os resultados obtidos, a partir da realização dos ensaios, iniciou-se a segunda grande etapa da pesquisa, a análise estatística dos resultados. Esta segunda fase do estudo teve por objetivo realizar a interpretação dos dados finais de forma coerente e precisa, auxiliando no entendimento do fenômeno estudado (RIBEIRO; TEN CATEN, 2001; CERVO; BERVIAN, 2002).

1.7 ESTRUTURA DA PESQUISA

A pesquisa foi estruturada em 6 capítulos. O primeiro capítulo – “INTRODUÇÃO” – tem por finalidade introduzir o assunto de forma genérica, destacando a importância do tema e justificando a necessidade de pesquisas relacionadas a esta área de conhecimento. Os objetivos principal e secundário, as hipóteses, as limitações, o delineamento da pesquisa e a estrutura do trabalho foram descritos neste capítulo.

No segundo capítulo – “O FENÔMENO RETRAÇÃO” – é realizada uma revisão de literatura, a qual aborda os assuntos de interesse a esta pesquisa, como alguns conceitos, os tipos de retração existentes, suas fases e seus mecanismos geradores.

O capítulo três – “PROGRAMA EXPERIMENTAL” – contempla o planejamento experimental empregado no estudo, bem como os métodos utilizados e a caracterização dos materiais necessários à realização da pesquisa.

No capítulo quatro – “ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS” – são apresentados os resultados obtidos nas variáveis de resposta avaliadas na pesquisa, conjuntamente com as análises estatísticas, contemplada pela análise de variância (ANOVA) e com as discussões dos mesmos.

No capítulo cinco – “CONSIDERAÇÕES FINAIS” – são abordadas conclusões importantes obtidas com a realização da pesquisa, bem como sugestões para pesquisas futuras.

2 O FENÔMENO RETRAÇÃO

Neste capítulo serão discutidos parâmetros relacionados com o fenômeno da retração nos materiais cimentícios. Fatores relevantes para o estudo serão abordados, como conceitos e classificações das retrações presentes nas idades iniciais e ao longo do tempo. Contudo, uma maior ênfase será destinada ao fenômeno da retração por secagem, o qual foi estudado nesta pesquisa, assim parâmetros referentes aos mecanismos geradores e fatores intervenientes tanto na ocorrência, quanto na magnitude do fenômeno estudado serão também abordados.

2.1 ENRIJECIMENTO, PEGA E ENDURECIMENTO – CONCEITOS

No campo da tecnologia do concreto, a definição correta dos termos enrijecimento, pega e endurecimento são extremamente relevantes. Estes termos designam a evolução dos processos químicos de hidratação das matrizes cimentícias.

O processo de *enrijecimento do concreto* é definido pela perda de consistência da pasta plástica de cimento e está, diretamente, associado à perda gradual de água do concreto. Esta perda de água ocorre, principalmente, durante as reações iniciais de hidratação do cimento, na adsorção superficial dos produtos de hidratação de baixa cristalinidade, como a etringita e o C-S-H, e no seu processo de evaporação (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

De uma forma geral, durante as reações iniciais de hidratação, as partículas de cimento reagem com a água, formando produtos como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o hidróxido de cálcio (CH ou Ca(OH)_2). O Ca(OH)_2 ocupa cerca de 20%, em massa, da matriz cimentícia, estando normalmente localizado na interface da pasta com o agregado. Já o C-S-H é um material amorfo, o qual possui propriedades similares a um gel rígido, sendo o responsável pelas propriedades relacionadas à resistência e à durabilidade nos compósitos cimentícios (LAM, 2005).

O processo de pega do concreto implica na solidificação da pasta plástica de cimento, ou seja, o termo pega está diretamente relacionado à mudança de estado físico da pasta, passando de um fluido para um sólido poroso. Conjuntamente, neste momento propriedades

elásticas do compósito cimentício já se desenvolveram (NEVILLE, 1997; SANT, FERRARIS, WEISS, 2008).

Neville (1997) menciona que o intervalo de tempo transcorrido, desde a adição de água ao cimento até o momento em que se inicia a solidificação do concreto, é denominado como o início de pega, e é neste instante que a pasta de cimento começa a perder sua trabalhabilidade. O início de pega pode ser determinado por diferentes técnicas, tais como: pelo método de resistência à penetração mecânica, propagação de onda ultra-sônica, condutividade elétrica, retração química, variação da pressão hidráulica, pela evolução das propriedades reológicas da matriz cimentícia, pela curva calorimétrica, a qual utiliza termopares embutidos no concreto, e pela emissão acústica, que detecta o fenômeno da cavitação quando ocorre à saída de água dos poros (PRINCIGALLO *et al.*, 2003; AMZIANE, 2006; SILVA, 2007; GARCIA; CASTRO-FRESNO; POLANCO, 2008; ROBEYST *et al.*, 2008; SANT; FERRARIS; WEISS, 2008). Segundo García *et al.* (2008), o processo de pega depende, não somente da resistência à penetração no concreto fresco em determinado período de tempo, mas também, de fatores que afetam a conectividade entre as partículas e os vazios.

Contudo, tal processo não ocorre repentinamente, sendo necessário algum tempo até que o concreto torne-se uma matriz totalmente rígida. O tempo necessário para esta total solidificação do concreto, denominado como fim de pega, varia conforme alguns fatores externos, como por exemplo, a temperatura. Segundo Silva (2007), usualmente, os termos início e fim de pega são utilizados para descrever arbitrariamente estados escolhidos do tempo total deste processo.

Na literatura, comumente é sugerido que o período de pega corresponde ao final da etapa de dormência do processo de hidratação do cimento (SUN; VOIGT; SHAH, 2006; SANT; FERRARIS; WEISS, 2008). Neste período de dormência, as reações iniciais de hidratação afetam propriedades como a área específica e o teor de água livre, logo, exercem influência direta na espessura do filme de água, o qual envolve os grãos de cimento, sendo este um fator contribuinte para as características de fluidez da pasta de cimento (NONAT *et al.*, 1997³ apud AMZIANE, 2006).

A duração do período de dormência varia de acordo com a composição da matriz cimentícia. A adição de pozolanas, como a sílica ativa, ou de aditivos redutores de retração (ARR), bem como o valor da relação a/c modificam significativamente este período. Inúmeros

³ NONAT, A.; MUTIN, J.C.; JIANG, S.P. Physico-chemical parameters determining hydration and particle interactions during setting of silicates cements, 2ii053. **Proceedings of the 10th International Congress of the Chemistry of Cement V 2, (Cement and Hydration)**, ICC. Göteborg, 1997.

pesquisadores avaliam a duração do estado de dormência dos materiais cimentícios, sendo encontrados na bibliografia períodos entre 0,5 a 8 horas (HOLT, 2001; KRAUB; HARIRI, 2006; SANT; FERRARIS; WEISS, 2008; ROBEYST; GROSSE; DE BELIE, 2009).

Durante o processo de pega, a pasta adquire certa resistência. Entretanto, em termos práticos, o desenvolvimento real de sua resistência acontece depois do tempo de fim de pega, na etapa denominada de endurecimento (NEVILLE, 1997). A fase de endurecimento envolve um aumento na resistência do material cimentício, todavia, esta etapa também depende de alguns parâmetros físico-químicos, como o grau de hidratação, a relação a/c e as condições de cura (NONAT, 1994).

A figura 2 demonstra, de forma esquemática, os estágios de enrijecimento, pega e endurecimento da pasta de cimento. Para a NBR NM 9 (2002), o período de início e fim de pega correspondem ao tempo necessário para uma argamassa atingir resistências à penetração igual a 3,4MPa e 27,6MPa, respectivamente, após o contato inicial do cimento com a água de amassamento.

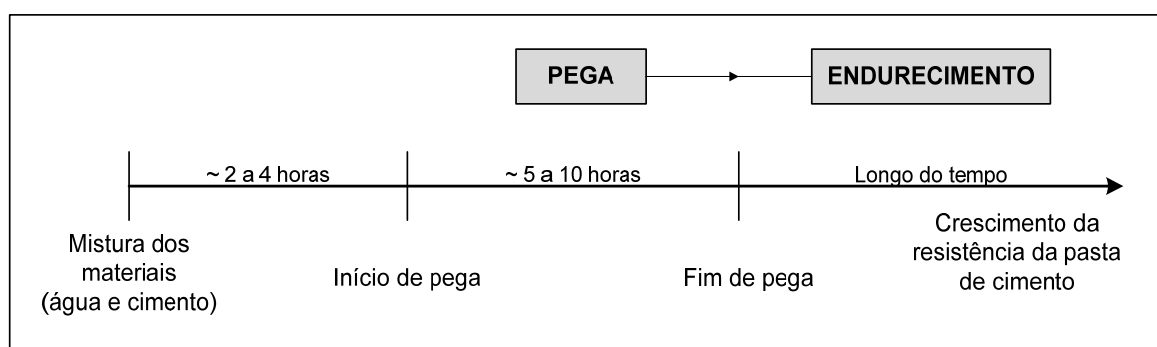


Figura 2: representação esquemática dos tempos de pega e endurecimento da pasta de cimento (adaptado de SILVA, 2007)

Na etapa de endurecimento do concreto, a resistência mecânica desenvolve-se devido ao rápido avanço das reações de hidratação do C_3S , as quais ocorrem por muitas semanas. Conseqüentemente, os produtos destas reações preenchem, progressivamente, os espaços vazios na pasta, havendo um decréscimo da porosidade e da permeabilidade do concreto, resultando em um aumento da resistência (MEHTA; MONTEIRO, 1994). A figura 3 demonstra, esquematicamente, o fenômeno físico de enrijecimento, pega e endurecimento da pasta de cimento, conjuntamente, com o decréscimo da porosidade e da permeabilidade do material.

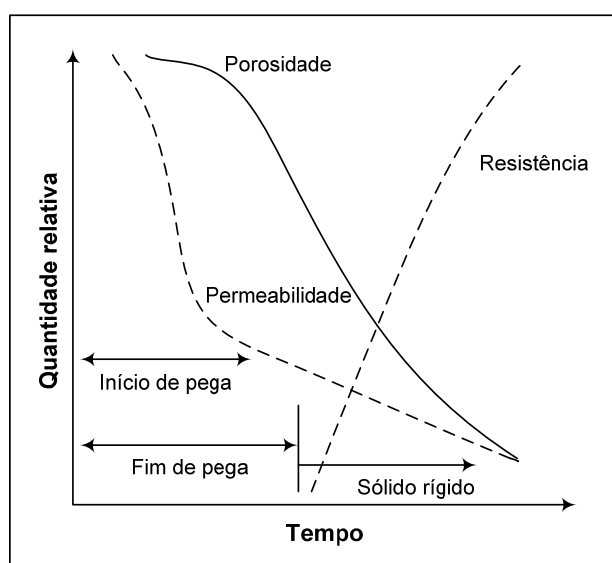


Figura 3: relações entre o tempo de pega, a permeabilidade, a porosidade e a resistência da pasta de cimento (adaptado de SOROKA, 1979⁴ apud MEHTA; MONTEIRO, 2006)

2.2 RETRAÇÃO NAS PRIMEIRAS IDADES

A retração nas idades iniciais pode ser originada por diferentes fatores, como a evaporação de água para o ambiente externo, as variações de temperatura externas, as reações iniciais de hidratação do cimento e/ou pelo calor gerado por estas reações químicas.

A definição exata do momento em que ocorre a retração nas primeiras idades do concreto e a sua intensidade são extremamente variáveis, uma vez que existe uma grande variedade de materiais, os quais constituem o traço do concreto. Entretanto, ela pode ser definida como sendo a retração que ocorre no período das primeiras 24h após a moldagem do material, desde o momento em que o concreto está iniciando o seu processo de endurecimento (HOLT; LEIVO, 2004; SULE; BREUGEL, 2004; HOLT, 2005; BARCELO; MORANVILLE; CLAVAUD, 2005).

Nesta etapa inicial, a retração possui elevada importância, mesmo com sua pequena magnitude, principalmente, em concretos de alta resistência (CAR) e concretos de alto desempenho (CAD), onde o calor gerado pelas reações iniciais de hidratação do cimento é mais elevado, devido a determinadas características do traço do concreto, como a baixa relação a/c , o maior consumo de cimento e a presença de adições minerais (sílica ativa, metacaulim, escória de alto forno, entre outros). Neste momento, o concreto tem menor capacidade de resistir às altas tensões de tração geradas pelas deformações provenientes da retração e, conseqüentemente, está mais vulnerável à ocorrência de fissuração

⁴ SOROKA, J. **Portland Cement Paste and Concrete**. London: Macmillan, 1979.

(COLINA; ACKER, 2000; BJONTEGAARD; HAMMER; SELLEVOLD, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2006; SILVA, 2007).

Normalmente, as fissuras ocorridas nesta etapa são denominadas de micro-fissuras. Estas pequenas fissuras podem se interligar com o passar do tempo, formando fissuras contínuas, as quais prejudicam, consideravelmente, a qualidade do concreto e a durabilidade das estruturas ao longo do tempo (JENSEN; HANSEN, 2001; AKKAYA; OUYANG; SHAH, 2007; CHANG-WEN; QIAN; JIA-PING, 2007; BOGHOSSIAN; WEGNER, 2008).

Durante a etapa inicial, a matriz cimentícia sofre deformações devido aos diferentes tipos de retração, sendo estas: a retração plástica, a retração química, a retração autógena e a retração ou deformação térmica.

A retração plástica ocorre em um primeiro momento, onde a matriz cimentícia está transformando-se de fluido para sólido poroso, contudo, estando em estado plástico, sem ter atingido significativa resistência. A perda de água por evaporação para o ambiente externo, através da água livre ou da água exsudada, e a absorção de água pela sub-base, no caso de piso, ou pelas fôrmas, são as principais causas para a ocorrência deste tipo de retração (APPA RAO, 2001; TOLEDO FILHO et al., 2005; BANTHIA; GUPTA, 2006; NUNES; FIGUEIREDO, 2007; ALY; SANJAYAN; COLLINS, 2008; BENTZ; WEISS, 2008).

Como consequência da evaporação inicial da água, é formada uma rede complexa de meniscos, a qual origina pressões negativas, devido ao aumento na tensão superficial dos capilares, assim, levando a contração do volume da pasta de cimento (VAN DAM *et al.*, 2005). Geralmente para pisos e pavimentos de concreto é considerada adequada uma taxa de evaporação igual ou menor a 0,5kg/m²/h (MINDESS; YOUNG; DARWIN⁵, 2003 apud VAN DAM *et al.*, 2005).

Da mesma forma, a retração química ocorre quando a matriz cimentícia está em estado plástico. As mudanças de volume ocorrem em decorrência das reações químicas entre os grãos anidros de cimento e as moléculas de água. Como resultado, eles geram produtos hidratados com um volume absoluto menor, ou seja, ocorre uma redução do volume interno (TAZAWA; MIYAZAWA; KASAI, 1995; HOLT, 2001; ZHANG; TAM; LEOW, 2003; LAM, 2005; SALES, 2006; BENTZ, 2008).

Segundo Japan Concrete Institute (1999) apud Holt e Leivo (2004), a retração autógena é definida como a mudança macroscópica do volume da pasta de cimento, ocorrida sem transferência de umidade para o ambiente externo. Tal mudança volumétrica não inclui deformações devido às variações de temperatura, ingresso de substâncias, forças externas e restrições.

Usualmente, este tipo de retração é uma preocupação em concretos de alta resistência (CAR) ou alto desempenho (CAD), pois a sua magnitude é afetada diretamente pelas propriedades dos materiais reativos (cimento e pozolanas), constituintes do traço de concreto, e pela baixa relação *a/c* do compósito (TAZAWA; MIYAZAWA, 1995; HOLT, 2001; ZHANG; TAM; LEOW, 2003; BJØNTEGAARD; HAMMER; SELLEVOLD, 2004; HOLT; LEIVO, 2004; NUNES, 2006; MELO NETO, 2008). Normalmente, o período do início de pega corresponde ao momento em que se inicia a retração autógena (TAZAWA, 1998 apud LAM, 2005).

A figura 4 representa de forma ilustrativa a relação entre o fenômeno da retração química e da retração autógena, segundo Tazawa (1998) apud Lam (2005). Nesta figura, o autor demonstra a influência do processo de exsudação na relação entre a retração química e a retração autógena. Percebe-se que quando ocorre exsudação, figura 4 (b), a retração autógena é reduzida, assim modificando a relação existente entre os dois fenômenos.

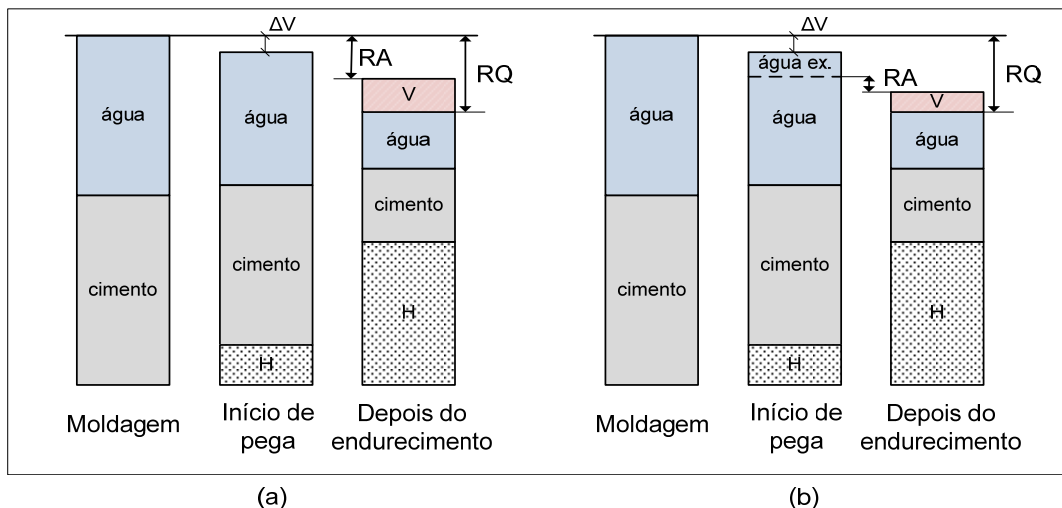


Figura 4: representação esquemática da relação entre a retração química e a retração autógena. (a) sem exsudação. (b) com exsudação (adaptado de Tazawa⁶, 1998 apud Lam, 2005)

Onde:

H – produtos hidratados;

ΔV – variação de comprimento dos materiais cimentícios antes do início de pega, proveniente de exsudação, retração química, entre outros.

V – vazios gasosos gerados pela hidratação;

água ex. – quantidade de água exsudada;

RA – retração autógena;

RQ – retração química.

Hua, Acker e Ehlacher (1995) mencionam que a retração autógena é semelhante à retração por secagem. Contudo, o mecanismo gerador do fenômeno é a principal diferença entre elas, sendo a retração autógena gerada pela autodessecação do material cimentício, e a retração por secagem pelo processo de secagem do material (SILVA, 2007).

A deformação térmica presente nas idades iniciais do concreto está associada à dissipação do calor gerado nas reações de hidratação do cimento, causando restrições internas; ou pela contração do elemento devido às variações de temperatura, caracterizado por uma restrição externa (BALTHAR, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2006; SALES, 2006; BAMFORTH, 2007; BENTZ; WEISS, 2008). Normalmente, as deformações devido às variações de temperatura do ambiente são mínimas. Porém, em situações específicas, onde é utilizado calor no processo de cura ou se o ambiente tem um fluxo de calor intenso, as deformações térmicas podem ser significantes (LAM, 2005).

Devido às características dos concretos de alta resistência (CAR) e de alto desempenho (CAD), além da ocorrência da retração autógena, o fenômeno da retração térmica também pode estar fortemente presente. (HOSSAIN, WEISS, 2006; SILVA, 2007).

Conjuntamente, as manifestações patológicas decorrentes do fenômeno da retração em estruturas de pisos de concreto são uma grande preocupação. Esta problemática está associada com diferentes fatores, agravado devido ao fato do elemento apresentar uma elevada área superficial; ou com fatores correspondentes às características de dosagem do composto cimentício, sendo estes estudados nesta pesquisa.

Contudo, cabe ressaltar que existem outros tipos de variações volumétricas presentes nas primeiras idades, como por exemplo, a fluência, sendo definida como as deformações presentes no material, com o tempo, sob tensão constante. Segundo Neville (1997), este fenômeno pode ser diferenciado em fluência básica, sendo aquela que ocorre sem troca de umidade com o meio externo, e fluência na secagem, sendo aquela que ocorre quando há secagem simultânea.

2.2.1 Fases da Retração nas Primeiras Idades

A retração ocorrida nas idades iniciais do concreto é subdividida em três fases distintas: a fase líquida, a fase de transição de suspensão para sólido poroso, e a fase de endurecimento. A seguir, as três fases serão rapidamente descritas e analisadas.

2.2.1.1 Fase líquida (fase de suspensão)

Como o próprio nome descreve, esta primeira etapa ocorre quando o material cimentício ainda comporta-se como um fluido, logo após o processo de moldagem do concreto. Nesta fase de suspensão, as partículas de cimento e de água começam a reagir lentamente, entretanto, ainda caracterizam-se por serem reações que ocorrem isoladamente no concreto (HUA; ACKER; EHRLANCHER, 1995; BARCELO; MORANVILLE; CLAVAUD, 2005; SILVA, 2007).

Devido a este comportamento, as variações volumétricas que ocorrem na fase líquida não têm grande importância, uma vez que, qualquer movimento, referente a tensões aplicadas, será imediatamente corrigido, pois o material é ainda um fluido e se deforma plasticamente, sem gerar tensões (HOLT, 2001; SILVA, 2007). Posteriormente à fase líquida, o material cimentício sofre uma transição de suspensão para sólido poroso, a qual é explicada pela Teoria do Patamar de Percolação.

2.2.1.2 Fase de transição de suspensão para sólido poroso – Formação do patamar de percolação

O processo de transição de fluido para sólido viscoelástico ocorre nas matrizes cimentícias, no instante em que os grãos de cimento anidros entram em contato com as moléculas de água, começando, assim, as reações de hidratação do cimento (HOLT, 2001; BARCELO; MORANVILLE; CLAVAUD, 2005). Por conseguinte, após esta transição, são geradas tensões internas, devido às variações volumétricas da pasta de cimento, contra as inclusões rígidas e sólidas dos agregados, e tensões por todo o material cimentício, se o elemento estiver restringido (BISSCHOP; VAN MIER, 2002).

O tempo de transição de suspensão para sólido é relacionado com o tempo de início e fim de pega da pasta de cimento. Contudo, o tempo de pega pode ser variável devido às condições de contorno externas ou a características da matriz cimentícia, as quais afetam as reações químicas. Estudos realizados por Justnes et al. (2000) apud Barcelo, Moranville e Clavaud (2005) demonstram a existência de uma relação direta entre o tempo de pega e a relação a/c, e uma relação inversa com o uso de aditivos superplastificantes. Contudo, em concretos de alta resistência, este tempo de pega é afetado devido à presença de adições minerais, tais como: o metacaulim, a sílica ativa, a cinza volante, entre outros (HOLT, 2001; BISSCHOP; VAN MIER, 2002; BARCELO; MORANVILLE; CLAVAUD, 2005).

Durante esta etapa de transição ocorre a formação de um esqueleto, resultante dos produtos de hidratação do cimento. Segundo Acker (1988)⁷ apud Hua, Acker e Ehrlander (1995) e Silva (2007), a Teoria de Percolação permite descrever o fenômeno de pega e simular as reações de hidratação do cimento. A figura 5 apresenta, de forma esquemática, as etapas presentes na Teoria do Patamar de Percolação.

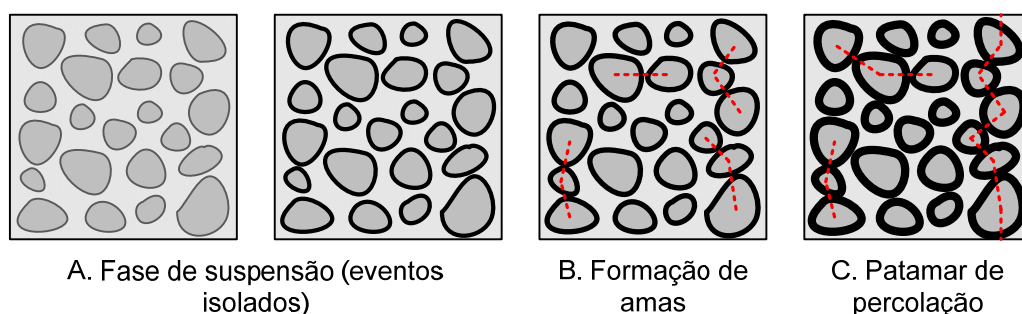


Figura 5: representação esquemática das etapas da pasta de cimento, segundo a Teoria de Percolação de Acker (1988) (adaptado de BARCELO, MORENVILLE; CLAVAUD, 2005; SILVA, 2007)

Na fase de suspensão (A), os grãos de cimento estão isolados. Quando estes grãos de cimento começam a reagir com as partículas de água, os produtos de hidratação resultantes começam a se depositar ao redor dos mesmos. Esta formação das ligações e deposição acontece de forma aleatória e descontínua em todo o volume da pasta de cimento. À medida que estas reações de hidratação vão ocorrendo, subconjuntos contínuos de grãos são ligados mecanicamente. Este processo caracteriza-se pela formação de amas (B), as quais vão interligando-se até o momento em que um caminho contínuo é formado, unindo as

faces opostas, assim, formando o Patamar de Percolação (C) (HUA; ACKER; EHRLANCHER, 1995; BARCELO; MORANVILLE; CLAVAUD, 2005; SILVA, 2007).

Com a formação do patamar de percolação, a matriz cimentícia começa a endurecer e, conseqüentemente, a adquirir resistência. Portanto, após a formação do esqueleto, a matriz cimentícia passa para a terceira etapa da retração nas primeiras idades, a fase de endurecimento.

2.2.1.3 Fase de endurecimento (*Hardening Shrinkage*)

Nesta terceira etapa da retração nas idades iniciais, o esqueleto está totalmente formado e o concreto começa a adquirir resistência suficiente para começar a resistir às tensões de tração adicionais geradas. Entretanto, a partir do patamar de percolação, a retração continua acontecendo ao longo do tempo, devido às reações de hidratação do cimento que ainda ocorrem lentamente (HOLT, 2001).

2.3 RETRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO

A retração, em seus dois estágios, pode induzir uma tendência de fissuração. Segundo Alvaredo e Wittmann (1995)⁸ apud Wittmann, Beltzung e Zhao (2009), o fenômeno da retração é a origem mais frequente da formação de fissuras. Como conseqüência, esta manifestação patológica permite a entrada de agentes agressivos, os quais contribuem para a aceleração da deterioração da estrutura através de diferentes fenômenos, como por exemplo, a carbonatação e a corrosão das armaduras, entre outros, reduzindo a vida útil do material (HADDAD; SMADI, 2004; HOLT; LEIVO, 2004; BANTHIA; GUPTA, 2006; ALY; SANJAYAN; COLLINS, 2008).

A segunda etapa do fenômeno retração é caracterizada pelas mudanças volumétricas que ocorrem nos materiais cimentícios ao longo do tempo. O período de ocorrência da retração ao longo do tempo é, comumente, definido como sendo a partir da desmoldagem do compósito cimentício, ou até mesmo como sendo 24 horas após a mistura dos materiais (cimento e água) (HOLT, 2001).

Neste instante, com o processo de pega finalizado, o material cimentício já desenvolveu certo grau de resistência, contudo variações volumétricas presentes nesta etapa, relacionadas, principalmente, ao gradiente de secagem do material, podem introduzir uma

⁸ ALVAREDO, A.M.; WITTMANN, F.H. **Shrinkage and cracking of normal and high performance concrete. High Performance Concrete: Material Properties and Design.** Aedificatio Publishers, Freiburg, 1995. pp.91–110.

tendência de fissuração bastante severa (KAUFMANN; WINNEFELD; HESSELBARTH, 2004). Segundo os autores, geralmente, os principais processos relacionados às mudanças de volume, presentes na matriz cimentícia, são a contínua hidratação do cimento (auto-dessecação) e o transporte constante de líquido e de vapor de água.

A duração da segunda fase da retração está relacionada, diretamente, com a forma e o tamanho do elemento. Características relacionadas com o tamanho e a forma da estrutura são, frequentemente, analisadas conjuntamente, através da relação superfície exposta/volume ao ambiente (sup/vol). Esta relação afeta não só a taxa de perda de umidade da estrutura para o ambiente externo, mas também, a capacidade de formação de um caminho preferencial, o qual facilita a difusão do calor gerado nas reações de hidratação do cimento (BANTHIA; YAN; MINDESS, 1996; ACKER; ULM, 2001; BISSCHOP; VAN MIER, 2002; SALES, 2006).

Em estruturas com uma elevada relação entre a superfície exposta e o volume, o processo de secagem do elemento demanda um período maior de tempo. No entanto, nestes elementos a magnitude total do fenômeno retração poderá ser ligeiramente menor, se comparados com outros idênticos, mas com menor relação sup/vol. Este fato é atribuído à capacidade do elemento em sofrer mais rapidamente o processo de secagem, pois um menor caminho para a difusão da água é formado, até o instante em que a umidade relativa se iguale em toda a seção do elemento (HOLT, 2001).

Além da geometria da estrutura, Yurtdas *et al.* (2006) menciona que propriedades do concreto, como a permeabilidade, influenciam no processo de secagem do material. Durante este processo, gradientes de saturação são criados devido a não uniformidade do período de secagem. Assim, os períodos de secagem da superfície e do interior do material ocorrem em intervalos de tempo distintos. Desta forma, ocasionando deformações não homogêneas, as quais induzem tensões de tração e, muitas vezes, microfissuração (BAZANT; NAJJAR, 1972).

Neste período, as variações volumétricas ocorrem devido a diferentes fatores; como a perda de água para o ambiente externo, variações de temperatura e reações químicas de hidratação. Segundo Neville (1997), Holt (2001) e Mehta e Monteiro (2006), em concretos, argamassas e pastas de cimento podem se manifestar diferentes tipos de retração ao longo do tempo, como a retração por secagem, a deformação térmica, a retração autógena e a retração por carbonatação.

A retração autógena ou retração por auto-dessecação ocorre durante todo o período de hidratação do cimento (APPA RAO, 2001). Este tipo de retração assemelha-se à retração por secagem, uma vez que ambas estão associadas à diminuição da UR interna do material cimentício. A diferença entre os dois fenômenos reside na origem desta diminuição; na auto-dessecação ocorre devido ao consumo de água evaporável pelas reações químicas de hidratação, enquanto na secagem acontece pela evaporação da água dos poros, devido à diferença existente entre a UR interna e a UR do ambiente externo (HOLT, 2001; BALTHAR, 2004; SILVA, 2007).

Outro tipo de retração que ocorre ao longo do tempo é a retração por carbonatação. Durante o processo de hidratação do cimento, o óxido de cálcio (CaO), presente no material cimentício, entra em contato com a água, produzindo hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), o qual possui características alcalinas. O Ca(OH)₂ e o C-S-H reagem com o dióxido de carbono (CO₂), presente no ar e que penetra no concreto, produzindo o carbonato de cálcio (CaCO₃) (PAPADAKIS; FARDIS; VAYENAS, 1992⁹ apud APPA RAO, 2001; MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Esta reação, além de causar uma leve diminuição no volume da pasta de cimento endurecida, também é responsável pelo decréscimo do pH do composto cimentício. Tipicamente, a retração por carbonatação afeta a superfície do concreto, assim, seções esbeltas estão mais propensas a esta forma de deformação. (HOLT, 2001; MEHTA; MONTEIRO, 2006).

A deformação térmica (expansão e retração), como mencionado no item 2.2, está presente nas duas fases de retração do concreto. Normalmente, a deformação térmica, ocorrida ao longo do tempo, é o resultado de variações climáticas (temperatura) cíclicas do ambiente externo. O fenômeno de gelo e degelo das estruturas é um exemplo, onde a variação de temperatura na estrutura é extremamente relevante, assim, podendo gerar a fissuração do elemento. Desta forma, se as taxas de contração ou expansão presentes no elemento são muito severas, a tendência de ocorrência de fissuras no concreto é altíssima (ACKER; ULM, 2001; HOLT, 2001; MEHTA; MONTEIRO, 2006; SALES, 2006).

Já as deformações oriundas do fenômeno da retração por secagem ou retração hidráulica ocorrem devido ao processo de secagem do material cimentício. De uma forma sucinta, durante a transformação da matriz cimentícia de um fluido para um sólido poroso, o compósito cimentício perde água, através da evaporação, para o ambiente externo, assim

gerando uma tendência de fissuração no compósito cimentício (COLINA; ACKER, 2000; HOLT, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2006; NUNES, 2006; SALES, 2006). Tal fenômeno será visto com uma maior profundidade no item 2.3.1.

Em estruturas como pisos de concreto, a tendência de fissuração presente na matriz cimentícia, ocasionada pelas variações volumétricas provenientes do fenômeno da retração, é uma manifestação patológica extremamente preocupante. Contudo, nesta pesquisa optou-se em estudar as deformações oriundas do fenômeno da retração por secagem, uma vez que esta é a maior contribuinte na magnitude da retração total do concreto.

Neste sentido, priorizou-se a realização de estudos visando à avaliação da influência de alguns fatores controláveis constituintes do traço do concreto, como o consumo de água, o teor de adição de microfibras de polipropileno e o tipo de cimento, frente a este fenômeno. Assim, possibilitando um maior entendimento da ocorrência deste fenômeno e de suas consequências nos concretos convencionais, comumente empregados em pisos.

2.3.1 Retração por Secagem ou Retração Hidráulica

Segundo Bissonette, Pierre e Pigeon (1999), o fenômeno da retração por secagem pode ser considerado o principal responsável pela deterioração das estruturas de concreto. Deformações provenientes deste fenômeno como contrações ou expansões do material, normalmente, são dificultadas por restrições internas e externas, originando tensões de tração no material cimentício. Quando estas tensões excedem a capacidade que o material pode suportar, na maioria dos casos, o fenômeno da retração por secagem vem acompanhado pela formação de fissuras superficiais (WITTMANN; BELTZUNG; ZHAO, 2009).

Em estruturas como pisos e pavimentos de concreto, a preocupação sobre a ocorrência, principalmente, da retração por secagem, não está associada somente à fissuração da estrutura. Conjuntamente, a possibilidade da ocorrência do *curling* ou empenamento das placas de concreto, a partir de restrições existentes, é muito alta, reduzindo seriamente aspectos funcionais e estéticos destes elementos (HOLT, 2001; HUBERT; BURLION; SHAO, 2003; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

Este fenômeno é originado a partir do processo de secagem do material, que segundo Granger, Torrenti e Acker (1997), é o momento em que ocorre a primeira mudança macroscópica no material cimentício. A secagem do concreto é um processo extremamente lento e ocorre de forma não homogênea na estrutura. Nas camadas superficiais do material

cimentício obtêm-se o equilíbrio hídrico com a umidade relativa do ambiente externo rapidamente. No entanto, no interior do material, obviamente dependendo de suas dimensões, o processo ocorre de forma mais branda, formando um diferencial de secagem (COLINA; ACKER, 2000; HOLT, 2001; BENBOUDJEMA; MEFTAH; TORRENTI, 2007; SA et al., 2008; WITTMANN; BELTZUNG; ZHAO, 2009).

A figura 6 demonstra o aumento das tensões devido ao diferencial de umidade formado pela ocorrência lenta e não homogênea do processo de secagem. Em outras palavras, pode-se dizer que pelo processo de secagem ocorrer de forma não uniforme no material, tem-se como resultado uma formação de um gradiente de umidade. A diferença de umidade no centro e na superfície do material gera tensões de tração na superfície e de compressão no interior, assim formando fissuras e o empenamento (curling) das placas de concreto, exemplificado na figura abaixo.

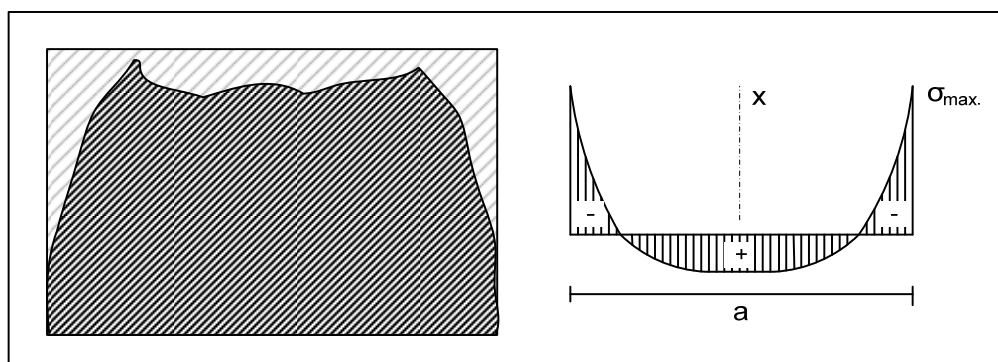


Figura 6: distribuição das tensões (adaptado de BISSCHOP,¹⁰ 2002 apud LAM, 2005)

Como consequência, o gradiente ou diferencial de secagem gera um aumento das tensões de tração na superfície e das tensões de compressão no interior do elemento. Assim, tal comportamento, possivelmente, induzirá a microfissuração da estrutura de concreto, prejudicando as propriedades do material, devido às deformações perto da zona superficial (BENBOUDJEMA; MEFTAH; TORRENTI, 2007; WITTMANN; BELTZUNG; ZHAO, 2009). Na figura 7 é mostrado o aumento das tensões geradas no material, bem como a formação das fissuras. Wittmann, Beltzung e Zhao (2009) enfatizam que em muitas estruturas de concreto, o gradiente hídrico permanece no interior do material, na forma de água saturada, durante um longo período de tempo, ou seja, estando presente por muitos anos ou até mesmo décadas.

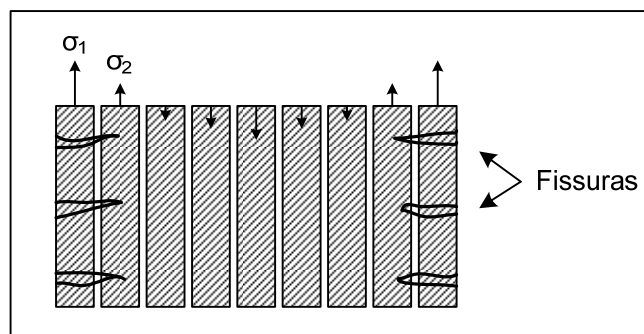


Figura 7: representação esquemática da formação de fissuras (adaptado de BAZANT,¹¹ 1982 apud WITTMANN; BELTZUNG; ZHAO, 2009)

Conjuntamente ao lento processo de secagem, fatores como as reações de hidratação do cimento, variações externas de temperatura e o fenômeno da auto-dessecação, provocado pela contínua hidratação do cimento após o período de pega, influenciam nas ações hídricas presentes na matriz cimentícia. Tais fatores geram fluxos e gradientes de umidade, originando tensões e deformações no material cimentício, influencia semelhante ao que ocorre no material devido ao processo de secagem (COLINA; ACKER, 2000; ACKER; ULM, 2001; BISSCHOP; VAN MIER, 2002).

Wittmann, Beltzung e Zhao (2009) desenvolveram uma forma de avaliar o fenômeno da retração hidráulica a partir de uma análise infinitesimal. Contudo, a retração por secagem infinitesimal não pode ser medida diretamente através de experimentos, a mesma deve ser determinada a partir de uma análise inversa dos dados experimentais. Neste sentido, a validação dos modelos de retração é realizada a partir dos dados referentes à retração infinitesimal do material cimentício, e não com valores referentes ao processo de secagem do mesmo.

No entanto, os pesquisadores salientam que a resposta obtida para estes modelos é também influenciada por outros parâmetros, tais como as dimensões do elemento, os fluxos e gradientes de umidade, bem como algumas propriedades do material como a fluência, o módulo de elasticidade, a resistência à tração, as deformações e a tendência de fissuração.

Além da influência na retração hidráulica do concreto, o processo de secagem do material cimentício afeta diretamente as propriedades mecânicas. Burlion, Bourgeois e Shao (2005) estudaram a ocorrência da deterioração das propriedades elásticas do concreto, devido ao processo de secagem. Os resultados demonstraram uma relação direta entre o processo de

¹¹ BAŽANT, Z. P. Mathematical models for creep and shrinkage of concrete. **Creep and Shrinkage in Concrete Structures**, pp.163–256, 1982.

secagem e a degradação das propriedades do material cimentício. Dois efeitos foram verificados, o efeito da sucção capilar, aumentando a resistência mecânica do concreto, e a degradação das propriedades elásticas do material, induzindo a tendência de fissuração.

Tal como foi mencionado para o modelo de Wittmann, Beltzung e Zhao (2009), o fenômeno da retração por secagem é influenciado pelas dimensões do elemento e pelo tipo de restrição presente, contrário às tensões que geram as deformações. O dimensionamento do elemento, através da relação superfície exposta ao ambiente/volume (sup/vol), influencia, de forma direta, a magnitude da retração hidráulica. Ela afeta não só a taxa de perda de umidade do material, mas também a capacidade que a estrutura possui, para difundir o calor gerado nas reações de hidratação do cimento (BANTHIA; YAN; MINDESS, 1996; ACKER; ULM, 2001; BISSCHOP; VAN MIER, 2002; NUNES, 2006).

Aitcin, Neville e Acker (1997)¹² apud Appa Rao (2001) mencionam ainda que a retração hidráulica, nas estruturas de concreto, aumenta, proporcionalmente, ao aumento da relação superfície exposta ao ambiente/volume (sup/vol). Logo, em estruturas como pisos de concreto, onde esta relação é elevada, a preocupação da ocorrência de tal fenômeno, bem como suas consequências é extremamente importante.

Além disso, nestas estruturas existem restrições externas e internas, as quais influenciam no processo de secagem e, conseqüentemente, na retração hidráulica da estrutura. As restrições externas, presentes nestas estruturas de concreto, limitam a deformação que o compósito poderá sofrer. Desta maneira, a presença deste tipo de restrição, origina fissuras visíveis, as quais são denominadas de microfissuras (SHIOTANI; BISSCHOP; VAN MIER, 2003). Nesta pesquisa, será realizado o ensaio de retração restringida, o qual permite avaliar a influência de restrições externas presentes na estrutura de concreto, através de um anel de aço (núcleo), apresentado no item 3.4.2.2.

Já as restrições internas presentes no compósito cimentício são classificadas em dois tipos. São eles:

- a) auto-restrição - causada pelo desenvolvimento de um gradiente de umidade, a partir do processo de secagem não uniforme do material; gerando, conseqüentemente, restrições internas no elemento, resultando na deformação lenta da matriz. Fatores como o tamanho e a geometria do elemento, através da relação sup/vol, são intervenientes no processo de secagem e na formação do gradiente de umidade (ACKER; ULM, 2001;

49

¹² AITCIN, P. C.; NEVILLE, A. M.; ACKER, P. Integrated view of shrinkage deformation, *Concr. Int.* 1997.

BISSCHOP; VAN MIER, 2002; SHIOTANI; BISSCHOP; VAN MIER, 2003; NUNES, 2006);

- b) restrição imposta pela dureza do agregado constituinte do compósito cimentício - as tensões, devido a este tipo de restrição, levam a formação de microfissuras radiais no entorno do agregado. Em muitos casos, esta fissuração radial ocorre no interior do material. Parâmetros relacionados com o tamanho, a dureza, o aspecto superficial e a resistência dos agregados, bem como a diferença entre o módulo de Young do agregado e da matriz cimentícia são importantes, e devem ser considerados (BISSCHOP; VAN MIER, 2002; SHIOTANI; BISSCHOP; VAN MIER, 2003; MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Contudo, os mesmos autores mencionam que fatores adicionais como a composição da matriz cimentícia (tipo de cimento e relação a/c) e as condições de cura/secagem (umidade relativa e temperatura de secagem), possivelmente afetarão, de forma significativa, a tendência de microfissuração devido à retração por secagem. Neste sentido, é provável que as restrições existentes impostas à estrutura de concreto poderão gerar a fissuração.

Em estruturas de pisos de concreto, Chodounsky e Vieceili (2007) afirmam que as fissuras decorrentes do fenômeno da retração por secagem são transversais às placas de concreto, no entanto a abertura das fissuras pode ser bastante variável. A figura 8 demonstra, de forma esquemática, esta configuração.

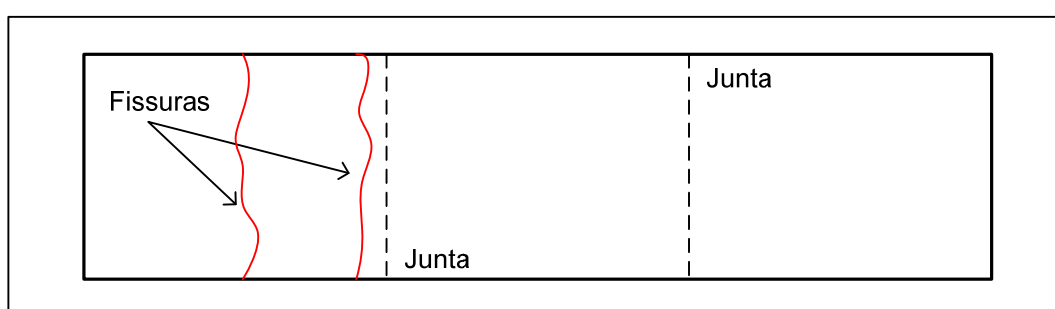


Figura 8: representação esquemática da configuração das fissuras, devido à retração hidráulica em pisos (adaptado de CHODOUNSKY; VIECELI, 2007)

Segundo Slowik, Schmidt e Fritsch (2009), a fissuração presente em pisos de concreto ocorre, predominantemente, devido à elevada superfície exposta sujeita a grandes taxas de evaporação. Neste sentido, para os autores uma forma de minimizar tal problemática refere-se ao emprego de um processo de cura controlado do concreto, onde se mantém a

superfície sempre úmida, objetivando a redução da pressão capilar do material, assim reduzindo a fissuração.

Além dos processos e técnicas construtivas, as propriedades internas da matriz cimentícia podem auxiliar na redução desta manifestação patológica. Diversos pesquisadores têm avaliado a influência positiva da realização de cura interna nos compósitos cimentícios, visando à redução das tensões internas e, conseqüentemente, da fissuração do material cimentício. Jensen e Hansen (2002) e Bentz, Lura e Roberts (2005) evidenciam a importância da realização de uma cura interna. Este processo é caracterizado pela disponibilidade de uma quantidade de água no interior da matriz cimentícia, não originada pelo proporcionamento dos materiais, a qual auxilia no aumento da hidratação do cimento e no desenvolvimento de resistência, na redução da retração autógena e na fissuração, reduzindo a permeabilidade e aumentando a durabilidade do material.

Jensen e Hansen (2002) analisaram o efeito da cura interna a partir da aplicação de partículas de polímeros superabsorventes (*SAP e hydrogel*) como adições, em concretos de alto desempenho. Os resultados demonstraram uma redução das deformações devido à retração autógena e uma minimização da fissuração durante o processo de endurecimento do material.

Igualmente, Lam (2005) avaliou a influência deste processo, com dois diferentes métodos, empregando polímeros superabsorventes (*SAP*) e agregados leves, na redução da retração por secagem em concretos e argamassas. Os resultados encontrados foram positivos, reduzindo a magnitude da retração por secagem. Contudo, o autor menciona que mais estudos são necessários para um maior entendimento da influência de tal processo sobre este fenômeno.

Acker e Ulm (2001) afirmam que as ações hídricas presentes na estrutura de concreto estão associadas, principalmente, com características referentes à porosidade do material. Os poros do concreto possuem dimensões entre $1\mu\text{m}$ e $10^{-3}\mu\text{m}$ e, quando estão vazios, as tensões capilares aumentam consideravelmente, causando a compressão do esqueleto sólido. Logo, o conhecimento vinculado aos mecanismos que geram a retração hidráulica é válido, no sentido de um melhor entendimento deste fenômeno.

2.3.1.1 Mecanismos geradores da retração por secagem

Na literatura são mencionados três tipos de água existentes nas matrizes cimentícias, as quais podem sair dos poros e originar a retração por secagem neste material: a água dos poros capilares, a água adsorvida (externa) e a água dos microporos (inter folhas). Cada

tipo de água é liberada por um mecanismo gerador, os quais estão envolvidos na ocorrência da retração por secagem nos materiais cimentícios (BARON, 1982 apud HUA; ACKER; EHLACHER, 1995; BELTZUNG; WITTMANN, 2005). São eles:

- a) variação da depressão capilar (ou pressão capilar);
- b) variação da tensão (ou energia) de superfície das partículas coloidais;
- c) variação da pressão de disjunção.

A capilaridade é definida como uma propriedade dos materiais porosos de absorver e transportar água, a partir de sua rede capilar. Segundo Wittmann, Beltzung e Zhao (2009), a ação capilar ocorre quando a água, antes líquida, condensa em uma superfície plana. Isto acontece no momento em que a pressão da fase gasosa saturada (ρ_0) alcança a superfície em contato com o ar. Contudo, em um capilar com um determinado raio de curvatura (r), a água condensa com uma pressão menor (ρ_r).

A relação entre o raio de curvatura (r) e as pressões de vapor seguem a equação de Kelvin (equação 1), demonstrada abaixo.

$$r = - \frac{2 \gamma V}{R T \ln \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

r – raio de curvatura (m);

γ – tensão da superfície da água, na interface fase líquida/fase gasosa (N/m);

V – volume molar da água (m³/mol);

R – constante ideal dos gases (8,314 J/mol·K);

T – temperatura (K);

ρ – pressão na fase líquida (MPa);

ρ_0 – pressão da fase gasosa saturada (ar seco + vapor d'água) (MPa);

A equação de Laplace (equação 2) descreve a variação da pressão hidrostática interna (Δp) na fase líquida sobre um menisco, com um dado raio de curvatura (r).

$$\Delta\rho = \frac{2\gamma}{r} \quad \text{Equação 2}$$

A combinação entre as equações de Kelvin (equação 1) e Laplace (equação 2) proporciona uma equação para a variação da pressão ($\Delta\rho$) da água retida nos capilares.

$$\Delta\rho = \frac{RT \ln\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)}{V} \quad \text{Equação 3}$$

Analisando as equações descritas acima é possível realizar algumas associações. Uma delas diz respeito às grandezas $\Delta\rho$ e r . Observando as equações nota-se que estas são inversamente proporcionais, portanto, quanto mais estreitos forem os poros capilares em processo de esvaziamento, maior será a intensidade do mecanismo da depressão capilar (SILVA, 2007).

Outra característica deste fenômeno é a formação de interfaces curvas entre o estado fluido (água) e o estado gasoso (ar) contido no interior dos poros. Nesta interface estabelece-se um gradiente de pressão denominado de depressão capilar ou pressão capilar. A figura 9 demonstra de forma esquemática este comportamento (HUA; ACKER; EHLACHER, 1995; SANTOS; ROCHA; CHERIAF, 2007).

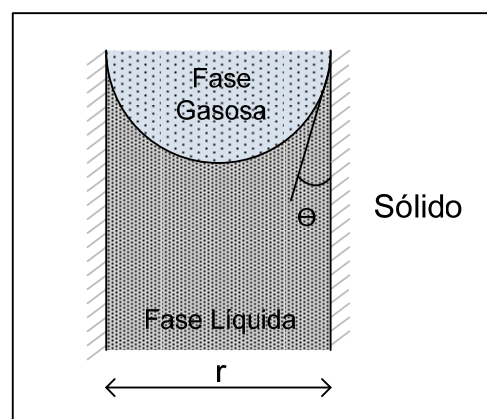


Figura 9: representação esquemática de um capilar não saturado (adaptado de HUA; ACKER; EHLACHER, 1995)

Em outras palavras, na medida em que ocorre o processo de secagem do material, meniscos esféricos são formados dentro dos poros capilares. Tal formação é seguida por

uma redução progressiva do raio de curvatura (r) deste menisco, o qual proporciona um equilíbrio entre a fase líquida e a fase gasosa do mesmo. Assim sendo, a fase líquida é tracionada, induzindo pressões negativas sobre as paredes dos capilares, tendendo a aproximá-las. Consequentemente, esta pressão da fase líquida tem de ser equilibrada por uma mudança de volume do sólido poroso, portanto, gerando o fenômeno da retração (HUA; ACKER; EHRLACHER, 1995; ACKER; ULM, 2001; BENBOUDJEMA; MEFTAH; TORRENTI, 2007; SANTOS; ROCHA; CHERIAF, 2007; SILVA, 2007).

O mecanismo da variação da tensão de superfície de partículas coloidais ocorre diferentemente. Para Powers¹³ (1946) apud Hua, Acker e Ehrlacher (1995), a tensão da superfície (γ) é o resultado da assimetria das forças atrativas, entre os átomos ou moléculas, próximos à superfície, sendo que este mecanismo produz uma tensão tangente à superfície. Contudo, esta tensão é dependente do entorno a que o material está submetido, sendo máxima quando a partícula está no vácuo, e mínima (nula) quando a partícula está em contato ou submersa no mesmo material.

Normalmente, o aumento do teor de umidade dos átomos e moléculas (adsorção) na superfície sólida causa uma diminuição nas tensões superficiais, enquanto, a redução do teor de umidade (desorção) provoca uma elevação destas tensões, assim resultando em uma compressão no sólido (HUA; ACKER; EHRLACHER, 1995; SANTOS; ROCHA; CHERIAF, 2007; SILVA, 2007).

Conforme Lura, Jensen e van Breugel (2003), a retração e a expansão significativas, da pasta de cimento são resultados das mudanças na tensão de superfície, das partículas sólido-gel. A adsorção de água reduz a tensão de superfície destas partículas, resultando em uma expansão. No entanto, contrariamente, a remoção da água adsorvida causará a retração da pasta de cimento.

Pesquisadores como Wittmann, Beltzung e Zhao (2009) verificaram que uma significativa redução na ocorrência do mecanismo da tensão de superfície exerce influência direta sobre o fenômeno da retração por secagem. Desta forma possibilitando uma redução de suas consequências na estrutura de concreto.

Os mesmos autores mencionam que para taxas de umidade relativa acima de 50%, a energia da superfície não modifica significativamente. Assim, para estes altos valores de

54

¹³ POWERS T. C. *et al. Studies of the physical properties of hardened portland cement pastes.* Proc. of american concrete institute, v. 41, p. 1946- 1947, 1946.

umidade relativa, a água penetra no interior de pequenos espaços e exerce o mecanismo denominado de pressão de disjunção.

Este mecanismo descreve uma complexa interação existente entre moléculas adsorvidas de água e duas superfícies sólidas, muito próximas entre si (HUA; ACKER; EHRLACHER, 1995; BENBOUDJEMA; MEFTAH; TORRENTI, 2007; WITTMANN; BELTZUNG; ZHAO, 2009). A quantidade de moléculas de água adsorvida é limitada, devido a esta pequena distância entre as superfícies sólidas. Esta distância corresponde, aproximadamente, a duas vezes a espessura da camada de água livre adsorvida (LURA; JENSEN; VAN BREUGEL, 2003). A figura 10 demonstra a ação do fenômeno da pressão de disjunção de maneira esquemática.

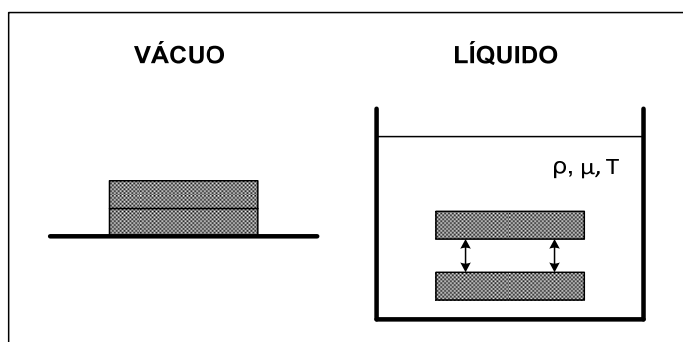


Figura 10: representação do fenômeno de pressão de disjunção, adaptado de Wittmann; Beltzung, Zhao (2009)

A partir da figura 10 observa-se que em um ambiente sem ar (vácuo), as duas superfícies se mantêm em contato, devido à presença de uma força atrativa entre elas. No entanto, se as superfícies são colocadas em uma solução aquosa, a água penetrará entre elas, separando as duas superfícies.

Hua, Acker e Ehrlacher (1995) afirmam que a espessura da camada de água adsorvida varia conforme a taxa de umidade relativa, para uma temperatura específica. Porém, acima de um determinado valor de umidade relativa, a camada não consegue mais desenvolver-se livremente, pois a distância entre as duas superfícies é muito pequena. Assim, se o valor referente à UR continuar a aumentar, a adsorção da água tende a separar as duas superfícies sólidas.

Logo, as duas superfícies sofrem uma pressão denominada de pressão de disjunção. Esta pressão chega ao seu valor máximo no estado em que as partículas estão saturadas, então quando o sistema vai de um estado saturado para um não saturado, ocorre retração, pois a pressão de disjunção diminui e as duas superfícies sólidas movimentam-se, assim tornando-se mais próximas (HUA; ACKER; EHRLACHER, 1995).

Ferraris (1986)¹⁴ apud Hua, Acker e Ehrlacher (1995) realizou inúmeras medições da pressão de disjunção dos materiais cimentícios. O autor notou uma constância na pressão de disjunção quando a umidade relativa variava entre 80% e 100%. O autor explica que quando a umidade relativa mantém-se elevada, esta variação não causa muitas mudanças entre as moléculas de água adsorvida e não adsorvida, assim a pressão de disjunção não varia com altos valores de UR.

Em materiais cimentícios, o mecanismo da pressão de disjunção é influenciado pela concentração de cálcio e pelo teor de álcalis (Na e K) presentes na solução do poro. Estudos realizados por Wittmann, Beltzung e Zhao (2009) demonstraram a existência de uma relação direta entre o teor de álcalis do material cimentício e a magnitude da retração hidráulica, para argamassas. Já em concretos, os autores verificaram que a utilização de pozolanas propicia uma redução da magnitude da retração hidráulica. Tal fato ocorre devido às características reativas entre as pozolanas e o cálcio dissolvido na fase líquida do poro. Assim, uma forma de atenuar o fenômeno da retração hidráulica em concretos é a substituição de uma pequena parcela de cimento por pozolanas.

Nota-se que os mecanismos geradores da retração por secagem dependem largamente do grau de saturação do material. Segundo Benboudjema, Meftah e Torrenti (2007), estes mecanismos geram micro-tensões no esqueleto sólido da matriz cimentícia, os quais aumentam, gradualmente, durante o processo de secagem do material, originando as deformações macroscópicas, observadas durante a ocorrência do fenômeno da retração por secagem.

Neste sentido, de acordo com os conceitos abordados, e pelo fato do mecanismo da pressão de disjunção ser considerado constante quando a taxa de umidade relativa é maior de 80%, e o mecanismo da tensão de superfície não modificar, significativamente, quando a taxa de umidade relativa é superior a 50%, acredita-se que o mecanismo da depressão capilar, regido pelas leis de Kelvin (equação 1) e Laplace (equação 2), foi o mecanismo gerador preponderante, no fenômeno da retração por secagem, avaliado nesta pesquisa.

2.3.1.2 Fatores intervenientes na retração por secagem em concretos

A retração é uma propriedade fortemente relacionada à pasta de cimento. Em concretos de cimento Portland, a magnitude deste fenômeno é reduzida, uma vez que diferentes fatores podem intervir, ou até mesmo, restringir as mudanças de volume. No entanto, o fenômeno

¹⁴ FERRARIS, C. F. Mécanism du retrait de la pâte de ciment durcie. Thèse de docteur ès sciences, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1986.

da retração por secagem sempre estará presente nos materiais cimentícios (TOLEDO FILHO et al., 2005; NUNES; FIGUEIREDO, 2007).

A presença de diferentes fatores pode intervir tanto na ocorrência quanto na magnitude do fenômeno da retração por secagem ao longo do tempo, bem como na sua tendência de fissuração. Tal comportamento foi demonstrado em pesquisa realizada por Bissonnette, Pierre e Pigeon (1999), onde foi verificada uma relação direta entre a magnitude da retração por secagem e o volume da pasta de cimento, em argamassas e concretos, figura 11.

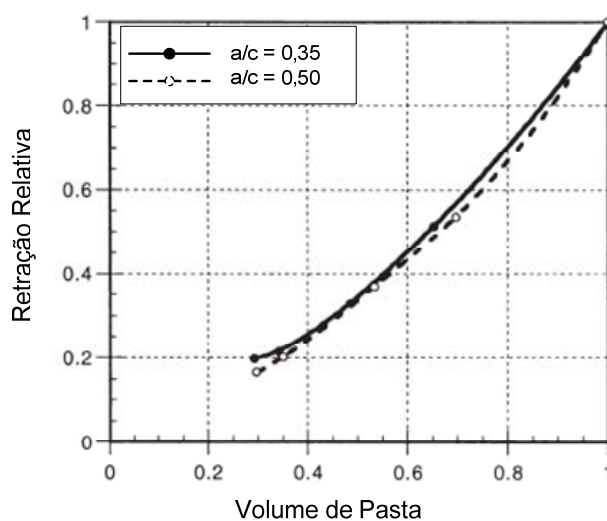


Figura 11: relação entre a retração relativa última e o volume da pasta de cimento (BISSONNETTE; PIERRE; PIGEON, 1999)

Analisando a figura 11, nota-se claramente o efeito gerado pela restrição imposta pelos agregados, pois à medida que o volume da pasta de cimento aumenta, a restrição imposta pelo agregado diminui, aumentando a magnitude da retração total. Segundo os autores, os resultados vão de encontro com a teoria elástica, uma vez que propriedades como o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson são extremamente importantes para os parâmetros da pasta de cimento e dos agregados. Conjuntamente, observa-se que para as relações a/c estudadas (0,35 e 0,5), uma influência relativamente pequena foi encontrada para a relação entre a retração total e o teor de volume de pasta de cimento.

Além destes fatores, a perda de peso/unidade de volume do material foi diretamente proporcional ao volume da pasta de cimento, para ambas as relações a/c . Desta forma, uma maior relação a/c acarreta em uma maior quantidade de perda de peso, simplesmente devido a um teor mais elevado de água livre presente na matriz cimentícia (BISSONNETTE; PIERRE; PIGEON, 1999).

Contrariamente, estudos propostos por Bentz, Peltz e Winpighler (2009) evidenciam a existência de uma grande influência da relação a/c nas propriedades iniciais dos materiais cimentícios, bem como na retração que ocorre nas primeiras idades. Os estudos mostraram que a relação a/c está diretamente relacionada com o volume de água disponível para a hidratação do cimento. Assim, este volume estabelece o espaçamento inicial entre as partículas de cimento, influenciando as propriedades das idades iniciais, como o tempo de pega, o aumento da temperatura semi-adiabática e a retração autógena (ZHANG; TAM; LEOW, 2003; BENTZ; PELTZ; WINPIGLER, 2009). Portanto, para a magnitude da retração total, a relação a/c é um parâmetro importante a ser considerado, uma vez que afeta significativamente uma fase do fenômeno.

Além da relação a/c, tais fatores podem estar relacionados com o tipo de material empregado e seu respectivo proporcionamento. Um exemplo a ser considerado é o tipo de cimento utilizado na mistura, bem como suas características como o teor de álcalis e a quantidade de cal livre presentes. Fleischer (1992)¹⁵ apud Wittmann, Beltzung e Zhao (2009) verificou em suas pesquisas a existência de uma relação direta entre a magnitude da retração em concretos e o teor de álcalis presentes.

Em pesquisa realizada por Kaufmann, Winnefeld e Hesselbarth (2004), características como a finura do cimento e a adição de diferentes *fillers* influenciaram, consideravelmente, a magnitude da retração e as propriedades mecânicas e reológicas das pastas estudadas. O estudo demonstra que a utilização de cimentos mais finos, conjuntamente à aplicação de condições de cura apropriada, propicia uma redução na retração, resultando em uma melhora nas propriedades mecânicas (resistência à tração na flexão e resistência à compressão) do material.

Wittmann, Beltzung e Zhao (2009) estudaram a influência do teor de álcalis e do teor de cal livre, presente na matriz cimentícia de argamassas e concretos, respectivamente, frente à retração por secagem. Os resultados demonstraram um aumento linear entre os teores de álcalis e a magnitude do fenômeno retração. Com relação ao teor de álcalis, os autores explicam que a tensão de superfície do poro não foi alterada, contudo os íons álcalis (Na e K), em solução aquosa, são envolvidos por produtos de hidratação, originando um componente de pressão de disjunção. Contudo, se a tensão de superfície é modificada

58

¹⁵ FLEISCHER, W. **Einfluss des zements auf das schwinden und quellen von beton**. PhD thesis, Munich University of Technology, 1992.

significativamente, a retração permanece praticamente inalterada (BELTZUNG, 2004¹⁶ apud WITTMANN; BELTZUNG; ZHAO, 2009).

Da mesma forma, o teor de cal livre no concreto estabelece uma relação direta com a retração por secagem. Os resultados demonstraram que com uma redução do teor de cálcio, através da adição de pozolanas, ocorre também um decréscimo dos íons adsorvidos na superfície dos produtos de hidratação e dos íons de cálcio. Tal redução afeta o mecanismo da pressão de disjunção e, conseqüentemente, reduz a retração (WITTMANN; BELTZUNG; ZHAO, 2009).

Em pesquisa realizada por Güneyisi, Gesoğlu e Mermedaş (2008), a adição do metacaulim auxiliou na redução das deformações provenientes da retração por secagem. Assim, os autores afirmam que concretos com alta resistência e com baixa retração por secagem podem ser originados a partir da utilização de pozolanas.

No entanto Akkaya, Ouyang e Shah (2007) afirmam que a incorporação de pozolanas na mistura, como a cinza volante, reduziu somente as deformações provenientes da retração autógena, e em contrapartida aumentaram as variações volumétricas devido à retração por secagem nos concretos estudados. Assim, para esta pesquisa o desenvolvimento da resistência tornou-se um importante fator para a avaliação da tendência de fissuração.

Além de realizar investigações sobre a substituição do cimento por adições minerais, Tongaroonsri e Tangtermsirikul (2009) estudaram, conjuntamente, a influência da relação água/pasta e do período de cura frente ao fenômeno da retração e a sua tendência de fissuração. Os resultados da pesquisa mostraram que a idade de fissuração e a deformação resultante do compósito cimentício, em sua forma restringida, variaram devido a todos os parâmetros estudados. Conjuntamente, o potencial de fissuração devido à retração, não é influenciado somente pelas deformações da matriz e pela ocorrência da retração, mas também pela magnitude do fenômeno e pela fluência do material.

Em pisos industriais de concreto, as técnicas construtivas e as condições de execução são fatores extremamente importantes para que se obtenha uma estrutura livre da presença de manifestações patológicas, originadas pelos fenômenos da retração plástica e da retração hidráulica. Uma atividade primordial, a qual influencia diretamente no aparecimento de fissuras nestes elementos refere-se ao processo de cura.

Neste sentido, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas visando uma maior eficiência no processo de cura do material cimentício. Collepardi *et al.* (2008) avaliaram a influência da substituição do processo de cura úmida pela utilização de uma combinação de aditivos químicos, objetivando o não aparecimento de fissuras devido à retração. Slowik, Schmidt e Fritsch (2008; 2009) analisaram a pressão capilar gerada no material durante o processo de secagem, bem como a sua influência na formação de fissuras devido ao fenômeno da retração. Nesta avaliação, os autores empregaram um processo de cura úmida contínuo na superfície do elemento.

Não menos importantes, fatores relacionados com as dimensões do elemento, através da relação sup/vol, como discutido no item 2.3, e as condições de contorno, como a temperatura do ambiente externo, a velocidade do vento e a umidade relativa afetam a ocorrência e a magnitude da retração por secagem dos materiais cimentícios (SHIOTANI; BISSCHOP; VAN MIER, 2003; HOLT; LEIVO, 2004; TOLEDO FILHO *et al.*, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2006; IMAMOTO; ARAI, 2008). Bissonnette, Pierre e Pigeon (1999) afirmam que para valores de umidade relativa entre 48% e 100%, a retração por secagem pode ser considerada inversamente proporcional à taxa de umidade relativa do ambiente.

A pasta de cimento endurecida sofre uma retração mais significativa, se comparado com os compósitos cimentícios. Este fato ocorre devido à presença de partículas mais rígidas na mistura, ou seja, devido à presença dos agregados na composição do concreto (ZHANG; LI, 2001). Os agregados atuam como restrições para as tensões geradas, auxiliando na redução da magnitude da retração por secagem.

No entanto, pesquisadores como Bisschop e van Mier (2002), e Imamoto e Arai (2008), demonstram que tal comportamento pode ser variável, dependendo da origem do agregado e da quantidade em que está constituindo o traço do concreto. Neste sentido, novas metodologias para avaliar possíveis relações existentes, entre as propriedades de diferentes tipos de agregados e as deformações presentes no material, devido à retração por secagem, estão sendo estudadas. Como a pesquisa de Imamoto e Arai (2008), a qual demonstra tais relações, a partir da avaliação da área da superfície específica do agregado empregado.

Outro fator importante que auxilia na redução da magnitude da retração por secagem é a inserção de fibras na mistura (ZHANG; LI, 2001; HSIE; TU; SONG, 2008). Segundo Swamy

e Stavrides (1979)¹⁷ apud Toledo Filho *et al.* (2005), a adição de fibras em materiais cimentícios pode reduzir a fissuração gerada pelo fenômeno da retração. Além de tal característica, as fibras também possuem uma capacidade de retardar o aparecimento da primeira fissura nos elementos, uma vez que o valor do seu módulo de elasticidade é superior ao da matriz cimentícia, e de manter a integridade do elemento no momento pós-fissuração (LANING, 1992; SONG; HWANG; SHEU, 2005; BANTHIA; GUPTA, 2006; BOGHOSSIAN; WEGNER, 2008).

Alguns estudos propostos por Toledo Filho *et al.* (2005) e Aly, Sanjayan e Collins (2008) afirmam que a adição de fibras na mistura dos materiais cimentícios possibilitam somente a redução da intensidade da retração plástica, não minimizando as consequências oriundas da retração hidráulica. Comportamento este decorrente do aumento da permeabilidade do compósito quando fibras são incorporadas, tornando o material cimentício mais vulnerável ao processo de secagem.

Conjuntamente, fatores relacionados com a geometria, comprimento e diâmetro da fibra, bem como, o coeficiente de fricção na interface matriz/fibra influenciam a magnitude do fenômeno da retração (BANTHIA; GUPTA, 2006). Estudos realizados por Ma, Tam e Wu (2002, 2004) avaliaram a influência da geometria e do tipo de fibra de polipropileno adicionada em materiais cimentícios frente ao fenômeno da retração plástica. Resultados satisfatórios foram encontrados, como a redução de 88% da fissuração quando adicionada uma fração de volume de 0,15% de fibras.

Em pesquisa realizada por Hsie, Tu e Song (2008) foi verificado um efeito positivo, relacionado à redução na intensidade da retração por secagem, quando adicionado fibras monofilamentadas e microfibras (staple) de polipropileno na mistura. Os resultados demonstraram uma relação inversa entre as variações volumétricas provenientes da retração por secagem e o teor de adição de fibras de polipropileno. Conjuntamente, as propriedades mecânicas dos concretos contendo fibras melhoraram significativamente, os valores de resistência à compressão aumentaram entre 14,6 e 17,31%, os de resistência à tração na flexão entre 8,88 e 13,35% e os de módulo de ruptura entre 8,99 e 24,60%, dependendo do traço analisado.

Diferentes fibras podem ser incorporadas no concreto, sendo usualmente de aço, polipropileno, vidro ou de origem vegetal. Segundo Laning (1992), além de ser um material inerte, as fibras sintéticas adicionadas ao concreto melhoram propriedades como: a

resistência ao impacto, a resistência à abrasão, a permeabilidade e a integridade pós-fissuração destes compósitos.

Ao final deste capítulo percebeu-se que muitos são os fatores influenciadores na ocorrência e na magnitude da retração por secagem, bem como na tendência de fissuração gerada por este fenômeno. No entanto, por estar se avaliando concretos proporcionados para pisos, o estudo limitou-se aos fatores considerados mais importantes, como o tipo de cimento, o consumo de água e o teor de adição de microfibras de polipropileno, os quais influenciariam de forma significativa na retração. Desta forma, espera-se contribuir para o início do entendimento do efeito destes fatores, para os materiais empregados no Brasil, frente ao fenômeno da retração por secagem em concretos.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A pesquisa experimental é caracterizada como sendo uma seqüência de ensaios estruturada, a qual possibilita a determinação entre a causa e o efeito de um determinado fenômeno. Esta metodologia está fortemente apoiada em conceitos estatísticos, destinada a otimizar o planejamento, a execução e a análise dos resultados de um experimento (VARGAS, 1985; RIBEIRO; TEN CATEN, 2001; CERVO; BERVIAN, 2002). Neste sentido, a etapa de planejamento do programa experimental, de forma organizada, foi indispensável para o bom andamento da pesquisa.

O programa experimental foi elaborado objetivando avaliar alguns fatores relacionados ao traço de concreto empregado em pisos, que influenciam na retração por secagem. Para tanto, foram estudados como fatores controláveis três diferentes valores de consumos de água, quatro diferentes teores de adição de microfibras de polipropileno, sendo um valor referência (0 g/m^3), e dois tipos de cimento.

A figura 12 demonstra, esquematicamente, o programa experimental empregado na pesquisa, totalizando 24 combinações de traços de concreto, para as variáveis de resposta correspondentes aos ensaios de resistência à compressão uniaxial (NBR 5739/94), resistência à tração na flexão (NBR 12142/94) e retração por secagem livre (ASTM C-157/93).

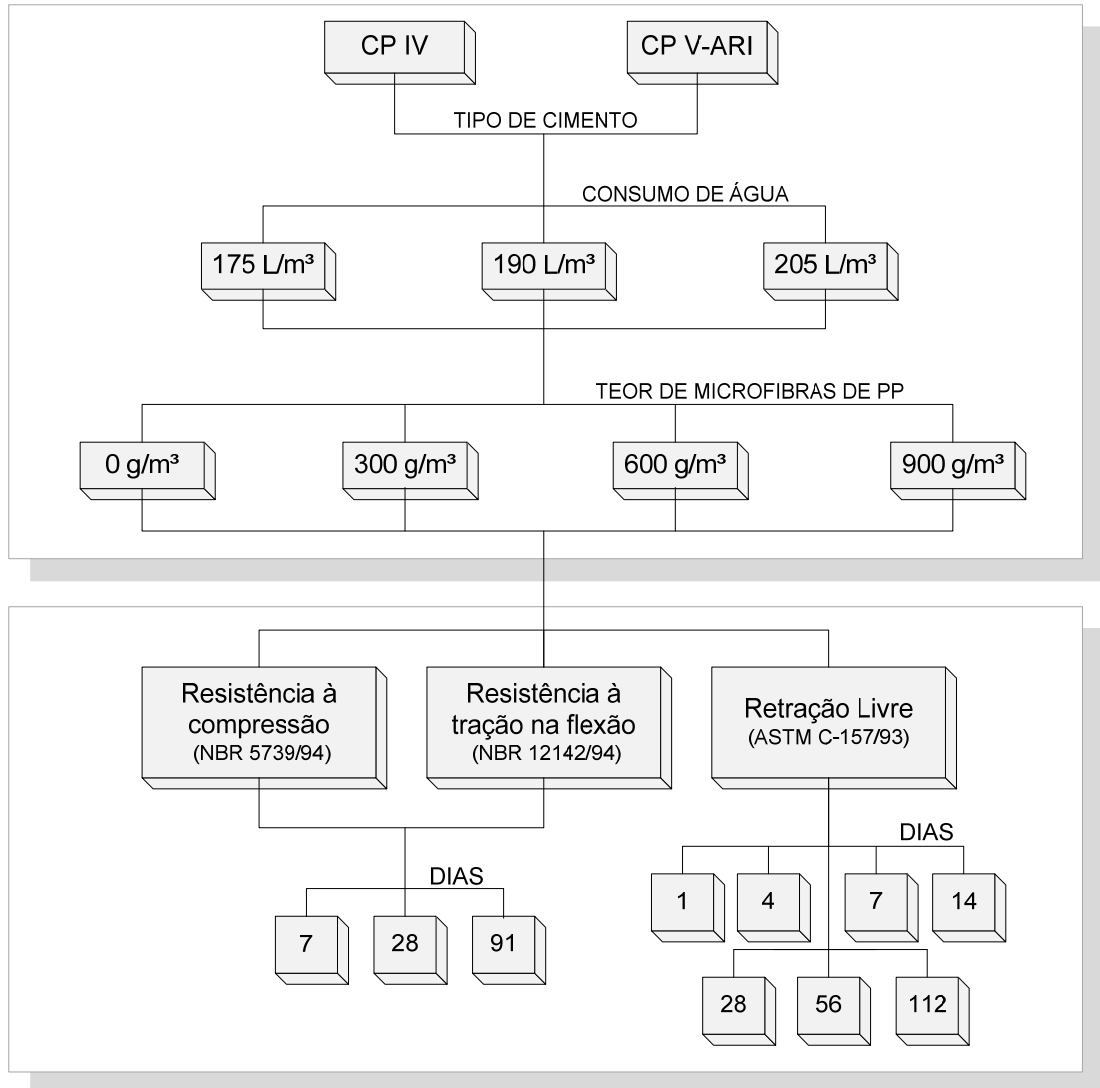


Figura 12: programa experimental – ensaios mecânicos e retração por secagem livre

Contudo, para o ensaio de retração por secagem restringida, representado na figura 13, foi definido um número reduzido de combinações, passando de 24 para 9 combinações de traços de concreto, devido às limitações apresentadas no item 1.5 desta pesquisa. Desta forma, as variáveis controláveis foram definidas sem que houvesse qualquer prejuízo aos resultados da pesquisa.

Optou-se por estudar o cimento pozolânico (CP IV) devido a dois fatores preponderantes. O primeiro diz respeito à elevada empregabilidade deste tipo de cimento na região sul do Brasil, uma vez que se tem uma maior facilidade de transporte, pois este tipo de cimento é fabricado na região. Pode-se acrescentar a sua grande utilização em concretos utilizados em pisos na região, objeto de estudo desta pesquisa.

Para o ensaio de retração restringida, os valores referentes à variável consumo de água não foram alterados. No entanto, os teores de adição de microfibras de polipropileno foram modificados, mantendo-se o mesmo intervalo de valores (entre 0g/m^3 e 900g/m^3), mas variando os teores em somente três níveis. A matriz experimental empregada neste ensaio é apresentada, de forma esquemática, na figura 13.

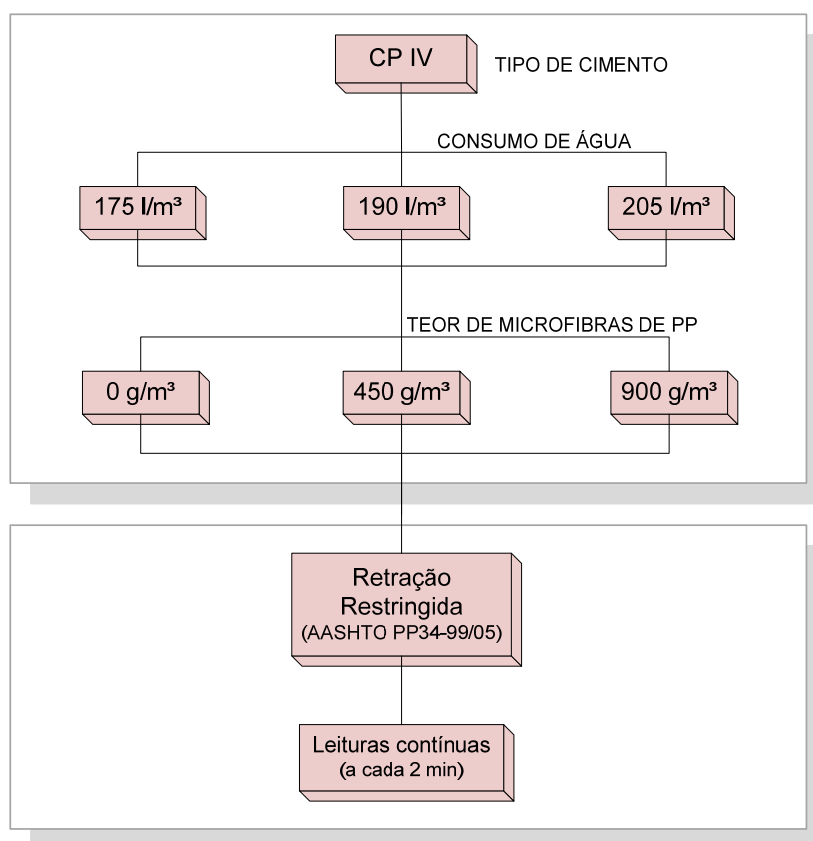


Figura 13: programa experimental - ensaio de retração por secagem restringida

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A correta execução de um planejamento experimental possibilita uma maior eficiência em termos de informação, se comparado com qualquer outra seqüência de ensaios não-estruturada. Isto permite a otimização dos recursos e do tempo empregado na pesquisa, viabilizando em termos técnicos e econômicos a sua realização (RIBEIRO; TEN CATEN, 2001; CERVO; BERVIAN, 2002; MARCONI; LAKATOS, 2002; DAL MOLIN; KULAKOWSKI; RIBEIRO, 2005).

Segundo Ribeiro e Ten Caten (2001), a realização de um projeto experimental adequado possibilita ao pesquisador encontrar o ajuste ótimo entre os parâmetros do sistema, maximizando o seu desempenho, reduzindo os custos e tornando-o pouco suscetível aos

fatores não controláveis (fatores de ruído). Os parâmetros do sistema são definidos como os fatores que podem influenciar no desempenho do produto, processo ou serviço. Tais parâmetros são subdivididos em fatores controláveis, fatores de ruído e fatores constantes.

De forma geral, os fatores controláveis (variáveis independentes) exercem influência sobre as variáveis de resposta. Os fatores de ruído são variáveis que não podem ser controladas, sendo responsáveis pelo erro experimental e pela ocorrência de variabilidade residual no sistema. Já, os fatores constantes são aquelas variáveis que não foram escolhidas como prioritárias no desenvolvimento da pesquisa, entretanto, devem ser mantidas constantes, uma vez que influenciam nas variáveis de resposta do sistema (RIBEIRO; TEN CATEN, 2001).

Portanto, quando o planejamento experimental é executado de forma correta, ele possibilita o cumprimento de uma seqüência estruturada de ensaios, permitindo com que haja uma interpretação confiável dos dados finais. Desta forma, assegura-se a realização de uma análise estatística coerente e precisa dos resultados, com um maior embasamento científico (RIBEIRO; TEN CATEN, 2001). Nesta etapa do trabalho foram definidas as variáveis de resposta e os fatores controláveis a serem utilizados na pesquisa, bem como, a matriz experimental.

3.1.1 Determinação das Variáveis de Resposta do Projeto Experimental

As variáveis de resposta (variáveis dependentes) são aspectos mensuráveis do produto, os quais possibilitam a quantificação de características e propriedades relacionadas à qualidade do mesmo (RIBEIRO; TEN CATEN, 2001).

Desta forma, as variáveis dependentes, determinadas como objeto de estudo deste projeto experimental, estão relacionadas com as características de qualidade do produto, o concreto. Logo, estas estão vinculadas às propriedades mecânicas e às variações dimensionais dos concretos estudados. As variáveis de resposta da pesquisa são as seguintes:

- a) resistência à compressão uniaxial;
- b) resistência à tração na flexão;
- c) retração por secagem livre;
- d) retração por secagem restringida.

O trabalho procurou avaliar a influência dos fatores controláveis, frente ao fenômeno da retração por secagem e, conseqüentemente, a tendência de fissuração decorrente deste fenômeno nos concretos comumente empregados em pisos. Neste sentido, estas variáveis de resposta foram as priorizadas na pesquisa.

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial e resistência à tração na flexão foram realizados com a finalidade de não só controlar a produção dos concretos pesquisados, mas também poder avaliá-los quanto as suas propriedades mecânicas, uma vez que para pisos de concreto, a resistência à tração na flexão é um importante parâmetro de projeto. Estes ensaios foram realizados nas idades de 7, 28 e 91 dias, sendo estas idades definidas para que se pudesse analisar o comportamento dos concretos estudados ao longo do tempo, assim podendo relacioná-los com os ensaios de retração por secagem.

Já os ensaios de retração por secagem livre e restringida foram realizados a fim de avaliar a magnitude das variações dimensionais presentes nos diferentes concretos estudados, devido ao fenômeno da retração por secagem, bem como a sua tendência de fissuração. Para esta pesquisa, as leituras do ensaio de retração por secagem livre foram realizadas nas idades de 1, 4, 7, 14, 28, 56 e 112 dias, seguindo as recomendações da norma americana ASTM C-157/93. Para o ensaio de retração por secagem restringida, as leituras das tensões foram realizadas para o mesmo período de tempo, sendo estas a cada dois minutos e ininterruptas.

Contudo, cabe salientar que os parâmetros de qualidade dos concretos estudados, os quais definem o desempenho do mesmo, não se limitam somente a essas variáveis de resposta. Outras variáveis poderiam ter sido analisadas, sendo estas relacionadas com as propriedades mecânicas dos concretos ou com características vinculadas ao fenômeno de retração em suas duas etapas. Entretanto, devido às limitações de tempo e recursos para o desenvolvimento da pesquisa, optou-se por estudar as propriedades que poderiam dar resultados mais significativos, frente aos problemas gerados pelo fenômeno da retração por secagem em concretos.

3.1.2 Escolha dos Fatores Controláveis no Projeto Experimental

Os fatores controláveis (variáveis independentes) são um subconjunto dos parâmetros do sistema, que podem exercer influência sobre as variáveis de resposta. A sua definição em diferentes níveis, significativos à pesquisa, e o seu total controle são necessários, pois, desta forma, é possível verificar a sua real influência nas variáveis dependentes (RIBEIRO; TEN CATEN, 2001). Nesta pesquisa, as variáveis independentes avaliadas foram as seguintes:

- a) consumo de água: 175 l/m³; 190 l/m³; 205 l/m³;
- b) teor de adição de microfibras de polipropileno: 0 g/m³; 300 g/m³; 450 g/m³ (somente para o ensaio de retração por secagem restringida); 600 g/m³; 900 g/m³;
- c) tipo de cimento: CP IV e CP V-ARI;
- d) idade (variável em função do ensaio).

A escolha destas variáveis independentes baseou-se em um conhecimento relacionado à dosagem de concretos, a tecnologia dos materiais cimentícios, bem como a parâmetros considerados importantes, empiricamente, por projetistas da área, em especificações de concretos utilizados em pisos, os quais, possivelmente, exercem influência na magnitude do fenômeno da retração por secagem. Desta forma, julgou-se relevante entender e avaliar o comportamento quantitativo de cada um dos parâmetros definidos, frente ao fenômeno estudado, procurando verificar a existência de alguma interação entre eles na ocorrência da retração por secagem nos concretos.

Cabe salientar que outros fatores, bem como as características dos materiais empregados, possivelmente exercem influência sobre o fenômeno estudado. Tais parâmetros podem estar relacionados, dentre outros fatores, com a dimensão máxima do agregado miúdo e do agregado graúdo, a finura do cimento e o teor de argamassa da mistura.

Após a definição dos parâmetros a serem controlados, partiu-se para a determinação dos diferentes níveis, de cada um destes fatores, a serem avaliados na pesquisa. É importante salientar que todas estas decisões basearam-se em especificações de diferentes projetistas de piso de concreto, como mencionado anteriormente.

A escolha dos cimentos pozolânico (CP IV) e de alta resistência inicial (CP V-ARI) baseou-se em diferentes fatores. Questões relacionadas com especificações de projeto de pisos de concreto, disponibilidade destes materiais no mercado cimenteiro da região e sua grande empregabilidade nas obras de construção evidenciam a necessidade de obtenção de um maior conhecimento científico dos mesmos, principalmente, por parte do meio técnico.

Conjuntamente a estes fatores, a composição química dos cimentos foi outro parâmetro preponderante na escolha destes materiais. Optou-se em estudar tipos de cimento com características químicas, físicas e mecânicas diferentes entre si, tais como a capacidade de atingir resistência inicial e resistência final do concreto, teor de adição de material pozolânico e calor gerado nas reações iniciais de hidratação.

Com relação aos valores de consumo de água e do teor de adição de microfibras de polipropileno, normalmente as especificações de projeto mencionam valores fixos próximos a 175 l/m³ e valores mínimos de 600 g/m³, respectivamente. Conforme verificado na tabela 2, onde são apresentadas especificações de projetos de pisos de concreto, de duas empresas distintas.

Tabela 2: especificações de projetos de pisos de concreto

Dados de Projeto								
Empresa	Tipo de cimento	fck (MPa)	fctm,k (MPa)	α (%)	Consumo de cimento máx. (kg/m ³)	Consumo de água máx. (l/m ³)	Teor de adição de fibras de PP (g/m ³)	Aditivo Plastificante (%)
A	CP-II E 32	32	4,5	50 a 53	380	-	600	≤ 0,4
B	-	30	-	49 a 52	380	175	600	-

Desta maneira, considerou-se interessante avaliar, para os dois parâmetros, intervalos os quais contemplassem os valores especificados em projetos. Assim, para a variável consumo de água foi estudado o intervalo entre 175 l/m³ e 205 l/m³, e para a variável adição de microfibras de polipropileno avaliado o intervalo entre teores de 0 g/m³ a 900 g/m³. Desta forma, acredita-se ser possível estimar a influência destes fatores frente ao fenômeno da retração por secagem e sua tendência de fissuração.

A microfibras de polipropileno foi empregada nesta pesquisa, por ser a fibra comumente utilizada em pisos de concreto, sem fins estruturais. Desta forma, não se pretendeu avaliar a influência de diferentes tipos de fibras, nem mesmo de características das fibras de polipropileno, como geometria, comprimento, espessura e diâmetro. Neste caso, a inserção de tais variáveis de controle no programa experimental, inviabilizaria a execução da pesquisa dentro dos prazos definidos para a realização de um mestrado.

3.1.3 Matriz Experimental

Após a definição das variáveis de resposta e dos fatores controláveis, partiu-se para a elaboração da matriz experimental a ser empregada neste estudo. Por se tratar de uma matriz experimental composta por três fatores controláveis e quatro variáveis de resposta, julgou-se desnecessária a utilização de qualquer método de fracionamento de experimentos.

Na tabela 3 é apresentada a matriz experimental empregada, enquanto na tabela 4 o número de corpos-de-prova moldados para a execução de cada um dos ensaios de laboratório propostos no estudo.

Tabela 3: matriz experimental empregada na pesquisa

Traço	Fatores Controláveis			Variáveis de Resposta			
	Consumo de água (L/m³)	Teor de adição microfibras (g/m³)	Tipo de cimento	Resistência à compressão	Resistência à tração na flexão	Retração Livre	Retração Restringida
1A	175	0	CP IV	7, 28 e 91 dias	7, 28 e 91 dias	1, 4, 7, 14, 28, 56 e 112 dias	X
2A	175	300					
3A	175	600					
4A	175	900					
5A	190	0					
6A	190	300					
7A	190	600					
8A	190	900					
9A	205	0					
10A	205	300					
11A	205	600					
12A	205	900					
1B	175	0	CP V-ARI	7, 28 e 91 dias	7, 28 e 91 dias	1, 4, 7, 14, 28, 56 e 112 dias	X
2B	175	300					
3B	175	600					
4B	175	900					
5B	190	0					
6B	190	300					
7B	190	600					
8B	190	900					
9B	205	0					
10B	205	300					
11B	205	600					
12B	205	900					
1C	175	0	CP IV	X	X	X	Contínuo
2C	175	450					
3C	175	900					
4C	190	0					
5C	190	450					
6C	190	900					
7C	205	0					
8C	205	450					
9C	205	900					

Tabela 4: número de corpos-de-prova empregados em cada ensaio

Ensaio Realizados	Norma de ensaio	Idades ensaiadas - leituras (dias)	Nº de CP's
Resistência à compressão	NBR 5739/94	7, 14 e 28	3/idade
Resistência à tração na flexão	NBR 12142/94	7, 14 e 28	3/idade
Retração Livre	ASTM C-157/93	1, 4, 7, 14, 28, 56, 112	2
Retração Restringida	AASHTO PP34-99/05	Contínua (leituras a cada 2 min)	1

Nota-se, a partir da análise da tabela 3, que alguns traços de concreto do grupo A e do grupo C são exatamente iguais, como é o caso dos traços 1A e 1C ou dos traços 8A e 6C, por exemplo. Desta forma, no momento da concretagem destes traços, os corpos-de-prova correspondentes a eles foram moldados simultaneamente, provenientes de uma mesma betonada.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados para a realização desta pesquisa são especificados nos itens a seguir.

3.2.1 Cimento

Com base nos projetos de piso de concreto analisados, para região sul do Brasil, normalmente é especificado o emprego dos cimentos composto (CP II), pozolânico (CP IV) ou de alta resistência (CP V-ARI). Desta forma, a pesquisa procurou abranger alguns destes tipos de cimento no estudo realizado, sendo definidos os cimentos Portland CP IV e CP V-ARI. A tabela 5 apresenta um resumo das prescrições da composição dos cimentos empregados nesta pesquisa, conforme as respectivas normas brasileiras.

Tabela 5: composição dos cimentos utilizados na pesquisa

Tipo de Cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma brasileira
		Clínquer + gesso (sulfato de cálcio)	Escória granulada de alto forno	Material Pozolânico	Material Carbonático	
Pozolânico	CP IV	85 - 45	-	15 - 50	0 - 5	NBR 5736
Alta resistência inicial	CP V-ARI	100 - 95	-	-	0 - 5	NBR 5733

Junto às empresas fabricantes solicitou-se a caracterização química, física e mecânica dos mesmos. Contudo, no sentido de complementar as características obtidas, alguns ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório de Cerâmica (LACER) e no Laboratório do NORIE, ambos da UFRGS, e na Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC). As características químicas (tabela 6), físicas (tabela 7), e mecânicas (tabela 8) dos cimentos utilizados na pesquisa são apresentadas a seguir.

Tabela 6: caracterização química dos cimentos estudados

Características avaliadas (% da massa)	Tipos de cimento Portland					
	CP IV			CP V-ARI		
	Resultados (fabricante)	Resultados (LACER)	Exigências da NBR 5736/91	Resultados (fabricante)	Resultados (LACER)	Exigências da NBR 5733/91
Al ₂ O ₃	-	11,67	-	-	2,36	-
SiO ₂	-	32,51	-	-	13,76	-
Fe ₂ O ₃	-	6,92	-	-	6,00	-
CaO	-	42,13	-	-	72,15	-
MgO	4,39	-	≤ 6,50	3,01	-	≤ 6,50
SO ₃	2,12	2,17	≤ 4,00	4,26	3,37	≤ 4,50
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	1,85	-	-	1,00	-
SrO	-	-	-	-	0,52	-
TiO ₂	-	1,25	-	-	0,24	-
MnO	-	0,11	-	-	-	-
P ₂ O ₅	-	0,09	-	-	0,07	-
Perda ao fogo	3,74		≤ 4,50	3,90		≤ 4,50
CaO livre	0,80	-		-	-	
Resíduo Insolúvel	30,05	-		-	-	
Equivalente alcalino (Na ₂ O _{eq})*	-	-	-	-	-	-

*Na₂O_{eq} = 0,658 x K₂O% + Na₂O%

Tabela 7: caracterização física dos cimentos estudados

Características avaliadas	Tipos de cimento Portland - RESULTADOS							
	CP IV				CP V-ARI			
	Fabricante	NORIE	CIENTEC	Exigências da NBR 5736/91	Fabricante	NORIE	CIENTEC	Exigências da NBR 5733/91
Massa específica (cm ³ /g)	2,80	2,65		-	3,05	3,02		-
Expansão à quente (mm)	0,0			≤ 5,0	0,0			≤ 5,0
Tempo de pega (h:min)	Início	04:12		≥ 1,0	02:55			≥ 1,0
	Fim	05:21		≤ 12,0	04:35			≤ 10,0
Consistência normal (%)	34,9			-	-			-
Finura Blaine (cm ² /g)	4306	5338	5480	-	4970	4340	5100	≥ 3000
Resíduo peneira #200µm (%)	1,1			≤ 8,0	0,16			≤ 6,0
Resíduo peneira #325µm (%)	5,1			-	1,44			-

Tabela 8: caracterização mecânica dos cimentos estudados

Características avaliadas (MPa)	Tipos de cimento Portland				
	CP IV		CP V-ARI		
	Resultados (fabricante)	Exigências da NBR 5736/91	Resultados (fabricante)	Exigências da NBR 5733/91	
Resistência à compressão	1 dia	-	-	28,2	≥ 14,0
	3 dias	19,0	≥ 10,0	42,0	≥ 24,0
	7 dias	23,9	≥ 20,0	46,2	≥ 34,0
	28 dias	38,9	≥ 32,0	51,5	-

3.2.2 Agregados

Para a dosagem dos concretos foi utilizado agregado miúdo (areia) e graúdo, proveniente do estado do Rio Grande do Sul. Tais materiais serão especificados e caracterizados nos itens 3.2.2.1 e 3.2.2.2, respectivamente, apresentados a seguir.

3.2.2.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo empregado na pesquisa é uma areia de quartzo, de origem natural, selecionada entre um grupo de areias comercializadas no município de Porto Alegre (RS). A escolha do agregado miúdo foi baseada na distribuição granulométrica, sendo preferida uma distribuição mais contínua.

A areia foi caracterizada quanto as suas propriedades físicas, seguindo os ensaios de determinação da composição granulométrica (NBR NM 248/2003), determinação da massa unitária (NM 45/1996), determinação da absorção de água (NBR NM 30/2001) e determinação de massa específica (NBR NM 52/2002). Para a execução dos ensaios de caracterização, as amostras foram submetidas a um processo de quarteamento, a fim de possibilitar que as mesmas representassem o material em sua totalidade.

Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE), da UFRGS. Os resultados da caracterização física do agregado miúdo são apresentados na tabela 9.

Tabela 9: caracterização física do agregado miúdo

AGREGADO MIÚDO						
Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2005)			
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa			
			Limites Inferiores		Limites Superiores	
			Zona utilizável	Zona ótima	Zona utilizável	Zona ótima
4,75	2	2	0	0	5	10
2,36	5	7	0	10	20	25
1,18	12	19	5	20	30	50
0,6	26	45	15	35	55	70
0,3	37	82	50	65	85	95
0,15	17	99	85	90	95	100
0,075	1	100	100	100	100	100
< 0,075	0	100	100	100	100	100
Módulo de Finura		2,54	1,55 - 2,20	2,2	2,90 - 3,50	2,9
Dimensão Máxima (mm)		4,8				
Massa Específica (g/cm³)		2,40				
Massa Unitária (g/cm³)		1,55				
Absorção de água (%)		0,97				

Os resultados da caracterização física do agregado miúdo atendem as especificações estabelecidas pela norma NBR 7211 (2005).

3.2.2.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo empregado na pesquisa é de origem basáltica, selecionado entre um grupo de agregados comercializados no município de Porto Alegre (RS), proveniente da

cidade de Montenegro (RS). A escolha do agregado graúdo baseou-se em parâmetros relacionados à dimensão máxima, à composição granulométrica e às características da superfície do agregado graúdo.

O agregado graúdo foi caracterizado quanto as suas propriedades físicas, seguindo os ensaios de determinação da composição granulométrica (NBR NM 248/2003), determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água (NBR NM 53/2003). Da mesma forma que o agregado miúdo, as amostras utilizadas para a execução dos ensaios de caracterização passaram por um processo de quarteamento, assim possibilitando que as amostras utilizadas representassem o material como um todo.

Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE), da UFRGS. Os resultados da caracterização física do agregado graúdo são apresentados na tabela 10.

Tabela 10: caracterização física do agregado graúdo

AGREGADO GRAÚDO							
Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2005)				
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa				
			Zona Granulométrica - d/D ¹				
			4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
19	2	2	-	2 - 15 ²	65 ² - 95	95 - 100	-
9,5	64	66	2 - 15 ²	80 ² - 100		-	-
4,75	32	99	80 - 100	95 - 100		-	-
2,36	1	100	95 - 100	-	-	-	-
1,18	0	100	-	-	-	-	-
0,6	0	100	-	-	-	-	-
0,3	0	100	-	-	-	-	-
0,15	0	100	-	-	-	-	-
Fundo	0	100	-	-	-	-	-
Módulo de Finura		6,67					
Dimensão Máxima (mm)		19					
Massa Específica (g/cm³)		2,87					
Massa Unitária (g/cm³)		1,58					
Absorção de água (%)		0,01					

¹ - Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo

² - Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados

Os resultados da caracterização física do agregado graúdo atendem as exigências estabelecidas pela norma NBR 7211 (2005).

3.2.3 Microfibras de Polipropileno

Dentre os diferentes tipos de fibras comercializadas no mercado nacional e utilizadas em pisos de concreto, optou-se em estudar a influência das microfibras de polipropileno na retração por secagem. A escolha deste material baseou-se na sua grande empregabilidade no mercado da construção e em suas características físicas e químicas.

Segundo o fabricante, as microfibras sintéticas de polipropileno, figura 14, são filamentos extremamente finos, obtidos através do processo de extrusão. Estas recebem um tratamento superficial adequado, a fim de facilitar a sua dispersão no concreto. O fabricante menciona que estas microfibras reduzem a tendência de fissuração, devido à retração que ocorre nas primeiras idades do concreto, pois controlam a ocorrência dos fenômenos de exsudação e de segregação do compósito. Contudo, não há nenhuma especificação do produto quanto à possibilidade de redução na magnitude do fenômeno da retração por secagem nas matrizes cimentícias.



Figura 14: fibras de polipropileno utilizadas na pesquisa

Na tabela 11 são apresentadas as especificações das microfibras de polipropileno, conforme a ficha técnica do produto, fornecida pelo fabricante.

Tabela 11: especificação das microfibras de polipropileno

GEOMETRIA			
Comprimento (mm)	Diâmetro (μm)	Frequência (milhões de fibras/kg)	Área superficial específica (m^2/kg)
6	12	1620	366
12	12	810	366

PROPRIEDADES FÍSICAS	
Densidade relativa	0,91
Deformação na ruptura (%)	25
Ponto de fusão ($^{\circ}\text{C}$)	160
Ponto de ignição ($^{\circ}\text{C}$)	365

Com relação a aspectos de durabilidade, conforme especificações do produto, estas microfibras de polipropileno são imputrescíveis, quimicamente inertes, não oxidam e possuem excelente resistência quando incorporadas em meio alcalino.

3.2.4 Água

A água utilizada na pesquisa, para a dosagem dos traços de concreto estudados, foi proveniente da rede de abastecimento público, da cidade de Porto Alegre (RS).

3.2.5 Aditivo

O aditivo químico utilizado foi do tipo plastificante polifuncional para concreto, a base de lignosulfonato. A tabela 12 apresenta as características físico-químicas do aditivo químico empregado na pesquisa, segundo as especificações fornecidas pelo fabricante.

Tabela 12: caracterização físico-química do aditivo químico plastificante utilizado na pesquisa

Propriedades Físico-Químicas	
Estado Físico	Líquido
Cor	Castanho
Odor	Característico
pH	7 a 9
Base química	Lignosulfonato
Densidade .	1,16 a 1,20 g/cm^3
Solubilidade	solúvel em água

3.3 DOSAGEM EXPERIMENTAL

Utilizou-se a metodologia de dosagem do IPT/EPUSP, proposta por Helene e Terzian (1992), onde os parâmetros utilizados foram a obtenção de um abatimento de tronco de cone de 100 ± 20 mm, definido com base em especificações de projeto para pisos, e um teor de argamassa de 55%, sendo este determinado experimentalmente. A dosagem experimental foi realizada sem a utilização de aditivo plastificante.

Como nesta pesquisa um dos fatores controláveis é o tipo de cimento, sendo estes os cimentos CP IV e CP V-ARI, a dosagem experimental foi realizada para ambos. Os valores obtidos na dosagem experimental realizada para o cimento pozolânico (CP IV) são apresentados na tabela 13.

Tabela 13: resultados da dosagem experimental - CP IV

Traço Unitário (1:m)	Relação água/cimento (a/c)	Resistência Potencial (MPa) (28 dias)	Consumo de cimento (kg/m³)	H (%)	Abatimento (mm)
1 : 3,5	0,43	30,9	471,9	9,66	80
1 : 5,0	0,53	26,1	359,0	8,86	80
1 : 6,5	0,67	17,1	286,3	8,92	100

O diagrama de dosagem do cimento pozolânico foi plotado a partir dos valores obtidos pelo ajuste do traço do concreto, conforme mostrado na figura 15. O diagrama de dosagem é composto por quatro eixos, sendo estes representados pela resistência à compressão do concreto, aos 28 dias, pela relação a/c, pela soma dos agregados no traço unitário e pelo consumo de cimento, em kg/m³. A partir do diagrama de dosagem dos concretos, com o emprego de cimento pozolânico, foram definidos os traços dos concretos utilizados na pesquisa, para este tipo de cimento.

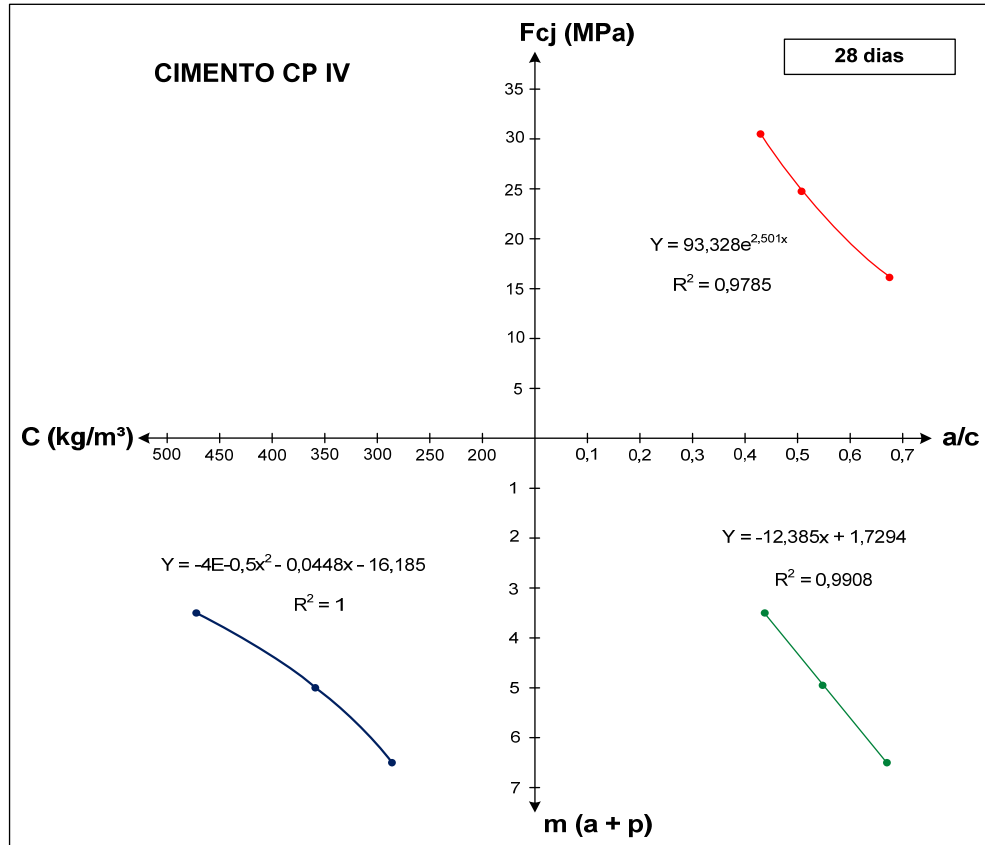


Figura 15: diagrama de dosagem - cimento CP IV

Na tabela 14 são demonstrados os valores obtidos através da dosagem experimental realizada, para o cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI).

Tabela 14: resultados da dosagem experimental - CP V-ARI

Traço Unitário (1:m)	Relação água/cimento (a/c)	Resistência Potencial (MPa) (28 dias)	Consumo de cimento (kg/m ³)	H (%)	Abatimento (mm)
1 : 3,5	0,39	49,2	505,4	8,77	85
1 : 5,0	0,50	38,1	381,4	8,36	95
1 : 6,5	0,64	28,7	303,3	8,54	85

Da mesma forma, o diagrama de dosagem para o cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI), figura 16, foi plotado com os valores obtidos a partir do ajuste do traço do concreto. Assim, com o auxílio do diagrama de dosagem, pode-se definir a composição dos traços de concreto, os quais empregaram este tipo de cimento.

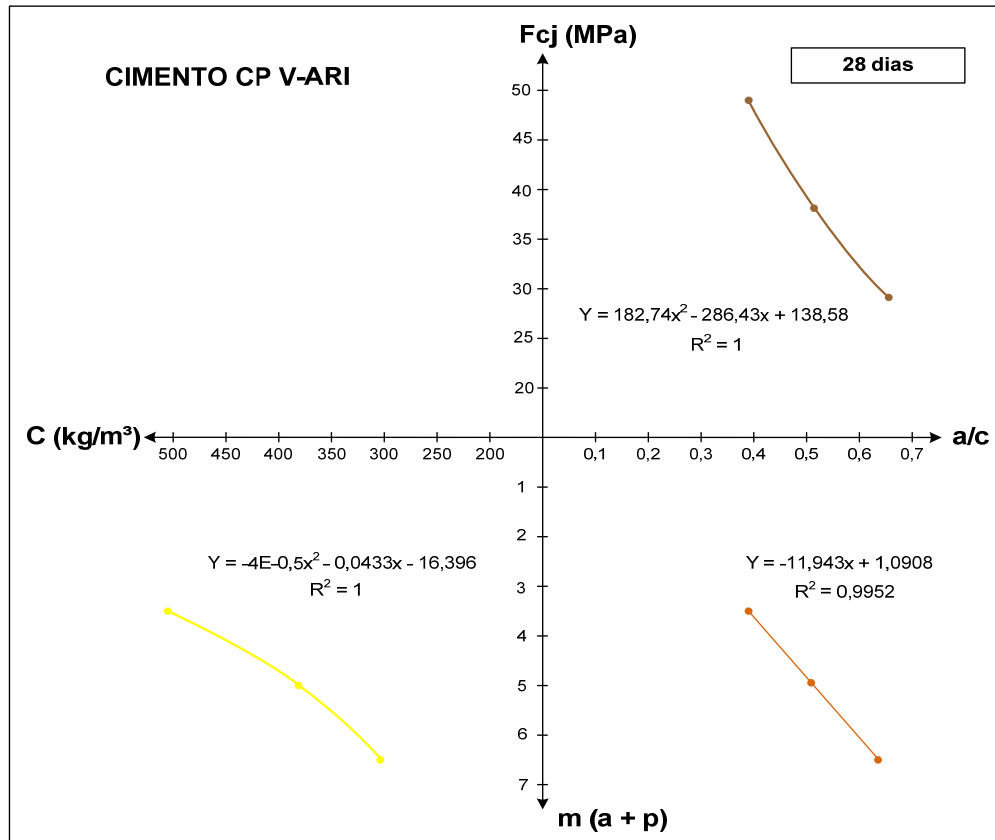


Figura 16: diagrama de dosagem - cimento CP V-ARI

3.3.1 Determinação da Quantidade de Material Empregada na Produção dos Concretos

Após a realização da dosagem experimental e com posse dos dados obtidos, pode-se determinar os traços dos concretos empregados neste estudo. Primeiramente, optou-se em fixar o valor referente à relação a/c (0,53); relação comumente utilizada em especificações de projetos de pisos de concreto. O traço base, para o cálculo dos demais, refere-se ao concreto com consumo de água de 190l/m^3 . Assim, para os diversos traços de concretos estudados, o valor correspondente ao consumo de cimento variou de acordo com a variação do fator controlável consumo de água, mantendo o valor da relação a/c constante.

Contudo, após esta definição, foi necessário verificar o comportamento do concreto fresco quando utilizado consumo de água (205 l/m^3) e de cimento elevados ($386,8\text{ kg/m}^3$). Tal verificação foi realizada somente com o cimento CP IV. Nenhuma problemática foi evidenciada para este concreto, a exceção do aumento do abatimento, conforme esperado.

Tal definição foi tomada, não só por questões relacionadas ao desperdício de materiais, mas também por tratar-se de uma verificação preliminar, na qual resultados satisfatórios para um

tipo de cimento seriam suficientes. Desta forma, julgou-se desnecessária a repetição de tal verificação para o cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI), uma vez que o fenômeno não ocorreu para o cimento pozolânico. A tabela 15 apresenta os resultados obtidos na verificação realizada empregando-se o cimento pozolânico.

Tabela 15: resultados obtidos na verificação do comportamento do concreto fresco – cimento CP IV

α (%)	a/c (fixo)	Consumo de água (l/m ³)	Consumo cimento (kg/m ³)	m	TRAÇO UNITÁRIO (massa)			QUANTIDADE DE MATERIAIS (kg)				PROPRIEDADES	
					cim	a	p	cim	a	p	água	H (%)	abatimento (mm)
55	0,53	175	330,2	5,48	1	2,56	2,92	6,86	17,59	20	3,64	8,18	100
		190	359,0	5,00	1	2,30	2,70	7,41	17,04	20	3,93	8,83	80
		205	386,8	4,51	1	2,03	2,48	8,07	16,38	20	4,28	9,62	200

Durante os processos de mistura dos materiais e de verificação do abatimento do concreto, realizado segundo a NBR 7223 (1992), o fenômeno da segregação não foi constatado em nenhum dos traços analisados. A única e principal diferença percebida entre os traços com elevados consumos de água e de cimento em relação aos demais foi o aumento significativo do seu abatimento (*slump*), como pode ser verificado nos dados demonstrados na tabela 15.

Neste sentido, para os concretos avaliados com mesma relação a/c, porém com diferentes volumes de pasta de cimento, devido à variação do consumo de água e do consumo de cimento, evidenciou-se um aumento no abatimento do concreto. Esta diferença analisada, na composição do compósito cimentício, propiciou uma redução do atrito entre os grãos dos agregados, com isso, melhorou a trabalhabilidade, majorando o abatimento do concreto.

Deste modo, definiu-se que para todos os traços estudados, os valores referentes aos seus abatimentos seriam de no mínimo 80 mm. Neste sentido, quando houve a necessidade de aumentar a trabalhabilidade do concreto, em razão de traços com baixo consumo de água (175 l/m³) e elevados teores de microfibras de PP (600 g/m³ e 900 g/m³), utilizou-se aditivo plastificante, em quantidades definidas durante o processo de mistura dos materiais.

Na tabela 16 são apresentadas as características dos concretos estudados, relevantes no processo de dosagem, como os fatores controláveis (tipo de cimento, consumo de água e teor de adição de microfibras de PP), consumo de cimento, traço unitário e parâmetros da mistura, como a relação água/materiais secos (H), o teor de argamassa (α), o abatimento do concreto e a quantidade de aditivo empregada, em massa, em relação à quantidade de

cimento. Cabe salientar, que a relação a/c manteve-se constante em 0,53 para todos os concretos avaliados.

Tabela 16: traços dos concretos empregados na pesquisa

TRAÇO	FATORES CONTROLÁVEIS			CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³)	TRAÇO UNITÁRIO				PARÂMETROS DA MISTURA			
	Tipo de cimento	Consumo de água (l/m ³)	Teor de adição de microfibras de PP (g/m ³)		cim	a	p	m	H (%)	α (%)	Abatimento (mm)	Aditivo (%)
1A	CP IV	175	0	330,2	1	2,56	2,92	5,48	8,18	55	80	-
2A	CP IV	175	300	330,2	1	2,56	2,92	5,48	8,18	55	90	0,17
3A	CP IV	175	600	330,2	1	2,56	2,92	5,48	8,18	55	80	0,30
4A	CP IV	175	900	330,2	1	2,56	2,92	5,48	8,18	55	60	0,33
5A	CP IV	190	0	359,0	1	2,30	2,70	5,00	8,83	55	120	-
6A	CP IV	190	300	359,0	1	2,30	2,70	5,00	8,83	55	95	-
7A	CP IV	190	600	359,0	1	2,30	2,70	5,00	8,83	55	80	0,17
8A	CP IV	190	900	359,0	1	2,30	2,70	5,00	8,83	55	80	-
9A	CP IV	205	0	386,8	1	2,03	2,48	4,51	9,62	55	180	-
10A	CP IV	205	300	386,8	1	2,03	2,48	4,51	9,62	55	140	-
11A	CP IV	205	600	386,8	1	2,03	2,48	4,51	9,62	55	110	-
12A	CP IV	205	900	386,8	1	2,03	2,48	4,51	9,62	55	105	-
1B	CP V	175	0	330,2	1	2,61	2,95	5,56	8,08	55	90	-
2B	CP V	175	300	330,2	1	2,61	2,95	5,56	8,08	55	115	-
3B	CP V	175	600	330,2	1	2,61	2,95	5,56	8,08	55	100	-
4B	CP V	175	900	330,2	1	2,61	2,95	5,56	8,08	55	80	0,38
5B	CP V	190	0	358,5	1	2,30	2,70	5,00	8,83	55	165	-
6B	CP V	190	300	358,5	1	2,30	2,70	5,00	8,83	55	125	-
7B	CP V	190	600	358,5	1	2,30	2,70	5,00	8,83	55	100	-
8B	CP V	190	900	358,5	1	2,30	2,70	5,00	8,83	55	125	0,36
9B	CP V	205	0	386,8	1	2,07	2,52	4,59	9,49	55	-	-
10B	CP V	205	300	386,8	1	2,07	2,52	4,59	9,48	55	160	-
11B	CP V	205	600	386,8	1	2,07	2,52	4,59	9,49	55	80	-
12B	CP V	205	900	386,8	1	2,07	2,52	4,59	9,49	55	120	-
1C	CP IV	175	0	330,2	1	2,56	2,92	5,48	8,18	55	80	-
2C	CP IV	175	450	330,2	1	2,56	2,92	5,48	8,18	55	80	0,79
3C	CP IV	175	900	330,2	1	2,56	2,92	5,48	8,18	55	60	0,33
4C	CP IV	190	0	359,0	1	2,30	2,70	5,00	8,83	55	120	-
5C	CP IV	190	450	359,0	1	2,30	2,70	5,00	8,83	55	80	0,51
6C	CP IV	190	900	359,0	1	2,30	2,70	5,00	8,83	55	80	-
7C	CP IV	205	0	386,8	1	2,03	2,48	4,51	9,62	55	180	-
8C	CP IV	205	450	386,8	1	2,03	2,48	4,51	9,62	55	90	-
9C	CP IV	205	900	386,8	1	2,03	2,48	4,51	9,62	55	105	-

Influência do consumo de água, do teor de adição de microfibras de polipropileno e do tipo de cimento no fenômeno da retração por secagem em concretos empregados em pisos.

3.3.2 Produção dos Concretos

A produção diária, correspondente ao número de traços de concreto moldados por dia, foi definida de forma aleatória. Esta aleatorização teve por finalidade reduzir qualquer interferência ou possibilidade de erro no processo de concretagem, minimizando os fatores de ruído presentes no experimento.

Contudo, a produção diária de concreto foi definida e, principalmente, limitada pelo número de fôrmas disponíveis para o ensaio de resistência à tração na flexão (NBR 12142/1994), com dimensões de 10 x 10 x 35cm. Desta forma, a moldagem dos concretos foi determinada pela capacidade do laboratório, contemplando, no máximo, quatro traços de concreto, os quais continham este ensaio.

A operação de mistura dos materiais foi realizada em uma betoneira de eixo inclinado, previamente imprimada com uma mistura de cimento, areia e água. A ordem de colocação dos materiais na betoneira seguiu um mesmo critério para todas as misturas de concreto. Os materiais foram misturados conforme este procedimento: agregado graúdo; 30% de água; cimento; 30% de água; agregado miúdo; 40% de água; microfibras de polipropileno, quando presentes no traço; e aditivo plastificante, quando necessário para melhorar a trabalhabilidade do concreto, atingindo o abatimento mínimo estabelecido (80mm).

O controle do abatimento do concreto foi realizado seguindo as prescrições da NBR 7223 (1992). As quantidades de aditivo necessárias para atingir o abatimento mínimo, juntamente com os valores obtidos no ensaio de abatimento de tronco de cone, são demonstradas na tabela 16.

Analisando a tabela 16, nota-se que no traço 4A (3C), o abatimento do concreto foi menor do que o valor mínimo estabelecido na pesquisa. Tal característica manteve-se mesmo com a adição de uma quantidade elevada de aditivo plastificante (91,3 g), se comparado com os demais traços com mesmo consumo de água, correspondente a 0,33% em relação à massa de cimento. Logo, pelo grande tempo de mistura dos materiais, julgou-se apropriado manter o abatimento de 60 mm.

A razão para a diminuição do abatimento, nos traços com elevados teores de adição de microfibras de PP, deve-se a possível formação de uma estrutura de rede no concreto, a qual reduz a possibilidade de segregação e os parâmetros de fluidez do material. As microfibras absorvem mais pasta de cimento, devido as suas características, desta forma aumentando a viscosidade da mistura e reduzindo o abatimento (CHEN; LIU, 2005).

Contrariamente, para o traço 9B, com consumo de água de 205 l/m^3 e sem adição de microfibras de polipropileno, não foi possível realizar o ensaio de abatimento de tronco de cone, uma vez que a mistura comportava-se como um concreto fluido. No entanto, não foi verificada a ocorrência de segregação do material, como era esperado segundo a verificação do comportamento fresco do concreto realizada anteriormente.

Durante a mistura dos materiais, as microfibras de polipropileno foram empregadas e separadas manualmente, a fim de facilitar a sua dispersão. Nenhum aditivo químico dispersante foi empregado com esta finalidade. No entanto, mesmo com o grande período de mistura dos materiais na betoneira, na realização dos ensaios experimentais, verificou-se a presença de grumos (tufos) de microfibras de polipropileno na matriz cimentícia, figura 17, principalmente nos traços com elevados teores de adição.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 17: tufos ou grumos de microfibras de polipropileno. (a) e (b): corpos-de-prova cilíndricos (9,5x19cm), correspondentes ao ensaio de resistência à compressão uniaxial. (c) e (d): corpos-de-prova prismáticos (7,5x7,5x28,5 cm), correspondentes ao ensaio de retração por secagem livre

As figura 17 (a) e (b) são de um corpo-de-prova cilíndrico, referente ao ensaio de resistência à compressão, do traço 12B, com consumo de água de 205 l/m³ e com 900 g/cm³ de microfibras de PP. Já as figura 17 (c) e (d) são de um corpo-de-prova prismático, correspondente ao ensaio de retração por secagem livre, do traço 4B, com consumo de água de 175 l/m³ e teor de adição de 900 g/m³. No detalhes das figuras (b) e (d) nota-se uma aglomeração das microfibras de polipropileno empregadas. Em alguns casos, esta aglomeração pode resultar em uma redução da capacidade para a qual a fibra foi empregada.

3.3.3 Moldagem dos Corpos-de-prova

Todos os corpos-de-prova, referentes a um determinado traço de concreto, foram moldados simultaneamente. O processo de adensamento adotado foi mecânico, com o auxílio de um vibrador de imersão (interno) com eixo rígido, seguindo as prescrições da norma NBR 5738 (2003). Anteriormente a este processo, aplicou-se desmoldante (óleo mineral) em todas as fôrmas, a fim de facilitar a desfôrma dos corpos-de-prova, após 24h.

Para o ensaio de resistência à compressão (NBR 5739/94) foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, de dimensões 9,5 x 19 cm, figura 18. Corpos-de-prova prismáticos, de dimensões 10 x 10 x 35 cm, figura 19, e 7,5 x 7,5 x 28,5 cm, figura 20, foram utilizados para os ensaios de resistência à tração na flexão (NBR 12142/94) e retração por secagem livre (ASTM C-157/93), respectivamente. Para o ensaio de retração por secagem restringida foram empregados corpos-de-prova circulares, figura 21, seguindo as prescrições da norma americana AASHTO PP34-99 (2005).



Figura 18: fôrma cilíndrica de 9,5 x 19 cm



Figura 19: fôrma prismática de 10 x 10 x 35 cm



Figura 20: fôrma prismática de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm



Figura 21: fôrma circular (anel)

Imediatamente após a moldagem, os corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos foram revestidos por um filme plástico, não reativo e não absorvente, a fim de evitar a perda de água do concreto para o ambiente externo. O corpo-de-prova correspondente ao ensaio de retração por secagem restringida foi revestido conforme especificações da norma americana, sendo descrito no item 3.4.2.2.

Os CP's referentes aos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão foram armazenados em superfície horizontal rígida e em ambiente livre da ação de intempéries, durante as primeiras 24 horas, figura 22. Os corpos-de-prova, correspondentes aos ensaios de retração por secagem livre e restringida, foram armazenados conforme as prescrições de suas correspondentes normas, sendo apresentados nos itens 3.4.2.1 e 3.4.2.2, respectivamente.



Figura 22: armazenamento dos corpos-de-prova após a moldagem

3.3.4 Procedimento de Cura

O procedimento de cura realizado em cada um dos ensaios será apresentado no item 3.4, onde é apresentado o método utilizado em cada um dos experimentos.

3.4 MÉTODOS DE ENSAIO

Os ensaios realizados foram divididos em experimentos correspondentes às propriedades mecânicas e às variações volumétricas da matriz cimentícia dos concretos estudados. Os métodos dos ensaios empregados na pesquisa serão detalhados nos itens apresentados a seguir.

3.4.1 Propriedades Mecânicas

A avaliação das propriedades mecânicas dos concretos estudados foi realizada a partir de ensaios de resistência à compressão uniaxial e de resistência à tração na flexão. Tais ensaios foram empregados com a finalidade de não só controlar tecnologicamente os compósitos analisados, mas também para avaliar a influência dos fatores controláveis nestas variáveis de resposta.

3.4.1.1 Resistência à compressão uniaxial (NBR 5739/94)

Para o ensaio de resistência à compressão uniaxial foram empregados moldes cilíndricos metálicos de dimensões 9,5 x 19 cm para a confecção dos corpos-de-prova. A moldagem dos corpos-de-prova foi realizada em duas camadas, com adensamento mecânico (vibrador de imersão) e posterior regularização da superfície, conforme prescrições da norma brasileira NBR 5738 (2003).

Como mencionado no item 3.3.3, os corpos-de-prova foram revestidos por um filme plástico transparente, imediatamente após o processo de moldagem, no local em que seriam armazenados durante as primeiras 24 horas. Neste ambiente de laboratório, livre da ação de intempéries, os CP's estavam livres da ação de intempéries. Posteriormente a este período os CP's foram desmoldados e armazenados em câmara úmida ($UR \geq 95\%$ e temperatura de 23 ± 2 °C) até a execução do ensaio.

Nas idades de 7, 28 e 91 dias foram ensaiados três corpos-de-prova, para cada traço de concreto moldado, totalizando 216 corpos-de-prova. Para este ensaio foi empregada uma prensa informatizada do modelo EMIC MCT30 PC 200i.

3.4.1.2 Resistência à tração na flexão (NBR 12142/94)

Para o ensaio de resistência à tração na flexão foram empregados moldes de madeira de dimensões 10 x 10 x 35cm para a confecção dos corpos-de-prova. A moldagem dos corpos-de-prova foi realizada da mesma forma que a empregada nos CP's cilíndricos, item 3.4.1.1, seguindo as especificações da norma NBR 5738 (2003).

Após a alocação dos CP's em uma superfície horizontal rígida e livre da ação de intempéries, eles foram revestidos por um filme plástico. Passadas as primeiras 24h, os CP's foram desmoldados e levados para a câmara úmida ($UR \geq 95\%$ e temperatura de 23 ± 2 °C), onde ficaram armazenados até a idade de execução do ensaio.

Nas idades de 7, 28 e 91 dias foram ensaiados três corpos-de-prova, para cada traço de concreto moldado, totalizando 216 corpos-de-prova. Para este ensaio empregou-se uma prensa analógica EMIC^G 120/24ton. O ensaio consistiu na aplicação controlada e contínua de uma carga vertical, na metade do comprimento da face de dimensão 10 x 35 cm, sendo o corpo-de-prova posicionado entre dois elementos de apoio (cutelos) na sua parte inferior e um elemento de apoio (cutelo) na sua parte superior, figura 23.



Figura 23: execução do ensaio de resistência à tração na flexão

3.4.2 Retração por Secagem

As variações volumétricas que a matriz cimentícia sofre devido ao fenômeno da retração por secagem foram avaliadas sob as formas livre e restringida. Com a realização destas duas formas do ensaio de retração por secagem, foi possível avaliar a influência dos fatores controláveis na magnitude da retração por secagem, bem como conjecturar sobre a tendência de fissuração do concreto.

Bissonnette; Pierre e Pigeon (1999) enfatizam em sua pesquisa a importância da realização de ensaios de retração livre. Para estes autores, a avaliação da distribuição das tensões nos

materiais cimentícios, devido ao fenômeno da retração, requer um conhecimento vinculado às variações volumétricas do material em sua forma livre.

Contudo, Tongaroonsri e Tangtermsirikul (2009) ressaltam que a realização de somente ensaios de retração livre é insuficiente para entender o comportamento da tendência de fissuração causada pelo fenômeno da retração por secagem em concretos. Portanto, a execução do ensaio de retração por secagem restringida é extremamente relevante, uma vez que auxilia na avaliação do comportamento real desta tendência de fissuração do concreto. Este parâmetro é extremamente significativo, uma vez que, na prática, todos os elementos estão restringidos de alguma maneira.

Da mesma forma, a execução de ambos os ensaios de retração por secagem auxiliou na verificação de possíveis correlações existentes entre as formas livre e restringida. Tal comportamento foi evidenciado em pesquisa realizada por Mokarem, Weyers e Lane (2005), auxiliando no entendimento do comportamento dos concretos estudados.

Os métodos de ensaio da retração por secagem livre e restringida serão apresentados nos itens 3.4.2.1 e 3.4.2.2, respectivamente.

3.4.2.1 Retração por secagem livre (ASTM C-157/93)

O método de ensaio de retração por secagem livre seguiu as determinações da norma americana ASTM C-157 (1993). Para este ensaio foram empregadas fôrmas prismáticas metálicas com dimensões de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm para a confecção dos corpos-de-prova. A moldagem dos corpos-de-prova foi realizada, simultaneamente, com os demais moldes, consistindo no preenchimento das fôrmas em duas camadas, com o auxílio de um vibrador de imersão para o processo de adensamento, com posterior regularização da superfície, seguindo as prescrições da NBR 5738 (2003).

Após este processo, os corpos-de-prova foram revestidos por um filme plástico e levados para a câmara úmida ($UR \geq 95\%$ e temperatura de 23 ± 2 °C), onde ficaram armazenados durante as primeiras 24h. Na câmara úmida, os CP's receberam uma proteção, a fim de evitar que gotas, formadas pela condensação da água, pudessem danificá-los.

Posteriormente às 24h, os CP's foram retirados dos moldes e colocados em um recipiente com água (temperatura ambiente) saturada em cal, onde passaram por um processo de cura submersa, durante o período de 7 dias. Passados os primeiros 30 minutos da cura submersa, realizou-se a primeira leitura ou leitura referência para cada um dos corpos-de-prova, sendo esta considerada como a deformação inicial do concreto. Este processo de leitura foi realizado em um corpo-de-prova de cada vez, respeitando as seguintes etapas:

- a) retirada do CP do recipiente de água saturada em cal;
- b) leve secagem do CP, com pano úmido;
- c) realização de 3 leituras da variação dimensional de cada CP (deformação zero), com auxílio de um relógio comparador digital horizontal, com precisão de milésimo de mm, figura 24;
- d) devolução do CP para o recipiente de água saturada em cal.



Figura 24: variação unidimensional - deformação referência (inicial)

Este mesmo processo foi repetido para as idades de 4 e 7 dias. Posteriormente a 3ª leitura, referente ao 7º dia, os corpos-de-prova foram levados para uma câmara climatizada, onde ficaram armazenados ao ar, com temperatura ($23 \pm 1,7 \text{ }^\circ\text{C}$) e umidade ($50 \pm 4\%$) controladas, conforme especificações da norma ASTM C-157 (1993).

Na câmara climatizada, os corpos-de-prova foram dispostos sob suportes vazados, de modo que o processo de secagem ocorresse em suas seis faces, figura 25. Leituras foram realizadas aos 14, 28, 56 e 112 dias, figura 26, seguindo as recomendações da norma ASTM C-157 (1993).



Figura 25: processo de secagem – câmara climatizada



Figura 26: leitura da variação unidimensional (retração por secagem livre)

Três leituras da variação unidimensional livre dos concretos foram realizadas para cada um dos corpos-de-prova, em todas as idades de leitura definidas, sendo utilizada a média das leituras, em cada idade, para o cálculo da deformação total livre dos concretos. Cabe salientar que as três leituras realizadas para um mesmo CP, em uma dada idade, mantinham-se semelhantes, assim evitando a ocorrência de erros durante a execução do ensaio. Segundo a norma americana ASTM C-157 (1993) a variação unidimensional total livre do concreto é calculada a partir da equação 4.

$$\Delta L_x = \frac{L_{jc} - L_{oc}}{G} * 100 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

ΔL_x – deformação unidirecional, após a desforma (%);

L_{jc} – leituras no aparelho comparador, na idade j (dias);

L_{oc} – leitura inicial no aparelho comparador, deformação zero, após a desforma;

G – comprimento inicial entre as extremidades internas dos pinos metálicos, antes da moldagem.

Para este ensaio foram moldados 2 corpos-de-prova prismáticos para cada traço de concreto, resultando em 48 corpos-de-prova para o ensaio de retração por secagem livre.

3.4.2.2 Retração por secagem restringida (AASHTO PP34-99/05)

O método do ensaio de retração por secagem restringida seguiu as recomendações da norma americana AASHTO PP34-99 (2005). Este ensaio consistiu na avaliação da magnitude do fenômeno da retração por secagem, de forma restringida às variações

dimensionais do concreto, bem como a sua tendência de fissuração devido a este fenômeno.

O molde utilizado neste ensaio foi desenvolvido e seguiu as prescrições da norma americana, porém com algumas adaptações, devido aos materiais disponíveis no mercado nacional. Pequenas alterações estão relacionadas com os materiais empregados na confecção do equipamento, contudo a principal diferença entre o equipamento normalizado e o empregado na pesquisa está na dimensão interna da fôrma externa do molde (fôrma de PVC).

Na norma americana a dimensão especificada é de 457 mm, porém, empregou-se uma fôrma de PVC, com diâmetro interno de 450 mm. As dimensões da fôrma interna (aço) e da base do molde (madeira) seguiram as prescrições da norma americana. A figura 27 apresenta, esquematicamente, as dimensões do molde utilizado para o ensaio de retração por secagem restringida.

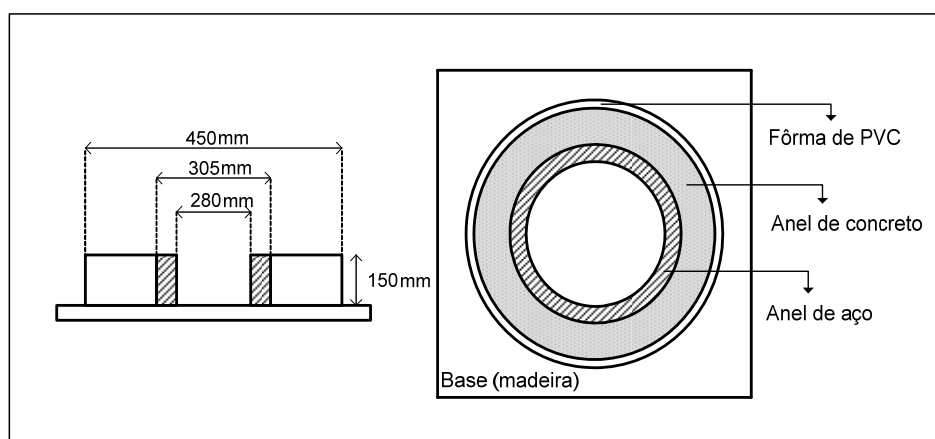


Figura 27: equipamento do ensaio de retração restringida, baseado na norma AASHTO PP34-99 (2005)

A primeira etapa deste ensaio consistiu na instrumentação da forma interna de aço (anel) e posteriormente, na preparação do molde para o processo de moldagem do concreto. A fase de instrumentação do anel resumiu-se na colagem de quatro extensômetros elétricos na face interna do anel de aço. Tal processo de instrumentação seguiu as seguintes etapas, para cada um dos extensômetros:

- a) marcação da posição, na face interna do anel de aço, na qual será colado o extensômetro elétrico, sendo estas posições equidistantes;
- b) lixamento do anel de aço, na posição previamente marcada, até a obtenção de uma superfície livre de rugosidades (figura 28);

- c) limpeza da superfície interna do anel de aço;
- d) marcação exata do posicionamento do extensômetro, na face interna do anel de aço, sendo esta na metade da altura (figura 29);
- e) limpeza da superfície, na posição exata da colagem do extensômetro elétrico (figura 30);

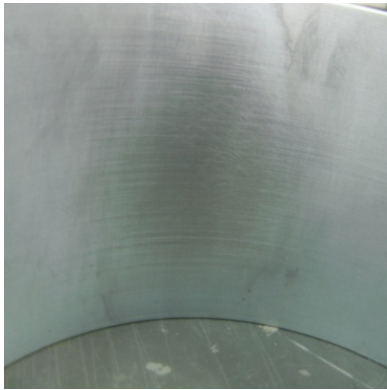


Figura 28: processo de lixamento da superfície interna do anel de aço

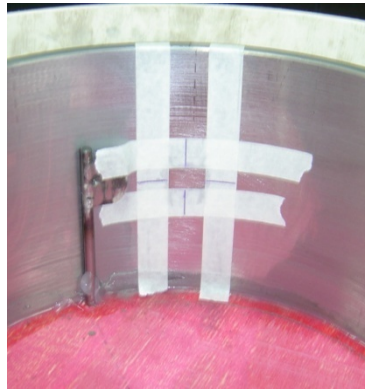


Figura 29: marcação do posicionamento de colagem



Figura 30: limpeza da superfície (exata) de colagem

- f) colagem do extensômetro elétrico, podendo este estar sujeito a esforços de compressão (figura 31) ou de tração (figura 32);
- g) colagem do terminal elétrico (figura 33);

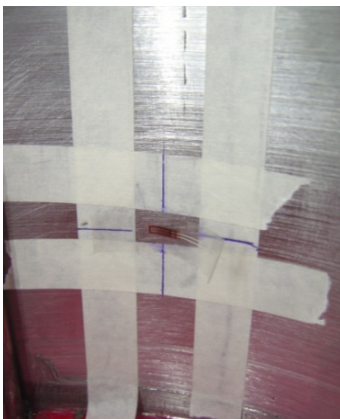


Figura 31: extensômetro sujeito a esforços de compressão

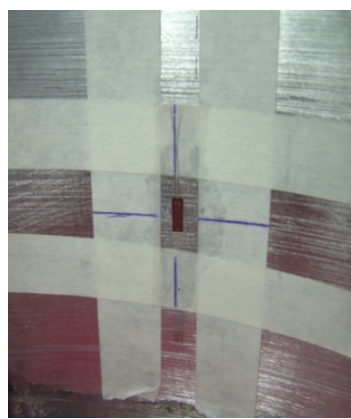


Figura 32: extensômetro sujeito a esforços de tração

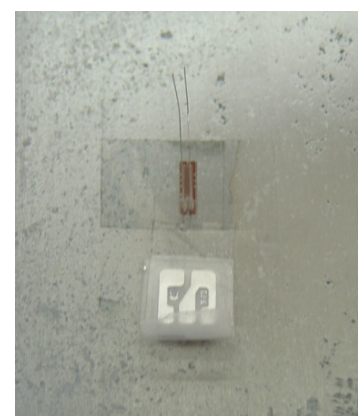
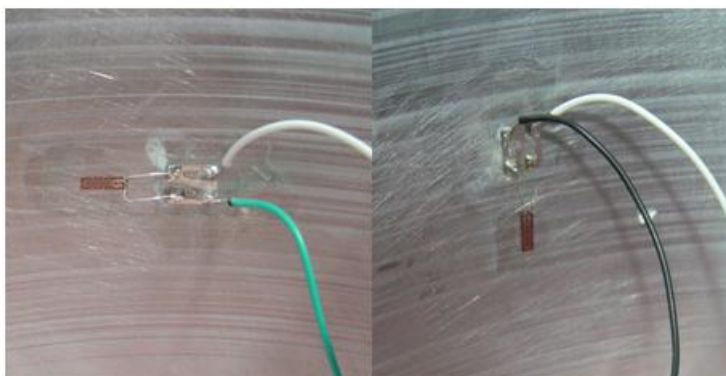


Figura 33: colagem do terminal elétrico

- h) soldagem (estanho) do extensômetro elétrico ao terminal elétrico;
- i) soldagem dos fios (dois) no terminal elétrico (figuras 34);

- j) formação do circuito elétrico – denominado como ponte de *Wheatstone*, sendo esta completa, pois é formada por quatro extensômetros elétricos, figura 35.



Figuras 34: extensômetros elétricos, terminais e fios soldados (posicionamento dos extensômetros frente a esforços de compressão e de tração)

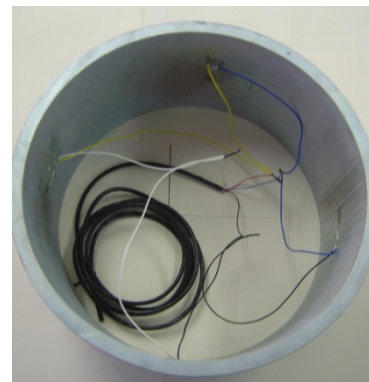


Figura 35: instrumentação completa do anel

A norma americana recomenda que as leituras das tensões sofridas pelo anel de aço sejam realizadas, separadamente, em cada um dos extensômetros elétricos. No entanto, como a pesquisa pretende avaliar, comparativamente, os concretos estudados, e, conjuntamente, devido ao número limitado de aparelhos para aquisição de dados, optou-se em empregar uma ponte de *Wheatstone* completa para cada um dos moldes, assim obtiveram-se valores médios das tensões sofridas pelo anel de aço.

Com o processo de instrumentação completo, passou-se para a etapa de preparação do equipamento. Primeiramente, revestiu-se a base de madeira com um filme plástico, a fim de torná-la uma superfície totalmente impermeável. Após este processo, as fôrmas interna (anel de aço) e externa (anel de PVC) foram posicionadas em seus locais pré-determinados com o auxílio de pinos metálicos, e, posteriormente, vedadas à base de madeira, com material selante, silicone, (figura 36), de forma a evitar a perda de pasta de cimento nos momentos de concretagem e adensamento do concreto.

A figura 37 mostra o filme plástico utilizado como revestimento à base de madeira e o selamento realizado nos moldes. No detalhe é demonstrado o pino metálico externo ao anel de PVC (fôrma externa). O plástico foi alocado desta forma a fim de maximizar a aderência entre o material selante e a base de madeira, evitando com que ocorresse perda de pasta de cimento. Na figura 38 é apresentada a fôrma finalizada, pronta para o processo de moldagem do corpo-de-prova. Nota-se que a parte interna do anel de aço foi protegida, com

o auxílio de uma placa de isopor, a fim de evitar qualquer prejuízo à instrumentação deste anel.

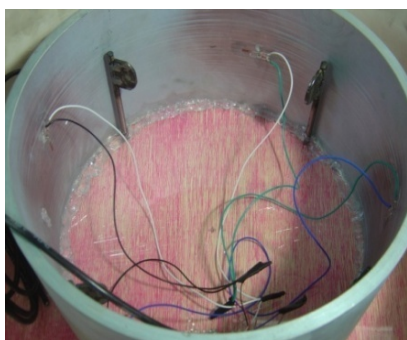


Figura 36: instrumentação e selamento concluídos – anel interno



Figura 37: detalhes de proteção e selamento



Figura 38: molde finalizado

Com os processos de instrumentação e preparação finalizados, os moldes foram armazenados ao ar, em uma câmara climatizada com temperatura ($23 \pm 1,7$ °C) e umidade ($50 \pm 4\%$) controladas, onde ficaram durante todo o período de ensaio, conforme prescrições da norma americana AASHTO PP34-99 (2005). Na câmara climatizada, os moldes, através de sua ponte de *Wheatstone* (completa), foram ligados a um sistema de aquisição e registro de dados, o qual permaneceu ligado até o final do ensaio, emitindo sinais a cada 2 minutos, ou seja, as leituras foram realizadas neste intervalo de tempo.

Esta etapa do trabalho foi realizada, aproximadamente, 24 horas antes do processo de concretagem, possibilitando a estabilização das leituras de cada um dos extensômetros elétricos, já que variáveis como a temperatura e a umidade poderiam afetá-las. As leituras obtidas neste período correspondem ao estado de deformação zero do anel de aço.

Os corpos-de-prova foram moldados na câmara climatizada, figura 39, assim evitando que variações de temperatura e umidade pudessem afetar os valores de leitura dos extensômetros elétricos. O processo de cura inicial foi realizado segundo recomendações da AASHTO PP34-99 (2005), onde o corpo-de-prova foi coberto por um plástico espesso e por sacas de aniagem úmidas, evitando que a secagem ocorresse neste período inicial, figura 40.



Figura 39: processo de concretagem dos CP's



Figura 40: processo de cura inicial

Posteriormente ao processo de cura inicial, decorrido nas primeiras 24 horas, o corpo-de-prova de concreto foi desformado. O processo de desmoldagem consistiu na retirada, através de corte, da fôrma externa de PVC, sendo este realizado facilmente, devido ao emprego de desmoldante, e sem qualquer variação nas leituras dos extensômetros elétricos. A fôrma interna, anel de aço, permaneceu como núcleo durante o período de ensaio, uma vez que ela é a restrição às tensões geradas pelo fenômeno da retração por secagem.

Na literatura, encontra-se a possibilidade de dois tipos de realização do processo de secagem para os corpos-de-prova deste ensaio, sendo estes pela superfície (*top and bottom*) ou pelas laterais do anel de concreto. Porém, a norma AASHTO PP34-99 (2005) especifica o processo de secagem como sendo pelas laterais do corpo-de-prova. A figura 41 demonstra esquematicamente este processo de secagem.

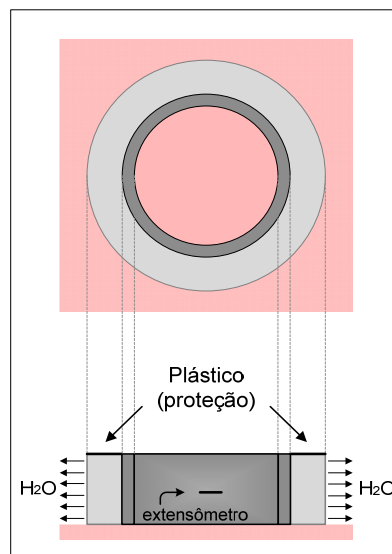


Figura 41: representação esquemática do processo de secagem

Assim, após a desmoldagem do corpo-de-prova, um plástico espesso foi colado na face superior do anel de concreto, limitando o processo de secagem às laterais do corpo-de-prova, unicamente. Na figura 42 é demonstrada a cobertura utilizada (plástico) durante o processo de secagem do concreto.



Figura 42: processo de secagem dos corpos-de-prova correspondentes ao ensaio de retração por secagem restringida

Leituras das tensões no anel de aço, devido às deformações do concreto, foram realizadas a cada 2 minutos de forma ininterrupta até os 120 dias, para cada um dos corpos-de-prova. Durante todo o período de ensaio, os anéis de concreto foram inspecionados com o auxílio de uma luz fluorescente e lupa, a fim de verificar a formação de fissuras. Para este ensaio foi moldado um corpo-de-prova para cada traço de concreto, resultando em 9 corpos-de-prova para o ensaio de retração por secagem restringida.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão uniaxial, resistência à tração na flexão, retração por secagem livre e retração por secagem restringida. Conjuntamente, é realizada uma análise dos resultados obtidos, buscando verificar se os objetivos propostos no estudo foram atingidos através dos ensaios realizados.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

A resistência à compressão uniaxial é uma propriedade de grande relevância na avaliação de estruturas de concreto, uma vez que ela dá uma boa indicação da qualidade do material, pelo fato de estar relacionada com a pasta de cimento endurecida. Logo, em projetos estruturais e no controle tecnológico, esta propriedade é o parâmetro mais valorizado, pois está diretamente relacionada à capacidade do elemento em resistir a esforços sem que ocorra ruptura. Segundo Neville (1997), a porosidade da matriz e a zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo são os fatores que determinam a resistência dos concretos mais utilizados.

Os resultados da resistência à compressão uniaxial média dos traços estudados, para as idades de análise, são apresentados na tabela 17. No apêndice A encontram-se todos os resultados correspondentes a este ensaio.

Tabela 17: resultados médios do ensaio de resistência à compressão uniaxial

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (MPa) -VALORES MÉDIOS									
	Traços (Cag - Fib)	Idades analisadas (dias)				Traços (Cag - Fib)	Idades analisadas (dias)		
		7	28	91			7	28	91
CIMENTO POZOLÂNICO	175-0	16,6	22,8	29,3	CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL	175-0	30,1	37,0	45,7
	175-300	17,8	25,1	34,2		175-300	31,0	41,8	47,9
	175-600	16,1	25,4	33,3		175-600	28,8	36,0	44,7
	175-900	16,3	19,7	34,4		175-900	30,2	33,4	42,3
	190-0	15,8	22,6	28,6		190-0	30,4	35,1	41,5
	190-300	17,0	23,4	32,2		190-300	31,3	36,1	42,9
	190-600	19,2	29,0	39,0		190-600	28,6	35,4	43,2
	190-900	17,6	20,3	29,1		190-900	31,4	36,8	46,3
	205-0	17,2	26,6	33,2		205-0	29,0	36,1	43,6
	205-300	17,4	25,8	33,3		205-300	26,9	36,1	45,2
	205-600	16,7	25,5	33,6		205-600	27,7	36,6	43,0
	205-900	17,2	23,8	32,4		205-900	26,3	34,2	45,0

Os resultados de resistência à compressão foram analisados estatisticamente, excluindo os dados espúrios, para os traços estudados, procurando avaliar a influência dos fatores independentes nos concretos produzidos. Na pesquisa foi considerado dado espúrio aquele que não pertencia ao intervalo médio mais ou menos um desvio padrão. Os fatores avaliados foram o consumo de água, o teor de adição de microfibras de polipropileno, o tipo de cimento e as idades de análise.

Os resultados foram analisados através do método de análise de variância (ANOVA). Tal análise foi realizada com o intuito de verificar se os fatores controláveis (consumo de água, teor de adição de microfibras de PP, tipo de cimento e idade) e suas interações seriam significativos, na variável de resposta (resistência à compressão uniaxial) medida.

A análise de variância dos dados experimentais, correspondentes a esta variável de resposta, através da ANOVA, são demonstradas na tabela 18. Nesta análise foram considerados os efeitos isolados de cada um dos fatores controláveis, bem como as interações entre eles.

Tabela 18: análise de variância (ANOVA) – resistência à compressão uniaxial

	GDL	MQ	F (calc)	p	SIGNIFICÂNCIA
Tipo de cimento (1)	1	7710,1	5199,3	0,000000	S
Consumo de água (2)	2	2,2	1,5	0,234748	NS
Fibras (3)	3	17,3	11,6	0,000001	S
Idade (4)	2	4077,8	2749,9	0,000000	S
Tcim x Cagua	2	14,6	9,8	0,000099	S
Tcim x Fib	3	19,5	13,1	0,000000	S
Cagua x Fib	6	10,1	6,8	0,000002	S
Tcim x Id	2	3,0	2,0	0,134121	NS
Cagua x Id	4	10,1	6,8	0,000048	S
Fib x Id	6	9,2	6,2	0,000008	S
Tcim x Cagua x Fib	6	11,2	7,5	0,000000	S
Tcim x Cagua x Id	4	1,0	0,6	0,629665	NS
Tcim x Fib x Id	6	1,4	0,9	0,470379	NS
Cagua x Fib x Id	12	1,3	0,9	0,555338	NS
1 x 2 x 3 x 4	12	4,8	3,2	0,000402	S
Erro	144	2,36			

GDL: grau de liberdade (n-1) MQ: média quadrática F(calc): valor calculado de F p: nível de significância
S: valor significativo NS: valor não significativo

Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Analisando a tabela 18 nota-se que os efeitos isolados dos fatores controláveis foram significativos na variável de resposta, a exceção da variável consumo de água, que segundo a análise mostrou-se não significativa. Da mesma forma, os efeitos de 2° ordem mostraram-se significativos, exceto a interação entre o tipo de cimento e a idade (Tcim x Id).

Com relação aos efeitos de terceira ordem, verificou-se a sua não significância em relação à variável de resposta analisada, com exceção da interação entre o tipo de cimento, o consumo de água e o teor de adição de microfibras de polipropileno (Tcim x Cag x Fib), a qual foi significativa, mas com uma influência pequena nos resultados. Da mesma forma, a interação de quarta ordem mostrou-se significativa, porém com uma influência muito pequena nos resultados.

A seguir são analisados os efeitos significativos das variáveis controláveis, bem como de suas interações, os quais tiveram uma influência expressiva na análise de variância (ANOVA) realizada.

4.1.1 Efeito do Tipo de Cimento (Tcim) na Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto

O tipo de cimento empregado na mistura é um fator extremamente importante a ser considerado na dosagem do concreto, uma vez que as características de cada tipo de cimento são bastante diferenciadas. Parâmetros como o ganho de resistência mecânica inicial devido à velocidade das reações de hidratação da matriz cimentícia, bem como a resistência final e o teor de adição de pozolanas, entre outros, diferenciam os tipos de cimentos.

A figura 43 demonstra a tendência de comportamento do tipo de cimento sobre a resistência à compressão uniaxial do concreto, para os traços estudados. Esta figura foi obtida com os resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial, de todos os traços estudados e para todas as idades consideradas, na análise de variância (ANOVA).

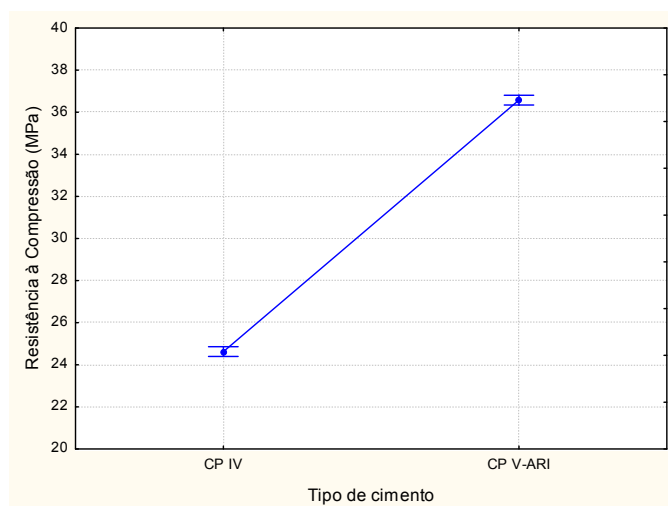


Figura 43: efeito isolado do tipo de cimento na resistência à compressão uniaxial do concreto

De acordo com o gráfico, nota-se a grande influência do tipo de cimento na resistência à compressão uniaxial dos concretos analisados. Através do teste ANOVA, verificou-se que os resultados deste ensaio para os concretos produzidos com cimento pozolânico diferem significativamente dos produzidos com cimento de alta resistência inicial.

Este comportamento era esperado, uma vez que a hidratação do cimento pozolânico ocorre de forma mais lenta, afetando diretamente a porosidade do compósito, e, conseqüentemente, a resistência à compressão. Neste sentido, a resistência final do concreto foi inferior devido não só a fatores relacionados com a velocidade das reações de hidratação do cimento, a menor quantidade de clínquer na composição do cimento, em

função da substituição por pozolanas, bem como o menor teor de C_3S , mas também com as propriedades de resistência do cimento, demonstradas na tabela 8.

No entanto, vale ressaltar que os resultados obtidos nestas análises mostram apenas uma tendência do comportamento da variável controlável tipo de cimento frente à resistência à compressão do concreto, e que outros fatores também estão envolvidos, como o teor de adição de microfibras de polipropileno e a idade, apresentados nos item 4.1.2. e 4.1.3, respectivamente.

4.1.2 Efeito do Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno (Fib) na Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto

A figura 44 representa o gráfico da influência isolada do teor de adição de microfibras de polipropileno sobre a resistência à compressão uniaxial dos concretos estudados. O gráfico foi obtido a partir dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial, de todos os traços estudados em todas as idades avaliadas, na análise de variância (ANOVA).

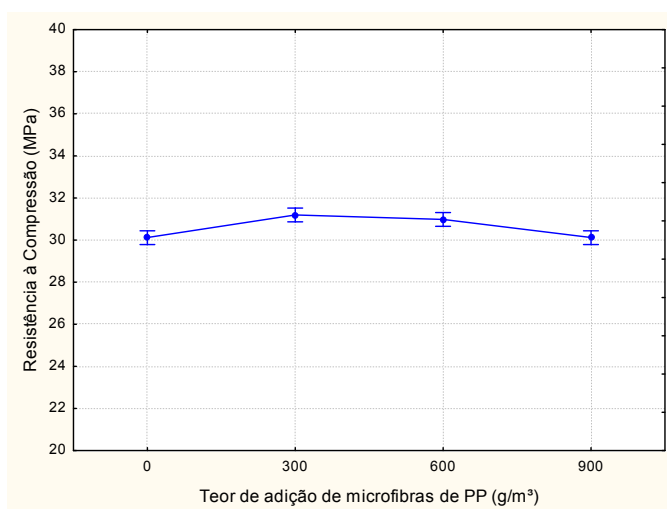


Figura 44: efeito isolado do teor de adição de microfibras de PP na resistência à compressão uniaxial do concreto

Segundo o gráfico, nota-se um aumento na resistência à compressão uniaxial dos traços de concreto produzidos com teores de adição de microfibras de polipropileno de 300 g/m³ e 600 g/m³. Tal aumento, possivelmente, pode ter ocorrido devido à capacidade das microfibras de PP de amarrarem as microfissuras iniciais do concreto, assim retardando a ruptura do corpo-de-prova e majorando a resistência do mesmo.

No entanto, quando adicionada uma maior quantidade de microfibras de PP à mistura (900 g/m³), os resultados de resistência à compressão do concreto foram prejudicados. Este

comportamento pode ser atribuído ao difícil processo de mistura, quando em presença de elevados teores de microfibras de PP no concreto e da dificuldade na moldagem dos corpos-de-prova. Tal problemática resultou na presença de agrupamentos (tufos) de microfibras de polipropileno na matriz cimentícia, demonstrados na figura 17, as quais possivelmente contribuíram para que o concreto reduzisse a sua capacidade de resistir aos esforços de compressão.

Tal fato foi fortemente evidenciado nos traços produzidos com cimento pozolânico e baixo consumo de água (175 l/m^3), assim, com uma menor quantidade de pasta de cimento na mistura. Desta forma, como mencionado, a adição de 900 g/m^3 de microfibras de PP prejudicou a mistura, fazendo com que houvesse dificuldade na moldagem dos corpos-de-prova, e, conseqüentemente, menores resultados de resistência à compressão. A figura 45 demonstra tal comportamento para os traços produzidos com cimento pozolânico.

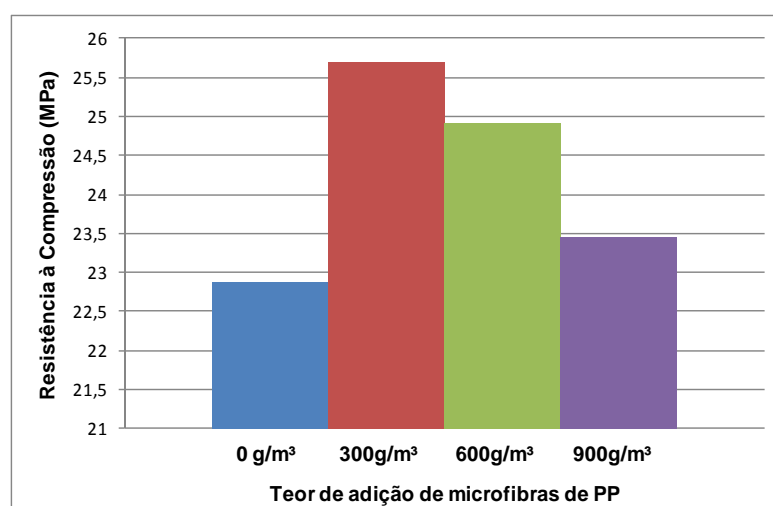


Figura 45: influência das microfibras de PP na resistência à compressão uniaxial, para os traços produzidos com cimento pozolânico e consumo de água de 175 l/m^3

Uma forma de minimizar esta problemática, referente à dificuldade de dispersão das microfibras de polipropileno na mistura, pode ter sido a utilização de aditivo químico. Como mencionado anteriormente, item 3.3.1, este material foi incorporado à mistura somente quando houve a necessidade de aumentar a trabalhabilidade do material, ou seja, aumentar o abatimento do concreto.

Esta tendência de comportamento foi verificada, principalmente nos traços produzidos com cimento pozolânico e com consumo de água de 190 l/m^3 . Nestes casos, o traço de concreto produzido com a incorporação de aditivo químico, isto é, o traço com teor de adição de microfibras de PP de 600 g/m^3 , teve sua resistência à compressão uniaxial maximizada.

Este fato pode ter ocorrido devido à melhora na dispersão das microfibras, com a presença de aditivo químico na mistura.

Na figura 46, verifica-se um descolamento entre os resultados de resistência à compressão uniaxial do traço produzido com a incorporação de aditivo químico em relação aos demais, em todas as idades analisadas. Este fato demonstra que os dados obtidos para o traço com teor de adição de 600 g/m³ de microfibras de PP foram superiores aos demais traços de concreto avaliados, com mesmo consumo de água.

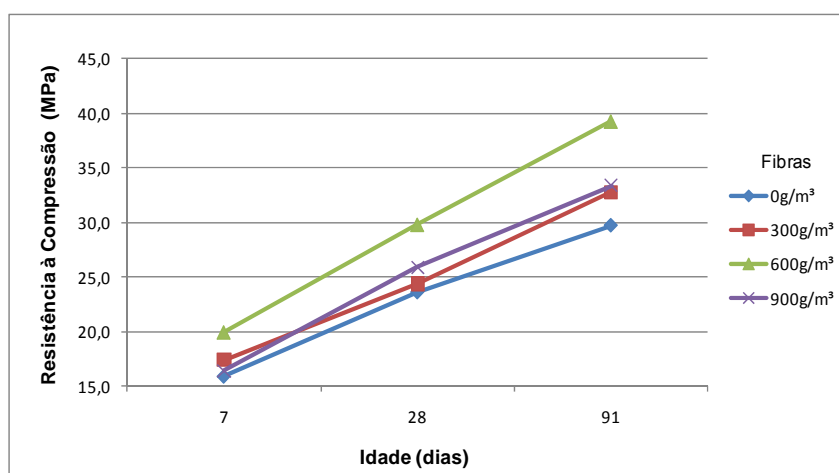


Figura 46: efeito da presença de aditivo na resistência à compressão, para os traços produzidos com cimento pozolânico e consumo de água de 190l/m³

A partir de uma análise estatística através do teste de Fisher, verificou-se que os resultados dos traços com teores intermediários de adição de microfibras de PP não apresentaram diferença significativa entre seus resultados. Igualmente ao observado nos traços sem adição e com adições de 900 g/m³ de microfibras. Contudo, os resultados deste ensaio entre estes dois grupos demonstraram-se significativos entre si.

Os resultados de resistência à compressão uniaxial dos traços de concreto com teores de adição de 300 g/m³ e 600 g/m³ apresentaram um leve aumento, cerca de 5%, em relação aos demais traços estudados. Este comportamento também foi evidenciado em pesquisa realizada por Hsie, Tu e Song (2008), onde os concretos reforçados com microfibras de polipropileno (*staple fiber*) tiveram um aumento na resistência à compressão uniaxial de 3,15%.

Contudo, é relevante ressaltar que os resultados obtidos nestas análises mostram apenas uma tendência do comportamento da variável controlável correspondente ao teor de adição

de microfibras de polipropileno frente à resistência à compressão uniaxial do concreto, e que outros fatores também estão envolvidos, como o consumo de água, o tipo de cimento e a idade.

4.1.3 Efeito da Idade na Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto

O efeito isolado do fator controlável idade sobre a variável de resposta analisada, para todos os traços estudados, é demonstrado na figura 47. Observa-se que a resistência à compressão uniaxial cresce com o aumento da idade do concreto, conforme esperado. Este comportamento ocorre devido às reações de hidratação do cimento, que ocorrem ao longo do tempo, assim resultando em um aumento da resistência à compressão uniaxial do concreto com o passar do tempo.

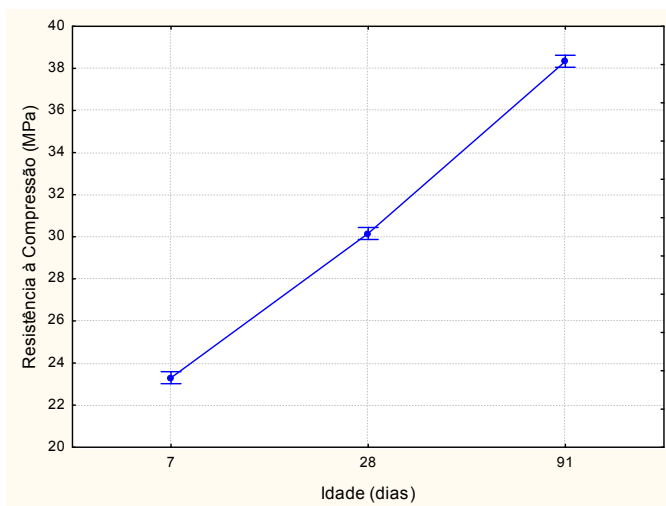


Figura 47: efeito isolado da idade na resistência à compressão uniaxial do concreto

Conjuntamente, realizou-se uma análise estatística pelo método do teste de Fisher. Esta análise demonstrou diferença significativa entre os resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial nas três idades analisadas. O crescimento da resistência dos 7 aos 28 dias foi de aproximadamente 30%. Já o aumento da resistência dos 28 para os 91 dias foi levemente menor, cerca de 27%.

4.1.4 Efeito da Interação TcimxCag na Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto

A influência da interação entre o tipo de cimento e o consumo de água frente à resistência à compressão uniaxial dos concretos estudados são apresentados na figura 48. As figuras foram plotadas com os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão uniaxial,

de todos os traços estudados em todas as idades avaliadas, na análise de variância (ANOVA).

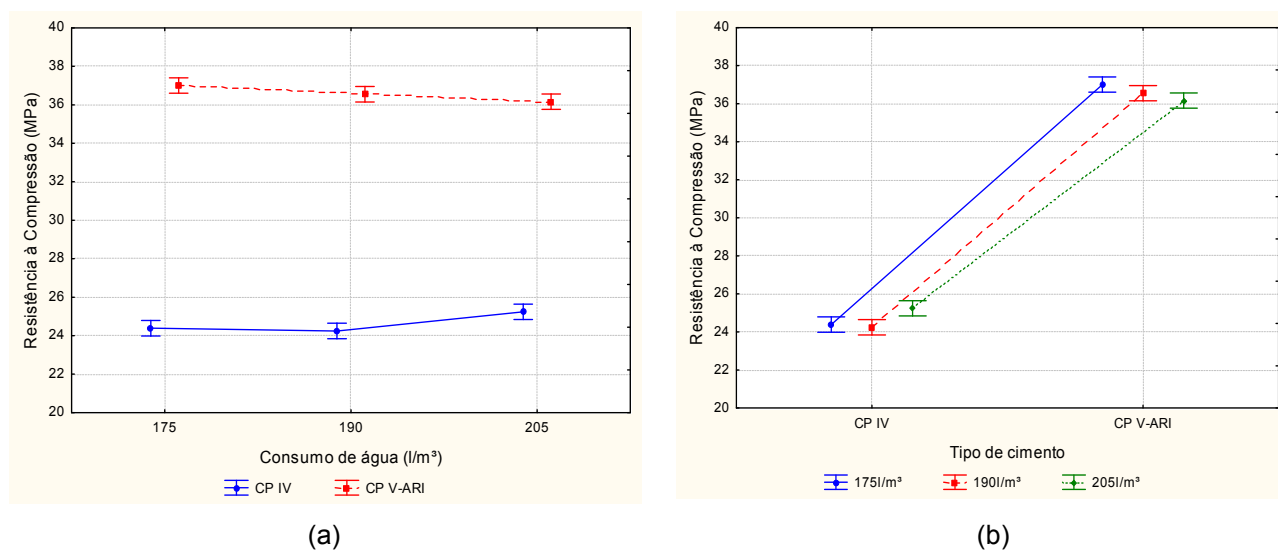


Figura 48: efeito da interação entre o tipo de cimento e o consumo de água sobre a resistência à compressão uniaxial do concreto. (a) resistência à compressão (MPa) x consumo de água (l/m³). (b) resistência à compressão (MPa) x tipo de cimento

Analisando as figuras, verificam-se comportamentos diferenciados para os dois cimentos empregados na pesquisa, na avaliação desta interação. Para os traços produzidos com cimento CP V-ARI, nota-se um leve decréscimo na resistência à compressão uniaxial dos concretos, com o aumento do consumo de água da mistura. Comportamento esperado, uma vez que para a mesma relação a/c (0,53), o concreto com maior consumo de água origina um aumento na porosidade da matriz cimentícia, resultante das reações volumétricas químicas, assim reduzindo a resistência à compressão do composto (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Para os concretos produzidos com cimento pozolânico, este comportamento manteve-se nos traços produzidos com consumos de água de 175 l/m³ e 190 l/m³. No entanto, para as misturas onde se utilizou consumo de água de 205 l/m³ a resistência à compressão foi majorada. Acredita-se que este fato pode ter ocorrido devido ao aumento do volume de pasta de cimento da mistura, o qual possivelmente auxiliou na dispersão das microfibras de polipropileno, assim aumentando, levemente, a resistência à compressão do concreto.

Analisando estatisticamente os resultados obtidos através do teste de Fisher, observa-se, para os concretos produzidos com cimento pozolânico, uma diferença significativa entre os resultados dos traços com consumo de água na mistura de 205 l/m³, em relação aos demais concretos produzidos com cimento CP IV. Para as misturas contendo cimento de alta

resistência inicial, mostrou-se significativa a diferença entre os resultados dos traços com consumos de água extremos, ou seja, entre os concretos com consumos de 175 l/m³ e 205 l/m³.

4.1.5 Efeito da Interação TcimxFib na Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto

A figura 49 apresenta o efeito da interação entre o tipo de cimento e o teor de adição de microfibras de polipropileno sobre a resistência à compressão uniaxial dos concretos estudados. Estas foram obtidas com os resultados alcançados no ensaio de resistência à compressão uniaxial, de todos os traços estudados em todas as idades avaliadas, na análise de variância (ANOVA).

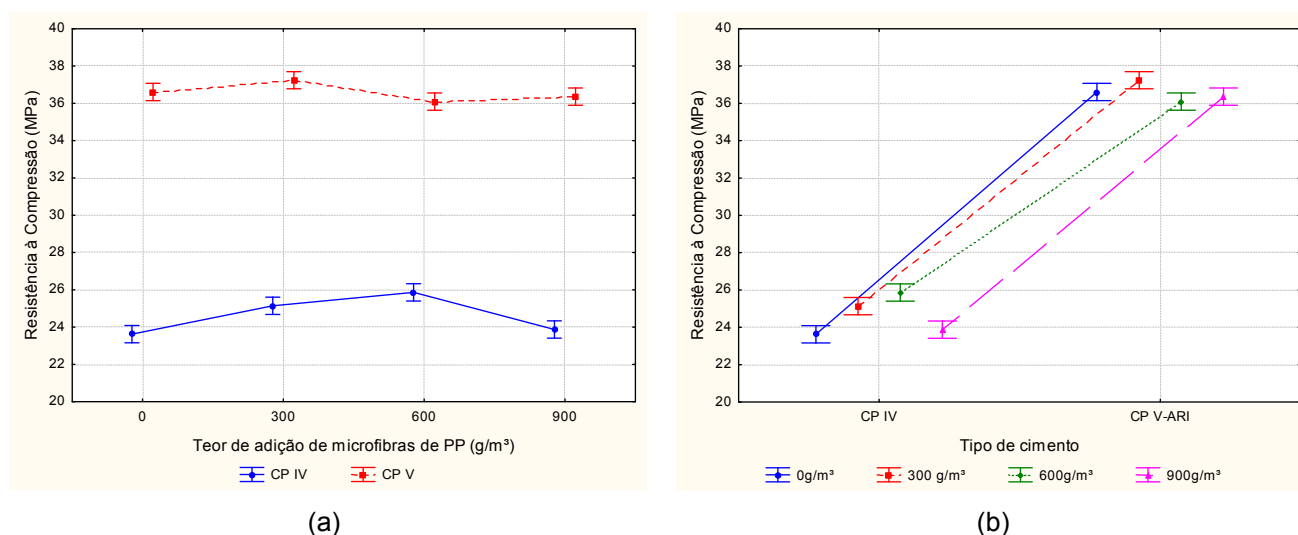


Figura 49: efeito da interação entre o tipo de cimento e o teor de adição de microfibras de PP sobre a resistência à compressão uniaxial do concreto. (a) resistência à compressão (MPa) x teor de adição de microfibras de PP (g/m³). (b) resistência à compressão (MPa) x tipo de cimento

De acordo com as figuras, observa-se que para os traços produzidos com cimento CP V-ARI, o aumento na resistência à compressão do concreto ocorre com a adição de 300g/m³ de microfibras de PP. Contudo, quando teores de adição de microfibras mais elevados são adicionados, a resistência reduz de forma significativa, quando analisada estatisticamente, através do teste de Fisher.

Este comportamento pode ser explicado a partir das propriedades do cimento, como o formato de grão. Por tratar-se de um material com formato de grão poliédrico, a inserção de elevados teores de microfibras de PP, possivelmente, dificultou o processo de mistura dos materiais. Desta forma, foi evidenciado que os concretos produzidos com este tipo de cimento suportaram adições de até 300 g/m³, para os materiais empregados na pesquisa.

No entanto, os concretos produzidos com cimento pozolânico suportaram teores de adição de até 600 g/m^3 , aumentando a resistência à compressão do concreto. Fato explicado pela maior facilidade de mistura e moldagem dos traços produzidos com este cimento. Uma vez que até mesmo o formato arredondado da pozolana (cinza volante) pode auxiliar na mistura dos materiais.

Assim, observou-se que o cimento pozolânico possuiu uma maior capacidade de suporte das microfibras de polipropileno na mistura, para os concretos e materiais empregados nesta pesquisa.

4.1.6 Efeito da Interação CagxFib na Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto

A figura 50 apresenta o efeito da interação entre o consumo de água e o teor de adição de microfibras de polipropileno frente à resistência à compressão uniaxial do concreto. As figuras foram obtidas através dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial, de todos os traços avaliados na análise de variância (ANOVA).

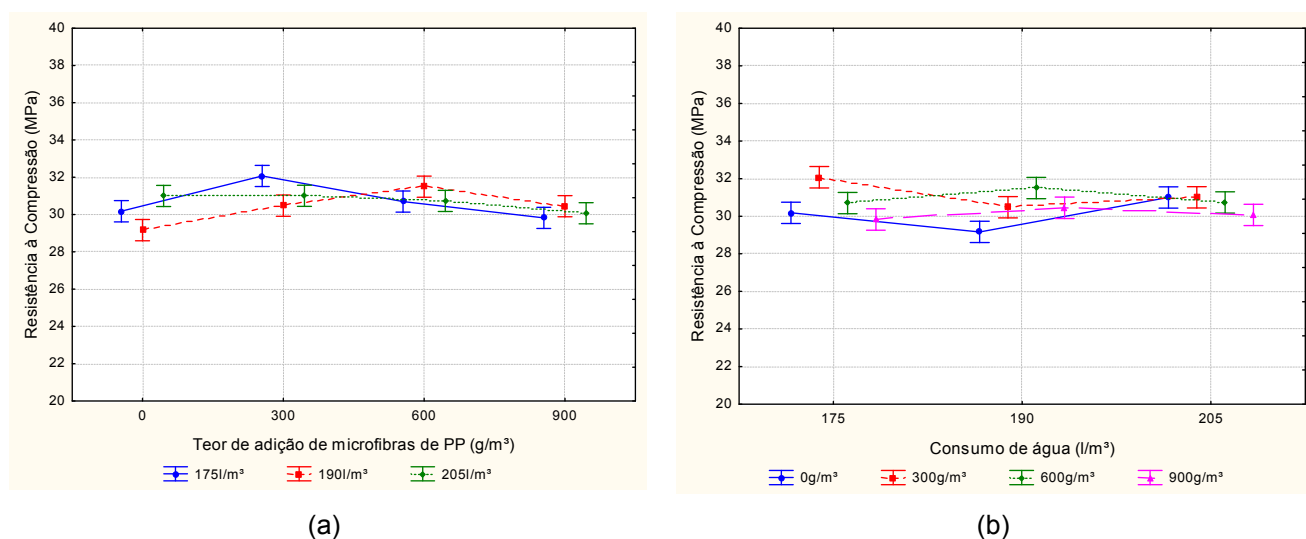


Figura 50: efeito da interação entre o consumo de água e o teor de adição de microfibras de PP sobre a resistência à compressão uniaxial do concreto. (a) resistência à compressão (MPa) x teor de adição de microfibras de PP (g/m^3). (b) resistência à compressão (MPa) x consumo de água (l/m^3)

Analisando as figuras não se verificou nenhuma tendência de comportamento entre os resultados obtidos neste ensaio. No entanto algumas considerações podem ser realizadas. Para os traços produzidos com consumo de água de 175 l/m^3 , devido ao baixo teor de pasta de cimento, nota-se uma melhora na resistência à compressão do concreto somente com adição de 300 g/m^3 de microfibras de PP. Já para os concretos com consumo de água de

190 l/m³, a capacidade de incorporação da microfibras na mistura é maior, devido à maior quantidade de pasta. Logo, teores de adição de até 600 g/m³ são suportados pela mistura, aumentando a resistência. Contudo, para os traços com consumo de 205 l/m³ tal comportamento não foi verificado.

Os traços com consumo de água de 175 l/m³ e teor de adição de microfibras de PP de 300 g/m³ (2A e 2B) apresentaram maiores resultados de resistência à compressão, para os materiais empregados na pesquisa. Através de uma análise estatística pelo método do teste de Fisher, mostrou-se que não existe uma diferença significativa entre estes e os traços produzidos com 190 l/m³ de água e adição de 600 g/m³ de microfibras de polipropileno (7A e 7B), em relação aos demais concretos, a diferença foi significativa.

4.1.7 Efeito da interação CagxId na Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto

A influência da interação entre consumo de água e a idade sobre a resistência à compressão uniaxial dos concretos estudados são demonstrados na figura 51. As figuras foram obtidas a partir dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial, de todos os traços estudados em todas as idades avaliadas, na análise de variância (ANOVA).

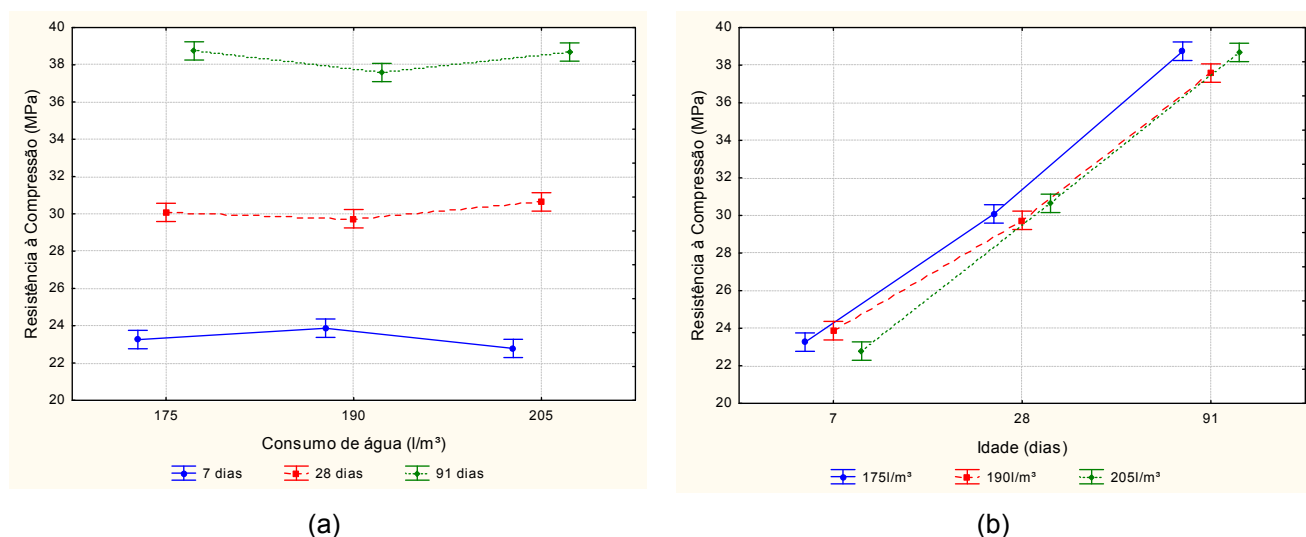


Figura 51: efeito da interação entre o consumo de água e a idade sobre a resistência à compressão uniaxial do concreto. (a) resistência à compressão (MPa) x consumo de água (l/m³). (b) resistência à compressão (MPa) x idade (dias)

A partir da análise das figuras, nota-se que aos 7 dias, o aumento do consumo de água de 175 l/m³ para 205 l/m³ reduziu a resistência à compressão uniaxial do concreto, porém aos 28 e 91 dias a variação deste fator controlável aumentou os resultados obtidos neste ensaio.

Contudo, quando o consumo de água aumentou de 175 l/m³ para 190 l/m³, os resultados obtidos comportaram-se de forma contrária, aos 7 dias a resistência à compressão foi majorada, enquanto aos 28 e 91 dias a variável de resposta foi minimizada. No entanto, não encontrou-se uma justificativa técnica para os resultados obtidos neste ensaio.

Realizando uma análise estatística através do teste de Fisher, verificou-se que os resultados dos traços com consumo de água de 205 l/m³, aos 7 e 28 dias, foram significativamente diferentes se comparados com os traços com consumo de água de 190 l/m³, nas mesmas idades de ruptura. Já aos 91 dias, quando analisados os resultados estatisticamente, demonstrou-se uma diferença significativa somente entre os concretos com consumos de água de 175 l/m³ e 205 l/m³.

4.1.8 Efeito da Interação Fibxldade na Resistência à Compressão Uniaxial do Concreto

A figura 52 demonstra o efeito da interação entre o teor de adição de microfibras de polipropileno e a idade sobre a resistência à compressão uniaxial dos concretos estudados. Estas foram obtidas a partir dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial de todos os traços estudados, em todas as idades avaliadas, na análise de variância (ANOVA).

Segundo as figuras não se verifica uma tendência de comportamento entre a interação analisada e a variável de resposta, porém algumas considerações estatísticas podem ser realizadas. Aos 7 dias, nota-se uma semelhança entre os resultados de resistência para todos os teores de adição de microfibras avaliados. Através de uma análise estatística pelo teste de Fisher, estes resultados não apresentaram uma diferença significativa entre si.

Aos 28 dias, a resistência à compressão reduziu com a adição de 900 g/m³ de microfibras de PP, conforme demonstram as figuras. A partir de uma análise estatística, este resultado demonstrou-se significativamente diferente em relação aos demais, para a mesma idade avaliada.

Comportamento diferente foi verificado aos 91 dias, onde a resistência à compressão foi significativamente menor para os traços sem adição de microfibras de polipropileno, quando analisados estatisticamente através do teste de Fisher. Os demais traços com diferentes teores de adição de microfibras de PP não apresentaram diferença significativa entre si.

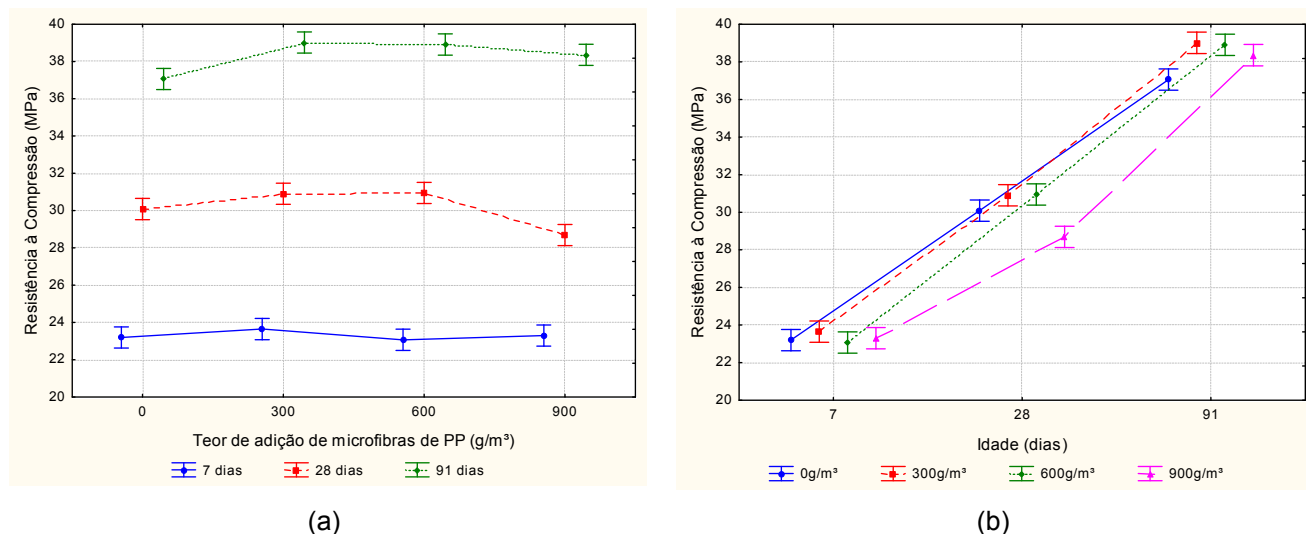


Figura 52: efeito da interação entre o teor de adição de microfibras de PP e a idade sobre a resistência à compressão uniaxial do concreto. (a) resistência à compressão (MPa) x teor de adição de microfibras de PP (g/m³). (b) resistência à compressão (MPa) x idade (dias)

Contudo, igualmente ao mencionado na interação avaliada no item 4.1.7, não foi encontrada uma justificativa técnica para a tendência de comportamento dos resultados obtidos nesta interação, para a variável de resposta analisada.

4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A resistência à tração na flexão é uma propriedade de grande relevância na avaliação de pisos de concreto simples, ou seja, pisos sem a presença de armadura. Esta propriedade do concreto fornece uma indicação da qualidade do material, pelo fato de estar relacionada com as propriedades da pasta de cimento endurecida. Logo, em projetos estruturais de pisos de concreto simples, esta propriedade é um dos parâmetros mais valorizados, pois está diretamente relacionado à capacidade do elemento em resistir a esforços de tração sem que ocorra ruptura da estrutura.

A tabela 19 apresenta os resultados médios da resistência à tração na flexão de todos os traços estudados, para as idades analisadas. No apêndice B encontram-se todos os resultados correspondentes a este ensaio.

Tabela 19: resultados médios do ensaio de resistência à tração na flexão

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa) - VALORES MÉDIOS									
	Traços (Cag - Fib)	Idades analisadas (dias)				Traços (Cag - Fib)	Idades analisadas (dias)		
		7	28	91			7	28	91
CIMENTO POZOLÂNICO	175-0	6,97	6,64	7,55	CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL	175-0	8,09	10,20	8,84
	175-300	7,52	7,81	9,22		175-300	7,31	8,59	9,00
	175-600	5,96	8,45	9,13		175-600	8,00	8,33	8,94
	175-900	6,81	8,05	8,64		175-900	8,62	8,50	9,37
	190-0	7,51	8,10	9,17		190-0	7,66	9,16	9,48
	190-300	6,98	6,95	8,76		190-300	8,42	8,16	9,65
	190-600	6,68	7,71	8,13		190-600	7,98	8,02	8,10
	190-900	7,17	7,57	8,01		190-900	8,54	9,20	9,64
	205-0	6,94	7,24	9,05		205-0	8,00	8,04	9,35
	205-300	6,72	7,33	8,28		205-300	8,03	8,15	9,47
	205-600	6,33	6,42	8,73		205-600	8,49	9,26	11,05
	205-900	6,24	6,99	7,81		205-900	7,76	9,23	9,48

Na pesquisa os resultados de resistência à tração na flexão foram analisados estatisticamente para todos os traços de concreto estudados. Esta análise buscou avaliar a influência de cada uma das variáveis controláveis nas misturas produzidas.

Os resultados foram analisados através do método de análise de variância (ANOVA), objetivando verificar a influência das variáveis independentes e de suas interações na variável de resposta (resistência à tração na flexão) estudada. A análise de variância dos dados experimentais, através da ANOVA, é apresentada na tabela 20. Nesta análise foram ponderados os efeitos isolados de cada uma das variáveis independentes, bem como as suas interações.

Segundo a tabela 20, observa-se que somente o efeito isolado dos fatores controláveis tipo de cimento e idade foram significativos para os resultados analisados. Acredita-se que o efeito isolado referente ao teor de adição de microfibras de polipropileno não se mostrou significativo devido às características próprias das fibras, relacionadas às suas dimensões e ao seu baixo módulo de elasticidade.

Tabela 20: análise de variância (ANOVA) – resistência à tração na flexão

	GDL	MQ	F (calc)	p	SIGNIFICÂNCIA
Tipo de cimento (1)	1	61,66	367,06	0,000000	S
Consumo de água (2)	2	0,32	1,92	0,149661	NS
Fibras (3)	3	0,13	0,79	0,501438	NS
Idade (4)	2	40,36	240,26	0,000000	S
Tcim x Cagua	2	1,11	6,59	0,001827	S
Tcim x Fib	3	0,43	2,54	0,058964	NS
Cagua x Fib	6	0,68	4,05	0,000875	S
Tcim x Id	2	0,76	4,50	0,012771	S
Cagua x Id	4	0,61	3,64	0,007417	S
Fib x Id	6	0,44	2,64	0,018398	S
Tcim x Cagua x Fib	6	0,98	5,85	0,000017	S
Tcim x Cagua x Id	4	0,11	0,68	0,610025	NS
Tcim x Fib x Id	6	0,24	1,41	0,216042	NS
Cagua x Fib x Id	12	0,49	2,93	0,001153	S
1 x 2 x 3 x 4	12	0,38	2,28	0,011236	S
Erro	144	0,31			

GDL: graus de liberdade (n-1) MQ: média quadrática F(calc): valor calculado de F p: nível de significância
S: valor significativo NS: valor não significativo

Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Para os efeitos de 2° ordem, as interações mostraram-se significativas, exceção da combinação entre o tipo de cimento e o teor de adição de microfibras de PP (Tcim x Fib). Com relação aos efeitos de 3° e 4° ordem, verificou-se uma não significância para as interações entre o tipo de cimento, o consumo de água e a idade (Tcim x Cag x Id), e entre o tipo de cimento, o teor de adição de microfibras de PP e a idade (Tcim x Fib x Id). As outras interações foram significativas, porém com pequena influência na análise de variância.

Nos itens que seguem serão analisados os efeitos isolados e as interações significativas, observadas a partir da análise de variância (ANOVA), as quais exerceram influência expressiva nos resultados obtidos.

4.2.1 Efeito do Tipo de Cimento (Tcim) na Resistência à Tração na Flexão do Concreto

A figura 53 apresenta os resultados do efeito isolado do tipo de cimento sobre a resistência à tração na flexão do concreto, para os traços estudados. A figura foi obtida a partir dos resultados de resistência à tração na flexão, para todos os traços estudados, em todas as idades avaliadas, na análise de variância (ANOVA).

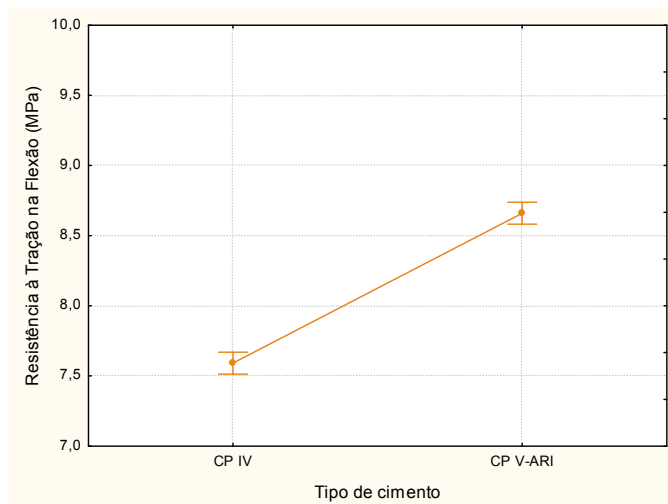


Figura 53: efeito do tipo de cimento na resistência à tração na flexão

Analisando a figura, verifica-se a grande influência do tipo de cimento na variável de resposta analisada, conforme esperado. Os resultados de resistência à tração na flexão para os concretos produzidos com cimento CP V-ARI foram significativamente maiores se comparados com os produzidos com cimento CP IV, quando analisados estatisticamente pelo método ANOVA. Igualmente ao comportamento observado para a resistência à compressão uniaxial, item 4.1.1.

Este comportamento era esperado, pois a hidratação do cimento pozolânico ocorre de forma mais lenta, afetando diretamente a porosidade do compósito, e, conseqüentemente, a resistência à tração na flexão. Desta forma, a resistência final do concreto foi inferior devido não só a fatores relacionados com a velocidade das reações de hidratação do cimento, a menor quantidade de C_3S e de clínquer na composição do material, em função da substituição por pozolanas, mas também está relacionado com as propriedades de resistência do cimento, demonstradas na tabela 8.

Contudo, vale ressaltar que os resultados obtidos nestas análises mostram apenas uma tendência de comportamento da variável controlável tipo de cimento frente à resistência à tração na flexão do concreto, e que outros fatores também estão envolvidos, como o consumo de água, o teor de adição de microfibras de PP e a idade.

4.2.2 Efeito da Idade (Id) na Resistência à Tração na Flexão do Concreto

O efeito isolado da variável controlável idade sobre a resistência à tração na flexão, para todos os traços de concreto estudados, é demonstrado na figura 54. Observa-se que a

variável de resposta analisada cresce com o aumento da idade do concreto. Este comportamento era esperado, uma vez que às reações de hidratação do cimento ocorrem ao longo do tempo, assim resultando em um aumento da resistência à tração na flexão do concreto com o passar do tempo.

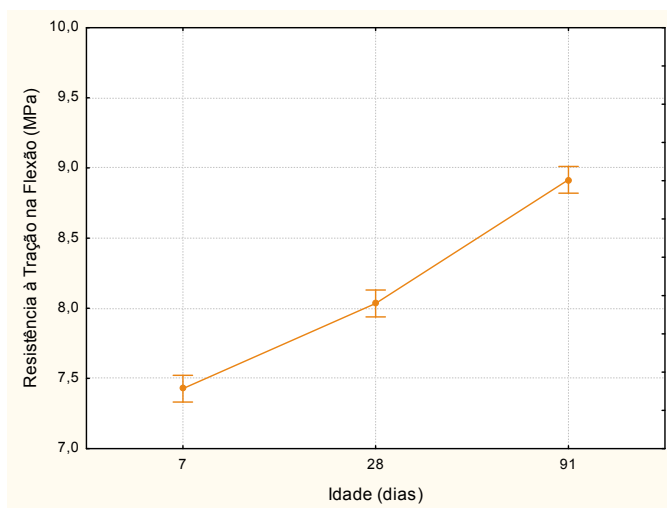


Figura 54: efeito da idade na resistência à tração na flexão

Conjuntamente, realizou-se uma análise estatística pelo método do teste de Fisher. Os resultados desta análise demonstraram a existência de uma diferença significativa entre os dados obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão para as três idades avaliadas. O crescimento percentual foi de aproximadamente 8% dos 7 para os 28 dias. No entanto dos 28 para os 91 dias, tal aumento foi levemente maior, sendo de aproximadamente 11%.

4.2.3 Efeito da Interação TcimxCag na Resistência à Tração na Flexão do Concreto

A figura 55 demonstra a influência da interação entre o tipo de cimento e o consumo de água sobre a resistência à tração na flexão do concreto. As figuras foram obtidas com os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão, para todos os traços estudados, na análise de variância (ANOVA).

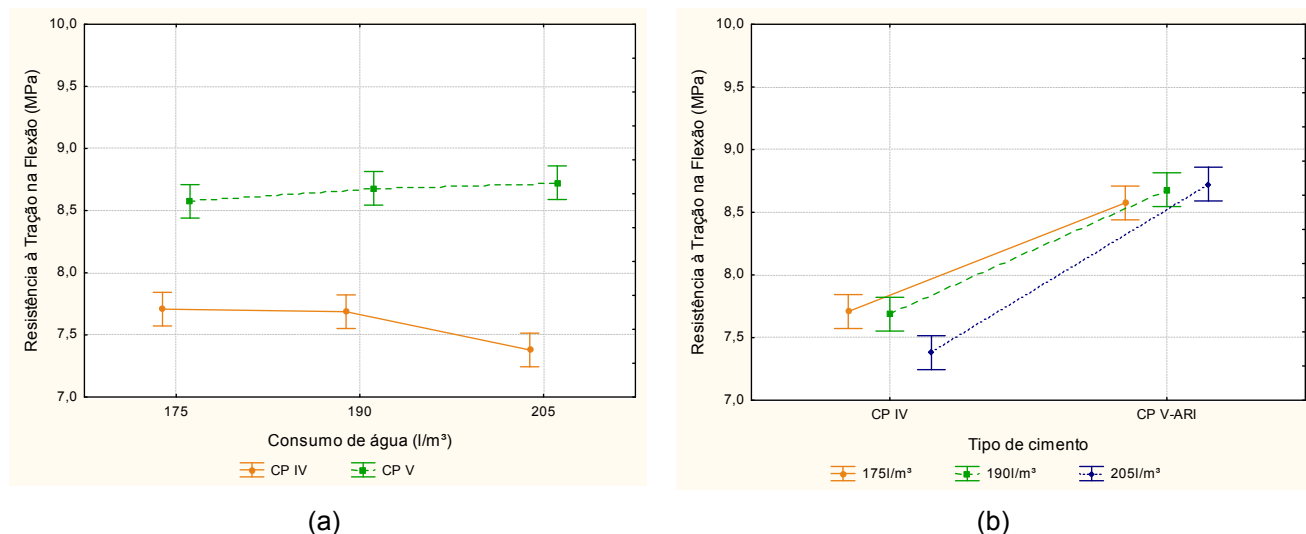


Figura 55: efeito da interação entre o tipo de cimento e o consumo de água sobre a resistência à tração na flexão do concreto. (a) resistência à tração na flexão (MPa) x consumo de água (l/m³). (b) resistência à tração na flexão (MPa) x tipo de cimento

Analisando estatisticamente os gráficos, nota-se que a resistência à tração na flexão reduz significativamente com o consumo de água de 205 l/m³, para os concretos produzidos com cimento pozolânico. Comportamento esperado, uma vez que quanto maior a quantidade de água na mistura, maior será a porosidade da matriz cimentícia, devido às reações volumétricas químicas, característica que limita o crescimento da resistência dos materiais cimentícios (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Para os concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI), a resistência à tração na flexão apresentou um leve crescimento com o aumento do consumo de água na mistura. No entanto, quando ponderando os dados através de uma análise estatística, pelo método do teste de Fisher, esta diferença mostrou-se não significativa.

Observa-se que tal tendência de comportamento foi diferente à verificada para o ensaio de resistência à compressão uniaxial, item 4.1.4, para esta mesma interação dos fatores controláveis.

4.2.4 Efeito da Interação $T_{cim} \times I_d$ na Resistência à Tração na Flexão do Concreto

O efeito da interação entre o tipo de cimento e a idade frente à resistência à tração na flexão dos concretos estudados é apresentado na figura 56. As figuras foram obtidas com os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão, para todos os traços de concreto avaliados, na análise de variância (ANOVA).

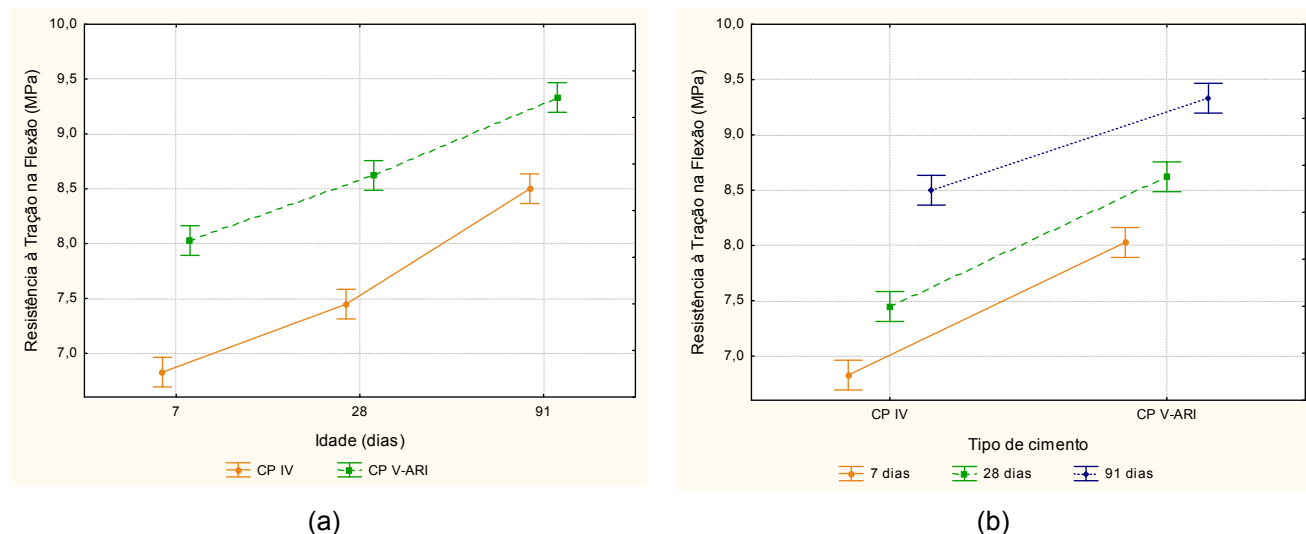


Figura 56: efeito da interação entre o tipo de cimento e a idade sobre a resistência à tração na flexão do concreto. (a) resistência à tração na flexão (MPa) x idade (dias). (b) resistência à tração na flexão (MPa) x tipo de cimento

Segundo as figuras, verifica-se uma tendência de comportamento para os resultados obtidos. Conforme o esperado, a resistência à tração na flexão aumenta, diferentemente para os dois tipos de cimento estudados, com o passar do tempo devido à ocorrência das reações de hidratação do cimento.

Para os traços produzidos com cimento CP V-ARI, a resistência inicial é maior comparado com os demais traços dosados com cimento pozolânico. Tal comportamento ocorre devido às características do cimento, como a alta velocidade das reações iniciais de hidratação. Ao decorrer do tempo, tem-se um aumento da resistência à tração, porém não tão marcante como o verificado para os concretos produzidos com cimento CP IV. A partir da figura 56, nota-se um crescimento acentuado da resistência à tração aos 91 dias, para os concretos produzidos com cimento pozolânico.

Dos 28 aos 91 dias, o crescimento percentual da resistência à tração na flexão dos concretos produzidos com cimento CP IV foi de 14,1%, enquanto para os traços em que foi empregado cimento CP V-ARI, no mesmo período, este crescimento foi de 8,2%. Este comportamento dos cimentos estudados é fortemente comprovado pela bibliografia (HELENE; TERZIAN, 1992; NEVILLE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2006).

4.2.5 Efeito da Interação CagxFib na Resistência à Tração na Flexão do Concreto

A figura 57 apresenta o efeito da interação entre o consumo de água e o teor de adição de microfibras de polipropileno frente à resistência à tração na flexão dos concretos avaliados

na pesquisa. As figuras foram obtidas com os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão, para todos os traços de concreto considerados, na análise de variância (ANOVA).

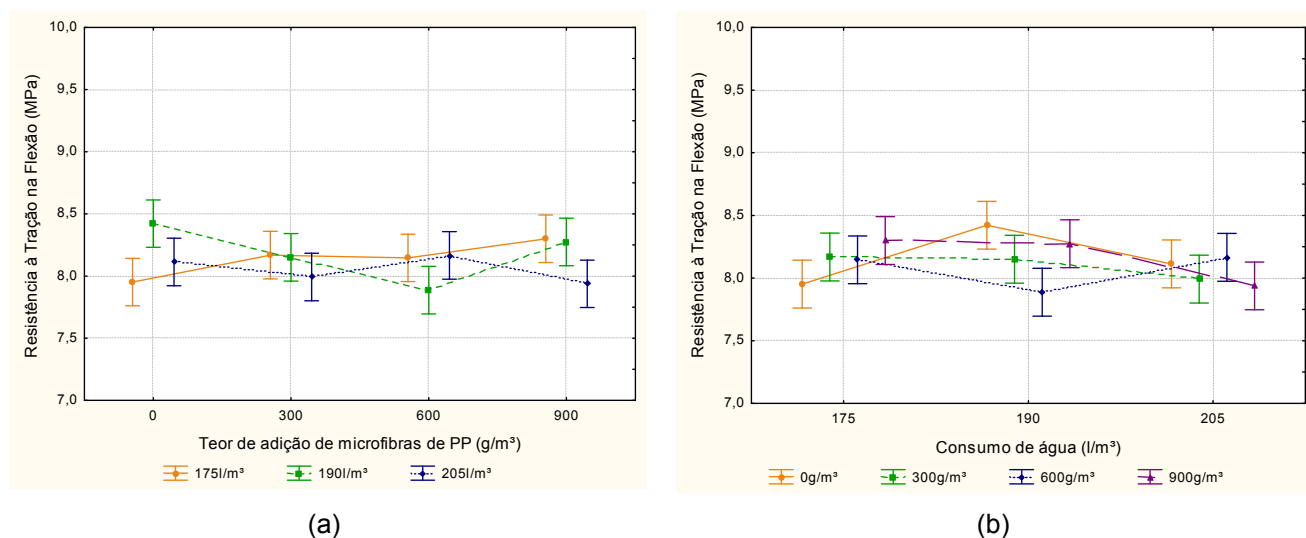


Figura 57: efeito da interação entre o consumo de água e o teor de adição de microfibras de PP sobre a resistência à tração na flexão do concreto. (a) resistência à tração na flexão (MPa) x teor de adição de microfibras de PP (g/m^3). (b) resistência à tração na flexão (MPa) x consumo de água (l/m^3)

A partir das figuras não se verifica uma tendência de comportamento para os resultados obtidos neste ensaio, igualmente ao observado para o ensaio de resistência à compressão, item 4.1.6. Os diferentes teores de adição de microfibras de PP, empregados nos concretos estudados, não influenciaram, significativamente, a variável de resposta avaliada, quando analisados estatisticamente. Acredita-se que tal fato decorre da influência negativa proveniente da aglomeração das microfibras de polipropileno na matriz cimentícia, demonstradas na figura 17.

Esta problemática encontrada influenciou de forma mais significativa os resultados desta propriedade mecânica. Fato explicado pela maior sensibilidade do ensaio de resistência à tração na flexão frente à presença de microfissuras ou possíveis falhas na matriz cimentícia.

Contudo, cabe ressaltar que este tipo de microfibra de polipropileno, empregada nas misturas, não foi utilizado com a finalidade de melhorar a resistência à tração na flexão dos concretos; pois, características como as dimensões, principalmente às relacionadas com o comprimento e o diâmetro da fibra, e o seu baixo módulo de elasticidade, comparado com o da matriz cimentícia, não influenciam diretamente na variável de resposta avaliada (MEHTA; MONTEIRO, 2006). Fato também evidenciado pelo efeito não significativo deste fator controlável, quando avaliado isoladamente.

4.2.6 Efeito da Interação CagxId na Resistência à Tração na Flexão do Concreto

O efeito da interação entre o consumo de água e a idade sobre a resistência à tração na flexão é demonstrado na figura 58. As figuras foram obtidas a partir dos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão, para todos os traços de concreto considerados, na análise de variância (ANOVA).

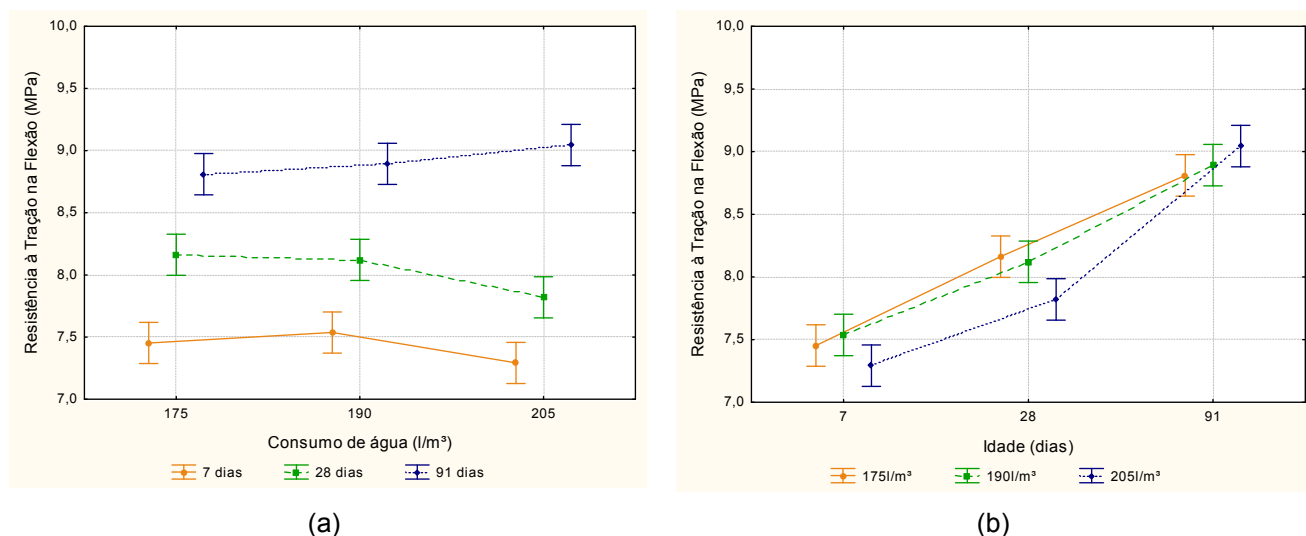


Figura 58: efeito da interação entre o consumo de água e a idade sobre a resistência à tração na flexão do concreto. (a) resistência à tração na flexão (MPa) x consumo de água (l/m³). (b) resistência à tração na flexão (MPa) x idade (dias)

A partir da análise das figuras, nota-se que a resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias reduz para os traços produzidos com consumo de água de 205 l/m³, conforme esperado. Analisando-os estatisticamente, pelo método do teste de Fisher, somente na idade de 28 dias esta diferença mostrou-se significativa em relação aos traços de concreto dosados com consumos de água menores.

Diferentemente do que ocorreu aos 91 dias, pois analisando a figura 58, verifica-se que a resistência à tração na flexão do concreto apresenta um leve aumento. Entretanto, se observou que os resultados não foram significativamente diferentes, quando realizada uma análise estatística pelo teste de Fisher.

4.2.7 Efeito da Interação FibxId na Resistência à Tração na Flexão do Concreto

A figura 59 apresenta o efeito da interação entre o teor de adição de microfibras de polipropileno e a idade sobre a resistência à tração na flexão dos concretos avaliados na

pesquisa. Os gráficos foram obtidos com os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão, para todos os traços de concreto considerados, na análise de variância (ANOVA).

Segundo os gráficos, nota-se um aumento na resistência à tração na flexão com o passar do tempo, independente do teor de adição de microfibra de PP da mistura, conforme esperado. Analisando estatisticamente os resultados, através do teste de Fisher, evidenciou-se que as microfibras de PP não influenciaram, significativamente, na variável de resposta nas idades de 7 e 91 dias.

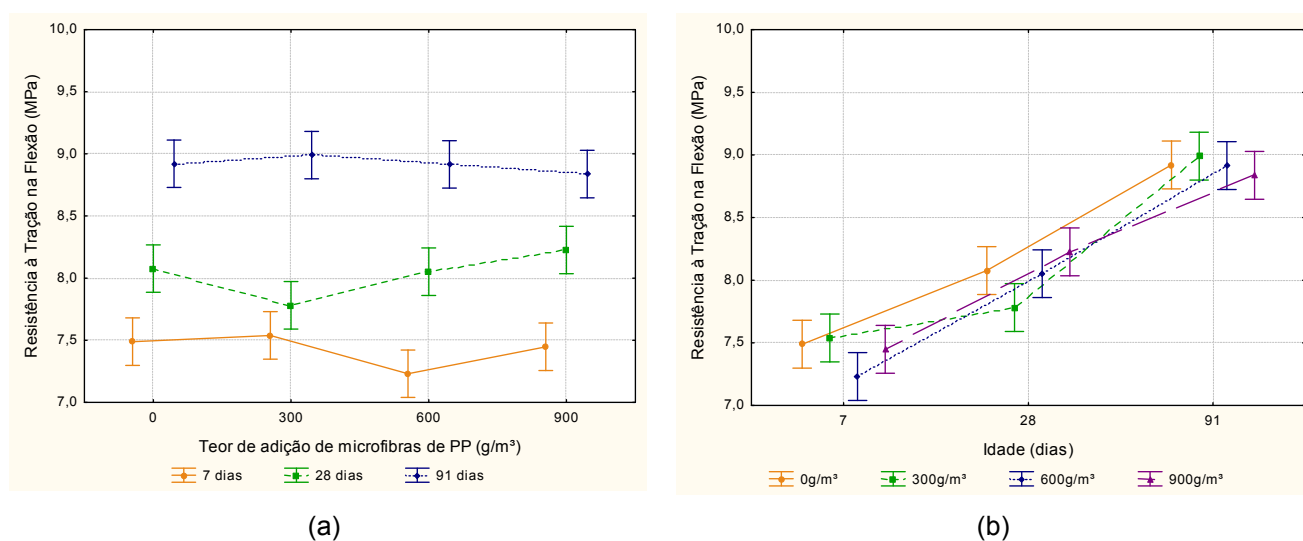


Figura 59: efeito da interação entre o teor de adição de microfibras de PP e a idade sobre a resistência à tração na flexão do concreto. (a) resistência à tração na flexão (MPa) x teor de adição de microfibras de PP (g/m³). (b) resistência à tração na flexão (MPa) x idade (dias)

Contudo, aos 28 dias constatou-se uma redução na resistência à tração na flexão para os traços com teor de adição de 300 g/m³ de microfibras de polipropileno. Tal diferença mostrou-se significativa somente em relação aos resultados dos traços com teor de adição de 900 g/m³ de microfibras de PP, quando analisados estatisticamente.

Como mencionado no item 4.2.5, vale lembrar que estas microfibras de polipropileno não foram empregadas na pesquisa com o intuito de maximizar a resistência à tração na flexão dos compósitos cimentícios estudados; uma vez que seus parâmetros físicos e geométricos não possibilitariam tal melhora.

4.3 RETRAÇÃO POR SECAGEM LIVRE

A retração unidimensional livre (variação de comprimento) é uma propriedade extremamente importante na avaliação do proporcionamento dos compósitos cimentícios, uma vez que

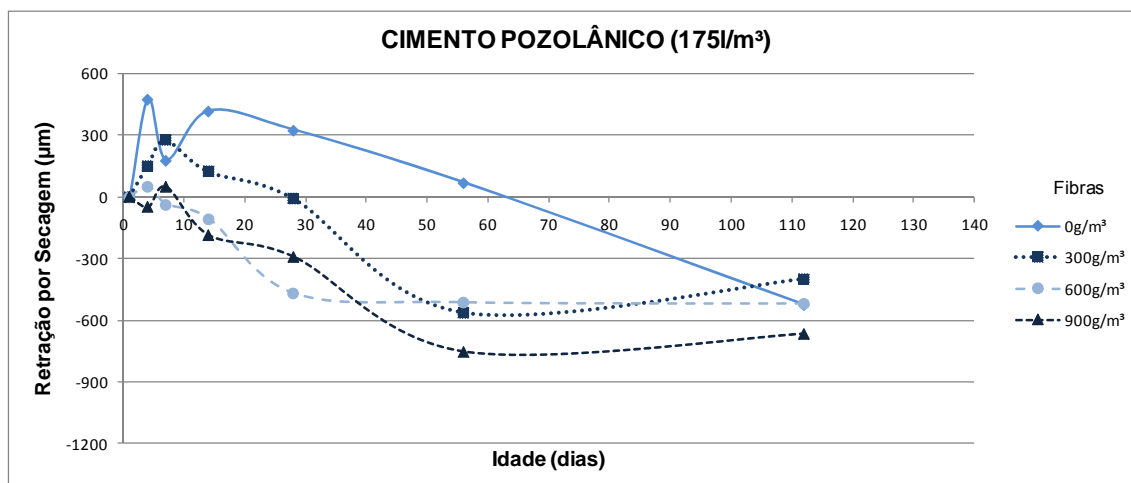
exerce influência direta sobre as características de durabilidade dos materiais. Cabe ressaltar que o procedimento normalizado pela ASTM C 157 (1991) determina experimentalmente a magnitude do fenômeno da retração por secagem para corpos-de-prova prismáticos não selados.

Na análise estatística dos resultados foram desconsiderados dois corpos-de-prova, de traços diferentes, os quais apresentaram erros nas leituras de retração por secagem livre. Tais erros podem ser atribuídos, possivelmente, a um somatório de fatores, como a grande variabilidade do ensaio, a sensibilidade do equipamento de leitura (relógio comparador horizontal) e a falha humana. Desta forma, para os traços 6A e 6B, com características semelhantes, isto é, dosados com consumo de água de 190 l/m³ e teor de adição de microfibras de PP de 300 g/m³, produzidos com cimento pozolânico e de alta resistência inicial, respectivamente, foi considerado somente um corpo-de-prova prismático.

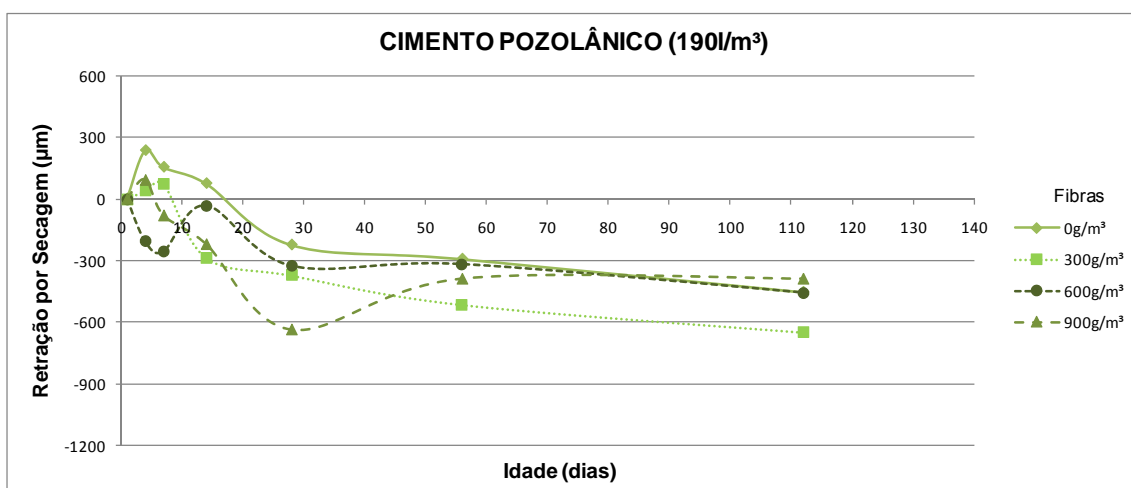
As figura 60 (a), (b) e (c) apresentam os resultados médios da retração por secagem livre para os traços produzidos com cimento pozolânico. De forma a facilitar a visualização dos resultados, as figuras foram plotadas agrupando-se os traços com mesmo consumo de água. Os resultados individuais destes concretos encontram-se no apêndice C.

Analisando estas figuras, evidencia-se uma tendência de comportamento inicial semelhante para todos os concretos avaliados, conforme esperado. Primeiramente, percebe-se que o concreto sofre uma expansão, devido à adsorção de água, a qual reduz a tensão de superfície das partículas de sólido-gel (SILVA, 2007). Nota-se que tal fenômeno ocorreu até o 14º dia, após o processo de moldagem dos corpos-de-prova, para os compósitos cimentícios produzidos com cimento pozolânico.

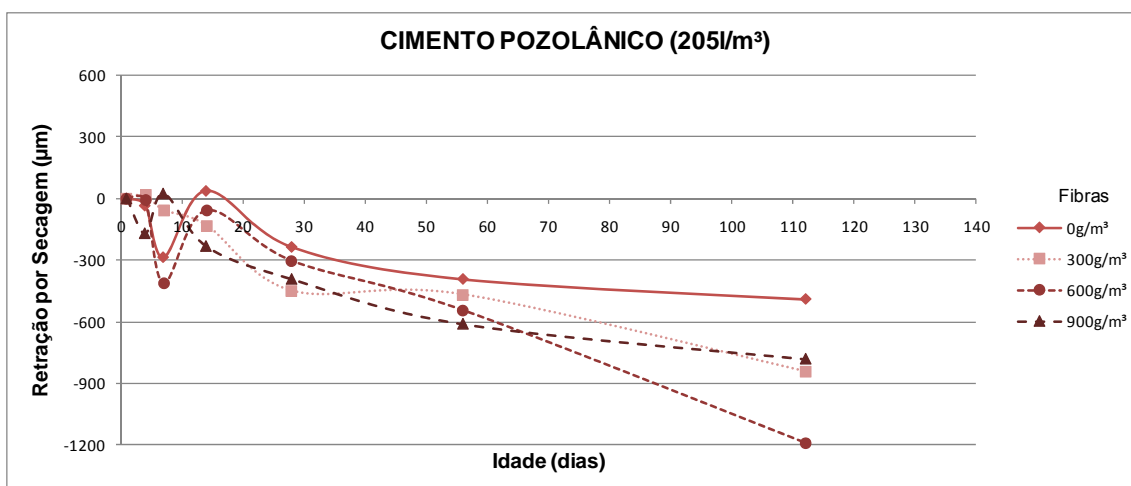
Posteriormente a este período de expansão inicial, os concretos iniciaram o processo de contração ou retração da matriz cimentícia. Esta retração do material cimentício está relacionada, provavelmente, com a formação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) (SILVA, 2007).



(a)



(b)



(c)

Figura 60: valores médios da retração por secagem livre – cimento pozolânico. (a) consumo de água de 175 l/m³. (b) consumo de água de 190 l/m³. (c) consumo de água de 205 l/m³

A partir da análise da figura 60 (a), nota-se que a expansão inicial é mais acentuada para o traço sem adição de microfibras de PP e que os traços com teores de adição de microfibras de PP de 300 g/m³ e 900 g/m³ apresentam a mesma tendência de comportamento ao longo do tempo, porém a magnitude da retração é diferenciada. Para este grupo de concretos, a intensidade da retração final foi mais acentuada para o traço com teor de adição de 900 g/m³, sendo de aproximadamente -600 µm.

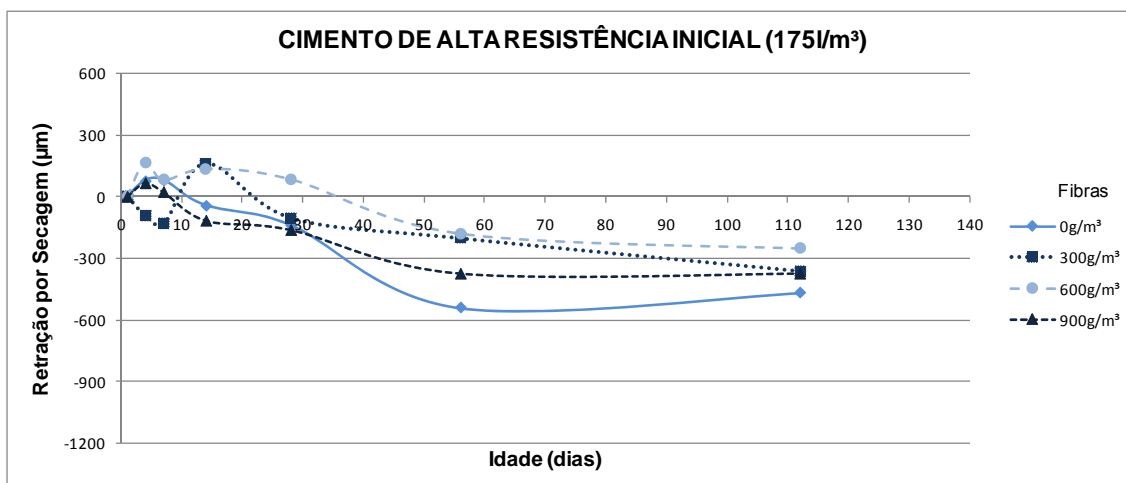
Analisando a figura 60 (b), verifica-se que a magnitude da retração final dos concretos com teores de adição de microfibras de PP de 0 g/m³, 600 g/m³ e 900 g/m³ foi semelhante. Contudo, a retração final foi mais acentuada para o compósito cimentício com teor de adição de 300 g/m³, sendo de aproximadamente -600 µm.

Com relação à figura 60 (c), percebe-se que a magnitude da retração final dos traços com teores de adição de microfibras de PP de 300 g/m³ e 900 g/m³ mostrou-se semelhante. Da mesma forma, verifica-se uma tendência de comportamento similar, ao longo do tempo, para os concretos com teores de adição de 0 g/m³ e 600 g/m³. No entanto, a intensidade da retração final é mais acentuada para o traço com adição de 600 g/m³, sendo de aproximadamente -1200 µm.

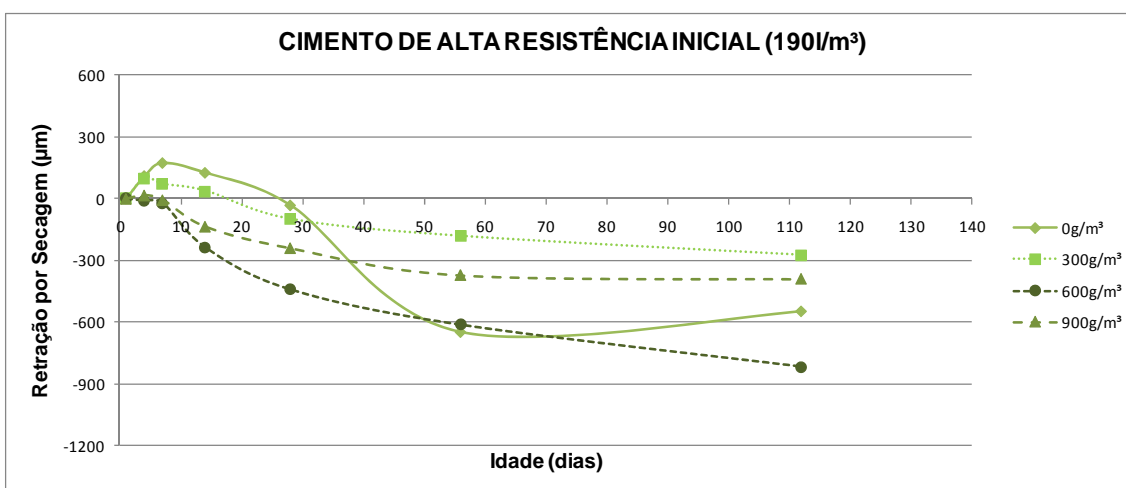
Os resultados médios da deformação unidimensional livre dos traços produzidos com cimento de alta resistência inicial são apresentados nas figura 61 (a), (b) e (c). Da mesma forma que realizado para o cimento pozolânico, o critério para o agrupamento dos traços, em cada uma das figuras, foi pela variável consumo de água. Os resultados individuais destes concretos são demonstrados no apêndice C.

Igualmente ao observado para os concretos produzidos com cimento pozolânico, as figuras 61 (a), (b) e (c) demonstram uma tendência de comportamento inicial semelhante. Inicialmente, percebe-se uma expansão do compósito cimentício, segundo Silva (2007), proveniente da adsorção de água. Este fenômeno ocorreu até o 14º dia, após o processo de mistura dos materiais. Posteriormente à expansão inicial, os concretos sofreram um processo de contração ou retração da matriz cimentícia, gerado, possivelmente, pela formação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) (SILVA, 2007).

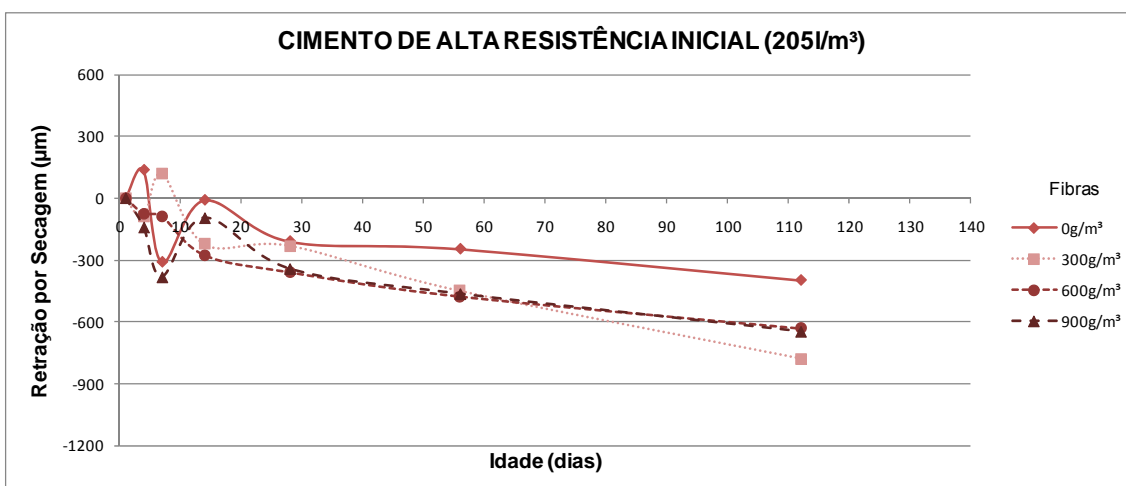
Na figura 61 (a), observa-se uma semelhança entre a magnitude da retração por secagem livre final para os traços com teores de adição de microfibras de PP de 300 g/m³ e 900 g/m³. No entanto a retração por secagem livre total foi mais acentuada para o concreto sem adição de microfibras, sendo de aproximadamente -500 µm.



(a)



(b)



(c)

Figura 61: valores médios da retração por secagem livre – cimento de alta resistência inicial. (a) consumo de água de 175 l/m³. (b) consumo de água de 190 l/m³. (c) consumo de água de 205 l/m³

Analisando a figura 61 (b), nota-se que a intensidade da retração por secagem total livre foi mais acentuada para o traço com teor de adição de microfibras de PP de 600 g/m³, sendo de aproximadamente -800 µm. Já a figura 61 (c), demonstra que para os traços produzidos com consumo de água elevado (205 l/m³), a magnitude do traço com adição de 300 g/m³ foi a mais acentuada, sendo de aproximadamente -800 µm.

Os resultados médios da retração por secagem livre dos concretos estudados são também demonstrados na tabela 21. Nesta tabela, a nomenclatura dos traços segue o mesmo critério utilizado na legenda das figuras acima.

Tabela 21: resultados médios da retração por secagem livre (µm) dos concretos estudados

RETRAÇÃO POR SECAGEM LIVRE (µm)	Traços	Idades (dias)						
		Referência	4	7	14	28	56	112
CIMENTO POZOLÂNICO	175-0	0	475	177	417	324	68	-525
	175-300	0	151	274	124	-7	-563	-399
	175-600	0	49	-37	-108	-471	-515	-521
	175-900	0	-49	49	-187	-293	-755	-668
	190-0	0	235	154	75	-223	-292	-453
	190-300	0	40	75	-285	-372	-515	-650
	190-600	0	-207	-256	-32	-326	-318	-456
	190-900	0	92	-81	-221	-636	-389	-389
	205-0	0	-34	-286	38	-236	-393	-490
	205-300	0	14	-59	-133	-451	-468	-842
	205-600	0	-10	-413	-60	-305	-545	-1188
	205-900	0	-170	24	-232	-392	-611	-781
CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL	175-0	0	78	81	-43	-138	-541	-468
	175-300	0	-93	-129	160	-103	-201	-359
	175-600	0	169	83	136	86	-179	-252
	175-900	0	66	23	-115	-161	-372	-372
	190-0	0	109	172	124	-34	-650	-549
	190-300	0	99	70	36	-100	-183	-275
	190-600	0	-10	-22	-237	-442	-614	-818
	190-900	0	16	-7	-136	-241	-372	-390
	205-0	0	137	-309	-9	-209	-246	-398
	205-300	0	-91	121	-223	-230	-449	-778
	205-600	0	-77	-91	-277	-360	-477	-631
	205-900	0	-142	-382	-97	-342	-464	-645

Observa-se, também, que a intensidade da retração por secagem livre total foi mais acentuada para o traço produzido com cimento pozolânico (CP IV) e com consumo de água de 205 l/m³. Em relação à variável consumo de água, este comportamento era esperado,

pois como foi mantida a relação a/c constante em 0,53 para todos os traços estudados, quanto maior o consumo de água, maior o consumo de cimento e o volume de pasta de cimento, assim reduzindo o percentual de agregados presentes na mistura. Desta forma, a magnitude da retração por secagem livre foi acentuada.

Já a influência do cimento pozolânico, na intensidade da retração por secagem livre, pode ser explicada a partir da finura do cimento, obtida através do método de permeabilidade ao ar (método Blaine). A partir da tabela 7, nota-se que a finura Blaine do cimento pozolânico foi superior à do cimento de alta resistência inicial, comportamento contrário ao esperado. Acredita-se que tal característica ocorre devido ao método de fabricação do cimento; onde, o processo de moagem é intensificado, com o intuito de acelerar a ocorrência das reações de hidratação do cimento, assim tornando-o mais competitivo no mercado, principalmente, para processos construtivos que necessitam de uma maior velocidade de execução, como por exemplo, empresas fabricantes de pré-moldados e de construções convencionais. Contudo, tal procedimento, possivelmente, poderá acarretar uma maior probabilidade de ocorrência do fenômeno da retração nas estruturas de concreto.

Outro fator importante, o qual pode ter influenciado na intensidade da retração por secagem dos traços produzidos com o cimento CP IV, é a presença de pozolanas (cinza volante) em sua composição. Em pesquisa realizada por Mokarem, Weyers e Lane (2005), os concretos produzidos com cinza volante apresentaram uma maior intensidade do fenômeno da retração por secagem ao longo do tempo, se comparados com os demais concretos estudados, produzidos com adição de sílica ativa, de escória de alto forno e sem qualquer adição, para condições semelhantes à realizada nesta pesquisa.

Em relação ao teor de adição de microfibras de PP, não se percebe uma tendência de comportamento com o passar do tempo. Segundo Zhang e Li (2001), fibras de polipropileno com baixo módulo de elasticidade podem auxiliar, de forma mais significativa, na fase inicial da retração, pois neste momento o seu módulo de elasticidade é superior ao da matriz cimentícia.

Os resultados do ensaio de retração por secagem livre foram analisados estatisticamente para todos os traços de concreto estudados. As análises foram realizadas através do método de análise de variância (ANOVA), e teve por objetivo verificar a influência de cada um dos fatores controláveis e de suas interações na variável de resposta (retração por secagem livre) analisada. A análise de variância dos dados experimentais, referentes a esta variável de resposta, são apresentados na tabela 22.

Tabela 22: análise de variância (ANOVA) – retração por secagem livre

RETRAÇÃO POR SECAGEM LIVRE					
	GDL	MQ	F (calc)	p	SIGNIFICÂNCIA
Tipo de cimento (1)	1	78691	2,3	0,127432	NS
Consumo de água (2)	2	733321	21,9	0,000000	S
Fibras (3)	3	379592	11,3	0,000001	S
Idade (4)	6	2337340	69,8	0,000000	S
Tcim x Cagua	2	9235	0,3	0,759458	NS
Tcim x Fib	3	141095	4,2	0,006786	S
Cagua x Fib	6	33016	1,0	0,437110	NS
Tcim x Id	6	34117	1,0	0,415498	NS
Cagua x Id	12	54413	1,6	0,090058	NS
Fib x Id	18	32295	1,0	0,504007	NS
Tcim x Cagua x Fib	6	153186	4,6	0,000268	S
Tcim x Cagua x Id	12	27488	0,8	0,629140	NS
Tcim x Fib x Id	18	33495	1,0	0,463141	NS
Cagua x Fib x Id	36	30724	0,9	0,607312	NS
1 x 2 x 3 x 4	36	38286	1,1	0,284574	NS
Erro	154	33503			

GDL: grau de liberdade (n-1) MQ: média quadrática F(calc): valor calculado de F p: nível de significância
S: valor significativo NS: valor não significativo

Se $p < 5\%$ = efeito significativo

De acordo com a tabela 22, observa-se que os efeitos isolados das variáveis independentes foram significativos na análise dos resultados obtidos, à exceção do tipo de cimento. Acredita-se que o tipo de cimento não se mostrou significativo na análise, possivelmente por apresentar superfícies específicas semelhantes, apresentadas na tabela 7, para os dois materiais estudados.

Com relação aos efeitos de 2° ordem, somente a interação entre o tipo de cimento e o teor de adição de microfibras de PP (Tcim x Fib) foi significativa na análise de variância (ANOVA). Para os efeitos de 3° e 4° ordem, mostrou-se significativa somente a interação entre o tipo de cimento, o consumo de água e o teor de adição de microfibras de PP (Tcim x Cag x Fib).

A seguir serão analisados os efeitos isolados significativos, bem como suas interações, os quais apresentaram uma influência expressiva nos resultados, a partir da análise de variância (ANOVA) realizada.

4.3.1 Efeito do Consumo de Água (Cag) na Retração por Secagem Livre do Concreto

A figura 62 apresenta a influência isolada da variável independente consumo de água sobre a retração por secagem livre do concreto. A figura foi obtida com todos os resultados de retração por secagem livre dos concretos estudados, em todas as idades consideradas na análise de variância (ANOVA).

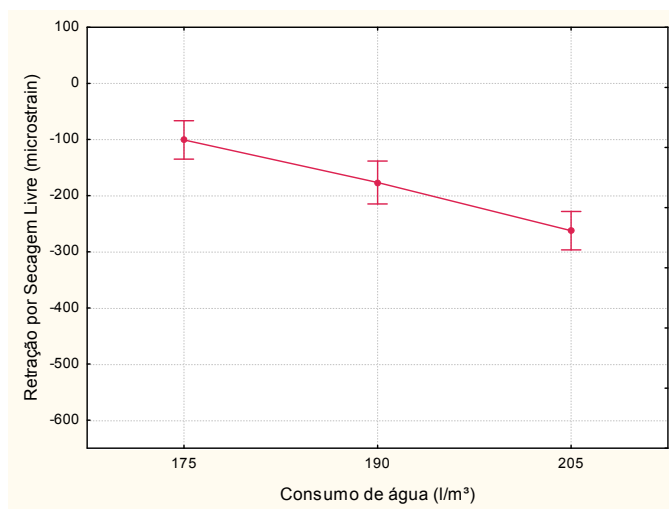


Figura 62: efeito isolado do consumo de água na retração por secagem livre do concreto

A partir da análise da figura, verifica-se que a retração por secagem livre aumenta com o acréscimo de água na mistura, isto é, quanto maior é o consumo de água do compósito cimentício, maior apresenta-se a intensidade da variação unidimensional livre. Como mencionado no item 4.3, este comportamento era esperado, pois, como a relação a/c (0,53) manteve-se constante para todos os traços estudados, quanto maior o consumo de água da mistura, maior o consumo de cimento e o volume de pasta de cimento, e menor a quantidade de agregados no compósito. Neste sentido, a porosidade da mistura majorou, gerando um maior número de meniscos e, conseqüentemente, uma maior intensidade de retração.

Tal comportamento também foi evidenciado em pesquisa realizada por Bissonnette, Pierre e Pigeon (1999), onde se evidenciou uma forte influência do volume de pasta de cimento sobre a magnitude da retração por secagem em concretos e argamassas. Logo, foi verificado que se aumentando somente o volume de pasta de cimento, se reduz as restrições impostas pelos agregados.

Quando realizada uma análise estatística, pelo método do teste de Fisher, verificou-se a existência de uma diferença significativa entre os resultados de retração por secagem livre para os traços de concreto dosados com diferentes consumos de água, evidenciando a variação unidimensional livre mais significativa para os traços com consumo de água elevado (205 l/m³).

Cabe ressaltar que os resultados obtidos nesta análise demonstram apenas uma tendência de comportamento do fator controlável consumo de água frente ao fenômeno da retração por secagem livre do concreto. Outros fatores como o tipo de cimento, o teor de adição de microfibras de polipropileno, as idades avaliadas, bem como suas interações também estão envolvidos na análise dos dados.

4.3.2 Efeito do Teor de Adição de Microfibras de PP (Fib) na Retração por Secagem Livre do Concreto

O efeito isolado da variável controlável correspondente ao teor de adição de microfibras de PP sobre a retração por secagem livre é apresentado na figura 63. A figura foi obtida com todos os resultados de retração por secagem livre dos concretos estudados, em todas as idades consideradas na análise de variância (ANOVA).

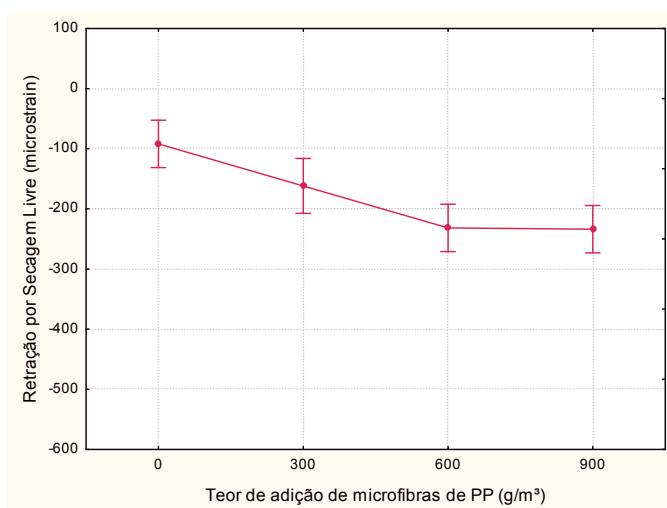


Figura 63: efeito isolado do teor de adição de microfibras de PP sobre a retração por secagem livre do concreto

A partir desta figura, nota-se um acréscimo da intensidade da retração por secagem livre do concreto com o aumento do teor de adição de microfibras de PP na mistura. Esperava-se que a adição de microfibras não alterasse significativamente a magnitude da retração por secagem livre. No entanto, tal variação mostrou-se significativa, possivelmente, por apresentar problemas relacionados à dificuldade de moldagem, assim incorporando vazios na matriz cimentícia, aumentando a porosidade interna do material.

Resultados contrários aos encontrados nesta pesquisa foram apresentados por Hsie, Tu e Song (2008), onde a inserção de microfibras de polipropileno reduziu, levemente, a magnitude da retração por secagem dos concretos. Contudo, nestas misturas utilizaram-se fibras monofilamentadas de polipropileno (*monofilament*), em adições semelhantes à desta pesquisa, conjuntamente com pequenos teores (60 g/m^3) de microfibras de PP (*staple fiber*).

Analisando os dados estatisticamente, através do teste de Fisher, percebeu-se uma não significância entre os resultados obtidos neste ensaio, referentes aos traços com teores de adição de 600 g/m^3 e 900 g/m^3 , para os materiais empregados nesta pesquisa. No entanto, todas as demais análises mostraram-se significativas.

4.3.3 Efeito da Idade (Id) na Retração por Secagem Livre do Concreto

O efeito isolado da variável controlável idade sobre a retração por secagem livre, através da análise de variância (ANOVA), é demonstrado na figura 64. Esta figura foi obtida com todos os resultados obtidos neste ensaio, para todos os traços de concreto analisados na pesquisa.

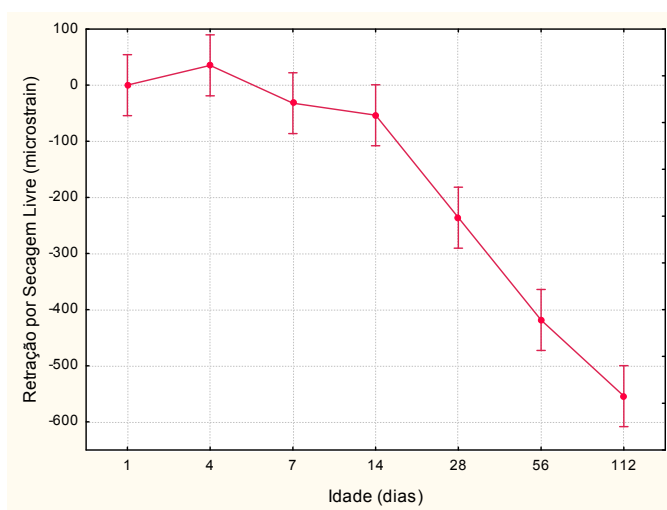


Figura 64: efeito isolado da idade na retração por secagem livre do concreto

Analisando o gráfico, verifica-se que a magnitude da retração por secagem livre aumenta com o passar do tempo, ou seja, há uma relação direta entre a idade e a deformação unidimensional livre da matriz cimentícia, conforme esperado.

A partir de uma análise estatística pelo teste de Fisher, notou-se que a retração nos primeiros dias (1° ao 7° dia) não demonstrou diferença significativa entre os resultados obtidos. Ou seja, até os 7 dias a intensidade da retração por secagem livre demonstrou-se

semelhante à leitura referência, quando analisadas estatisticamente. No entanto, em relação às demais idades analisadas esta diferença mostrou-se significativa.

Em pesquisas realizadas por Lam (2005) e Mokarem, Weyers e Lane (2005), a magnitude da retração por secagem livre, em corpos-de-prova prismáticos, começou a intensificar-se a partir do 7º dia, para os compósitos estudados, com diferentes características e composições.

Cabe lembrar que nesta pesquisa as leituras foram realizadas somente até os 112 dias, porém sabe-se que o crescimento da intensidade deste fenômeno é contínuo ao longo do tempo. Portanto, leituras em idades mais avançadas, certamente, possibilitariam um melhor entendimento deste fenômeno.

4.3.4 Efeito da Interação TcimxFib na Retração por Secagem Livre do Concreto

A figura 65 demonstra o efeito da interação entre o tipo de cimento e o teor de adição de microfibras de polipropileno frente à retração por secagem livre dos concretos estudados. As figuras foram obtidas com todos os resultados de retração por secagem livre das misturas avaliadas, em todas as idades consideradas na análise de variância (ANOVA).

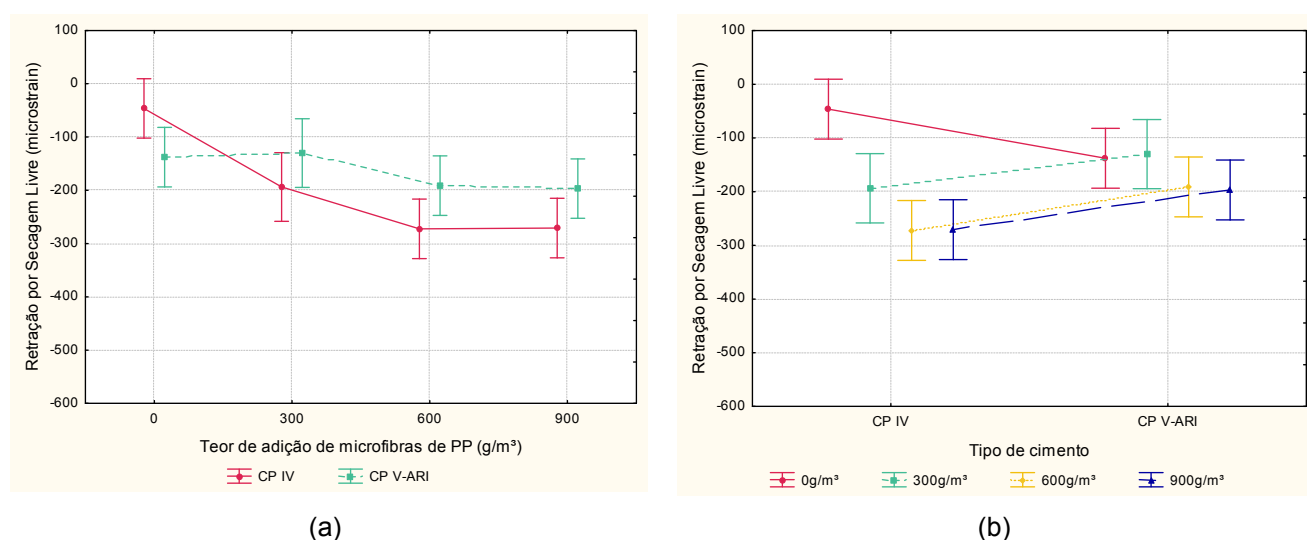


Figura 65: efeito da interação entre o tipo de cimento e o teor de adição de microfibras de PP sobre a retração por secagem livre do concreto. (a) retração por secagem livre (μm) x teor de adição de microfibras de PP (g/m^3). (b) retração por secagem livre (μm) x tipo de cimento

Segundo as figuras, percebe-se uma leve tendência de comportamento para os concretos estudados. Para os traços produzidos com adição de microfibras de PP nota-se uma ligeira redução na magnitude da retração por secagem livre, quando se empregou o cimento de

alta resistência inicial na mistura. Já para os traços referência, isto é, aqueles em que não se utilizou adição de microfibras, este comportamento ocorreu de forma contrária.

Entretanto, quando analisados os resultados estatisticamente pelo teste de Fisher, os traços com iguais teores de adição de microfibras de polipropileno, independente do tipo de cimento empregado, não apresentaram diferença significativa entre si. Como mencionado anteriormente no item 4.3, este comportamento pode ser explicado pela finura do cimento, obtida através do ensaio de permeabilidade ao ar (método Blaine), a qual, aparentemente, exerceu influência direta sobre os cimentos estudados.

Estudos realizados por Kaufmann, Winnefeld e Hesselbarth (2004) demonstraram uma considerável influência da finura do cimento e da adição de *fillers* na mistura, frente à magnitude do fenômeno da retração.

Desta forma, comparando-se cimentos com finura semelhantes, evidenciou-se uma pequena significância na influência do tipo de cimento sobre a variável de resposta analisada, para os materiais empregados nesta pesquisa. Tal efeito também pode ser verificado pela não significância isolada desta variável controlável, quando ponderados pela análise de variância (ANOVA).

4.4 RETRAÇÃO POR SECAGEM RESTRINGIDA

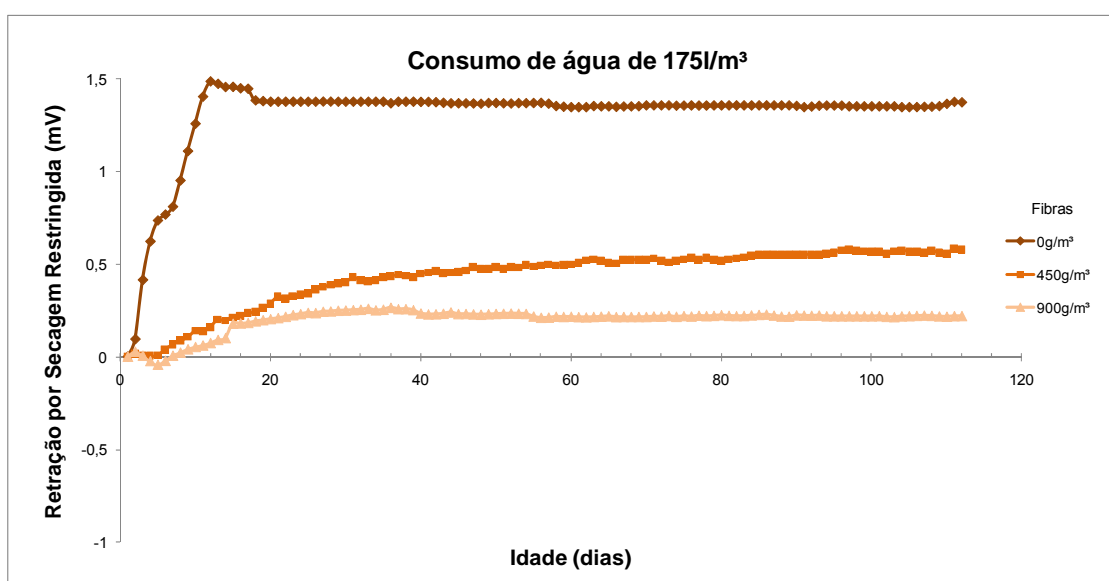
A retração por secagem restringida é uma propriedade extremamente importante na avaliação do proporcionamento dos compósitos cimentícios, uma vez que exerce influência direta sobre as características de durabilidade dos materiais. O procedimento utilizado neste ensaio possibilita a reprodução do comportamento do compósito cimentício, quando sujeito a restrições internas e externas.

Os resultados médios diários obtidos no ensaio de retração por secagem restringida são apresentados na figura 66. Os dados contidos nos gráficos representam os valores da tensão diária média imposta pelos concretos no anel de aço (núcleo). De forma a facilitar a visualização dos resultados, as figuras foram plotadas agrupando-se os traços com mesmo consumo de água. Os resultados individuais deste ensaio encontram-se no apêndice D.

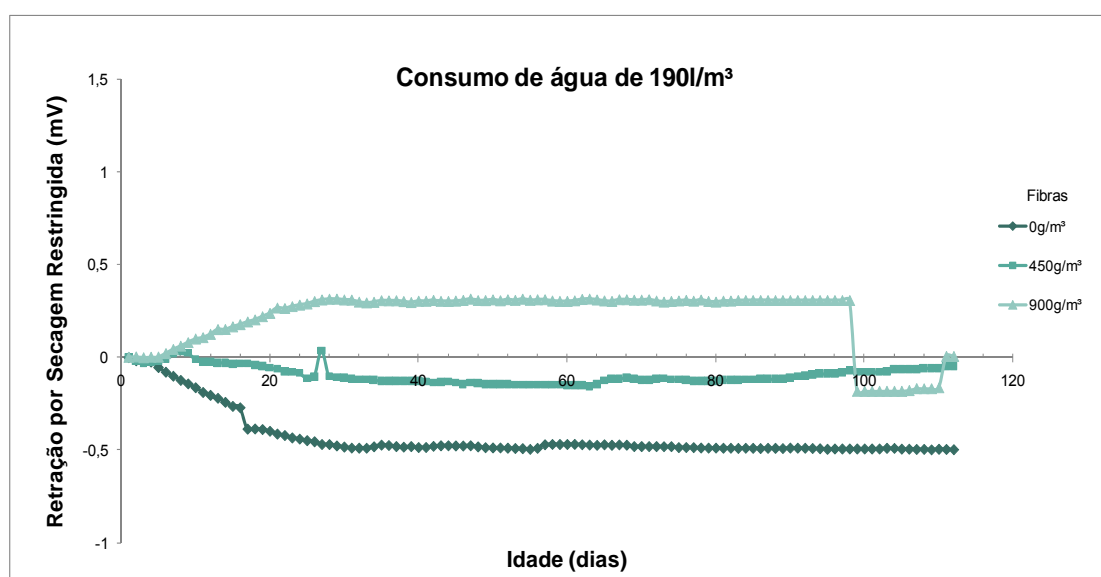
À medida que o concreto retrai, uma deformação à compressão é produzida no anel de aço (núcleo). Esta deformação é balanceada pelas deformações à tração que ocorrem no compósito cimentício. Quando acontece a primeira fissuração no concreto, estas

deformações e as tensões geradas sobre o núcleo de aço são aliviadas (MOKAREM; WEYERS; LANE, 2005).

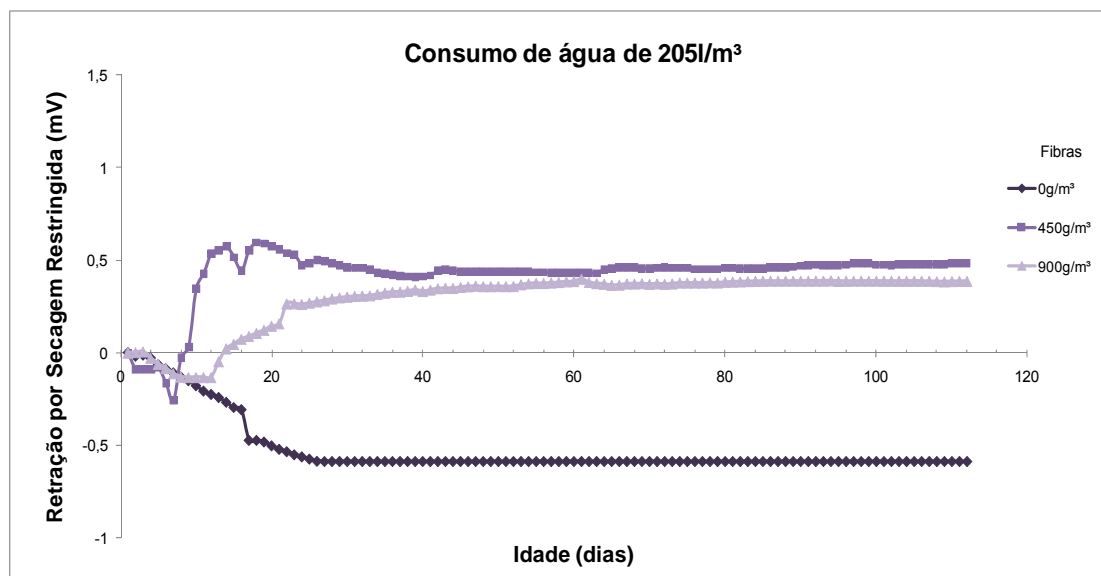
Analisando os gráficos, percebe-se uma leve queda na tensão sofrida pelo núcleo de aço, em alguns traços de concreto estudados. Tal comportamento representa o acontecimento de um alívio das tensões geradas sobre o anel de aço e das deformações do compósito cimentício, o qual evidencia a ocorrência de fissuração na matriz cimentícia.



(a)



(b)



(c)

Figura 66: valores médios diários da retração por secagem restringida do concreto. (a) traços com consumo de água de 175 l/m³. (b) traços com consumo de água de 190 l/m³. (c) traços com consumo de água de 205 l/m³

As figura 67 (a), (b) e (c) demonstram a abertura das fissuras, aos 145 dias, para os traços produzidos sem adição de microfibras de PP. A primeira fissura encontrada, visualmente, próximo à idade de 56 dias, foi no traço 7C (205 l/m³ – 0 g/m³). Tal fato era esperado, uma vez que este concreto foi produzido com um elevado consumo de água e sem qualquer adição de microfibras de PP.

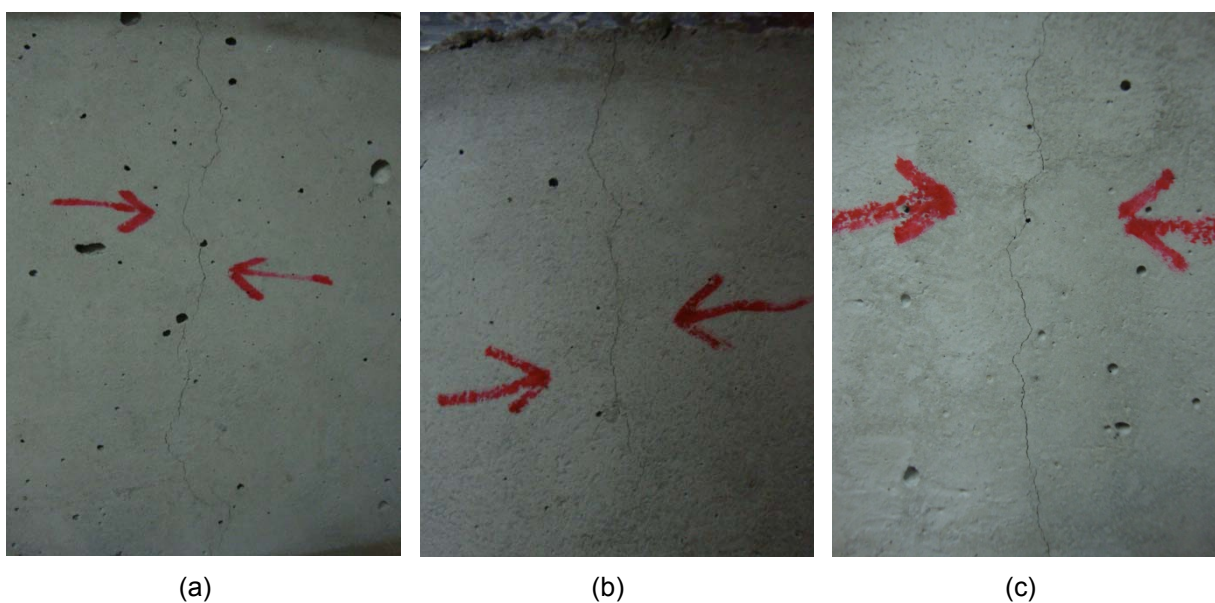


Figura 67: abertura das fissuras nos traços sem adição de microfibras de PP. (a) consumo de água de 175 l/m³. (b) consumo de água de 190 l/m³. (c) consumo de água de 205 l/m³.

Segundo a tabela 21, na idade de 56 dias, a intensidade da retração por secagem livre para o traço 7C (9A) foi de $-393 \mu\text{m}$. Assim, pode-se dizer que esta intensidade de deformação unidimensional livre corresponde à deformação máxima que este concreto suporta antes da ocorrência da sua fissuração.

No traço 1C ou 1A ($175 \text{ l/m}^3 - 0 \text{ g/m}^3$), a primeira fissura foi visualizada próximo à idade de 112 dias, assim como o ocorrido para o traço 4C ou 5A ($190 \text{ l/m}^3 - 0 \text{ g/m}^3$). Nestas idades, a magnitude da variação unidimensional livre foi de $-525 \mu\text{m}$ e de $-453 \mu\text{m}$, respectivamente. Desta forma, evidenciado a máxima deformação livre que os concretos suportam antes do aparecimento da primeira fissura.

Logo, percebe-se que quanto maior foi o consumo de água da mistura, para concretos sem adição de microfibras de PP, maior a tendência de fissuração da matriz cimentícia. Em outras palavras, pode-se dizer que o elevado volume de pasta de cimento presente no concreto originou uma maior tendência de fissuração da matriz cimentícia, em menores idades, para taxas de variação unidimensional livre inferiores.

Tal comportamento também foi evidenciado em pesquisa realizada por Tongaroonsri e Tangtermsirikul (2009), onde concretos contendo volumes maiores de pasta de cimento fissuraram mais rapidamente. Os autores mencionam, ainda, que a idade de fissuração do concreto varia de acordo com o proporcionamento dos materiais, com a presença de adições minerais e com o período de cura.

Após 112 dias, fissuras também foram evidenciadas nos traços produzidos com teor de adição de 450 g/m^3 de microfibras de polipropileno, e consumos de água de 190 l/m^3 (traço 5C), figura 68 (a), e 205 l/m^3 (traço 8C), figura 68 (b). Estas figuras demonstram a abertura das fissuras aos 145 dias.

A partir da figura 68, nota-se que a abertura da fissura do traço 8C, sendo este com um maior consumo de água, é consideravelmente maior, se comparada com a abertura da fissura do traço 5C. Fato esperado, uma vez que o consumo de água e o volume de pasta de cimento da mistura são mais elevados, bem como a intensidade da variação unidimensional livre, sendo de aproximadamente $-1015 \mu\text{m}$ e $-553 \mu\text{m}$, para os traços 8C e 5C, respectivamente. Estes valores foram considerados a partir da interpolação dos resultados obtidos neste ensaio para os traços com teores de adição de microfibras de PP de 300 g/m^3 e 600 g/m^3 , e seus respectivos consumos de água.

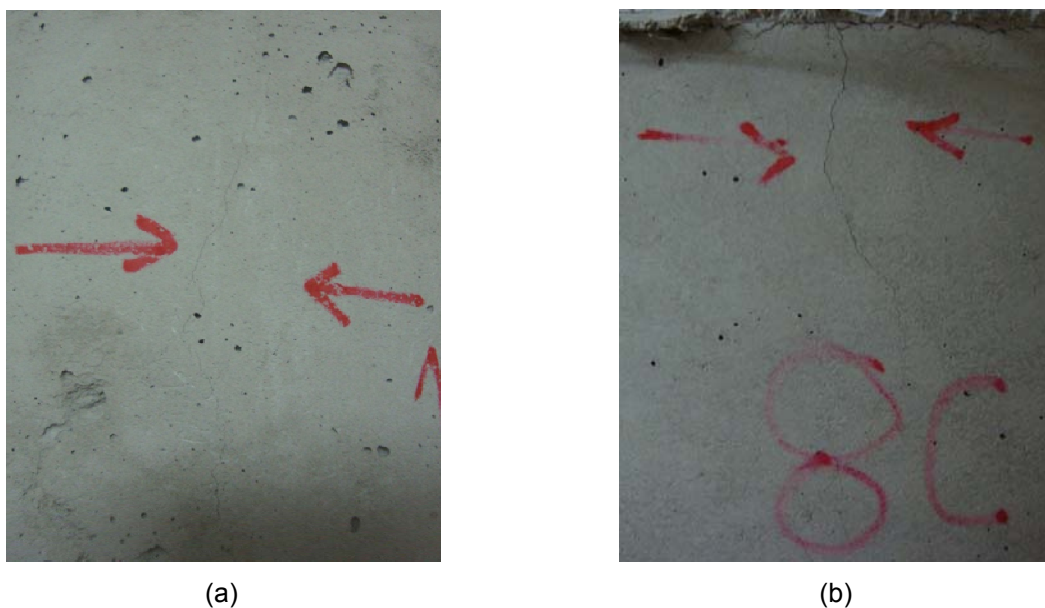


Figura 68: abertura das fissuras nos traços com adição de 450 g/m³ de microfibras de PP. (a) consumo de água de 190 l/m³. (b) consumo de água de 205 l/m³

A figura 69 mostra a abertura das fissuras para os traços dosados com teor de adição de 900 g/m³ de microfibras de polipropileno, e consumo de água de 175 l/m³, figura 69 (a), e 190 l/m³, figura 69 (b), respectivamente. A abertura das fissuras corresponde à idade de 112 dias.

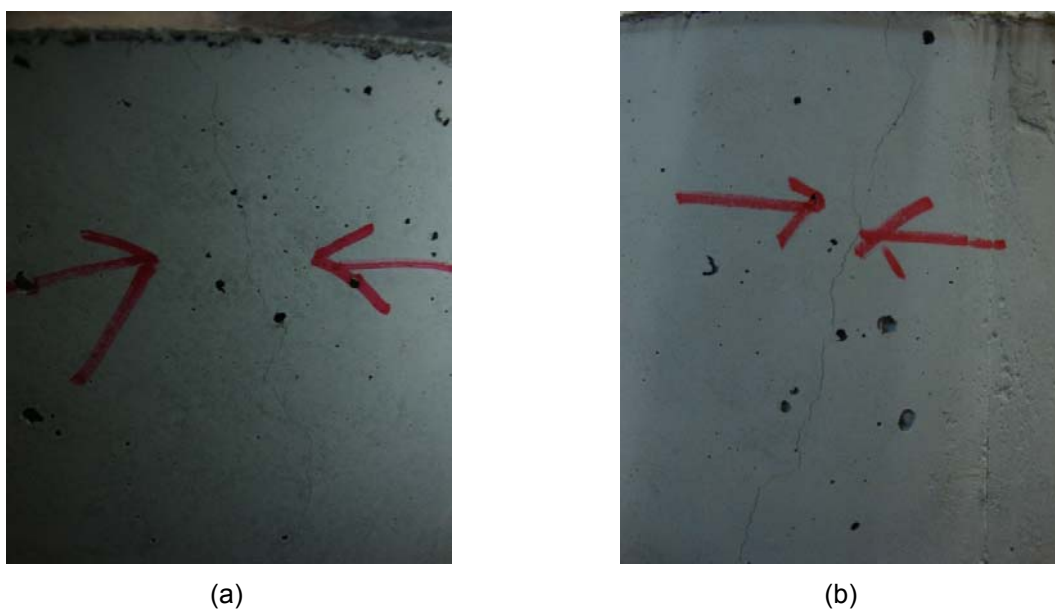


Figura 69: abertura das fissuras nos traços com adição de 900 g/m³ de microfibras de PP. (a) consumo de água de 175 l/m³. (b) consumo de água de 190 l/m³

Contrariamente ao comportamento esperado, dois traços com adição de 900g/m³ de microfibras de PP fissuraram. Acredita-se, que tal fato ocorreu devido à dificuldade de mistura do material e de moldagem dos corpos-de-prova, para os traços de concreto produzidos com elevados teores de adição de microfibras de PP e baixo volume de pasta de cimento, isto é, baixo consumo de água.

Desta forma, sem a utilização de qualquer aditivo químico, a formação de agrupamentos de microfibras de PP na matriz cimentícia foi inevitável, figura 17. Tal problemática não só prejudicou as propriedades da matriz cimentícia, pois os tufo de microfibras presentes atuaram como vazios, aumentando a sua porosidade, como também fez com que as microfibras de polipropileno perdessem a função para a qual tinha sido empregada, ou seja, a capacidade do material de restringir as deformações e, conseqüentemente, a fissuração do compósito, foi reduzida.

De acordo com a tabela 21, a deformação máxima que o concreto suportou antes da ocorrência de fissuração, para os traços com teor de adição de 900 g/m³, foi de -668 µm e -389 µm, para os traços com consumo de água de 175 l/m³ e 190 l/m³, respectivamente.

A tabela 23 demonstra o número de fissuras presentes, em cada um dos traços de concreto estudados, até a idade final de análise dos corpos-de-prova, isto é, até o 145º dia. A inspeção foi realizada visualmente, com o auxílio de uma luz fluorescente.

Tabela 23: número de fissuras encontradas em cada traço de concreto

Traço	Consumo de água (l/m ³)	Teor de adição de microfibras de PP (g/m ³)	Nº de fissuras
1C (1A)	175	0	2
2C	175	450	-
3C (4A)	175	900	1
4C (5A)	190	0	2
5C	190	450	1
6C (8A)	190	900	1
7C (9A)	205	0	2
8C	205	450	1
9C (12A)	205	900	-

Como demonstrado na tabela 23, somente os concretos 2C (175 l/m³ – 450 g/m³) e 9C (205 l/m³ – 900 g/m³) não apresentaram nenhuma fissuração até a idade avaliada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve por objetivo estudar a influência de parâmetros constituintes do traço do concreto, considerados importantes no processo de dosagem do compósito cimentício. Os fatores tipo de cimento (CP IV e CP V-ARI), consumo de água (175 l/m³, 190 l/m³ e 205 l/m³), teor de adição de microfibras de polipropileno (0 g/m³, 300 g/m³, 600 g/m³ e 900 g/m³) e idade, variável para cada ensaio, foram considerados. Para tal avaliação realizaram-se ensaios de resistência à compressão uniaxial, resistência à tração na flexão, retração por secagem livre e retração por secagem restringida dos concretos estudados.

As conclusões apresentadas a seguir, apesar de irem de encontro com a maior parte da bibliografia existente, não devem ser tomadas de forma absoluta, uma vez que se referem somente aos resultados obtidos dos concretos produzidos com tipos, quantidades e qualidades específicas de materiais e técnicas de execução. A representatividade do comportamento destes concretos deve ser firmada pela realização de novas pesquisas, buscando confirmar e complementar os dados obtidos nesta pesquisa.

5.1 CONCLUSÕES

A influência de cada fator controlável estudado foi verificada através da análise estatística realizada nesta pesquisa. Da relação destes fatores, com os ensaios de resistência à compressão uniaxial, resistência à tração na flexão, retração por secagem livre e retração por secagem restringida, realizados ao longo do tempo, conclui-se que:

- o tipo de cimento empregado na produção dos concretos, bem como a idade de análise exerceram influência direta na resistência à compressão uniaxial e na resistência à tração na flexão dos compósitos cimentícios estudados, sendo significativamente maiores para o cimento CP V-ARI e para idades mais avançadas;
- o efeito da adição de microfibras de polipropileno na resistência à compressão uniaxial dos concretos estudados mostrou-se significativo, causando incrementos de até 5% para adições de 300 g/m³ e 600 g/m³. No entanto, tal influência é pouco expressiva se comparada com os resultados obtidos na análise de variância para o tipo de cimento e a idade de ruptura;

- devido às características próprias da microfibras de polipropileno utilizada, a inserção da mesma nos concretos não se mostrou significativa na resistência à tração na flexão do material;
- a variação do consumo de água, mantendo-se constante a relação a/c , não se mostrou significativa na resistência à compressão uniaxial e na resistência à tração na flexão dos concretos avaliados;
- o tipo de cimento empregado na produção dos concretos não influenciou, significativamente, na magnitude da retração por secagem livre ao longo do tempo. Comportamento explicado pela finura do cimento, verificada através do ensaio de permeabilidade ao ar (método Blaine), que mostrou uma superfície específica semelhante para os cimentos CP IV e CP V-ARI;
- a magnitude da variação unidimensional livre (retração por secagem livre) do concreto aumentou ao longo do tempo, conforme esperado;
- o consumo de água da mistura exerceu influência significativa na magnitude da deformação unidimensional livre. Para os concretos estudados, com mesma relação a/c , evidenciou-se uma relação direta entre a variável controlável consumo de água e a intensidade da retração por secagem livre;
- o tipo de microfibras de polipropileno empregado na pesquisa não reduziu a magnitude da deformação unidimensional livre (retração por secagem livre) do concreto ao longo do tempo;
- a variável controlável consumo de água influenciou significativamente na tendência de fissuração do material, quando analisados pelo ensaio de retração por secagem restringida;
- no ensaio de retração por secagem restringida, notou-se que o aumento de volume da pasta de cimento, originado pelo aumento do consumo de água da mistura, majorou a tendência de fissuração da matriz cimentícia, em menores idades, para concretos sem adição de microfibras de polipropileno;
- teores de adição de 450 g/m^3 de microfibras de PP não reduziram a tendência de fissuração dos concretos avaliados, com consumo de água maiores (190 l/m^3 e 205 l/m^3). No entanto para os traços produzidos com consumo de água de 175 l/m^3 , este teor de adição mostrou-se adequado;
- a inserção de 900 g/m^3 de microfibras de PP, em traços com baixo volume de pasta de cimento, ou seja, baixo consumo de água, sem a presença de qualquer aditivo químico, aumentou a tendência de fissuração do compósito.

Tal comportamento decorreu da dificuldade de mistura e dispersão do material e da moldagem dos corpos-de-prova;

- o teor de adição de microfibras de polipropileno é uma variável dependente do proporcionamento dos demais materiais constituintes do traço do concreto; ou seja, a quantidade de microfibras incorporada à mistura não pode ser considerada como um valor fixo, predeterminado, como usualmente é realizado;
- o fato da não dispersão das microfibras de polipropileno, causadas pela ausência de aditivo químico ou por baixos teores de pasta de cimento, possivelmente, prejudicaram as propriedades mecânicas e aumentaram a retração por secagem do concreto;
- a inserção de microfibras de polipropileno na mistura não contribuiu para a redução da magnitude da retração por secagem livre dos concretos estudados. Entretanto, estas reduziram a tendência de fissuração do concreto, avaliada pelo ensaio de retração por secagem restringida, desde que dosadas adequadamente em função do teor de pasta de cimento empregado;
- o fato do cimento pozolânico estar muito fino, resultou em uma maior intensidade de retração por secagem, sendo esta superior à verificada para as misturas contendo cimento de alta resistência inicial;
- aditivos deveriam sempre ser utilizados quando ocorre a incorporação de microfibras de polipropileno em compósitos cimentícios.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto que o presente estudo ficou limitado pelas variáveis controláveis propostas, e que durante a sua realização surgiram novos questionamentos, sugere-se para pesquisas futuras a avaliação:

- microestrutural do efeito da adição de microfibras de polipropileno nos concretos, bem como de sua interação com o consumo de água da mistura;
- do efeito de outros tipos de cimento, comumente empregados na construção civil, frente aos fenômenos estudados;

- da influência do tipo de fibras de polipropileno incorporado na mistura, avaliando parâmetros como as dimensões e a geometria do material, em concretos com características semelhantes as avaliadas nesta pesquisa;
- do emprego de combinações entre diferentes tipos de fibras de polipropileno na mistura, como por exemplo, a mistura entre teores de adição de fibras de polipropileno monofilamentadas e de microfibras (*staple*);
- da incorporação de diferentes tipos de fibras, em compósitos cimentícios com tais características;
- do efeito da incorporação de adições, como a sílica ativa, o metacaulim e a escória de alto-forno, no fenômeno da retração por secagem;
- do efeito da utilização de aditivos químicos na composição do concreto, verificando o seu comportamento frente às variáveis de resposta estudadas, bem como a sua possibilidade de melhora na dispersão das microfibras de polipropileno;
- de diferentes condições ambientais (condições de contorno) e tipos de cura em ambiente laboratorial ou com a avaliação de protótipos, visando reduzir as consequências provenientes do fenômeno da retração por secagem em concretos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABABNEH, A.; XI, Y.; FRANGOPOL, D. M.; WILLAM, K. The damage of concrete structures due to coupled moisture transfer and drying shrinkage. **Proceedings of the 2001 ASCE Structures Congress and Exposition**. Washington, DC, Maio 2001. Disponível em: <<http://ascelibrary.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=ASCECP000109040558000027000001&idtype=cvips>>. Acessado em: 03.09.2009.
- ACI Committee 302. **ACI 302.1R-04 - Guide for Concrete Floor and Slab Construction**. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan, 2004.
- ACKER, P.; ULM, F. J. Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements. **Nuclear Engineering and Design**, v. 203, n. 2-3, p. 143-158, jan. 2001.
- AKKAYA, Y.; OUYANG, C.; SHAH, S. P. Effect of supplementary cementitious materials on shrinkage and crack development in concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 29, n. 2, p. 117-123, fev. 2007.
- ALY, T.; SANJAYAN, J. G.; COLLINS, F. Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes. **Materials and Structures**, v. 41, n. 10, p. 1741-1753, jan. 2008.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO PP34-99**: Standard practice for estimating the cracking tendency of concrete. Washington: 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C157**: Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. Philadelphia: 1993.
- AMZIANE, S. Setting time determination of cementitious materials based on measurements of the hydraulic pressure variations. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n.2, p. 295-304, fev. 2006.
- APPA RAO, G. Long-term drying shrinkage of mortar ÷ influence of silica fume and size of fine aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 2, p. 171-175, fev. 2001.
- ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 45:95**: Agregados – Determinação da massa unitária e dos espaços vazios. [s. l.], 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 9**: Concreto e argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- _____. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR NM 76:** Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

_____. **NBR 7211:** Agregados para Concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 7223:** Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

_____. **NBR 12142:** Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

BALTHAR, V. K. C. B. L. M. **Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas.** 2004. 144 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BAMFORTH, P. B. **Early-age thermal crack control in concrete.** Londres: CIRIA (Construction Industry Research and Information Association), 2007.

BANTHIA, N.; YAN, C.; MINDESS, S. Restrained shrinkage cracking in fiber reinforced concrete: A novel test technique. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 1, p. 9-14, jan. 1996.

BANTHIA, N.; GUPTA, R. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p. 1263-1267, jul. 2006.

BARCELO, L.; MORANVILLE, M.; CLAVAUD, B. Autogenous shrinkage of concrete: a balance between autogenous swelling and self-desiccation. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 1, p. 177-183, jan. 2005.

BAZANT, Z. P.; NAJJAR, L. J. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. **MATÉRIAUX ET CONSTRUCTIONS**, v. 5, n. 25, p. 3-20, 1972

BELZUNG, F.; WITTMANN, F. H. Role of disjoining pressure in cement based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 12, p. 2364-2370, dez. 2005.

BENBOUDJEMA, F.; MEFTAH, F.; TORRENTI, J. -M. Structural effects of drying shrinkage. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 131, n. 11, p. 1195-1199, nov. 2005.

BENBOUDJEMA, F.; MEFTAH, F.; TORRENTI, J. -M. A viscoelastic approach for the assessment of the drying shrinkage behavior of cementitious materials. **Materials and Structures**, v. 40, n. 2, p. 163-174, mar. 2007.

BENTZ, D. P.; LURA, P.; ROBERTS, J. W. Mixture proportioning for internal curing. **Concrete International**, v. 27, n. 2, p. 35-40, fev. 2005. Disponível em: <<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build05/PDF/b05003.pdf>>. Acessado em: 15 nov. 2009.

BENTZ, D. P. A review of early-age properties of cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 2, p. 196-204, fev. 2008.

BENTZ, D. P.; PELTZ, M. A.; WINPIGLER, J. Early-Age Properties of Cement-Based Materials: II. Influence of Water-to-Cement Ratio. **Materials in Civil Engineering**, v. 21, n. 9, p. 512-517, set. 2009.

BENTZ, D. P.; WEISS, J. W. **REACT: Reducing early-age cracking today**. Concrete Plant International, mai. 2008. Disponível em: <<http://ciks.cbt.nist.gov/~bentz/REACTpaper.pdf>>. Acessado em: 30 abr. 2009.

BISSCHOP, J.; VAN MIER, J. G. M. Effect of aggregates on drying shrinkage microcracking in cement-based composites. **Materials and Structures**, v. 35, n. 8, p. 453-461, set. 2002.

BISSCHOP, J.; VAN MIER, J. G. M. Effect of aggregates and microcracks on the drying rate of cementitious composites. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 10, p. 1190-1196, out. 2008.

BISSONNETTE, B.; PIERRE, P.; PIGEON, M. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 10, p. 1655-1662, out. 1999.

BJØNTEGAARD, O.; HAMMER, T. A.; SELLEVOLD, E. J. On the measurement of free deformation of early age cement paste and concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, n. 5, p. 427-435, jul. 2004.

BOGHOSSIAN, E.; WEGNER, L. D. Use of flax fibres to reduce plastic shrinkage cracking in concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 30, n. 10, p. 929-937, nov. 2008.

BURLION, N.; BOUGEOIS, F.; SHAO, J. F. Effects of desiccation on mechanical behaviour of concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, n. 3, p. 367-379, mar. 2005.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. **Metodologia Científica**. 5 ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002.

CHANG-WEN, M.; QIAN, T.; JIA-PING, L. Water consumption of the early-age paste and the determination of “time-zero” of self-desiccation shrinkage. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 11, p. 1496-1501, nov. 2007.

CHEN, B.; LIU, J. Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 5, p. 913-917, mai. 2005.

CHODOUNSKY, M. A.; VIECILI, F. A. **Pisos Industriais de Concreto – Aspectos Teóricos e Executivos**. São Paulo: Reggenza, 2007.

COLINA, H.; ACKER, P. Drying cracks: Kinematics and scale laws. **Materials and Structures**, v. 33, n. 2, p. 101-107, mar. 2000.

COLLEPARDI, M.; TROLI, R.; BRESSAN, M.; LIBERATORE, F.; SFORZA, G. Crack-free concrete for outside industrial floors in the absence of wet curing and contraction joints. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 10, p. 887-891, nov. 2008.

DAL MOLIN, D. C. C.; KULAKOWSKI, M. P.; RIBEIRO, J. L. D. Contribuições ao planejamento de experimentos em projetos de pesquisa de engenharia civil. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 2, p. 37-49, abr./jun. 2005.

FARNY, J. A. **Concrete Floors on Ground**. 3 ed. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, U.S.A., 2001.

GARCÍA, A.; CASTRO-FRESNO, D.; POLANCO, J. A. Evolution of penetration resistance in fresh concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 5, p. 649-659, mai. 2008.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GRANGER, L.; TORRENTI, J. M.; ACKER, P. Thoughts about drying shrinkage: Scale effects and modelling. **Materials and Structures**, v. 30, n. 2, p. 96-105, mar. 1997.

GRULLÓN PEÑA, M. R.; HELENE, P. R. L. **Estudo de fissuração associada à retração em argamassas para reparo em estruturas de concreto**. 2005. 23 f. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; MERMEDAŞ, K. Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin. **Materials and Structures**, v. 41, n. 5, p. 937-949, jun. 2008.

HADDAD, R. H.; SMADI, M. M. Role of fibers in controlling unrestrained expansion and arresting cracking in Portland cement concrete undergoing alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Reserach**, v. 34, n.1, p. 103-108, jan. 2004.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 349p.

HOLT, E. E. Early ages autogenous shrinkage of concrete. **Technical Research Centre of Finland**, ESPOO, 2001.

HOLT, E. E.; LEIVO, M. Cracking risks associated with early age shrinkage. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, n. 5, p. 521-530, jul. 2004.

HOLT, E. E. Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 3, p. 464-472, mar. 2005.

HOSSAIN, A. B.; WEISS, J. The role of specimen geometry and boundary conditions on stress development and cracking in the restrained ring test. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 1, p. 189-199, jan. 2006.

HSIE, M.; TU, C.; SONG, P. S. Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. **Materials Science and Engineering A**, v. 494, n. 1-2, p. 153-157, out. 2008.

HUA, C.; ACKER, P.; EURLACHER, A. Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste. I. Modelling at macroscopic scale. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1457-1468, out. 1995.

HUBERT, F. -X.; BURLION, N.; SHAO, J. -F. Drying of concrete: modeling of hidric damage. **Materials and Structures**, v. 36, n. 1, p. 12-21, jan.- fev. 2003.

IMAMOTO, K.; ARAI, M. Specific surface area of aggregate and its relation to concrete drying shrinkage. **Materials and Structures**, v. 41, n. 2, p. 323-333, mar. 2008.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Autogenous deformation and RH-change in perspective. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 12, p. 1859-1865, dez. 2001.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials: II. Experimental observations. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 6, p. 973-978, jun. 2002.

KAUFMANN, J.; WINNEFELD, F.; HESSELBARTH, D. Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, n. 5, p. 541-549, jul. 2004.

KRAUB, M.; HARIRI, K. Determination of initial degree of hydration for improvement of early-age properties of concrete using ultrasonic wave propagation. **Cement & Concrete Composites**, v. 28, n. 4, p. 299-306, abr. 2006.

LAM, H. **Effects of Internal Curing Methods on Restrained Shrinkage and Permeability**. 2005. 134f. Thesis (Civil and Environmental Engineering). University of Toronto.

LANING, A. **Synthetic fibers**. (1992) Disponível em: <ftp://imgs.ebuild.com/woc/C920525.pdf>. Acessado em: 29 mai. 2009.

LURA, P.; JENSEN, O. M.; VAN BREUGEL, K. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 2, p. 223-232, fev. 2003.

MA, Y.; TAN, M.; WU, K. Effect of different geometric polypropylene fibers on plastic shrinkage cracking of cement mortars. **Materials and Structures**, v. 35, n. 3, p. 165-169, abr. 2002.

MA, Y.; ZHU, B.; TAN, M.; WU, K. Effect of Y type polypropylene fiber on plastic shrinkage cracking of cement mortar. **Materials and Structures**, v. 37, n. 2, p. 92-95, mar. 2004.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração, análise e interpretação de dados**. 5 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3. ed. Califórnia: McGraw-Hill, 2006. Disponível em: <<http://www.docstoc.com/docs/2815799/Concrete-Microstructure-Properties-and-Materials>>. Acessado em: 12 dez. 2008.

MELO NETO, A. A.; **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada**. 2008. 333f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

MOKAREM, D. W.; WEYERS, R. E.; LANE, D. S. Development of a shrinkage performance specifications and prediction model analysis for supplemental cementitious material concrete mixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 5, p. 918-925, mai. 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução de Salvador E. Giamusso. 2 ed. São Paulo: PINI, 1997.

NONAT, A. Interactions between chemical evolution (hydration) and physical evolution (setting) in the case of tricalcium silicate. **Materials and Structures**, v. 27, n. 4, p. 187-195, mai. 1994.

NUNES, N. L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos**. 2006. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

NUNES, N. L.; FIGUEIREDO, A. D. **Retração do concreto de cimento Portland**. 2007. 59 f. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

OLIVEIRA, P. L. **Projeto estrutural de pavimentos rodoviários e de pisos industriais de concreto**. 2000. 246 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PRINCIGALLO, A.; LURA, P.; BREUGEL, K.; LEVITA, G. Early development of properties in cement paste: A numerical and experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 7, p. 1013-1020, jul. 2003.

RIBEIRO, J. L. D.; TEN CATEN, C. **Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2001.

ROBEYST, N.; GRUYAERT, E.; GROSSE, C. U.; DE BELIE, N. Monitoring the setting of concrete containing blast-furnace slag by measuring the ultrasonic p-wave velocity. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 10, p. 1169-1176, out. 2008.

ROBEYST, N.; GROSSE, C. U.; DE BELIE, N. Monitoring fresh concrete by ultrasonic Transmission measurements: Exploratory multi-way analysis of the spectral information. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 95, n. 1, p. 64-73, jan. 2009.

SA, C.; BENBOUDJEMA, F.; THIERY, M.; SICARD, J. Analysis of microcracking induced by differential drying shrinkage. **Cement & Concrete Composites**, v. 30, n. 10, p. 947-956, nov. 2008.

SALES, A. T. C. **Retração, fluência e fratura em compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu**. 2006. 273 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SANT, G.; FERRARIS, C. F.; WEISS, J. Rheological properties of cement pastes: A discussion of structure formation and mechanical property development. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 11, p. 1286-1296, nov. 2008.

SANTOS, F. I. G.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Influência da cinza pesada empregada em substituição ao agregado natural nos mecanismos de transferência de umidade em argamassas. **Revista Matéria**, v. 12, n. 2, ISSN 1517-7076, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762007000200003&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>. Acessado em: 23.07.2009.

SHIOTANI, T.; BISSCHOP, J.; VAN MIER, J. G. M. Temporal and spatial development of drying shrinkage cracking in cement-based materials. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 70, n. 12, p. 1509-1525, ago. 2003.

SILVA, E. F. **Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração**. 2007. 357 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SLOWIK, V.; HÜBNER, T.; SCHMIDT, M.; VILLMANN, B. Simulation of capillary shrinkage cracking in cement-like materials. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, n. 7, p. 461-469, ago. 2009.

SONG, P. S.; HWANG, S.; SHEU, B. C. Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 8, p. 1546-1550, ago. 2005.

SULE, M.; BREUGEL, K. V. The effect of reinforcement on early-age cracking due to autogenous shrinkage and thermal effects. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, n. 5, p. 581-587, jul. 2004.

SUN, Z.; VOIGT, T.; SHAH, S. Rheometric and ultrasonic investigations of viscoelastic properties of fresh Portland cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 2, p. 278-287, fev. 2006.

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 2, p. 281-287, fev. 1995.

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S.; KASAI, T. Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 2, p. 288-292, fev. 1995.

TOLEDO FILHO, R. D.; GHAVAMI, K.; SANJUÁN, M. A.; ENGLAND, G. L. Free, restrained, drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetables fibres. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, n. 5, p. 537-546, mai. 2005.

TONGAROONSRI, S.; TANGTERMSIRIKUL, S. Effect of mineral admixtures and curing periods on shrinkage and cracking age under restrained condition. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 1050-1056, fev. 2009.

VAN DAM, T. J. *et al.* **Final Report for Early-Opening-to-Traffic Portland Cement Concrete for Pavement Rehabilitation**. NCHRP Web-Only Document 76 (Project 18-4B), 2005. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w76.pdf>. Acessado em: 15 dez. 2009.

VARGAS, M. **Metodologia da pesquisa tecnológica**. Rio de Janeiro: Globo, 1985.

ZHANG, J.; LI, V. C. Influences of fibers on drying shrinkage of fiber-reinforced cementitious composites. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 127, n. 1, p. 37-44, jan. 2001.

ZHANG, M. H.; TAM, C. T.; LEOW, M. P. Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 10, p. 1687-1694, out. 2003.

WITTMANN, F. H.; BELTZUNG, F.; ZHAO, T. J. Shrinkage mechanisms, crack formation and service life of reinforced concrete structures. **International Journal Structures Engineering**, v. 1, n. 1, p. 13-28, 2009.

YURTDAS, I.; PENG, H.; BURLION, N.; SKOCZYLAS, F. Influences of water by cement ratio on mechanical properties of mortars submitted to drying. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p. 1286-1293, jul. 2006.

**APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO UNIAXIAL**

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (MPa)							
CIMENTO POZOLÂNICO				CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL			
Traços	Idades (dias)			Traços	Idades (dias)		
	7	28	91		7	28	91
1A (175-0)	16,5	23,2	28,1	1B (175-0)	30,8	35,5	46,4
	17,0	23,2	29,8		31,4	39,8	46,3
	16,2	21,9	30,0		28,2	35,7	44,3
2A (175-300)	17,0	22,5	34,40	2B (175-300)	28,7	42,8	47,7
	18,3	26,5	35,40		34,1	41,4	48,7
	18,1	26,3	32,70		30,3	41,1	47,4
3A (175-600)	16,6	24,3	32,50	3B (175-600)	29,5	35,3	45,2
	15,6	26,4	35,50		28,5	33,3	43,2
	16,0	25,6	31,80		28,4	39,3	45,7
4A (175-900)	16,0	21,5	34,00	4B (175-900)	30,1	36,7	41,5
	16,3	17,2	35,20		29,8	31,4	42,8
	16,5	20,4	34,00		30,6	32,2	39,0
5A (190-0)	15,7	21,5	26,6	5B (190-0)	30,0	36,6	41,7
	15,9	23,6	29,7		30,3	36,5	41,1
	15,9	22,8	29,5		30,9	32,1	41,8
6A (190-300)	17,0	24,4	32,8	6B (190-300)	31,5	34,1	42,3
	17,4	22,0	32,4		31,3	38,4	42,9
	16,7	23,8	31,4		31,1	35,7	43,5
7A (190-600)	18,7	27,5	39,3	7B (190-600)	29,8	34,4	42,8
	19,1	29,7	38,3		27,5	35,3	44,8
	19,9	29,8	39,3		28,6	36,5	42,1
8A (190-900)	16,9	21,1	31,9	8B (190-900)	33,0	39,2	47,3
	17,0	20,5	26,6		30,6	36,1	47,1
	18,8	19,4	28,8		30,5	35,0	44,6
9A (205-0)	17,8	27,8	33,0	9B (205-0)	28,8	31,7	44,3
	17,7	25,3	34,0		31,0	39,1	43,1
	16,2	26,8	32,7		27,1	37,5	43,5
10A (205-300)	16,9	26,3	32,0	10B (205-300)	23,2	36,5	45,8
	17,5	25,3	35,3		29,3	35,6	45,5
	17,9	25,9	32,6		28,2	36,3	44,4
11A (205-600)	16,6	26,2	33,0	11B (205-600)	29,3	38,8	45,1
	18,5	25,7	34,1		29,6	35,3	41,9
	14,9	24,7	33,8		24,2	35,7	42,1
12A (205-900)	17,9	23,3	33,0	12B (205-900)	29,4	34,0	45,2
	17,0	24,0	32,4		25,4	33,0	43,1
	16,6	24,0	31,9		24,0	35,7	46,6

**APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA
FLEXÃO**

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)							
CIMENTO POZOLÂNICO				CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL			
Traços	Idades (dias)			Traços	Idades (dias)		
	7	28	91		7	28	91
1A (175-0)	7,18	6,92	7,24	1B (175-0)	8,13	10,15	9,17
	6,92	7,31	6,94		7,87	8,05	9,23
	6,75	6,36	7,87		8,05	10,25	8,52
2A (175-300)	7,28	6,36	8,37	2B (175-300)	6,28	7,96	8,85
	7,40	9,20	10,42		8,04	9,60	8,95
	7,88	7,87	8,88		7,60	8,21	9,21
3A (175-600)	5,56	8,54	8,12	3B (175-600)	8,04	8,70	8,45
	6,58	8,29	9,60		7,45	8,71	9,23
	5,72	8,53	9,67		8,52	7,60	9,13
4A (175-900)	7,14	8,18	8,61	4B (175-900)	8,45	8,36	10,05
	6,39	8,05	8,45		8,21	8,53	9,27
	6,91	7,92	8,86		9,21	8,61	8,79
5A (190-0)	7,71	7,88	9,04	5B (190-0)	7,88	9,53	9,34
	7,86	8,21	9,86		7,47	9,18	8,76
	6,96	8,21	8,62		7,63	8,77	10,35
6A (190-300)	7,18	6,72	9,48	6B (190-300)	8,20	7,77	10,08
	6,85	7,28	8,79		8,45	8,28	9,31
	6,91	6,84	8,00		8,61	8,45	9,57
7A (190-600)	7,21	8,04	7,63	7B (190-600)	7,92	7,33	7,50
	6,55	7,24	8,21		8,29	8,36	8,37
	6,29	7,85	8,54		7,72	8,37	8,44
8A (190-900)	7,01	7,95	8,03	8B (190-900)	9,72	8,77	9,50
	7,17	7,03	8,21		7,90	9,82	9,47
	7,33	7,75	7,80		8,02	9,02	9,93
9A (205-0)	7,15	7,87	9,50	9B (205-0)	7,50	8,61	9,22
	6,71	6,92	8,70		8,37	7,96	8,62
	6,98	6,94	8,97		8,12	7,54	10,21
10A (205-300)	6,91	6,71	7,94	10B (205-300)	7,86	8,62	8,94
	7,10	8,45	8,62		8,36	7,95	10,07
	6,14	6,82	8,28		7,87	7,87	9,41
11A (205-600)	6,28	5,98	8,71	11B (205-600)	9,04	9,88	11,40
	6,35	6,72	8,54		7,38	8,21	11,16
	6,39	6,55	8,96		7,95	9,68	10,60
12A (205-900)	6,45	7,38	7,29	12B (205-900)	7,72	9,27	10,43
	5,94	6,61	7,95		7,96	9,72	8,88
	6,32	6,98	8,18		7,60	8,69	9,14

**APÊNDICE C – RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RETRAÇÃO POR SECAGEM
LIVRE**

	Traços	CP	Idades (dias)							
			Referência	4	7	14	28	56	112	
RETRAÇÃO POR SECAGEM LIVRE (µm)	CIMENTO POZOLÂNICO - CP IV	1A	1	0	921	372	902	824	471	1
			2	0	29	-17	-68	-177	-335	-1052
		2A	1	0	216	327	293	54	-490	-341
			2	0	87	221	-46	-69	-636	-457
		3A	1	0	155	64	42	-234	-346	-379
			2	0	-57	-139	-258	-707	-683	-662
		4A	1	0	-214	-106	-361	-464	-887	-786
			2	0	116	203	-12	-121	-623	-549
		5A	1	0	487	290	93	-188	-268	-440
			2	0	-18	18	56	-259	-316	-466
		6A	1	0	40	75	-285	-372	-515	-650
			2	0	-	-	-	-	-	-
		7A	1	0	-215	-206	-6	-307	-321	-438
			2	0	-199	-306	-57	-345	-314	-475
		8A	1	0	1	-48	-68	-628	-373	-373
			2	0	183	-114	-373	-644	-404	-404
		9A	1	0	16	-227	107	-181	-330	-436
			2	0	-85	-345	-31	-292	-455	-545
		10A	1	0	-207	-207	-209	-689	-689	-965
			2	0	235	90	-57	-213	-248	-719
		11A	1	0	64	-533	0	-316	-594	-1056
			2	0	-85	-293	-121	-294	-495	-1320
		12A	1	0	-194	0	-263	-416	-622	-772
			2	0	-145	49	-201	-368	-599	-790
CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL - CP V-ARI		1B	1	0	26	30	-84	-191	-550	-478
			2	0	131	132	-1	-86	-532	-457
		2B	1	0	-4	-175	237	10	-91	-292
			2	0	-182	-83	83	-216	-311	-427
		3B	1	0	219	-46	147	136	-176	-227
			2	0	119	212	125	36	-183	-277
		4B	1	0	31	-42	-138	-50	-392	-413
			2	0	101	89	-93	-271	-351	-331
		5B	1	0	85	122	153	-52	-662	-553
			2	0	132	222	95	-16	-638	-546
		6B	1	0	-	-	-	-	-	-
			2	0	99	70	36	-100	-183	-275
		7B	1	0	-11	-23	-156	-447	-665	-726
			2	0	-8	-20	-319	-438	-564	-910
		8B	1	0	52	88	-88	-200	-325	-321
			2	0	-19	-102	-184	-282	-419	-459
		9B	1	0	410	-232	46	-118	-148	-338
			2	0	-136	-386	-64	-299	-344	-457
		10B	1	0	-329	-56	-328	-336	-608	-1175
			2	0	148	298	-118	-125	-291	-381
		11B	1	0	68	80	-122	-289	-358	-622
			2	0	-222	-262	-433	-432	-596	-641
		12B	1	0	-182	-487	-180	-500	-553	-722
			2	0	-101	-277	-14	-185	-374	-569

**APÊNDICE D – RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE RETRAÇÃO POR SECAGEM
RESTRINGIDA**

Datas de Leituras	RETRAÇÃO POR SECAGEM RESTRINGIDA - TENSÕES (mV)								
	DATAS DE CONCRETAGEM								
	24/9/2009	6/10/2009	29/9/2009	6/10/2009	8/10/2009	1/10/2009	29/9/2009	5/11/2009	5/11/2009
	TRAÇOS DE CONCRETO - ANÉIS								
	5C	7C (9A)	8C	4C (5A)	3C (4A)	9C (12A)	1C (1A)	2C	6C (8A)
28/9/2009	1,1286	0,4999	1,3938	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
29/9/2009	1,1079	0,4812	1,3972	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30/9/2009	1,1000	0,4489	1,7996	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1/10/2009	1,1010	0,2262	2,5837	0,0000	0,0000	0,1322	1,9310	0,0000	0,0000
2/10/2009	1,1090	0,0000	1,3089	0,0000	0,0000	0,1348	0,0000	0,0000	0,0000
3/10/2009	1,1229	0,0000	1,3169	0,0000	0,0000	0,1381	0,0000	0,0000	0,0000
4/10/2009	1,1477	0,0000	1,2348	0,0000	0,0000	0,1042	0,0000	0,0000	0,0000
5/10/2009	1,1591	0,0000	1,1393	0,0000	0,0000	0,0717	0,0035	0,0000	0,0000
6/10/2009	1,1535	0,5849	1,3723	0,8502	0,0000	0,0488	0,0977	0,0000	0,0000
7/10/2009	1,1194	0,5657	1,4296	0,8328	0,0000	0,0206	0,4177	0,0000	0,0000
8/10/2009	1,1029	0,5714	1,7427	0,8321	0,0480	0,0026	0,6255	0,0000	0,0000
9/10/2009	1,1056	0,5565	1,8248	0,8260	0,0747	0,0000	0,7385	0,0000	0,0000
10/10/2009	1,1000	0,5211	1,9326	0,7968	0,0537	0,0000	0,7705	0,0000	0,0000
11/10/2009	1,0993	0,4991	1,9488	0,7713	0,0242	0,0000	0,8130	0,0000	0,0000
12/10/2009	1,0916	0,4766	1,9720	0,7496	0,0044	0,0000	0,9543	0,0000	0,0000
13/10/2009	1,0951	0,4538	1,9124	0,7269	0,0257	0,0855	1,1130	0,0000	0,0000
14/10/2009	1,0956	0,4338	1,8390	0,7081	0,0535	0,1547	1,2610	0,0000	0,0000
15/10/2009	1,0890	0,4071	1,9509	0,6873	0,0702	0,1789	1,4073	0,0000	0,0000
16/10/2009	1,0798	0,3785	1,9918	0,6618	0,0885	0,2069	1,4897	0,0000	0,0000
17/10/2009	1,0728	0,3605	1,9865	0,6458	0,1010	0,2214	1,4763	0,0000	0,0000
18/10/2009	1,0663	0,3437	1,9737	0,6301	0,1092	0,2385	1,4593	0,0000	0,0000
19/10/2009	1,0510	0,3179	1,9541	0,6082	0,1224	0,2551	1,4599	0,0000	0,0000
20/10/2009	1,0497	0,2903	1,9349	0,5863	0,1393	0,2770	1,4519	0,0000	0,0000
21/10/2009	1,0449	0,2786	1,9283	0,5791	0,1495	0,2898	1,4499	0,0000	0,0000
27/10/2009	1,0164	0,1139	1,8705	0,4635	0,2275	0,3970	1,3870	0,0000	0,0000
28/10/2009	1,0236	0,1136	1,8810	0,4641	0,2291	0,3976	1,3828	0,0000	0,0000
29/10/2009	1,1655	0,1055	1,9000	0,4611	0,2317	0,3940	1,3799	0,0000	0,0000
30/10/2009	1,0273	0,0842	1,8935	0,4515	0,2407	0,4016	1,3800	0,0000	0,0000
31/10/2009	1,0212	0,0657	1,8827	0,4365	0,2471	0,4085	1,3801	0,0000	0,0000
1/11/2009	1,0173	0,0530	1,8703	0,4288	0,2528	0,4146	1,3800	0,0000	0,0000
2/11/2009	1,0118	0,0365	1,8570	0,4159	0,2584	0,4241	1,3800	0,0000	0,0000
3/11/2009	1,0100	0,0253	1,8551	0,4093	0,2653	0,4298	1,3800	0,0000	0,0000
4/11/2009	1,0100	0,0130	1,8552	0,4010	0,2743	0,4332	1,3800	0,0000	0,0000
5/11/2009	1,0085	0,0014	1,8452	0,3948	0,2797	0,4379	1,3808	0,4968	0,1848
6/11/2009	1,0012	0,0000	1,8304	0,3802	0,2867	0,4393	1,3803	0,5127	0,1864
7/11/2009	1,0002	0,0000	1,8253	0,3798	0,2857	0,4412	1,3800	0,5049	0,1822
8/11/2009	1,0000	0,0000	1,8183	0,3723	0,2928	0,4488	1,3800	0,5028	0,1849
9/11/2009	1,0000	0,0000	1,8104	0,3662	0,2947	0,4551	1,3800	0,5060	0,1854
10/11/2009	1,0000	0,0000	1,8092	0,3607	0,2984	0,4600	1,3800	0,5375	0,2044

11/11/2009	1,0000	0,0000	1,8047	0,3601	0,2996	0,4610	1,3800	0,5651	0,2268
12/11/2009	0,9986	0,0000	1,8098	0,3600	0,3018	0,4651	1,3800	0,5846	0,2447
13/11/2009	0,9933	0,0000	1,8158	0,3678	0,3040	0,4721	1,3800	0,6044	0,2638
14/11/2009	0,9946	0,0000	1,8395	0,3769	0,3090	0,4640	1,3714	0,6375	0,2834
15/11/2009	0,9981	0,0000	1,8471	0,3747	0,3008	0,4718	1,3800	0,6371	0,2908
16/11/2009	0,9923	0,0000	1,8410	0,3691	0,3039	0,4792	1,3800	0,6585	0,3086
17/11/2009	0,9849	0,0000	1,8368	0,3658	0,3145	0,4816	1,3800	0,6992	0,3345
18/11/2009	0,9920	0,0000	1,8365	0,3690	0,3070	0,4807	1,3789	0,6931	0,3348
19/11/2009	0,9897	0,0000	1,8342	0,3637	0,3072	0,4863	1,3787	0,7097	0,3493
20/11/2009	0,9850	0,0000	1,8341	0,3640	0,3018	0,4895	1,3771	0,7195	0,3613
21/11/2009	0,9841	0,0000	1,8342	0,3702	0,2836	0,4931	1,3739	0,7328	0,3758
22/11/2009	0,9839	0,0000	1,8357	0,3733	0,2786	0,4901	1,3707	0,7410	0,3870
23/11/2009	0,9829	0,0000	1,8357	0,3733	0,2793	0,4903	1,3713	0,7609	0,4043
24/11/2009	0,9816	0,0000	1,8353	0,3724	0,2819	0,4908	1,3708	0,7833	0,4220
25/11/2009	0,9808	0,0000	1,8344	0,3720	0,2891	0,4900	1,3704	0,8239	0,4512
26/11/2009	0,9815	0,0000	1,8355	0,3734	0,2805	0,4914	1,3689	0,8128	0,4486
27/11/2009	0,9813	0,0000	1,8315	0,3672	0,2807	0,5006	1,3726	0,8256	0,4589
28/11/2009	0,9808	0,0000	1,8314	0,3631	0,2786	0,5054	1,3727	0,8346	0,4670
29/11/2009	0,9806	0,0000	1,8308	0,3617	0,2769	0,5078	1,3711	0,8406	0,4734
30/11/2009	0,9802	0,0000	1,8305	0,3615	0,2796	0,5074	1,3698	0,8605	0,4861
1/12/2009	0,9801	0,0000	1,8302	0,3601	0,2811	0,5098	1,3723	0,8744	0,4949
2/12/2009	0,9791	0,0000	1,8306	0,3585	0,2819	0,5128	1,3716	0,8856	0,4992
3/12/2009	0,9778	0,0000	1,8307	0,3575	0,2829	0,5163	1,3726	0,8940	0,4993
4/12/2009	0,9729	0,0000	1,8285	0,3538	0,2821	0,5179	1,3733	0,8994	0,4949
5/12/2009	0,9841	0,0000	1,8272	0,3595	0,2811	0,5303	1,3694	0,9260	0,4943
6/12/2009	1,0041	0,0000	1,8466	0,3788	0,2670	0,5131	1,3564	0,9125	0,4833
7/12/2009	1,0108	0,0000	1,8528	0,3805	0,2600	0,5066	1,3525	0,9040	0,4788
8/12/2009	1,0142	0,0000	1,8577	0,3800	0,2610	0,5029	1,3502	0,9112	0,4820
9/12/2009	1,0191	0,0000	1,8598	0,3804	0,2660	0,4973	1,3500	0,9290	0,4909
10/12/2009	1,0118	0,0000	1,8580	0,3808	0,2646	0,4986	1,3507	0,9327	0,4902
11/12/2009	1,0064	0,0000	1,8518	0,3788	0,2661	0,5047	1,3560	0,9407	0,4906
12/12/2009	1,0083	0,0000	1,8539	0,3772	0,2635	0,5045	1,3549	0,9346	0,4864
13/12/2009	1,0116	0,0000	1,8545	0,3756	0,2623	0,5062	1,3546	0,9285	0,4811
14/12/2009	1,0152	0,0000	1,8575	0,3786	0,2646	0,5031	1,3521	0,9463	0,4880
15/12/2009	1,0089	0,0000	1,8556	0,3761	0,2662	0,5055	1,3540	0,9517	0,4881
16/12/2009	1,0099	0,0000	1,8544	0,3779	0,2681	0,5027	1,3543	0,9609	0,4925
17/12/2009	1,0080	0,0000	1,8542	0,3764	0,2637	0,5047	1,3551	0,9510	0,4875
18/12/2009	1,0000	0,0000	1,8500	0,3689	0,2644	0,5101	1,3600	0,9514	0,4865
19/12/2009	1,0000	0,0000	1,8500	0,3689	0,2644	0,5101	1,3600	0,9560	0,4888
20/12/2009	1,0000	0,0000	1,8500	0,3689	0,2644	0,5101	1,3600	0,9636	0,4923
21/12/2009	1,0000	0,0000	1,8500	0,3689	0,2644	0,5101	1,3600	0,9827	0,4993
22/12/2009	1,0061	0,0000	1,8552	0,3683	0,2674	0,5107	1,3583	0,9719	0,4919
23/12/2009	1,0072	0,0000	1,8555	0,3686	0,2663	0,5103	1,3588	0,9711	0,4915
24/12/2009	1,0058	0,0000	1,8507	0,3635	0,2699	0,5141	1,3595	0,9808	0,4956
25/12/2009	1,0099	0,0000	1,8511	0,3638	0,2655	0,5152	1,3589	0,9703	0,4906

Influência do consumo de água, do teor de adição de microfibras de polipropileno e do tipo de cimento no fenômeno da retração por secagem em concretos empregados em pisos.

26/12/2009	1,0107	0,0000	1,8506	0,3633	0,2694	0,5156	1,3592	0,9823	0,4964
27/12/2009	1,0109	0,0000	1,8504	0,3613	0,2672	0,5180	1,3596	0,9788	0,4926
28/12/2009	1,0118	0,0000	1,8563	0,3606	0,2713	0,5190	1,3596	0,9949	0,4992
29/12/2009	1,0122	0,0000	1,8586	0,3606	0,2690	0,5193	1,3596	0,9859	0,4934
30/12/2009	1,0111	0,0000	1,8598	0,3600	0,2706	0,5200	1,3600	0,9904	0,4957
31/12/2009	1,0179	0,0000	1,8616	0,3599	0,2742	0,5200	1,3600	0,9958	0,4962
1/1/2010	1,0274	0,0000	1,8665	0,3590	0,2708	0,5201	1,3595	0,9906	0,4890
2/1/2010	1,0300	0,0000	1,8707	0,3598	0,2693	0,5200	1,3599	0,9932	0,4871
3/1/2010	1,0366	0,0000	1,8714	0,3595	0,2699	0,5200	1,3600	0,9957	0,4874
4/1/2010	1,0395	0,0000	1,8699	0,3583	0,2729	0,5204	1,3600	1,0054	0,4903
5/1/2010	1,0400	0,0000	1,8706	0,3595	0,2754	0,5200	1,3598	1,0184	0,4976
6/1/2010	1,0402	0,0000	1,8699	0,3592	0,2773	0,5202	1,3600	1,0242	0,4997
7/1/2010	1,0477	0,0000	1,8726	0,3582	0,2719	0,5215	1,3574	1,0135	0,4948
8/1/2010	1,0587	0,0000	1,8806	0,3608	0,2666	0,5190	1,3506	1,0028	0,4896
9/1/2010	1,0503	0,0000	1,8795	0,3601	0,2661	0,5193	1,3535	1,0020	0,4870
10/1/2010	1,0499	0,0000	1,8795	0,3600	0,2733	0,5199	1,3580	1,0198	0,4961
11/1/2010	1,0493	0,0000	1,8727	0,3585	0,2718	0,5200	1,3592	1,0222	0,4961
12/1/2010	1,0507	0,0000	1,8713	0,3572	0,2711	0,5200	1,3592	1,0203	0,4935
13/1/2010	1,0520	0,0000	1,8711	0,3544	0,2723	0,5201	1,3586	1,0217	0,4941
14/1/2010	1,0625	0,0000	1,8759	0,3558	0,2682	0,5193	1,3547	1,0296	0,4963
15/1/2010	1,0625	0,0000	1,8759	0,3558	0,2682	0,5193	1,3547	1,0155	0,4894
16/1/2010	1,0625	0,0000	1,8759	0,3558	0,2682	0,5193	1,3547	1,0077	0,4834
17/1/2010	1,0625	0,0000	1,8759	0,3558	0,2682	0,5193	1,3547	1,0155	0,4868
18/1/2010	1,0700	0,0000	1,8759	0,3558	0,2682	0,5193	1,3547	1,0229	0,4893
19/1/2010	1,0700	0,0000	1,8759	0,3558	0,2682	0,5193	1,3547	1,0303	0,4924
20/1/2010	1,0700	0,0000	1,8759	0,3558	0,2682	0,5193	1,3547	1,0219	0,4885
21/1/2010	1,0800	0,0000	1,8800	0,3595	0,2688	0,5174	1,3501	1,0324	0,4945
22/1/2010	1,0806	0,0000	1,8802	0,3591	0,2651	0,5159	1,3501	1,0194	0,4869
23/1/2010	1,0807	0,0000	1,8801	0,3549	0,2638	0,5176	1,3507	1,0145	0,4833
24/1/2010	1,0778	0,0000	1,8789	0,3547	0,2680	0,5187	1,3520	1,0242	0,4887
25/1/2010	1,0772	0,0000	1,8779	0,3536	0,2686	0,5186	1,3531	1,0294	0,4891
26/1/2010	1,0794	0,0000	1,8786	0,3537	0,2701	0,5192	1,3559	1,0351	0,4918
27/1/2010	1,0801	0,0000	1,8785	0,3512	0,2718	0,5199	1,3681	1,0432	0,3101
28/1/2010	1,0842	0,0000	1,8798	0,3544	0,2704	0,5172	1,3788	0,6682	0,0038
29/1/2010	1,0879	0,0000	1,8799	0,3536	0,2675	0,5135	1,3765	0,7091	0,0129
30/1/2010	1,0858	0,0000	1,8788	0,3521	0,2661	0,5147	1,3770	0,7773	0,0000
31/1/2010	1,0811	0,0000	1,8769	0,3502	0,2687	0,5168	1,3794	0,0635	0,0000
1/2/2010	1,0801	0,0000	1,8783	0,3500	0,2695	0,5194	1,3799	0,3391	0,0000
2/2/2010	1,0805	0,0000	1,8862	0,3501	0,2690	0,5200	1,3798	0,6628	0,0000
3/2/2010	1,0800	0,0000	1,8995	0,3501	0,2743	0,5200	1,3798	0,1035	0,0168
4/2/2010	1,0802	0,0000	1,9000	0,3501	0,2758	0,5200	1,3797	0,2361	0,0349
5/2/2010	1,0899	0,0000	1,9079	0,3529	0,2697	0,5194	1,3776	0,3330	0,0407
6/2/2010	1,0954	0,0000	1,9100	0,3559	0,2670	0,5160	1,3738	1,0555	0,0100
7/2/2010	1,0933	0,0000	1,9100	0,3527	0,2686	0,5178	1,3752	1,0607	0,0100
8/2/2010	1,0933	0,0000	1,9100	0,3510	0,2715	0,5196	1,3777	1,0739	0,0100

9/2/2010	1,1044	0,0000	1,9101	0,3587	0,2693	0,5113	1,3668	1,0762	0,0160
10/2/2010	1,1092	0,0000	1,9118	0,3597	0,2675	0,5095	1,3611	0,7571	0,0292
11/2/2010	1,1081	0,0000	1,9154	0,3596	0,2646	0,5027	1,3604	0,5699	-0,1846
12/2/2010	1,1102	0,0000	1,9152	0,3592	0,2631	0,5027	1,3604	0,5696	-0,1848
13/2/2010	1,1088	0,0000	1,9100	0,3550	0,2606	0,5079	1,3633	0,5662	-0,1848
14/2/2010	1,1052	0,0000	1,9102	0,3515	0,2640	0,5098	1,3667	0,5561	-0,1848
15/2/2010	1,1092	0,0000	1,9115	0,3533	0,2627	0,5077	1,3652	0,5702	-0,1848
16/2/2010	1,1110	0,0000	1,9127	0,3519	0,2619	0,5071	1,3629	0,5739	-0,1848
17/2/2010	1,1146	0,0000	1,9185	0,3527	0,2635	0,5050	1,3679	0,5698	-0,1848
18/2/2010	1,1208	0,0000	1,9271	0,3567	0,2608	0,4979	1,3731	0,5664	-0,1806
19/2/2010	1,1204	0,0000	1,9279	0,3567	0,2640	0,4952	1,3733	0,5639	-0,1702
20/2/2010	1,1200	0,0000	1,9258	0,3583	0,2600	0,4931	1,3723	0,5729	-0,1708
21/2/2010	1,1148	0,0000	1,9202	0,3575	0,2592	0,4935	1,3750	0,5615	-0,1705
22/2/2010	1,1144	0,0000	1,9196	0,3583	0,2644	0,4965	1,3783	0,5564	-0,1655
23/2/2010	1,1173	0,0000	1,9246	0,3571	0,2602	0,4950	1,3800	0,5831	0,0043
24/2/2010	1,1213	0,0000	1,9284	0,3563	0,2609	0,4956	1,3800	0,5773	0,0043