

Lucas Onghero

**COMBATE À RETRAÇÃO E FISSURAÇÃO EM CONCRETOS
DE ALTO DESEMPENHO REFORÇADOS COM MICROFIBRA
DE VIDRO**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil
da Universidade Federal de Santa Ca-
tarina para a obtenção do Grau de mes-
tre em Engenharia Civil
Orientador: Prof. Dr. Wellington
Longuini Repette

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Onghero, Lucas

Combate à retração e fissuração em concretos de
alto desempenho reforçado com microfibra de vidro /
Lucas Onghero ; orientador, Wellington Longuini
Repetto, 2017.
143 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Concreto de alto
desempenho reforçado com fibras. 3. Retração em
concretos. 4. Fissuração de concreto. 5. Microfibras
de vidro. I. Repette, Wellington Longuini. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Lucas Onghero

**COMBATE À RETRAÇÃO E FISSURAÇÃO EM CONCRETOS
DE ALTO DESEMPENHO REFORÇADOS COM MICROFI-
BRAS DE VIDRO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2 de março de 2017.

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof.^a Wellington Longuini Repette, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Berenice Martins Toralles Carbonari, Dr.^a
Universidade Estadual de Londrina
(Videoconferência)

Prof. Philippe Jean Paul Gleize, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fernando Pelisser, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Venho agradecer primeiramente ao meu orientador, professor Dr. Wellington Longuini Repette, que desde 2009, quando ingressei como aluno de Iniciação Científica, não mediu esforços para me ensinar e acerca do ambiente acadêmico e sua importância para o desenvolvimento do país, além de ter contribuído muito para meu crescimento profissional e pessoal.

Aos colegas e amigos conquistados durante todo esse tempo de UFSC, os quais sempre estiveram dando aquele incentivo.

Quero agradecer aos amigos do GTEC, por toda ajuda dada, sendo tanto para o desenvolvimento deste trabalho quanto à companhia nos raros momentos de descontração. Gostaria de agradecer também ao professor Luiz Roberto Prudêncio Junior, pelos conhecimentos compartilhado e sua amizade durante todos esses anos.

Ao professor Luís Gómez, pelo suporte técnico no desenvolvimento dos equipamentos usados nesta dissertação.

À Universidade Federal de Santa Catarina, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, a seus professores e funcionários.

Ao grupo Nanotec, ao Laboratório de Materiais de Construção – LMCC, e aos órgãos de fomento CAPES, CESP e FAPESC.

Aos amigos da pós-graduação, em especial aos do GTec e do Nanotec, pela ajuda, horas de descontração e amizade de sempre.

Às empresas: Grace, MM Fibras, Supermix Concreto S/A e Maxmohr pela doação dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Ao CNPQ, pelo indispensável apoio financeiro.

Meus mais sinceros agradecimentos aos amigos do Futebol do Acojar, em especial aos professores Rafael Higashi e Ivo Padaratz, ao ambiente extremamente confortável que ali construímos, servindo como o escape da rotina de pesquisa.

RESUMO

O surgimento dos concretos de alto desempenho (CAD) tem como premissa a preocupação com a durabilidade da estrutura, porém por apresentarem maior refinamento dos poros e maior consumo de cimento, acabam se mostrando vulneráveis aos efeitos autógenos de retração, aumentando a possibilidade de fissuração do concreto. Uma vez fissurado, é facilitado o ingresso dos agentes agressivos na estrutura, promovendo a deterioração, perda de durabilidade e com avanço do tempo, perda de estabilidade mecânica. Dentro desse cenário, se faz importante estudar métodos para combater a deformação do concreto devido à retração e, melhoramentos do material frente à capacidade de resistir à fissuração. Desta forma, objetivo deste trabalho é produzir um concreto de alto desempenho com retração controlada utilizando microfibras de vidro. Portanto, nesta pesquisa foi realizado ensaios de retração livre, objetivando descrever a capacidade da mistura em se deformar devido ao efeito do fenômeno de retração; ensaio de retração restringida, dando como resposta a deformação e tempo para surgimento da fissuração do material; além da caracterização no estado fresco e no estado endurecido. Foram confeccionados CADs com duas relações A/Agl (A/Agl) diferentes, sendo utilizado as relações de 0,25 e 0,32; e as adições de fibras ocorreram em teores de 0,20%; 0,25% e 0,30% do volume de concreto. Concluiu-se, portanto, para os teores estudados, a incorporação de fibra auxiliou na diminuição da deformação devido à retração autógena livre, principalmente para as misturas com relação A/Agl 0,32, onde apresentou diminuição da deformação em até 75% em relação com sua referência. Quando restringida, foi possível notar que ao adicionar fibra, o concreto apresentou menor deformação, porém não ocorreu diferença significativa entre as misturas quanto ao tempo necessário para a fissuração do concreto. Quanto às propriedades mecânicas, ocorreu a diminuição dos valores de resistência à compressão e de módulo de elasticidade da mistura até os 7 dias, período onde é de extrema importância quando se espera combater a fissuração por retração autógena, efeito que pode ser atribuído por falha de amostragem e elevada quantidade de fibra incorporada, resultando em heterogeneidade do CADRF. Elevados teores de fibra resultam em acréscimo do teor de ar incorporado na mistura resultando em diminuição das propriedades mecânicas do CADRF. Portanto é possível afirmar que a incorporação de fibra possui influência nos parâmetros analisados, porém se deve estudar melhor o volume de fibras a ser incorporados, uma vez que elevados teores pode resultar em perda de eficiência mecânica, não proporcionando o benefício que se busca ao incorporar as fibras no concreto.

Palavra-chave: retração autógena, concreto de alto desempenho, concreto reforçado com fibra

ABSTRACT

The emergence of high performance concrete (HPC) has as a premise a concern with a durability of the structure, however, because they present greater pore refinement and higher cement consumption, they are shown to be vulnerable to the autogenous effects of retraction, with the possibility of cracking the concrete. Once cracked, it is facilitated the entry of aggressive agents into the structure, promoting deterioration, loss of durability and with advancement of time, loss of mechanical stability. Within one scenario, it is important to study methods to combat concrete deformation due to shrinkage and material improvements over the ability to withstand cracking. In this way, the objective of this work is to produce a high-performance concrete with controlled retraction using glass microfibers. Thus, in the research was carried out free retraction tests, aiming to describe a mixing ability to deform due to the effect of retraction phenomenon; Restricted retraction test, giving as answer the deformation and time for the appearance of the cracking of the material; In addition to the characterization is not fresh and not hardened state. HPC's were made with two different Water / Binder (W/B) ratios, being used as ratios of 0.25 and 0.32; And the fiber additions were set at 0.20%; 0.25% and 0.30% of the concrete volume. Therefore, an incorporation of auxiliary fibers in the reduction of the tests due to the autonomous retraction, mainly for the mixtures with W/B ratio of 0.32, 75% in relation to its reference, was concluded for the studied contents. When restricted, there may or may not be a combination of fibers, or no lower formability, but there is no significant difference between the mixtures as to the time required for cracking the concrete. As for the mechanical properties, there was a decrease in the values of compressive strength and modulus of elasticity of the mixture up to 7 days, the period where it is of the utmost importance when it is expected that the fight against cracking by autogenous retraction, an effect that can Be attributed by sampling failure and high amount of fiber incorporated, resulting in heterogeneity of the FRHPC. High fiber content results in an increase in the air content incorporated in the mixture resulting in a decrease in the mechanical properties of the FRHPC. Thus, it is possible to consider that a fiber incorporation has influence on the parameters analyzed, but it is better to study the fiber volume to be incorporated, since high can result in loss of mechanical efficiency, not providing the benefit that is sought to incorporate like fibers in the concrete.

Keyword: autogenous shrinkage, high performance concrete, glass fibre reinforced concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concentração de tensões em descontinuidades na tração.	27
Figura 2 - Propagação de fissuras em compósitos.	29
Figura 3 - Mecanismo de supressão de fissuras por compósitos de fibras espaçadas.	30
Figura 4 - Transferência de tensões através de uma fissura.	31
Figura 5 - Representação esquemática das tensões distribuídas nas fibras e na matriz.	34
Figura 6 - Sistema de propagação das fissuras e descolamento da interface.	34
Figura 7 - Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico.	35
Figura 8 - Comportamentos característicos de CRF com fibras.	36
Figura 9 - Corrosão da seção da fibra de vidro utilizada em concreto Reforçado com Fibras exposto à ambientes agressivo.	38
Figura 10 - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade.	39
Figura 11 - Representação da distribuição de tensões em relação ao comprimento crítico das fibras.	41
Figura 12 - Fratura do compósito de acordo com o comprimento crítico.	41
Figura 13 - Comportamento da inclinação da fibra inclinada em função da sua ductilidade.	43
Figura 14 - Eficiência da configuração das fibras na mistura.	44
Figura 15 - Relação entre o raio de curvatura e pressão de vapor de água em um tubo capilar.	47
Figura 16 - Forças exercidas pela água nos poros dos géis das pastas de cimento endurecidas.	49
Figura 17 - Causas de fissuração em estruturas de concreto armado.	50
Figura 18 - Efeito da umidade relativa na retração à carbonatação, retração por secagem e retração do concreto.	52
Figura 19 - Coeficiente de expansão térmica para pasta de cimento e concretos.	53
Figura 20 - Resposta esquemática da retração de misturas cimentícias com a alteração do ciclo de secagem e molhagem.	54
Figura 21 - Extremidade do corpo de prova de retração restringida linear.	58

Figura 22 - Curvas de retração e fluência obtidas através dos dados de ensaios de retração livre e restringida.	59
Figura 23 - Desenho esquemático da dosagem do CADRF.	70
Figura 24 - Processo de mistura padrão para o estudo.	73
Figura 25 - Esquema explicativo da nomenclatura das misturas adotado na dissertação	74
Figura 26 - Distribuição granulométrica do cimento.	75
Figura 27: Espectros de Raio-X obtidos para o cimento com a identificação dos seus principais constituintes.....	76
Figura 28 - Distribuição granulométrica da Sílica Ativa.....	77
Figura 29: Equipamento para análise de FTIR.....	79
Figura 30: Espectro de infravermelho do aditivo superplastificante	80
Figura 31: Espectros de infravermelho do aditivo superplastificante e água.	80
Figura 32 – Imagem da amostra de fibra de vidro encontrada no mercado.....	81
Figura 33 – Imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da matriz reforçada com fibra de vidro.....	81
Figura 34 - Aparatos utilizados para ensaio de espalhamento (slump flow).....	83
Figura 35 – Ensaio de espalhamento realizado na mistura de 0,25_0% (a) e 0,25_0,2% (b).	83
Figura 36: Forma metálica (a), vista superior da forma metálica moldada com concreto, em destaque as paredes revestidas com isopor (b); detalhe da conexão do pino solidarizado ao concreto e ao transdutor de descolamento (c).	85
Figura 37: Vista geral da banca de retração pronta para usar (esquerda), com ensaio em andamento (direita).....	86
Figura 38 - Aparato para ensaio de retração restringida de acordo com a ASTM 1581 (2009).	87
Figura 39 - Representação da ponte de Wheatstone.....	88
Figura 40: Ensaio de retração autógena restringida (a) e detalhe da impermeabilização dos anéis de concreto (b).	91
Figura 41 – Etapas de realização do Ensaio Barcelona.	93
Figura 42 – Comportamento da curva Tensão-Deformação dos concreto e seus componentes.	94
Figura 43 – Diagrama Tensão-Deformação e o avanço de microfissuras no interior do concreto em função do carregamento aplicado.....	95

Figura 44 – Representação esquemática do módulo tangente inicial (a) e representação esquemática do procedimento (b).....	96
Figura 45 - Aparato utilizado para realização de módulo de elasticidade.....	98
Figura 46 - Posicionamento do detector e pulsador para a detecção da vibração longitudinal.....	99
Figura 47 - Posicionamento do detector e pulsador para a detecção da vibração flexional e torcional (COSSOLINO; PEREIRA, 2010).....	99
Figura 48 - Retração livre das misturas com relação A/Agl 0,25.....	104
Figura 49 - Retração livre das misturas com relação A/Agl 0,32.....	104
Figura 50 - Influência das fibras na deformação das misturas às 140 horas.....	105
Figura 51 - Retração restringida das misturas com relação A/Agl 0,25.....	106
Figura 52 - Retração restringida das misturas com relação A/Agl 0,32.....	107
Figura 53 – Retração restringida média das misturas.....	107
Figura 54 - Influência do teor de MFV na resistência à compressão dos compósitos nem diferentes idades.....	109
Figura 55 – Evolução da resistência à compressão de cada mistura estudada.....	110
Figura 56 – Relação entre Resistência à tração indireta.....	111
Figura 57 – Influência do teor de MFV no módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos.....	113
Figura 58 – Evolução do módulo dinâmico em relação da idade de hidratação.....	113
Figura 59 – Influência do teor de MFV no módulo de elasticidade estático dos compósitos em diferentes idades.....	115
Figura 60 – Evolução do módulo de elasticidade estático para os teores de adição de MFV.....	115
Figura 61 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura relação A/Agl 0,25.....	129
Figura 62 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura 0,25_0,20%.....	129
Figura 63 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura 0,25_0,20%.....	130
Figura 64 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura 0,25_0,25%.....	130

Figura 65 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura 0,25_0,30%	130
Figura 66 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura relação A/Agl 0,32.....	131
Figura 67 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura 0,30_0,0 %MFV.	131
Figura 68 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura 0,30_0,20 %MFV.	132
Figura 69 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura 0,30_0,25 %MFV.	132
Figura 70 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura 0,30_30 %MFV.	132
Figura 71 - Resultados obtidos no ensaio de retração restringida em todos os strain gauges para as misturas 0,25_0 %MFV.	133
Figura 72 - Resultados obtidos no ensaio de retração restringida em todos os strain gauges para as misturas 0,25_0,2%MFV.	133
Figura 73 - Resultados obtidos no ensaio de retração restringida em todos os strain gauges para as misturas 0,25_0,25%MFV.	134
Figura 74 - Resultados obtidos no ensaio de retração restringida em todos os strain gauges para as misturas 0,25_0,3%MFV.	134
Figura 75 - Resultados obtidos no ensaio de retração restringida em todos os strain gauges para as misturas 0,32_0 %MFV.	134
Figura 76 - Resultados obtidos no ensaio de retração restringida em todos os strain gauges para as misturas 0,32_0,2%MFV.	135
Figura 77 - Resultados obtidos no ensaio de retração restringida em todos os strain gauges para as misturas 0,32_0,25%MFV.	135
Figura 78 - Resultados obtidos no ensaio de retração restringida em todos os strain gauges para as misturas 0,32_0,3%MFV.	135
Figura 79 – Taxa de liberação de calor para as misturas de referência.....	137
Figura 80 – Calor total liberado nas misturas de referência.	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios de classificação do CAD segundo FHWA.	25
Tabela 2 - Propriedades dos materiais componentes das matrizes de cimento e de algumas fibras.	39
Tabela 3 - Fator de orientação das fibras (η_1).	43
Tabela 4 - Redução de fissuração com o aumento de 0,05% no volume de fibra utilizado.....	63
Tabela 5 - Redução de fissuração em argamassas reforçadas com fibras (PELISSER et al., 2010)	64
Tabela 6 - Resumo da influência da adição de fibras nas propriedades do concreto.	67
Tabela 7 - Quadro resumo dos traços unitários em massa.....	74
Tabela 8 - Quadro resumo do consumo de material em kg/m ³ . ..	74
Tabela 9 - Valores percentuais da distribuição granulométrica do cimento.....	75
Tabela 10: Caracterização química e física do cimento CP V ARI	76
Tabela 11 - Determinação da análise química quantitativa do cimento.....	76
Tabela 12 - Valores percentuais da distribuição granulométrica da sílica ativa.....	77
Tabela 13 - Determinação da análise química quantitativa da sílica ativa.....	78
Tabela 14 - Distribuição do percentual retido acumulado dos agregados que foram usados no programa experimental.....	78
Tabela 15 - Propriedades da fibra utilizada.	81
Tabela 16 - Quadro resumo dos ensaios realizados.....	82
Tabela 17 - Resumo do avanço da microfissuração e do comportamento da curva tensão-deformação dos concretos em função da porcentagem da tensão última	95
Tabela 18 - Expressões para a estimativa do módulo de elasticidade	97
Tabela 19 - Relações entre Módulo de elasticidade dinâmico e estático.....	102
Tabela 20 - Resultado dos ensaios realizados em estado fresco.	103
Tabela 21 – Espaçamento entre fibras estimado.....	106
Tabela 22 – Descrição da amostragem do ensaio de retração restringida.....	108

Tabela 23 - Teste Anova para a data de ruptura obtida no ensaio restringido	108
Tabela 24 - Teste Anova para o ensaio de resistência à compressão	110
Tabela 25 - Teste Anova para o ensaio de tração indireta.....	112
Tabela 26 - Teste Anova para o ensaio de módulo dinâmico...	114
Tabela 27 - Diferença entre os resultados obtidos pelos modelos em relação ao ensaio de módulo à compressão.....	116
Tabela 28 - Teste Anova para o ensaio de módulo à compressão.	117
Tabela 29 - Teste de significância entre os grupamentos ensaio do módulo de elasticidade estático.....	139
Tabela 30 -Teste de significância entre os grupamentos para ensaio do módulo de elasticidade dinâmico.	140
Tabela 31 -Teste de significância entre os grupamentos para os ensaios de resistência à compressão.....	140
Tabela 32 - Teste de significância entre os grupamentos para os ensaios de tração indireta.	141
Tabela 33 -Teste de significância entre os grupamentos para a idade de ruptura obtida nos ensaios de retração restringida.	141

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
CNPq – Conselho Nacional de Pesquisas
PPGEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
NANOTEC - Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil
FAPESC – Fundação de Amparo à Pesquisa de Santa Catarina
CESP – Centrais Elétricas de São Paulo
CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
LMCC – Laboratório de materiais de construção civil
GTEC – Grupo de tecnologia em materiais à base de cimento portland
HPC – *High performance concrete*
CAD – Concreto de alto desempenho
A/Agl – Água / Aglomerante
W/B – *Water / Blind*
CADRF – Concreto de alto desempenho reforçado com fibra
FRHPC – *Fiber reinforced high performance concrete*
NBR - norma da associação brasileiras de normas técnicas.
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
FHWA – *federal highway administration*
AR – Álcali resistente
MFV – Microfibra de vidro
MEV – Microscopia eletrônica de varredura
CP V-ARI – Cimento Portland Tipo V de Alta resistência inicial
DRX – Difractometria de Raio-X
FRX – Fluorescência de Raio-X
MPa – Mega Pascal
GPa – Giga Pascal
 μm - micrometro
mm - milímetro
 g/cm^3 - gramas por centímetro cúbico
 kg/m^3 - quilograma por metro cúbico

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_l - tensão na extremidade da fissura;
 σ_0 - tensão de tração aplicada;
 a - comprimento da fissura superficial ou metade do comprimento da fissura interna;
 ρ_e - raio da curvatura na extremidade da fissura.
 σ - tensão de tração aplicada;
 w_c - dimensão crítica característica de abertura de fissura;
 w - dimensão da abertura da fissura;
 $\sigma_w(w)$ - tensão de fechamento da fissura fictícia;
 f_t - resistência à tração do compósito.
 V_f - Volume de fibra utilizado;
 $V_{crítico}$ - Volume crítico de fibra;
 l_c - comprimento crítico da fibra;
 σ - resistência à tração;
 τ - força de ligação da interface fibra/matriz
 d - diâmetro da fibra;
 N - número de fibras por unidade de área (Aveston & Kelly);
 η_θ - fator de correção devido à distribuição das fibras;
 S - fator de espaçamento das fibras (Romuald & Mandel);
 d - raio das fibras;
 S - fator de espaçamento das fibras (Romuald & Mandel);
 η_1 = fator de orientação das fibras;
 ϵ_{mu} - deformação última de ruptura da matriz;
 E_c - módulo de elasticidade do compósito;
 σ_{fu} - resistência à tração da fibra;
 η_l - fator de correção em função da orientação das fibras de Krenchel (1964).
 p_0 - pressão de vapor sobre uma superfície plana;
 p - valor de pressão correspondente;
 T - tensão de superfície do líquido;
 R - constante dos gases;
 θ - temperatura absoluta;
 r raio de curvatura d menisco;
 ρ densidade do líquido.
 M aglomerante - massa de aglomerante (kg);
 V_p - volume de pasta/m³ de concreto (m³);
 ρ_{ag} - massa específica do aglomerante (g/cm³);
 ρ_c - massa específica do cimento (g/cm³);
 ρ_{mc} - massa específica da sílica ativa (g/cm³).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	19
1.1	OBJETIVOS	21
1.1.1	Objetivo geral	21
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1	CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRA	23
2.1.1	Propagação de fissuras	27
2.1.2	Interface matriz-fibra	31
2.1.3	Classificação do comportamento mecânico dos concretos reforçados com fibra.	35
2.2	Fatores influentes no desempenho do compósito.....	36
2.2.1	Fibras	36
2.2.1.1	Fibras de Vidro Álcali Resistente.....	37
2.2.2	Resistência à tração e módulo de elasticidade das fibras. 38	
2.2.3	Fator de forma.....	40
2.2.4	Distribuição e volume de adição.	42
2.3	RETRAÇÃO	46
2.3.1	Formas de retração.	50
2.3.1.1	Retração por carbonatação.	51
2.3.1.2	Retração térmica.	52
2.3.1.3	Retração por secagem.	53
2.3.1.4	Retração autógena.....	55
2.3.1.5	Ensaio para retração.....	57
2.3.1.6	Combate à retração.....	60
2.4	Influência da utilização de fibras na retração.....	61
2.5	Síntese do capítulo	66
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	69
3.1	DOSAGEM DO CADRF	69

3.2	MATERIAIS.....	74
3.2.1	Cimento.....	75
3.2.2	Sílica Ativa.....	77
3.2.3	Agregados	78
3.2.4	Aditivo Superplastificante.....	79
3.2.5	Fibra.....	80
3.3	MÉTODOS	82
3.3.1	Avaliação tecnológica no estado fresco	82
3.3.2	Bancada de retração autógena livre.....	83
3.3.3	Retração autógena restringida.....	87
3.3.4	Resistência mecânica à compressão.....	91
3.3.5	Resistência à tração indireta.....	92
3.3.6	Módulo estático de elasticidade à compressão e módulo de elasticidade dinâmica.....	93
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	103
4.1	Avaliação tecnológica no estado fresco	103
4.2	Bancada de retração autógena livre	103
4.3	Retração autógena restringida.....	106
4.4	Resistência mecânica à compressão.....	108
4.5	Resistência a tração indireta.....	111
4.6	Módulo estático de elasticidade à compressão e módulo de elasticidade dinâmica.....	112
5	CONCLUSÕES.....	118
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119
	APÊNDICE A.....	129
	APÊNDICE B.....	133
	APÊNDICE C.....	137
	APÊNDICE D.....	139

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O concreto de alto desempenho (CAD) vem sendo desenvolvido desde os meados dos anos 90, os quais além de possuir boa trabalhabilidade, deveriam apresentar elevada resistência mecânica e durabilidade (CUSSON & HOOGEVEEN, 2007). Neste período, a elevada resistência mecânica à compressão era o principal critério adotado para se avaliar o desempenho da mistura, mesmo não sendo a propriedade mais adequada para classificar estes concretos, uma vez que são dosados para suportar exposições à ambientes de elevada agressividade e, apesar dos concretos apresentarem elevadas resistências, estruturas recém construídas já vinham apresentar grande deterioração, mostrando que somente a resistência não é parâmetro para assegurar a durabilidade de uma estrutura (MEHTA & AÏTCIN, 1990).

A diminuição da porosidade das misturas de CAD, conseguidas através do auxílio do surgimento de aditivos químicos redutores de água, possibilitando trabalhar com concretos de baixas relações água/Aglomerante (A/Agl), contribuem para o aumento da durabilidade da estrutura. Porém essas misturas normalmente apresentam elevados consumos de aglomerantes, fazendo com que se tornem mais vulneráveis aos efeitos da retração autógena e conseqüentemente sujeitos à fissuração do concreto.

Com a fissuração da camada de concreto, o aço da estrutura fica menos protegido e, desta forma, estará sujeito ao avanço de agentes agressivos presentes no ambiente, diminuindo assim a vida útil da edificação.

Desta forma, a adição de fibras em concretos tem sido utilizada para reforçar o material, o qual apresenta comportamento frágil. Inicialmente começou a ser incorporado nas misturas fibras de amianto e, com o passar dos anos e o avanço das tecnologias, surgiram as fibras de celulose, aço, de vidro, polipropileno; melhorando assim as características do material, principalmente as propriedades mecânicas pós fissuração da matriz. Apesar disso, a sua incorporação resulta em perda de fluidez, uma vez que as fibras se comportam como agregados lamelares, contendo elevada área superficial, que faz com que aumente seu atrito interno.

Portanto, para compensar a perda de trabalhabilidade das misturas contendo fibras, se faz necessário a utilização de aditivos superplastificante, fazendo com que se possa obter a fluidez desejada.

Assim como nos agregados normalmente utilizados, a utilização de fibras resulta no surgimento de uma zona de transição entre a pasta e as fibras, estas se tornando um plano de falha do concreto reforçado com fibras (CRF). Essa região pode vir a ser fortalecida com a adição de materiais pozolânicos. Mesmo com o melhoramento da matriz por adições

pozolônicas, a zona de transição se mostra um fator influente no desempenho do CRF. (LARANJEIRA et al., 2012; LEE; KANG & KIM, 2010)

Com a adição das fibras, o CRF apresenta uma diminuição da fragilidade, que é características das misturas do concreto, passando a apresentar um comportamento pseudo dúctil e, capacidade portante após fissuração, permitindo uma redistribuição das tensões aplicadas no material.(FIGUEIREDO, 2011)

Tendo em vista esta transformação do comportamento da mistura, as fibras se mostram um material particularmente interessante para ser utilizados em elementos de superfície contínuos (revestimentos de túneis), pavimentos rígidos, elementos estruturais que apresentam elevada taxa de armadura ou concreto para reparos estruturais.

Neste contexto, este trabalho é parte integrante de um projeto UFSC-CESP, sob a coordenação do Professor Wellington Longuini Repette, com motivação no reparo e construção de obras do setor elétrico. O projeto se pautou em obter concretos autoadensáveis de alto desempenho com retração controlada, sem detrimento das propriedades no estado fresco, tendo como autor o doutorando Ronaldo Pilar. Na sequência, os trabalhos foram divididos em duas linhas. A primeira avaliou a durabilidade dos concretos frente a carbonatação e cloretos, resultando no trabalho de mestrado desenvolvido por Rafael Dors Sakata e, a segunda avaliou os efeitos da incorporação de microfibras de vidro nos concretos de referência, onde os resultados foram apresentados nesse texto.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Investigar o efeito da incorporação de microfibras de vidro como agente de combate à retração em concretos de alto desempenho reforçado com microfibra de vidro.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir. O primeiro capítulo traz uma breve introdução sobre o tema, além apresentar os objetivos estabelecidos e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo é apresentada uma abordagem geral sobre as características do concreto de alto desempenho reforçado com fibra, enfatizando sua utilização prática, as propriedades dos materiais utilizados, distribuição do esforço mecânico pela matriz; além de apresentar o fenômeno de retração, enfatizando os mecanismos responsáveis, a fissuração do concreto e sua ocorrência prática.

O terceiro capítulo apresenta as características dos materiais utilizados neste trabalho, método de dosagem seguido, parâmetros fixados, os traços estudados e os métodos descrição dos equipamentos utilizados para a realização dos ensaios. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos durante o programa experimental e suas discussões. Já no quinto capítulo, é apresentado uma breve conclusão baseado nos resultados apresentados e discutidos no capítulo anterior.

Além destes cinco capítulos base, é apresentado ainda as referências bibliográficas utilizadas como embasamento para o desenvolvimento deste trabalho e, é apresentado três apêndices, onde é apresentado os resultados de cada amostra testada, ensaios auxiliares realizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para atender a demanda das especificações de elementos estruturais cada vez mais esbeltos, é necessário que ocorra o avanço tecnológico tanto do processo construtivo, quanto dos materiais utilizados, principalmente quanto ao seu comportamento mecânico.

Com a intenção de aplicar estas novas tecnologias, se faz necessário que as mesmas atendam os critérios normativos existentes. No Brasil, a NBR 6118 (2014) apresenta os requisitos mínimos de qualidade que as estruturas de concreto armado devem atender durante sua construção e serviço, prevendo seu desempenho e durabilidade.

Além desta normativa, há a norma referente ao desempenho das edificações habitacionais (NBR 15575, 2013), a qual especifica como 50 anos a vida útil mínima de projeto para elementos estruturas, implicando em maior cuidado com a durabilidade da edificação e exigindo maiores cuidados na especificação do concreto a ser utilizado.

2.1 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRA

O concreto de alto desempenho (CAD) vem atender estes critérios de desempenho, uma vez que é definido como um concreto que possui características desenvolvidas para aplicações e ambientes específicos, apresentando propriedades dificilmente conseguidas com a utilização de componentes convencionais, práticas normais de mistura, lançamento e cura (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Normalmente os concretos são classificados através de sua resistência mecânica à compressão, onde de acordo com BUITELAAR(2004), concretos com resistências entre 80 MPa e 120 MPa são considerados CAD, acima deste valor passa a ser designado concreto de ultra-alto desempenho.

A NBR 12655 (2015) estabelece duas classes de classificação do concreto, não apresentando o conceito de desempenho, mas sim resistência. Portanto classifica como concreto de alta resistência para misturas que apresentam resistência à compressão superior à apresentada pela classe “C50”, pela ABNT NBR 8953, onde são classificados em dois grupos, Grupo I, onde apresenta resistências mecânicas à compressão de 20 a 50 MPa; e Grupo II para concretos de resistência entre 55 MPa e 100

MPa. Porém a mais recente versão da norma brasileira NBR 6118 (2014) já admite concretos com até 90 MPa de resistência.

Este conceito de alto desempenho se apresenta de maneira subjetiva, dando apenas a idéia de que os materiais utilizados possuem propriedades muito superiores aos utilizados em concretos convencionais.

RANADE et al. (2011) relatam que os concretos de alto desempenho ainda podem ser separados em duas categorias, de acordo com sua propriedade mecânica, havendo os de alta resistência à compressão, e os de concretos de ultra alta resistência e ductilidade.

Segundo TUTIKIAN & HELENE (2011) o CAD não é igual ao concreto de alta resistência (CAR), pois os concretos de alto desempenho apresentam ótima trabalhabilidade, acabamento, durabilidade, além de poder apresentar outra característica específica para o fim que foi projetado. Por sua vez, os CAR são uma parcela dos CAD, os quais apresentam resistência mecânica à compressão acima de 50 MPa.

Como incentivo à utilização de CAD, a Federal Highway Administration (FHWA), iniciou um programa nacional para a implantação deste tipo de material para construção de pontes (RUSSEL & GRAYBEAL, 2013) (Russel & Graybeal, 2013). Este projeto também propôs alguns parâmetros de desempenho suficiente para estimar a durabilidade a longo prazo e a resistência mecânica dos concretos utilizados nas estruturas viárias.

Desta maneira, a FHWA define o CAD através dos parâmetros bases, definindo limites de desempenho e dividindo em três classes, conforme pode ser observado na

Tabela 1.

Segundo TUTIKIAN & HELENE (2011), no Brasil ainda é conveniente considerar a resistência à flexão e a resistência à carbonatação, além do rendimento aos 28 dias (MPa/kg) como substituição à durabilidade ao gelo-degelo sugerida pela FHWA.

O processo de dosagem do CAD começa na seleção dos materiais a serem utilizados, uma vez que os mesmos devem proporcionar um concreto resistente, durável e com trabalhabilidade compatível ao seu emprego (TUTIKIAN & HELENE, 2011).

No geral, um CAD é composto por cimento, adições minerais, agregados água e aditivos químicos. De acordo com o emprego destinado, pode haver a necessidade de inserir algum material especial, como por exemplo fibras ou pigmentos.

Para atingir os critérios de resistência e durabilidade exigidos, os concretos de alto desempenho vêm sendo dosados com relação água/mate-

riais cimentícios (A/mc) inferior à 0,40; sendo assim indispensável a utilização de aditivos químicos para a obtenção e manutenção da trabalhabilidade necessária, resultando em composições com elevada resistência, trabalhabilidade e apresentando elevada durabilidade devido à diminuição da permeabilidade da mistura (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Tabela 1 - Critérios de classificação do CAD segundo FHWA.

Característica de Desempenho	Método de Ensaio	Classes de desempenho do CAD		
		1	2	3
Durabilidade Gelo-Degelo	AASHTO T161 ASTM C 66/03	$70\% \leq P_c^1 < 80\%$	$80\% \leq P_c < 90\%$	$90\% \leq P_c$
Resistência à delaminação	ASTM C 672/12	$3,0 \geq CS^2 > 2,0$	$2,0 \geq CS > 1,0$	$1,0 \geq CS >$
Resistência à Abrasão	ASTM C 944/12	$2,0 > RA^3 \geq 1,0$	$1,0 > RA \geq 0,5$	$0,5 > RA$
Resistência de penetração de Cl ⁻	ASTM C 1202/12 AASHTO T 277	$2500 \geq C^4 > 1500$	$1500 \geq C > 500$	$500 \geq C$
Reatividade alcali-silica	ASTM C 441	$0,20 \geq RAS^5 > 0,15$	$0,15 \geq RAS > 0,10$	$0,10 \geq RAS$
Resistência à sulfatos	ASTM 1202	$RS^6 \leq 0,10$ Até 6 meses	$RS \leq 0,10$ Até 12 meses	$RS \leq 0,10$ Até 18 meses
Abatimento / Fluidez	ASTM C 143 AAHTO T119	$SL^7 > 190$ mm $SF^8 < 500$ mm	$500 < SF \leq 600$ mm	600 mm <
Resistência à Compressão	ASTM C 39 AAHTO T22/11	$55 \leq f_c < 69$ Mpa	$69 \leq f_c < 97$ MPa	97 MPa $\leq f$
Elasticidade	ASTM C 469	$34 \leq E_c^9 < 41$ GPa	$41 \leq E_c < 48$ GPa	48 GPa $\leq E$
Retração	ASTM C 157 AASHTO T 160	$800 > S^{10} \geq 600$	$600 > S \geq 400$	$400 > S$
Fluência	ASTM C 512	$75 \geq R^{11} > 55$ /Mpa	$55 \geq R > 30$ /Mpa	30 /Mpa $\geq F$

Fonte: adaptado de Russell et al., 2006.

- 1 módulo de elasticidade dinâmico relativo a 300 ciclos;
- 2 classificação visual da superfície depois de 50 ciclos;
- 3 média de profundidade de desgaste (mm);
- 4 coulombs;
- 5 expansão até 56 dias (%);
- 6 expansão (%);
- 7 abatimento do tronco de cone (mm);
- 8 espalhamento (mm);
- 9 módulo de elasticidade estático à compressão;
- 10 deformação específica (10-6 mm/mm); e
- 11 razão entre deformação específica e tensão (10-6/MPa).

Portanto, para se obter uma mistura que atenda aos requisitos, se faz necessário o conhecimento das propriedades mecânicas dos agregados

utilizados, pois estes poderão afetar o desempenho do CAD produzido. (DONZA; CABRERA; IRASSAR, 2002)

De acordo com TUTIKIAN & HELENE (2011) basicamente dois princípios básicos são levados em consideração para produzir com concreto de alto desempenho:

- Diminuição da relação A/mc e do consumo de água por metro cúbico (m^3) através da utilização de aditivos plastificantes e superplastificante;
- Obter uma matriz cimentícia mais densa, otimizando a granulometria dos agregados utilizados, aumentando a compacidade da mistura;
- Utilização de adição mineral para o fortalecimento das ligações primárias e secundárias, refinando os poros dos grãos.

Um dos benefícios do CAD é a utilização de peças mais esbeltas com mesma capacidade portante, sendo possível reduzir o consumo de aço da estrutura. Com essa perspectiva de diminuição das dimensões dos elementos estruturas, atualmente inúmeras obras utilizam estruturas de CAD. (TUTIKIAN & HELENE, 2011).

A utilização CAD deve ser bem coordenada, afim de aproveitar os benefícios que o material proporciona e assim tornar viável a sua aplicação. Portanto é extremamente importante planejar a utilização destes materiais desde as fases iniciais do anteprojeto, integrando as demais fases para que possam atender o conceito de Construção de Alto Desempenho (TUTIKIAN & HELENE, 2011).

Percebe-se que os princípios para o concreto de alto desempenho têm um apelo forte para o aumento da densidade da matriz, porém, se tratando de um material cerâmico, material de comportamento frágil, a incorporação de fibras na mistura contribui com a melhoria desta propriedade.

Segundo AİTCİN (2004), as misturas de CAD se comportam como material compósito real, e quanto à sua capacidade de deformação, se assemelha mais como uma rocha artificial do que à uma mistura de concreto propriamente dita. Portanto a ductilidade da peça é essencialmente derivada da taxa de armadura prevista e projeto.

A melhoria das propriedades depende de características pontuais do compósito como: características das fibras (tipo de fibra, quantidade e dimensões), as propriedades da matriz cimentícia e a interface matriz-fi-

bra. O desempenho na fissuração e tenacidade do compósito é influenciado pela distribuição espacial e alinhamento das fibras dentro do concreto. (MEHTA & MONTEIRO, 2014). Esses fatores contribuem para o material controlar a propagação das fissuras e apresentar resistências residuais, como foi discutido a seguir.

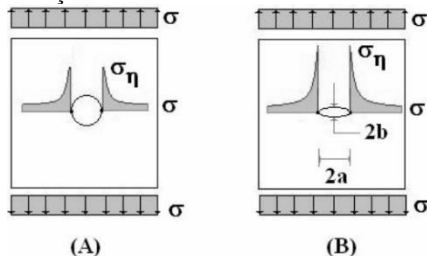
2.1.1 Propagação de fissuras

A pasta cimentícia dos CADs apresentam, assim como nos concretos convencionais, defeitos inerentes da própria hidratação do cimento, além das fissuras resultantes da sua retração. Além disso, a matriz de concreto de alto desempenho é composta pelo ar incorporado no processo de produção, defeitos dos agregados graúdos e pela zona de transição com as fibras e os agregados constituintes. (MARKOVIC, 2006) e (SCHLANGEN; KOENDERS; VAN BREUGEL, 2007)

As discontinuidades na matriz podem apresentar geometrias muito variadas, por outro lado são comuns em dois formatos principais, como as provenientes de um poro de formato esférico ou a de uma fissura de formato elíptico. No caso do formato esférico, quando submetidas à tração, as tensões nas regiões periféricas das discontinuidades atingem valores de tensão três vezes maiores que da tensão de tração aplicada. (FERREIRA & HANAI, 2010)

No entanto, em casos onde as discontinuidades são de formato elípticas, as tensões nas periferias das discontinuidades foram amplificadas a um fator igual a $(1 + 2a/b)$, sendo “a” o maior e “b” o menor semieixo da elipse, conforme pode ser observado na Figura 1. Em uma situação real, a dimensão de “b” é praticamente nula, dessa forma a relação “a/b” tende ao infinito e, portanto, matematicamente, a tensão na borda da fissura crescerá infinitamente. (FERREIRA & HANAI, 2010)

Figura 1 - Concentração de tensões em discontinuidades na tração.



Fonte: Ferreira & Hanai.

Dessa forma, de acordo com a teoria da mecânica de fratura proposta por Griffith, é possível estimar a tensão na borda de uma fissura utilizando a equação (1). (CALLISTER & RETHWISCH, 2012)

$$\sigma_n = 2 \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{a/\rho_e} \quad (1)$$

Onde:

σ_n é a tensão na extremidade da fissura;

σ_0 é a tensão de tração aplicada;

a é o comprimento da fissura superficial ou metade do comprimento da fissura interna;

ρ_e é o raio da curvatura na extremidade da fissura.

Ao ser solicitado à compressão, a matriz transmite as tensões através das microfissuras existentes, fenômeno que não ocorre quando a sollicitação é de tração, a qual acaba induzindo tensões nas bordas das microfissuras com maior intensidade. Como consequência, ocorre a propagação da descontinuidade da direção transversal das tensões (FIGUEIREDO, 2011; NUNES, 2006a)

De acordo com FERREIRA & HANAI (2010), por se tratar de materiais cimentícios, a propagação das tensões como análise de ruptura pode ser classificada como ruptura “Quase -frágil”, se subdividindo em três etapas, onde primeiramente ocorre a microfissuração do volume sólido, dando uma resposta considerada elástica-linear.

Posteriormente, na segunda etapa, a microfissuração passa a ficar mais profunda devido ao excesso de carregamento, principalmente no plano principal de fratura. É nesse momento que ocorre a concentração de danos, resultando em perda da linearidade da curva tensão-deformação de forma gradativa, até que ocorra a coalescência das microfissuras.

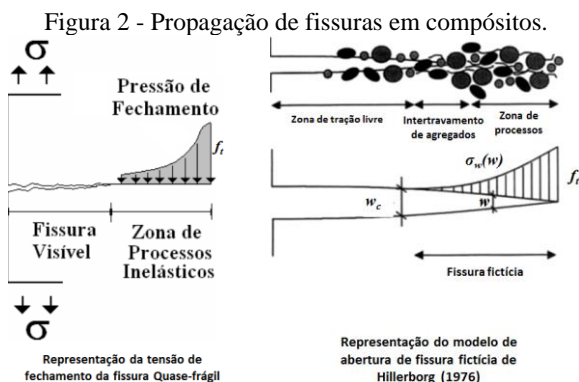
Por última, é atingido o nível onde ocorre a diminuição do carregamento, impedindo a ruptura brusca do material.

Ao se formar uma fissura, sugere-se que uma parcela de sua extensão é composta por uma região inelástica, onde é considerado a existência de uma tensão de fechamento, também conhecida como pressão coesiva, que decresce de acordo com o deslocamento da fissura. Esta região de processos inelásticos é definida como “fissura fictícia” (Figura 2).

A tensão de fechamento se origina de diversos e complexos mecanismos atuantes na face das fissuras, e tem como principal propriedade a transmissão de tensões entre as faces das fissuras. Desta forma, para que ocorra a propagação das fissuras, é necessária a dissipação de uma energia

superior ao limite de propagação do mecanismo de fechamento. (FERREIRA & HANAI, 2010)

O RILEM TC 162-TDF (2002) sugere uma representação do modelo da fissura fictícia apresentado por HILLERBORG; MODÉER & PETERSSON (1976), a região da fissura fictícia é subdividida em duas partes, a parte de intertravamento dos agregados e uma zona de processos. Esse modelo considera que a fissura fictícia é formada tão logo a tensão de tração aplicada (σ) atinja a intensidade da tensão de tração máxima do material (f_t), de modo que a tensão decresce até o zero no ponto que corresponde a dimensão crítica característica da abertura de fissura (w_c).



Fonte: adaptado de RILEM TC162 TDF em (CASAGRANDE, 2014)Casagrande (2014).

Onde:

σ : é a tensão de tração aplicada;

w_c : é a dimensão crítica característica de abertura de fissura;

w : é a dimensão da abertura da fissura;

$\sigma_w(w)$: é a tensão de fechamento da fissura fictícia;

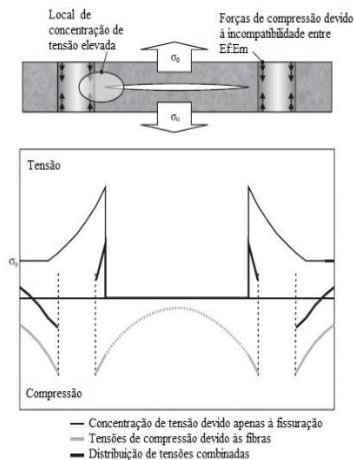
f_t : é a resistência à tração do compósito.

Como pode ser visto nas Figura 3 e 4, a abertura de fissura representa uma barreira à propagação de tensões e, com a evolução da fissuração, tem-se uma área de transferência de tensões cada vez menor, fazendo com que aumente a concentração de tensão na área não fissurada até que essa tensão atinja a resistência do material, quando resulta em sua ruptura.

Desta maneira as fibras desempenham um trabalho importante quando incorporadas à matriz cimentícia, pois agem transferindo as tensões através das fissuras, aumentando a energia associada à ruptura do compósito à tração;

O desempenho do compósito está diretamente relacionado com as propriedades das fibras escolhidas, volume de fibras utilizados e das propriedades da matriz cimentícia utilizada. Segundo FIGUEIREDO (2011), ao incorporar baixos teores de fibras na mistura, o compósito já passa a apresentar certa ductilidade, resultando em um comportamento “pseudo-ductil”.

Figura 3 - Mecanismo de supressão de fissuras por compósitos de fibras espaçadas.



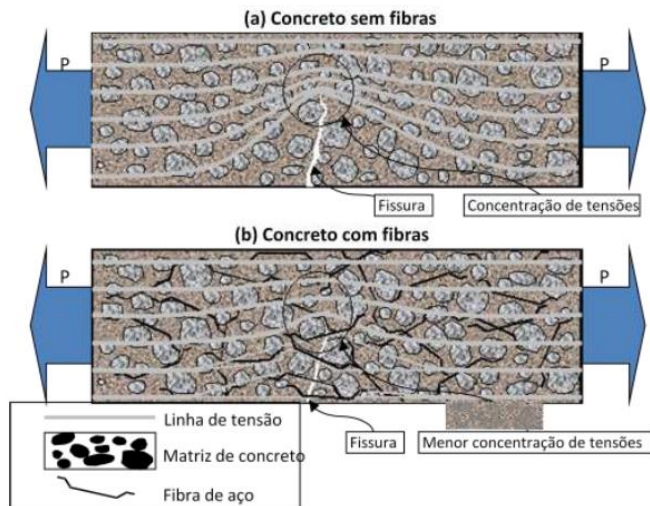
Fonte: adaptado de Illston (2013).

De acordo com o modelo de Hillerbog, a fissura fictícia abrange a zona de processos, a zona de intertravamento dos agregados e uma zona de transferência de tensões resultante da adição das fibras. (RILEM TC 162-TDF, 2002)

Devido aos mecanismos de transferência de tensão e absorção de energia, a distribuição de tensão da fissura é modificada, inibindo a sua propagação e resultando na modificação do modelo de fratura fictícia. (FIGUEIREDO, 2011)

WECHARATANA & SHAH (1983) apresentam um modelo onde, assim como no modelo anterior, apresenta zona de processo, zona de intertravamento de agregados e a zona de transferência de tensões, há uma zona de tração livre, formando de “fissura efetiva”.

Figura 4 - Transferência de tensões através de uma fissura.



Fonte: Figueiredo (2011)

2.1.2 Interface matriz-fibra

A interface fibra-matriz possui um impacto crucial nas propriedades dos CRF. Esta região possui grande complexidade devido à duas razões principais:

- A força de ligação, o tipo de ligação e a morfologia química da interface podem mudar significativamente à medida que a matriz continua a hidratar ao longo de muitos anos.
- em FRC contendo fibras em multifilamento, a interface está entre um feixe de fibras e concreto, onde nem todos os filamentos estão necessariamente envoltos pela matriz cimentícia;

Ambos fatores são desafios para a caracterização dos parâmetros como força de ligação, além de resultar em implicações para a avaliação

de durabilidade. Em concretos reforçados com fibra composta por monofilamentos, a interface fibra-matriz é geralmente considerada muito semelhante à interface entre barras de aço e o concreto das estruturas. A zona próxima à fibra, em torno de $<10 \mu\text{m}$, é análogo à zona de transição ou de interface em concreto normal, que possui quantidade de hidróxido de cálcio localmente mais elevada do que em pastas de cimento endurecido. (DOMOME, 2010)

Nestes locais, há também uma porosidade em torno de duas vezes maiores que nas pastas, podendo assim esperar que tenha uma redução na resistência do CRF, sendo que está fortemente dependente da orientação das fibras em compósitos com monofilamentos, sendo assim uma propriedade altamente variável (HORNE, 2007)

Já interface de CRF em multifilamentos é mais complexa, uma vez que a matriz de cimento está em contato com a maior parte dos filamentos, porém não sua totalidade, não atingindo os filamentos localizados na parte mais interna. À medida que o processo de hidratação do cimento vai avançando, o contato entre os filamentos perimetrais e a pasta de cimento se tornará mais forte e, os produtos de hidratação irão gradualmente começar a ser depositados entre os filamentos, modificando a estrutura da ligação entre fibra-matriz. (DOMOME, 2010)

A presença das fibras na mistura forma uma zona de transição fibra-matriz, semelhante ao que ocorre com a iteração entre os agregados e a pasta de cimento, ou seja, quando adicionado o reforço fibroso, a área em torno deste apresenta a formação de uma película de água, apresentando menor quantidade de produtos cimentícios em relação ao resto da mistura.

Com a evolução da hidratação do cimento, nessa região de interface ocorre a precipitação de produtos de hidratação na forma de cristais, de modo que a microestrutura da zona de transição é constituída em sua maioria por cristais portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que tem geometria hexagonal plana e que tendem a alinhar-se em um plano paralelo às fibras, além de sulfoaluminatos de cálcio, como a etringita, na forma de agulhas. Nessa região, há também grande presença de poros resultantes das reações de hidratação dos compostos. Essa configuração confere à zona de transição principalmente resistência mecânica menor que o restante da matriz e, por consequência, grande possibilidade de propagação de fissuras.

De maneira geral, a zona de transição é basicamente estruturada por uma fina camada conhecida como “filme duplo”, que separa a fibra da matriz, sendo seguido por uma camada com alta concentração de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e uma camada de elevada porosidade, fazendo ligação com a matriz cimentícia. A formação da zona de transição ainda pode ser

alterada por reações químicas, porém normalmente apresenta esta configuração citada acima e, está totalmente dependente da disponibilidade de água no sistema. Na maioria das vezes, quando solicitadas, as fibras são arrancadas da matriz na região do filme duplo, porém devido a aleatoriedade de sua distribuição na mistura, as tensões podem ser desviadas de sua superfície, fazendo com que ocorra a concentração de tensão na camada porosa da zona de transição e podendo gerar fissuras da ordem de 40 μm da superfície da fibra (BENTUR & ALEXANDER, 2000; BENTUR & MINDNESS, 2007; GENG & LEUNG, 1996; HORNE, RICHARDSON & BRYDSON, 2007; MONTEIRO, GJORV & MEHTA, 1985; PINCHIN & TABOR, 1978)

A região da zona de transição de uma mistura pode se apresentar de 30 a 50% mais fraca que a matriz devido à elevada porosidade e produtos pouco resistentes. Segundo alguns estudos, percebe-se que quanto menor a relação A/Agl, maior é a dureza da interface. (HORNE, RICHARDSON & BRYDSON, 2007; LEE, KANG & KIM, 2010; MARKOVIC, 2006)

A transmissão de tensões em compósitos reforçados com fibras ocorre por dois mecanismos fundamentais: elástico e por atrito (BENTUR & MINDNESS, 2007; GRAY, 1984). No mecanismo elástico, ocorre a compatibilidade das deformações entre a fibra e a matriz devido à aderência entre os materiais, sendo desprezada a possibilidade de ocorrer deslocamento relativo entre a fibra e a matriz.

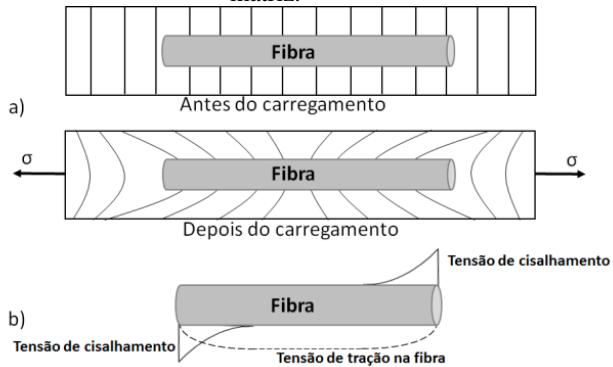
Em fibras que apresentam módulo de deformação elástica muito superior ao da matriz desenvolvem-se tensões cisalhantes na interface, resultando em distribuição não uniforme da carga externa (Figura 5).

Desta forma, enquanto as tensões cisalhantes não superarem a resistência de cisalhamento da interface, o mecanismo elástico predomina (NUNES, 2006a). Na medida que este limite é superado, entra em ação o mecanismo de atrito, iniciando o descolamento da fibra (Figura 6).

Na medida que a fibra se descola totalmente da matriz, se inicia o escorregamento da fibra, sendo seguido de seu arrancamento. Este processo resulta da transferência de tensões por atrito, estas sendo uniforme ao longo da interface dos materiais.

A transição entre os mecanismos de transferências de tensões é gradual e ambos podem ocorrer simultaneamente, dependendo da qualidade da interface fibra-matriz. Em materiais sujeitos à esforços de tração direta, é possível que o descolamento/arrancamento da fibra ocorra antes de iniciar a fissuração da matriz (BENTUR & MINDNESS, 2007).

Figura 5 - Representação esquemática das tensões distribuídas nas fibras e na matriz.

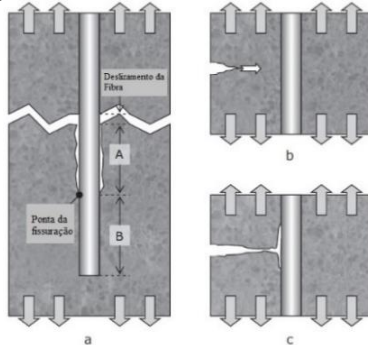


Fonte: adaptado de Bentur & Mindess em Casagrande (2014)

- a) Distribuição da tensão elástica na matriz ao redor da fibra
 b) Distribuição de tensão ao longo da interface fibra-matriz

KIM *et al.* (2009) e NAAMAN (2012) reportam esse efeito de arancamento e, em seus estudos, verificam a influência do formato da fibra na interação do compósito. Os autores afirmam que, os comportamentos obtidos foram semelhantes ao modelo clássico, porém com desempenhos variados.

Figura 6 - Sistema de propagação das fissuras e descolamento da interface.



Fonte: adaptado de (HOLLAWAY; PURNEL, 2010) Illston (2013).

- a) Início do deslizamento da fibra e fissuração da interface onde, A é o comprimento onde houve rompimento da interface fibra-matriz e B é o comprimento ainda ancorado na mistura.
 b) Crescimento da fissuração.
 c) Contato da fissura com a fibra, ocasionando mudança do sentido da propagação, se dando agora na interface de ligação.

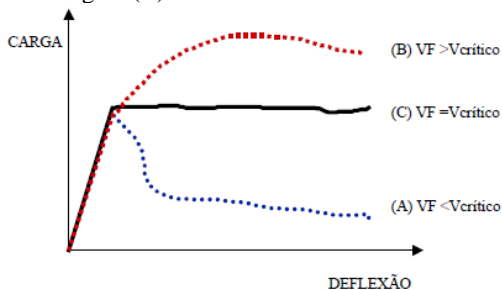
2.1.3 Classificação do comportamento mecânico dos concretos reforçados com fibra.

A adição de fibras nas misturas de concreto traz como principal benefício a promoção de resistência à tração dos elementos, além do aumento de sua capacidade de absorver energia pós-fissuração da matriz.

Deste modo que, para a caracterização do comportamento destes materiais, os ensaios mais utilizados são de tração direta uniaxial e tração à flexão, de onde é possível obter as deformações resultantes aos carregamentos impostos, sendo eles deformação ou deflexão, de acordo com o ensaio utilizado. (FIGUEIREDO, 2011)

O comportamento do compósito é governado pelo volume crítico de fibra (V_f), o qual é definido como o teor de fibra necessário para manter a mesma capacidade portante do compósito após a ruptura da matriz. Portanto, para teores superiores ao V_f , o compósito continua aceitando níveis de carregamento, trazendo um comportamento de endurecimento do compósito. Já para teores inferiores, é percebido um comportamento de amolecimento do compósito, ou seja, a mistura não apresenta mais capacidade portante suficiente ao carregamento imposto (Figura 7). (FIGUEIREDO, 2011)

Figura 7 - Compósitos reforçados com fibras em teores abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico.



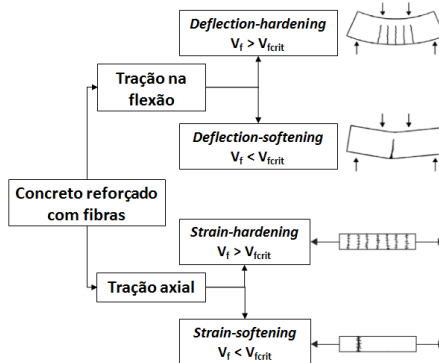
Fonte: Figueiredo, 2011

O efeito do volume de fibra se dividem em duas classes, de acordo com o ensaio realizado. Ao se ensaiar o corpo de prova em flexão, é possível classificar o comportamento em *flexion-hardening* quando o $V_f > V_{crítico}$, ou seja, o composto apresenta capacidade de resistência residual superior à carga de ruptura, apresentando múltiplas fissuras em sua ma-

triz; ou pode ser classificada como *flexion-softening* quando o $V_f < V_{crítico}$, capacidade resistência pós fissuração é inferior à carga de ruptura da matriz.

Ao ser ensaiado na tração axial, o composto é classificada do como *strain-hardening* quando apresenta capacidade de resistência pós fissuração superior à carga de ruptura da matriz ($V_f > V_{crítico}$), acompanhando múltiplas fissurações ao longo do elemento; ou se classifica como *strain-softening*, apresentando capacidade de resistência pós fissuração inferior à carga de ruptura da matriz ($V_f < V_{crítico}$).

Figura 8 - Comportamentos característicos de CRF com fibras.



Fonte: adaptado de Naaman & Reinhardt 2003; Di Prisco et al. 2013 em Casagrande, 2014.

2.2 Fatores influentes no desempenho do composto

2.2.1 Fibras

Há disponível no mercado uma grande variedade de fibras (sintéticas ou naturais) que podem ser incorporadas em misturas de concreto, tais como fibra de vidro álcali-resistente, carbono, kevlar, fibras de coco, polipropileno, metálicas, entre outras.

Como reportado no capítulo anterior, as fibras são inseridas para melhorar o desempenho da matriz, controlando as fissuras e servindo como ponte de transferência de tensão, melhorando propriedades como: resistência à tração, tenacidade, fadiga, resistência ao impacto (BENTUR & MINDNESS, 2007; MARKOVIC, 2006)

NAAMAN & REINHARDT (2003) sugere que, para realmente obter as melhorias das fibras como reforço, as fibras devem apresentar algumas características:

Apresentar resistência à tração superior que a resistência à tração apresentada pela matriz cimentícia;

Resistência de aderência fibra-concreto deve ser superior ou parecido com a resistência à tração da matriz;

Módulo de elasticidade à tração superior ao módulo de elasticidade à tração apresentado pelo concreto; e

Coefficiente de Poisson e coeficiente de expansão térmica semelhantes ou superior ao da matriz cimentícia, evitando assim o descolamento da fibra pela tensão de tração;

Além das propriedades mecânicas dos materiais, algumas características físicas das fibras como a geometria, ancoramento, distribuição, volume de fibras, comprimento; interferem no desempenho do compósito. Portanto o material escolhido deve ser criteriosamente escolhido, buscando o melhor desempenho para a aplicação destinada. (NAAMAN & REINHARDT, 2003)

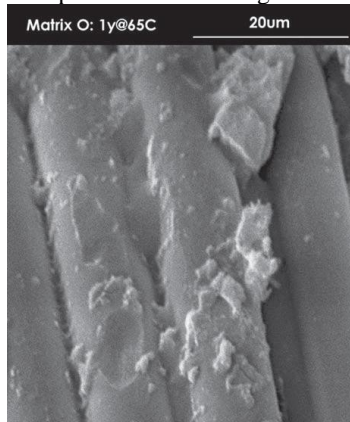
2.2.1.1 Fibras de Vidro Álcali Resistente

Dentre as fibras existentes, as fibras de vidro são frequentemente utilizadas para reforçar misturas de concreto uma vez que apresenta boas propriedades mecânicas.

Como as matrizes cimentícias são altamente alcalinas, tendo um pH em torno de 12-13. Muitas fibras podem degradar nesses ambientes. Fibras de Celulose, Fibras de vidro Comum Vidro (Tipo E) e algumas fibras de polímero podem sofrer corrosão extrema, onde acaba reduzindo significativamente a área de sua seção transversal (Figura 9), isto é, a área de secção transversal eficaz das fibras, comprometendo assim a eficiência do reforço.

Portanto, como a estrutura do vidro padrão (Tipo E) ($\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$) não é estável em contato com as matrizes cimentícias devido ao ambiente altamente alcalino, recomenda-se utilizar as fibras de vidro álcali-resistente (AR), as quais a adição de 16 a 20% de Zircônio (formando a estrutura $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$), o qual reduz a velocidade da reação entre o vidro e a matriz cimentícia e resulta na formação de uma camada de proteção. (RANADE et al., 2011)

Figura 9 – Corrosão da seção da fibra de vidro utilizada em concreto Reforçado com Fibras exposto à ambientes agressivos.



Fonte: HOLLAWAY & PURNEL, 2010

2.2.2 Resistência à tração e módulo de elasticidade das fibras.

Segundo FIGUEIREDO (2011), uma vez que a adição de fibras no concreto tem como objetivo o reforço do elemento de concreto no pós fissuração, então a escolha do material fibroso a ser utilizado deve necessariamente apresentar resistência à tração e módulo de elasticidade superiores ao apresentado pelo concreto, uma vez que, a utilização de fibras de módulo e resistência mecânica inferiores à matriz cimentícia, resultarão em fissurações muito pronunciadas no momento de sua ruptura, necessitando maiores volumes de adição para a eficiência do reforço.

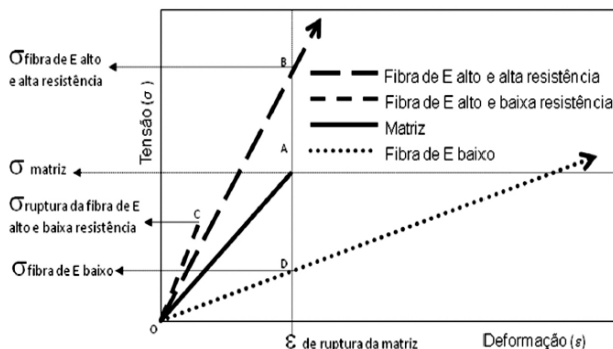
Por sua vez, ao se utilizar fibras de elevados módulos e resistência mecânica, no momento da ruptura do concreto, estas apresentarão resistência superior à matriz, permitindo sua eficiência como reforço pós fissuração mesmo utilizando baixos volumes na mistura. FIGUEIREDO (2011)

Por outro lado, ao se adicionar fibras de elevado módulo de elasticidade e baixas resistência (fibras de vidro), para a deformação sofrida pela matriz ao ser solicitado pela tensão de ruptura, essa fibra já terá rompido, portanto não exercendo o reforço desejado. Nesse aspecto, a utilização de fibras dúcteis se mostra interessantes para o reforço dos compósitos cimentícios.

Estas relações de entre módulo da matriz e das fibras podem ser observadas melhor na Figura 10, onde retrata o desempenho do compósito

considerando uma perfeita aderência fibra-matriz e um perfeito comportamento elástico do material.

Figura 10 - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade.



Fonte: Figueiredo, 2011

Tabela 2 - Propriedades dos materiais componentes das matrizes de cimento e de algumas fibras.

Mateiral	Densidade Relativa	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de Tração [MPa]	Deformação na ruptura [%]	Volume no composto [%]
Argamassa	1,8 - 2,0	10 - 30	1 - 10	0,01 - 0,05	85 - 97
Concreto Convencional	1,8 - 2,4	20 - 40	1- 4	0,01 - 0,02	97 - 99,9
Fibra de Aramida	1,45	70- 130	2900	2 - 4	1 - 5
Fibra de Amianto	2,55	164	200-1800	2 - 3	5 - 15
Fibra de Carbono	1,16 - 1,95	30 - 390	600-2700	0,5 - 2,4	3 - 5
Fibra de Celulose	1,5	10 - 50	300-1000	20	5 - 15
Fibra de Vidro	2,7	70	600-2500	3,6	3 - 7
Poliacrilonitrila	1,16	17 - 20	900-1000	8 - 11	2 - 10
Filamento de HDPE	0,96	5	200	-	2 - 4
Polipropileno	0,91	4 - 15	300 - 500	10	0,1 - 10
Acetato de polivinila	1,0 - 3,0	12 - 40	700-1500	-	2 - 3
Aço	7,86	200	700-2000	3 - 5	0,3 - 2,0

Fonte: adaptado de HOLLAWAY & PURNEL, 2010.

A natureza do material que compõe as fibras também estará diretamente ligada com sua capacidade de suportar as deformações. Fibras metálicas apresentam melhores desempenho do que as fibras de PVA e de polipropileno. (CHOI et al., 2014)

A Tabela 2 mostra a propriedades de alguns materiais constituintes de concreto reforçado com fibra.

2.2.3 Fator de forma

Juntamente com as características anteriormente abordadas, o as características físicas das fibras possuem grande influência no desempenho do compósito. O formato da fibra é levado em consideração de acordo com o seu fator de forma (λ).

Este índice é definido como sendo a razão entre o comprimento do filamento e o seu diâmetro, sendo diretamente proporcional ao seu desempenho pós fissuração. Deste modo, uma fibra com elevado λ tende a apresentar elevado desempenho.

Esta relação pode ser explicada devido ao maior embutimento da fibra dentro da matriz, aumentando assim o atrito entre a fibra e a matriz e, elevando assim a resistência das mesmas quando solicitadas.

Por mais que este fator tenha relação direta com o comprimento da fibra, esta necessita possuir compatibilidade dimensional com os demais materiais utilizados, sendo que se recomenda que a fibra deve possuir no mínimo comprimento duas vezes maior que o diâmetro dos materiais utilizados na mistura. (BENTUR & MINDNESS, 2007)

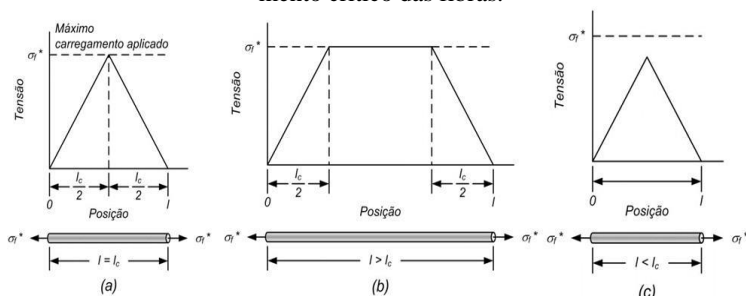
A influência do fator de forma é apresentada por YOO *et al.* (2014), onde seus resultados apresentaram que quanto maior segue este fator de forma, melhor foi o desempenho obtido nos ensaios mecânicos.

Por mais que, o fator de forma está diretamente relacionado com o desempenho do compósito, e do comprimento mínimo recomendado para a escolha do material, se deve atentar ao comprimento crítico (l_c) que a fibra necessita apresentar.

Para avaliação deste parâmetro, o modelo se baseia no aumento linear da tensão entre a fibra-matriz sendo aplicada na direção ao centro da fibra. Desta forma, nas extremidades da fibra as tensões se apresentam inexistente. (FIGUEIREDO, 2011)

Desta forma, as fibras que apresentam seu comprimento l_c , apresentam comportamentos característicos à deformação da matriz ou à fratura da interface matriz-fibra, ocasionando o seu arrancamento. Logo se o seu comprimento for maior que l_c , estas foram rompidas devido ao maior embutimento ou caso a tensão exercida supere a resistência à tração apresentada pela fibra utilizada, conforme pode ser observado na Figura 12. (HOLLAWAY & PURNEL, 2010)

Figura 11 - Representação da distribuição de tensões em relação ao comprimento crítico das fibras.

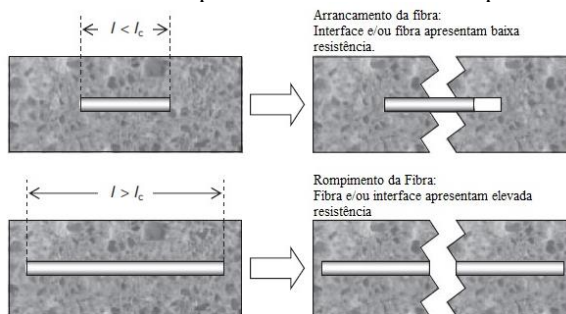


Fonte: Willian D. Callister & Rethwisch (2012).

A escolha do comprimento crítico está relacionada ao diâmetro da fibra (d), limite de resistência à tração (σ), força de ligação da interface (τ) e pode ser calculado através da equação (2).

$$l_c = \frac{\sigma \cdot d}{2 \cdot \tau} \quad (2)$$

Figura 12 - Fratura do compósito de acordo com o comprimento crítico.



Fonte: HOLLAWAY & PURNEL, 2010

Para concretos que apresente forte interação fibra-matriz, o comprimento crítico tende a diminuir, portanto ao se trabalhar com matrizes de elevadas resistências, se busca trabalhar com fibras comprimentos inferiores às usualmente encontradas no mercado.

As macrofibras metálicas possuem a tendência de apresentar travamento entre os agregados graúdos, de forma que muitas vezes inviabiliza trabalhar com elevados teores de fibras, ou ainda, necessitando a uti-

lização de fibras de menor comprimento com a finalidade de evitar aglomerados e mantendo a capacidade de fluidez, como pode ser observado nos trabalhos de ABUKHASHABA *et al.* (2014); ALBERTI *et al.* (2014); GRABOIS *et al.* (2016); LIAO *et al.* (2006).

Além disso, o formato e deformação das fibras apresentam grande influência no desempenho do compósito, sendo que, em concretos de alto desempenho, as fibras mais utilizadas são as fibras metálicas lisas que apresentam suas extremidades torcidas, com o objetivo de melhorar a sua ancoragem na matriz cimentícia, melhorando o desempenho residual, principalmente para pequenas deformações.

Desta forma, ao ser solicitadas, as fibras necessitam deformar antes que ocorra a fase de escorregamento, se caracterizando uma região *strain hardening*.

Quando solicitadas à grandes deformações, as fibras deformadas apresentam capacidade portante semelhante às fibras lisas, isso se deve ao fato da ocorrência da retificação da fibra resultante da tensão aplicada ao composto, transformando o mecanismo de transferência de tensão sendo predominantemente por atrito. (HOLLAWAY & PURNEL, 2010)

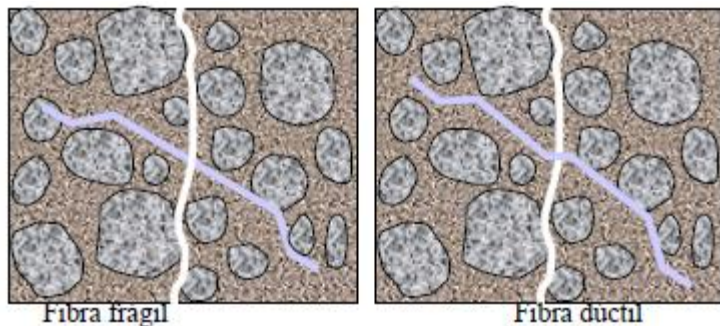
2.2.4 Distribuição e volume de adição.

Outro fator que interfere no desempenho do concreto reforçado com fibra é o volume de fibra, a forma com que elas se encontram distribuída na mistura e a quantidade de fibras que se encontram na região fissurada (BENTUR & MINDNESS, 2007; FIGUEIREDO, 2011)

Quanto a relação da distribuição e orientação das fibras com a resistência residual do concreto se deve considerar que, a inclinação das fibras em uma angulação de até 45° resultam em aumento da sua resistência ao arrancamento e, diminui a eficiência da adição ao compósito.

A perda de eficiência da fibra inclinada pode inversamente proporcional à sua ductilidade, ou seja, para fibras menos dúcteis, maior é a perda de eficiência do desempenho das fibras que apresentam inclinação, uma vez que a fibra passa a ser submetida à um elevado nível de tensão de cisalhamento. Sendo assim, se a fibra possui capacidade de se deformar plasticamente, acaba se alinhando às tensões atuantes. (FIGUEIREDO, 2011)

Figura 13 - Comportamento da inclinação da fibra inclinada em função da ductilidade.



Fonte: Figueiredo (2011(a)).

Um fator de orientação é sugerido por Krenchel (Tabela 3) e, pode ser aplicado ao cálculo do compósito de fibras levando em consideração a orientação das fibras. Quando as fibras se encontram aleatoriamente dispersas em três dimensões (concreto), utiliza-se um fator de correção de 0,20. Neste caso, apenas 20% das fibras estejam transferindo as tensões na região da fissura. Outros valores de eficiência das fibras são apresentados por HOLLAWAY & PURNEL (2010) levando em consideração o alinhamento e o comprimento das fibras (Figura 14).

Tabela 3 - Fator de orientação das fibras (η_1).

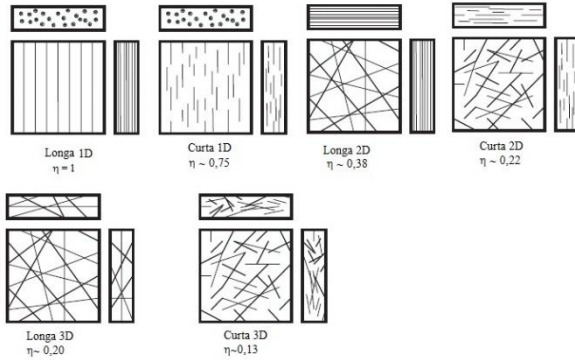
Orientação da Fibra	Fator de eficiência do reforço (η_1)
Alinhadas	1
Aleatória em duas direções	0,38
Aleatória em três direções	0,20

Fonte: Callister

De acordo com MARKOVIC (2006), além do comprimento e orientação das fibras, o número de fibras existentes na seção de fratura deve ser levado em consideração, uma vez que, o desempenho de dois compostos com mesma quantidade de fibra só foi o mesmo se o compósito apresentar mesma orientação das fibras.

Desta forma, a moldagem de peças esbeltas vem a induzir o alinhamento das fibras na direção do esforço principal, aumentando a probabilidade de intercepção das fissuras de maneira eficaz e intensificando o desempenho do reforço estrutural. (FIGUEIREDO, 2011)

Figura 14 - Eficiência da configuração das fibras na mistura.



Fonte: adaptado de Hollaway & Purnell (2010).

Além da quantidade de fibras, o espaçamento entre elas é de grande influência para a propagação das fissuras, uma vez que, além da transferência de tensões, as fibras podem atuar reduzindo a propagação das fissuras.

Alguns modelos matemáticos são propostos para o cálculo do fator de espaçamento das fibras e o seu número para um compósito reforçado com fibras curtas e aleatoriamente distribuídas. Estes parâmetros podem ser obtidos utilizando as equações (3), (4) e (5).

$$S = 13,84 \cdot d \cdot \sqrt{1/V_f} \quad (3)$$

Onde:

S é o fator de espaçamento das fibras (Romuald & Mandel);

d é o raio das fibras; e

Vf é o volume de fibras no compósito [%].

Na equação 3, se faz necessário considerar o fator de orientação das fibras dentro do compósito, conforme apresentado na Tabela 3, sendo assim, o espaçamento pode ser calculado através da equação 4.

$$S = \eta_1 \cdot 13,84 \cdot d \cdot \sqrt{1/V_f} \quad (4)$$

Onde:

S é o fator de espaçamento das fibras (Romuald & Mandel);

d é o raio das fibras; e
 V_f é o volume de fibras no compósito [%].
 η_1 = fator de orientação das fibras, se alinhada = 1; aleatória em 2D = 0,38;
 e aleatória em 3D = 0,2.

$$N = \eta_{\theta} \cdot \left(\frac{4 \cdot V_f}{\pi \cdot d^2} \right) \quad (5)$$

Onde:

N é o número de fibras por unidade de área (Aveston & Kelly);
 V_f é o volume de fibras no compósito;
 η_{θ} é o fator de correção devido à distribuição das fibras, quando 2D então $\eta_{\theta} = 2/\pi$, quando 3D então $\eta_{\theta} = 1/2$;
 d é o diâmetro das fibras.

Portanto, através dos modelos apresentados, é verificado que, quanto maior o volume de fibras, menor foi o espaçamento entre elas, resultando em maior quantidade de fibras por unidade de área e, por consequência maior é a probabilidade de a fibra interceptar uma fratura de maneira efetiva.

A determinação do volume crítico está associada à modelagem proposta por AVESTON & KELLY (1973), a qual focaliza um compósito ideal, com fibras contínuas e alinhadas à direção do esforço principal. Ainda nesta determinação, é possível inserir os fatores de orientação das fibras proposto por Krenchel. Desta forma o volume crítico de fibras pode ser calculado através da equação (5).

$$V_{crit} = \frac{\varepsilon_{mu} \cdot E_c}{\sigma_{fu} \cdot \eta_1} \quad (6)$$

Onde:

V_{crit} é o volume crítico de fibras;
 ε_{mu} é a deformação última de ruptura da matriz;
 E_c é o módulo de elasticidade do compósito;
 σ_{fu} é a resistência à tração da fibra; e
 η_1 é o fator de correção em função da orientação das fibras de Krenchel (1964).

Deste modo, é possível afirmar que, para a mesma matriz, o volume de fibra necessária para a manutenção da resistência residual do

compósito irá decrescer na medida que a resistência última à tração da fibra utilizada aumentar, necessitando, portanto, uma menor quantidade de fibra para resistir à solitação.

Por outro lado, o volume de fibra possível de ser incorporado no concreto está relacionado com a composição de sua matriz. Concretos contendo agregados graúdos possuem menor capacidade de dispersão das fibras, limitando assim o volume a ser utilizado e, conseqüentemente as propriedades do compósito resultante. Na prática, a fração utilizada varia de acordo com as propriedades das fibras, sendo utilizado de 0,4% a 2,0% de fibras metálicas e 0,06% e 0,5% para fibras de polipropileno. (RANADE et al., 2011)

2.3 RETRAÇÃO

O fenômeno retração está diretamente ligado deformações em pastas de cimento, argamassas e concreto, sem a existência de qualquer tipo de carregamento. A causa principal da retração é a perda de água da pasta de cimento. (HAYSPARK et al., 2005)

Para melhor definir o fenômeno, a retração é uma deformação tridimensional de contração do concreto pela perda de água, normalmente expressa em deformação linear, isso porque a maioria dos elementos de concreto possui uma ou duas dimensões inferiores à terceira, onde os efeitos de retração são mais intensos. (AITCIN et al., 1997)

Durante o processo de hidratação do cimento ocorre a diminuição do volume absoluto e, quando a mistura é curada ao ar livre, ocorre a diminuição do volume aparente. Neste caso é possível afirmar que a contração do volume absoluto é acompanhada da contração do volume aparente. (KUMM, 2009)

Porém quando o concreto convencional é curado em água, o volume absoluto diminui, mas ocorre o aumento do volume aparente. Isso devido ao crescimento dos sais de etringita e portlandita ou ainda pelo inchamento dos cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que adsorvem a água. Portanto quando o concreto é curado em água, não apresenta contração do seu volume, porém o seu volume absoluto diminui. (AITCIN et al., 1997)

Alguns mecanismos para a movimentação da água dentro da mistura têm sido propostos e, os principais são:

Tensão capilar: Conforme pode ser observado na Figura 15, a água livre localizada no capilar e nos géis dos poros maiores, estarão submetidos à tensão capilar e, ao começar a evaporar a água, a superfície livre torna-se mais côncava, aumentando assim a tensão superficial. A equação (6) descrita por Kelvin sugere uma relação entre o raio de curvatura do menisco e a correspondente pressão do vapor. (DOMOME, 2010)

$$\ln(p/p_0) = \frac{2.T}{R.\theta.\rho.r} \quad (7)$$

Onde:

p_0 é a pressão de vapor sobre uma superfície plana;

p é o valor de pressão correspondente;

T é a tensão de superfície do líquido;

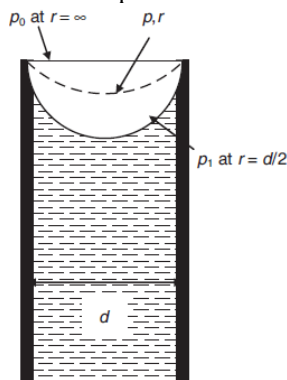
R é o constante dos gases;

θ é a temperatura absoluta;

r raio de curvatura d menisco; e

ρ densidade do líquido.

Figura 15 - Relação entre o raio de curvatura e pressão de vapor de água em um tubo capilar.



Fonte: Domome (2010).

A tensão de tração existente na água próxima do menisco pode ser calculada como sendo $2T/r$ e, deve ser equilibrada pelas tensões de compressão do sólido. Com a evaporação da água, ocorre aumento das tensões de tração, exigindo aumento da tensão de compressão na parte sólida do concreto e, resultando na diminuição de seu volume.

Tensão superficial ou energia de superfície: A energia de superfície é o trabalho necessário para aumentar a superfície por unidade de área. Sendo que as tensões superficiais induzem tensões de compressão no material, em CAD onde o tamanho médio de poros é muito pequeno, essas tensões apresentam bem significativa.

A absorção das moléculas de água na superfície das partículas reduz a energia de superfície, reduzindo assim o esforço de compressão interno, resultando na expansão de volume global. (DOMOME, 2010)

Pressão de separação: Através da Figura 16 é possível verificar a separação entre as camadas dos poros do gel, a partir de uma seção mais ampla, onde há presença de água livre em contato com vapor de água, para uma seção mais estreita entre sólidos, onde a água presente se encontra sob ação de tensões de superfícies.

Os movimentos entre as camadas são impedidos através da força de ligação entre as partículas (força de Van der-Walls). A água adsorvida na superfície forma uma película na superfície sólida à saturação, que está sob atração na superfície.

Em regiões de camadas mais estreitas, a camada de água agirá impedindo a adsorção, resultando em expansão ou dissociação da pressão, que é equilibrada pela tensão interpartículas. Na retração por secagem, a camada de água adsorvida é reduzida e a sua zona de adsorção impedida, resultando na redução da pressão de separação e, conseqüentemente, na retração do concreto. (DOMOME, 2010)

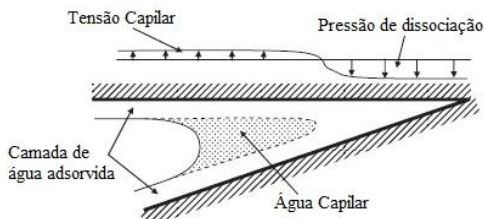
Movimento da água intercamadas: Este mecanismo se refere à água evaporável, a qual seu contato com a superfície som os sólidos e a sua dificuldade de atingir a superfície geram um elevado gradiente de energia higroscópica e, deste fenômeno é provável que ocorra a retração em magnitude igual ao ocorrido com a água livre ou adsorvida. (DOMOME, 2010)

A reversibilidade deste mecanismo depende da premissa de que não há mudança da estrutura durante o processo, o que é altamente improvável devido a dois fatores:

Redução das tensões capilares devido à interconexão de capilares anteriormente isolados; e

Diminuição da energia total do sistema, além da formação de uma estrutura melhor consolidada devido à movimentação da água adsorvida devido a formação das novas ligações interpartículas.

Figura 16 - Forças exercidas pela água nos poros dos géis das pastas de cimento endurecidas.



Fonte: adaptado de Domone (2010)

Embora a estrutura de concreto possa expandir, a contração dos elementos é extrema importância, uma vez que o concreto apresenta baixa capacidade de deformação, além de possuir resistência à tração inferior à compressão. (RANAIVOMANANA; MULTON; TURATSINZE, 2013)

Em consequência das deformações resultantes da retração e, dependendo do grau de restrição da estrutura, podem surgir tensões que, caso ultrapassem a resistência do material, resultam no surgimento de fissuras. Essas fissuras podem vir a comprometer a eficiência estrutural devido à diminuição da área resistente, ou ainda, reduzir a sua durabilidade, uma vez que ficam mais suscetíveis à ação de agentes agressivos.

Dentro deste aspecto, é possível afirmar que, a probabilidade de ocorrer o surgimento de fissuras depende, além do potencial de retração, depende também da restrição da estrutura, resistência à tração, fluência do concreto e módulo de elasticidade. (KELLY, 1964) Desta forma, um concreto que combate a retração de maneira eficiente necessitaria possuir baixo módulo de elasticidade, baixa retração, boa resistência à tração e fluência. Apresentar todas essas propriedades simultaneamente não é possível em uma mistura de concreto, uma vez que a sua resistência e o seu módulo de elasticidade apresentam características diretamente proporcionais.

Portanto a prevenção do surgimento de fissuras é a melhor alternativa, uma vez que os reparos das estruturas fissuradas apresentam normalmente elevado custo e são de difíceis execuções. Desta forma, para se prevenir a retração, existem diferentes maneiras de combate, já que seus mecanismos atuantes também são distintos.

Figura 17 - Causas de fissuração em estruturas de concreto armado.

Fissuração em estruturas	Retração		Plástica	
			Autógena	
			Carbonatação	
			Secagem	
	Temperatura		Ciclo Ambiental	
			Calor de hidratação	
	Grau de restrição	de	Interno	Armaduras Agregados
			Externo	Vínculos estruturais

Fonte: Adaptada de FOLLIARD et al., 2003

2.3.1 Formas de retração.

A retração de materiais cimentícios está vinculada à redução volumétrica do composto devido à perda de água. Durante o processo de hidratação do cimento ocorre a diminuição do volume absoluto, que corresponde ao volume de sólidos existente no volume aparente da mistura, enquanto em sua secagem ao ar livre ocorre a diminuição de seu volume aparente. Desta forma ocorrendo a contração do volume absoluto e aparente paralelamente.

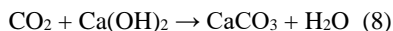
Porém quando o concreto convencional é curado em água, o volume absoluto diminui, porém, ocorre o aumento do volume aparente devido ao crescimento dos sais de etringita e portlandita, além da adsorção de água pelos cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), resultando em seu inchamento. (AITCIN *et al.*, 1997)

A retração pode ser dividida em cinco tipos diferentes, sendo: retração plástica, retração por secagem, retração autógena, retração térmica e retração por carbonatação. Cada um ocorre em idades particulares e apresentam magnitudes distintas, dependendo dos materiais utilizados e suas proporções, além das condições ambientais de exposição.

A seguir foi caracterizado os tipos de retração, mas como o foco desta pesquisa foi a reação autógena e a de secagem, estas foram melhor detalhada, assim como seus efeitos.

2.3.1.1 Retração por carbonatação.

A retração por carbonatação, se difere da retração por secagem pelo fato de que é causada por reação química e não pela perda de água da mistura. A combinação do dióxido de carbono (CO_2) com a água como ácido carbônico, reage com produtos da reação do cimento, principalmente a portlandita (hidróxido de cálcio), conforme pode ser observado na equação (8).



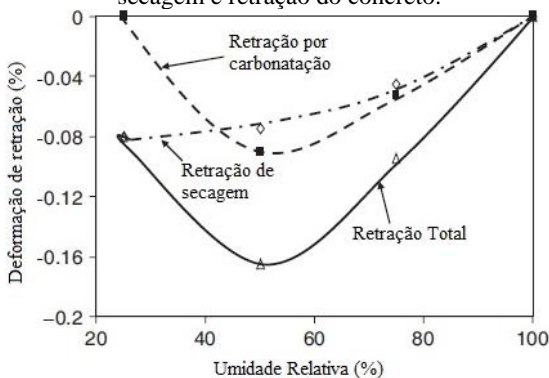
Como resultado dessa reação, ocorre liberação de água, resultando em retração da mistura, porém ocorre a diminuição da permeabilidade do concreto. Este fenômeno pode ser explicado pela cristalização do carbonato de cálcio resultante da reação nos poros da matriz, reduzindo a permeabilidade e oferecendo um ganho de resistência. (DOMOME, 2010)

Essa retração normalmente atinge a camada superficial do concreto, causando baixa retração e diminuição do pH da mistura. A profundidade e a velocidade de carbonatação irá depender da umidade relativa, tanto do interior do concreto quanto do ambiente ao qual está sendo submetido; porosidade da mistura e concentração de CO_2 no ambiente.

A saturação dos poros do concreto irá interferir na carbonatação do concreto. Para concretos com os poros saturados ($\text{UR} = 100\%$), o ácido carbônico não irá conseguir penetrar na estrutura, portanto não ocorrendo a degradação do concreto, já para concretos com umidade relativa em 0% (totalmente secos), não haverá água disponível para formar o ácido carbônico, desta forma também não ocorrerá a carbonatação. Portanto, a carbonatação das estruturas de concreto torna-se crítica quando há umidade relativa em torno de 50%.

Apesar de apresentar pouca deformação de retração, a diminuição do pH do concreto pode vir a comprometer a durabilidade da estrutura do concreto armado, já que favorece a despassivação da armadura, resultando em corrosão e, conseqüentemente causar a fissuração do concreto.

Figura 18 - Efeito da umidade relativa na retração à carbonatação, retração por secagem e retração do concreto.



Fonte: Adaptado de Domome (2010)

2.3.1.2 Retração térmica.

Como todo material, o concreto e seus constituintes podem vir a apresentar deformações quando submetidos às variações térmicas, podendo este fenômeno ocorrer desde as primeiras idades até o longo de sua vida útil.

Tendo em vista isso, o conhecimento de seu coeficiente de expansão é de extrema importância, principalmente para prever e calcular as tensões originadas pelo gradiente térmico gerado pelo calor liberado da reação de hidratação do cimento, além de calcular as variações dimensionais devido à variação térmica do ambiente ao qual a estrutura está submetida. (DOMOME, 2010)

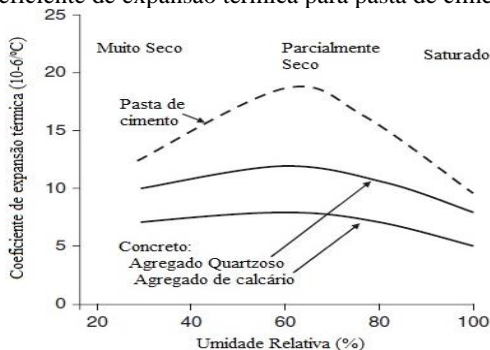
A intensidade das deformações térmicas devido à hidratação do cimento tende a estar diretamente relacionada ao consumo de cimento utilizado na mistura e, sua evolução tende a apresentar expansão, em situações normais, nas primeiras 12 horas e, após atingir o pico de temperatura, a estrutura de concreto tende a voltar ao seu tamanho original.

Nem sempre este processo se mostra totalmente elástico, sendo assim apresentando parte da deformação sofrida sendo inelástica e resultando em retração da peça. Este efeito é mais crítico em peças onde o equilíbrio térmico entre o seu interior e sua camada externa demora para ser obtido. (DOMOME,2010)

No caso de concreto, o qual se mostra um material heterogêneo, o coeficiente de dilatação térmica depende das características de cada componente, além de depender também da relação água cimento (A/C) e do teor de agregados utilizado.

Em idades mais avançadas, onde grande parte da reação de hidratação já ocorreu, a retração térmica depende da variação da temperatura do ambiente, sendo mais severas em ambientes de elevado gradiente térmico. A Figura 19 apresenta a curva de coeficiente de expansão térmica de uma mistura de pasta de cimento, e concretos realizados com agregados quartzosos e calcários submetidos à ambientes com diferentes umidades relativas. (DOMOME,2010)

Figura 19 - Coeficiente de expansão térmica para pasta de cimento e concretos.



Fonte: Adaptado de Domome (2010)

2.3.1.3 Retração por secagem.

A retração por secagem está associada à perda de água adsorvida pela mistura para o ambiente, tornando-a assim uma das principais causas de fissuração (DINIZ *et al.*, 2011). Isso porque está associada à hidratação dos compostos anidros do cimento, assim sendo tanto mais acentuada quanto maior é a perda de água que estes sofrem como consequência de um ambiente mais ou menos seco. (HAYSPARK *et al.*, 2005)

A retração por secagem pode ser ainda classificada como plástica, quando ocorre antes da ocorrência da pega do concreto e, ocorre quando a taxa de evaporação da água da superfície exposta do concreto é superior à taxa de exsudação, ocasionando a variação volumétrica e, podendo vir a resultar em fissuração, geralmente com forma característica de mapa,

podendo resultar em perda de durabilidade e desempenho da estrutura. (REPETTE, 2011)

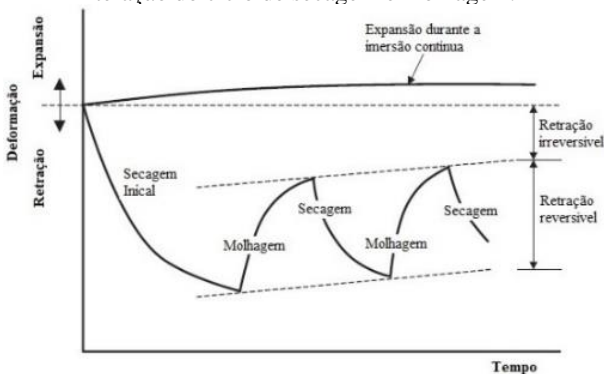
A intensidade da retração plástica sofre interferência de alguns parâmetros como temperatura, umidade relativa do ambiente, velocidade do vento, geometria da estrutura e características da mistura de concreto.

Quando a retração plástica ocorre após o final da pega do concreto, recebe a classificação de retração hidráulica. Quando exposto à uma umidade relativa inferior à 100%, ocorre a saída de água dos poros do concreto, resultando em diminuição do seu volume, gerando tensões internas na parede do sólido. Contudo em poros com diâmetros menores que 2 nm, devido à ausência da formação de menisco capilar, a retração se dá devido à diminuição da pressão de desligamento pela água adsorvida (MEHTA & MONTEIRO, 2014; SCHLANGEN *et al.*, 2007)

Na ocorrência da retração por secagem, a água contida nos poros de diâmetros superiores à 50 nm, essa conhecida como água livre, não apresenta efeito significativo, uma vez que essa se encontra livre das forças de atração exercidas pela superfície sólida. Porém, em poros inferiores à 50 nm, pode ocorrer a diminuição significativa das acentuadas reduções do volume de pasta de cimento. (ISAÍÁ, 2011)

Na Figura 20 é representado o comportamento típico da retração, onde é possível verificar que a deformação máxima ocorre nas primeiras idades e, parte dessa deformação se torna irreversível mesmo com a aplicação de cura.

Figura 20 - Resposta esquemática da retração de misturas cimentícias com a alteração do ciclo de secagem e molhagem.



Fonte: adaptado de Domome, 2010.

Também é possível verificar que, ao ser imerso em água, o concreto apresenta uma pequena expansão, recuperando uma parcela da deformação sofrida pela secagem. Isso ocorre pelo fato de aumentar o teor de água, compensando a autodessecação e, mantendo a pasta saturada.

Além disso, a água é absorvida para dentro do C-S-H, causando o aumento do volume líquido, porém em CAD, este efeito de expansão é pequeno, uma vez que é resistido pela estrutura da matriz cimentícia. (DOMOME, 2010)

2.3.1.4 Retração autógena

A retração autógena é causada pela retração química e pela auto dessecação decorrentes da hidratação do cimento e, para a sua quantificação, não é levado em consideração a perda ou ganho massa, as variações térmicas e nem o esforço ao qual está submetido. (TAZAWA; et al., 2000) A análise deste efeito é de extrema relevância para a análise estrutural a partir do momento em que o concreto apresenta comportamento viscoelástico.

Segundo DINIZ *et al* (2011) , a remoção da água dos poros maiores não apresenta influência sobre o fenômeno autógeno. Essa é a razão deste fenômeno ser desprezado em concretos e argamassas convencionais, onde os poros não são muito refinados. Porém é nocivo para concretos de alto desempenho. ($A/C < 0,45$ e adições de sílica ativa).

Os fatores que influenciam no fenômeno da retração autógena são relação A/C, composição do cimento, teor de sílica ativa, finura do cimento, sílica ativa, teor de agregado e temperatura de exposição, sua influência foi mais bem explicada mais adiante neste trabalho.

Enquanto a mistura ainda é fluida, a retração sofrida pela mistura devido a diminuição de volume da reação dos compostos do cimento é convertida totalmente em variação volumétrica externa. (SANT; LURA; WEISS, 2006)

Porém, quando a estrutura do concreto apresentar certa rigidez, a retração química resulta em formações de volumes gasosos no interior da pasta sob condições autógenas, sendo que, com a evolução das reações de hidratação do cimento, mais poros são formados, reduzindo o equilíbrio de pressões existente. (HUA; ACKER; EHRLACHER, 1995)

Como consequência deste processo, ocorre a formação de meniscos e a redução da umidade relativa interna, esta não atingindo níveis inferiores à 75%. (JENSEN; HANSEN, 2001)

Sabendo-se que o refinamento dos poros do concreto resulta em aumento da tensão capilar e, conseqüentemente no aumento da retração autógena, as misturas de concretos de alto desempenho então tendem a apresentar elevados valores de retração autógena, uma vez que, como característica principal da dosagem destas misturas, se trabalha com adições minerais e com baixas relações A/C, fatores que resultam em baixa porosidade e refinamento dos poros existentes. (COOK; HOVER, 1999)

A retração autógena passa a ser uma preocupação de engenharia a partir do momento em que peças estruturais de geometria considerável são construídas em concreto de elevada resistência, visando elevada vida útil da edificação. A retração autógena também é relevante em situações caracterizadas como concreto massa, pois o núcleo da mistura estaria em uma situação autógena (sistema fechado). As misturas plásticas de concreto com baixo consumo de água só foram possíveis com o advento dos aditivos redutores de água de alto desempenho. Nesse sentido, a retração autógena, muitas vezes negligenciada em concretos convencionais, passa a ter um papel relevante em concretos de baixa relação a/c com adições minerais.

Como o CAD se caracteriza por utilizar relações A/C inferiores à 0,40; inferior ao limite teórico destinado para a hidratação total do cimento e assim, surgem tensões capilares devido o refinamento dos poros e redução química próprio ao processo de hidratação. Nesse cenário, já é demonstrado que, nas primeiras idades, a retração autógena ocorrida em CAD é mais pronunciada que a retração por secagem. (CUSSON; REPETTE, 2000)

Com relação à taxa de deformação em CAD, foi mostrado que grande parte da retração autógena se dá nos primeiros dias de hidratação do cimento, podendo chegar a 260 μm com um dia. (CUSSON; HOOGEVEEN, 2007)

A retração autógena varia em função da relação A/Agl, composição e finura do cimento Portland (BENTZ, 2008; BENTZ et al., 2001; HOLT; LEIVO, 2004; JENSEN; HANSEN, 2001; TAZAWA; MIYAZAWA, 1995). A retração autógena é maior quando se incorpora sílica ativa no concreto, sendo que a diferença aumenta ao longo do tempo (IGARASHI; BENTUR; KOVLER, 2000; PERSSON, 1997; TAZAWA; MIYAZAWA, 1995). No entanto, até os seis dias, não foram encontradas diferenças significativas de retração autógena em CAA com diferentes filers. (CRAEYE et al., 2010)

Foi observado que a redução da relação A/Agl aumenta a contribuição da retração autógena em relação à retração total (autógena mais

secagem). Concretos com relação A/Agl igual a 0,17 apresentaram deformação referente apenas à retração autógena (TAZAWA; MIYAZAWA, 1995 b). Situação semelhante foi relatada por Persson (1997), que observou uma contribuição autógena na retração total de 80%, aproximadamente, aos 28 dias, com uma relação A/Agl de 0,19. Como a retração autógena é um fenômeno que ocorre na pasta de cimento, o teor de agregado do concreto interfere na variação volumétrica, ou seja, a retração autógena é reduzida quando se aumenta o volume de agregado no concreto (TAZAWA; MIYAZAWA, 1995 b).

Foi demonstrado, também, que a temperatura de cura influencia a retração autógena. MOUNANGA et al. (2006) avaliaram os efeitos da temperatura de cura (10, 20, 30, 40 e 50°C) na retração de pastas de cimento Portland, com relação A/Agl de 0,25; 0,30; 0,35 e 0,40. Os autores observaram que o aumento da temperatura promove um incremento na retração autógena das pastas, independentemente da relação A/Agl, nas primeiras 20 horas de hidratação. No entanto, LURA; VAN BREUGEL; MARUYAMA (2001) estudaram o efeito da temperatura de cura (10, 20, 30, e 40°C) e do tipo de cimento na retração autógena de CAD, nas primeiras idades, e constataram que não existiu uma tendência para a retração autógena em função da temperatura, embora seus valores fossem alterados para cada temperatura de cura e do tipo de cimento usado.

2.3.1.5 Ensaios para retração

A medida da retração pode ser tomada de duas maneiras fundamentalmente distintas: medindo-se a retração linear ou medindo-se a retração volumétrica. Ambos os métodos têm suas vantagens e desvantagens.

As medidas de retração plástica e de retração por secagem são geralmente realizadas em prismas, como proposto pela ASTM C 157 (2016). Os corpos de prova prismáticos são moldados em fôrmas metálicas de alta rigidez, e postos em contato com transdutores de deslocamento.

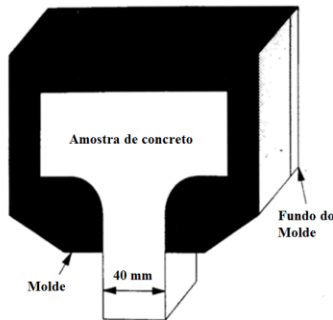
Para a medição da retração autógena nestes aparatos, é necessário que os mesmos estejam previamente preparados a fim de garantir as condições necessárias. Para idades mais avançadas de hidratação, estas medições podem ser realizadas no quadro de retração, sugerido pela ASTM C 157 (2016). Através destes procedimentos se faz a obtenção das leituras de retração linear livre das misturas de concreto.

Estes ensaios lineares foram desenvolvidos com o propósito de se avaliar a retração do material, independente de geometria ou restrição à que o corpo de prova está submetido. Para a realização do ensaio, por recomendação da norma ASTM C157 (2016), o ambiente de ensaio deve ser controlado sob temperatura de 23°C e umidade relativa de 50% e, normalmente são medidos apenas os deslocamentos axiais, sendo recomendado também realizar o acompanhamento da face superior do prisma, a fim de realizar o acompanhamento de abatimento das amostras.

Além disso, o ensaio linear de retração restringida pode ser usado para a determinação da curva tensão-deformação e, conseqüentemente o módulo de elasticidade do concreto ensaiado, além de nos fornece a tensão gerada pela retração do concreto, porém por ser ensaiado uniaxialmente, o teste está propenso à erros e dificuldades inerentes aos ensaios de resistência uniaxial. (KOVLER, 1994)

Um exemplo deste ensaio, suas restrições, análise e detalhe do procedimento de ensaio é apresentado por (KOVLER, 1994), onde é apresentado o equipamento de restrição ativa, onde é ensaiado um corpo de prova de 1,0(um) metro de comprimento com seção quadrada de 40 mm e, contendo um alargamento em suas extremidades onde se dá a restrição, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Extremidade do corpo de prova de retração restringida linear.



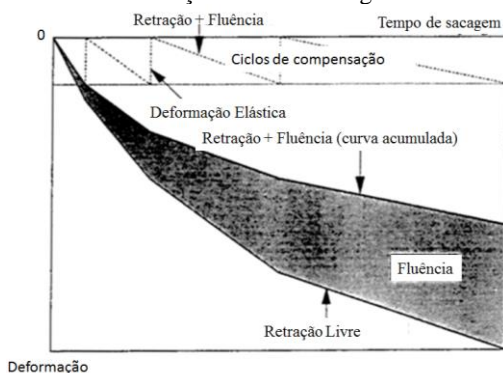
Fonte: adaptado de Kovler (1994)

Uma das extremidades da amostra é mantida totalmente restringida enquanto a outra permanece livre para se movimentar horizontalmente. Essa extremidade livre está conectada à uma célula de carga e à transdutores de deslocamento, de modo que durante o tempo de ensaio seja possível tomar as medidas de deformação da amostra e da carga gerada por essa deformação devido à restrição sofrida.

À medida que o corpo de prova contraía durante o ensaio, o mesmo era retornado a sua dimensão original através de um sistema de parafusos ligado a um motor que estava conectado à uma célula de carga, que traciona a extremidade livre do corpo-de-prova, até que retorne à posição inicial, registrando nesse momento o esforço necessário para executar essa atividade, que nada mais é que a tração induzida pela retração do concreto.

Segundo o proposto por Kovler (1994), este procedimento era realizado em dois corpos de prova de mesmas dimensões e geometrias, com a única diferença que uma das amostras permanecia sem restrições, podendo retrair livremente, de modo a ser aquisitado a retração livre linear e, assim completando o ensaio, onde segundo este procedimento, é possível obter os valores de retração livre, retração restringida e da parcela de fluência do concreto amostrado, conforme apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Curvas de retração e fluência obtidas através dos dados de ensaios de retração livre e restringida.



Fonte: adaptado de Kovler (1994)

Para a avaliação de misturas frente à retração restringida têm mostrado grande variedade de ensaios, resultando assim em resultados experimentais divergentes entre si, isso devido ao fato que cada pesquisador acaba por escolher a metodologia seguida e aquisição de dados que melhor atende seus objetivos. (TANESI; FIGUEIREDO, 1999)

Apesar disso, os ensaios de retração restringida podem ser divididos basicamente em ensaios de anel, ensaios lineares e ensaios em placas. O ensaio de anel baseia-se na medida de tensões num anel metálico, provocada pela retração do anel de concreto que o envolve. Neste caso é

assumido que a distribuição de tensão na seção do anel é linear e de magnitude igual ao esforço gerado pela contração do concreto. Desta forma é possível calcular a tensão de tração média medida do concreto através da deformação do anel metálico. (NUNES, 2006)

Já o ensaio em placas, possui a vantagem de possuir grande área de exposição, o que é benéfico principalmente quando se deseja mensurar a retração por secagem. Conforme apresentado por Kraai (1985) *apud* NUNES (2006), são moldadas duas placas de concreto de pequenas dimensões, simulando um pavimento de concreto, para isso mantendo uma mesma relação área/volume. Estas placas são submetidas à idênticas condições ambientais (umidade relativa, temperatura e velocidade de vento), sendo restringida apenas nos perímetros das formas, através da fixação de telas em forma de “L”. No fim do experimento são medidos o comprimento e a abertura de fissura em cada placa. Como este ensaio tende a reproduzir uma estrutura em escala, deve-se tomar cuidado com a compatibilidade dimensional entre os constituintes das misturas e as dimensões de placas escolhidas.

A medida volumétrica da retração autógena é realizada geralmente através de balões de borracha suficientemente resistentes preenchidos com pasta de cimento fresca e imersos em meio líquido. A partir daí a medida de retração autógena é feita pela variação de nível do líquido onde o balão está imerso.

SANT ; LURA & WEISS (2006) compararam diferentes tipos de ensaios de retração e atentam para a interpretação criteriosa dos dados obtidos através do método ASTM C 157 (2016) quando aplicado em misturas de baixa relação A/C. Isso porque uma análise pouco cuidadosa dos dados diminui a precisão das leituras obtidas, gerando uma falsa indicação no início da retração.

2.3.1.6 Combate à retração

Atualmente existem inúmeras formas disponíveis para combate à retração, dentre estas é possível citar:

- cimentos expansivos; a citar os tipos K, M e S (designados pela ASTM C 845, (1996) que, pela formação de etringita, provocam a expansão da pasta.
- aditivos redutores de retração: são aditivos de base glicol, que atuam diminuindo a tensão superficial da água (REPETTE; MAILVAGANAM, 1999);

- aditivos aceleradores de pega: promovem o ganho de resistência da pasta e diminuem a retração autógena (ESPING, 2006);
- precauções na composição da mistura: maiores teores de agregado graúdo e maior relação A/C, por exemplo, são favoráveis à menor incidência de retração;
- incorporação de fibras à mistura: de natureza metálica ou polimérica, as fibras dispersas na mistura contribuem para o combate à retração (GRZYBOWSKI; SHAH, 1990; NOUN; MORSHEDIAN, 1995); e
- Cura: consiste em proporcionar umidade e temperatura adequadas, de modo a prevenir a perda de umidade da pasta.

Portanto o combate ao efeito da retração em concretos com elevados consumo de cimento tem sido alvo de muitos estudos. Como alternativas surge a utilização de agentes de cura interna, adição de fibras e a utilização de aditivos químicos.

Muitas pesquisas utilizam de aditivos químico como estratégia de combate da retração, estes conhecidos como redutores ou compensadores de retração, conforme sua composição e ação do mesmo nas misturas cimentícias. Dentre estes, se obtém melhor desempenho utilizando aditivos redutores de retração uma vez que os compensadores de retração tendem a resultar em maior porosidade da mistura. (HOLT& LEIVO, (2004); HOSSAIN; WEISS (2004); IGARASHI; BENTUR & KOVLER, (2000)

A promoção de cura interna aparece como outra alternativa, onde muito tem sido estudado para o melhoramento e viabilidade da técnica, a qual consiste em utilizar materiais com capacidade absorção de água, com a finalidade de que funcionem como reservatório para as misturas.

Neste aspecto, os estudos utilizados normalmente incorporam às misturas polímeros superabsorvente (PSA) ou materiais porosos, os quais atendem à premissa da técnica utilizada. Quanto ao benefício no combate à retração, essa técnica se mostra muito eficiente, conforme apresentado por KUMM (2009), ONGHERO & REPETTE (2009) e ONGHERO; REPETTE & PILAR (2012).

2.4 Influência da utilização de fibras na retração.

Sendo a adição de fibras um mecanismo de reforço secundário para a matriz cimentícia, reduzindo as tensões desenvolvidas durante o processo de hidratação da mistura e, se mostrando uma alternativa para combater a fissuração por retração (NUNES, 2006). A percentagem de redução da retração e da fissuração difere dependendo das características das

fibras utilizadas. As mais utilizadas são as fibras sintéticas (menor custo), porque aumentam a resistência e a ductilidade, além de reduzir a retração e aumentar a resistência à microfissuras. (NILI; AFROUGHSAKET, 2010)

Entretanto, em casos severos, com uso de concretos com elevado consumo de cimento, cura insuficiente ou ausência de juntas, somente a adição das fibras não resolve por si o problema da fissuração dos elementos de superfície restringidos, sendo necessário estar associado a outros procedimentos para reduzir a fissuração, como por exemplo a execução de cura úmida ou limitação do consumo de cimento (NUNES, 2006).

Incorporação de fibras na matriz cimentícia resulta no aumento da tenacidade e na resistência do compósito à fissuração, uma vez que age absorvendo as deformações de retração da pasta, sem a ocorrência de perda de propriedades mecânicas como em outros materiais anteriormente citados. Além disso, a rede de bloqueio formada pela fibra evitará a sedimentação das partículas maiores, diminuindo assim a quantidade de água de exsudação e aumentando a resistência à tração do concreto fresco. (MA et al., 2004)

As propriedades das fibras adicionadas mostram diferenças quanto ao mecanismo de ação e ao efeito que as mesmas trazem ao CADRF. Das propriedades da fibra utilizada para combate à retração, a geometria das mesmas não apresenta influência na perda de umidade da mistura (KIM et al., 2008), portanto não afetando a magnitude da retração da mistura. Porém o mesmo autor retrata que o controle da fissuração é melhorado pelo teor de fibras utilizadas.

Graças a seu elevado módulo de elasticidade, as fibras de aço não serão solicitadas no seu limite de deformação elástica antes da fissuração da matriz de concreto. Assim, estas podem atuar como ponte de tensões, provocando a diminuição da concentração das mesmas na frente de propagação da fissura, reduzindo sua abertura, propagação e interconexão com outras fissuras.

Em geral, para um mesmo volume de fibras adicionadas, as fibras com maior coeficiente elástico são mais eficazes no controle da retração. Além disso, comparando o número de fibras dentro da seção transversal de concreto, muitas vezes compensando seu baixo módulo de elasticidade com uma maior quantidade de fibras na seção do concreto, conforme apresentado por LEE; WON (2016).

Por outro lado, o tipo de fibra utilizada possui grande influência no desempenho do compósito, isso devido à capacidade do material absorver as deformações. Neste sentido, as fibras metálicas se mostram mais adequadas para o uso em CADs, quando comparadas com fibras poliméricas,

devido às propriedades intrínsecas dos materiais. (AITCIN; NEVILLE; ACKER, 1997)

A fabricação de concreto reforçado com fibra de vidro em grande escala é muito pequena, isso devido ao fato que, incorporar a quantidade de fibra suficiente para a melhoria das propriedades mecânicas não seria rentável, além da dificuldade que se teria em obter uma mistura homogênea e com consistência adequada ao ser incorporados teores elevados na mistura (em torno de 1%).

Porém, mesmo com a adição de pequenos volumes, variando o consumo entre 0,8 e 1,2 kg/m³ de fibras de vidro com 12 mm de comprimento apresentam melhoria à fissuração devido à retração, resultante da quantidade de fibras contidas na mistura (podendo ser superior 2 milhões, dependendo dos filamentos). (HANNANT 2003).

Assim, para o caso de concretos reforçados com fibras curtas e distribuídas aleatoriamente na matriz de concreto, a maior parte do trabalho total para a ruptura do compósito se dá através da energia dissipada na ruptura da aderência entre a fibra e a matriz e posterior arrancamento das fibras ((BENTUR; MINDNESS, 2007).

PELISSER et al. (2010), apresenta estudo com utilização de fibras compostas por diferentes materiais, sendo incorporadas em argamassas e sendo avaliadas quanto à retração por secagem. Os autores verificaram que o material do qual a fibra composta e o volume de incorporação utilizado são fatores que influenciam na formação de fissuras apresentadas pela mistura.

Tabela 4 - Redução de fissuração com o aumento de 0,05% no volume de fibra utilizado.

Tipo de Fibra	Redução do tamanho da fissura	Número de fissuras
Polypropileno	55%	50%
Fibra de Vidro	28%	30%
PET	45%	58%
Nylon	24%	23%

Na Tabela 4 é apresentado a melhoria da eficiência das misturas diante a fissuração e tamanhos de fissuras encontrados por PELISSER et al. (2010), ao se aumentar o volume de fibras de 0,05% para 0,10%. Quando comparado com as misturas de sem adição de fibras, a Tabela 5 apresenta a melhoria, comparando a área fissurada desenvolvida pelas misturas.

Tabela 5 - Redução de fissuração em argamassas reforçadas com fibras
(PELISSER et al., 2010)

Tipo de Fibra	Teor de fibra	Redução de fissuração
Polypropileno	0,05%	75%
	0,10%	89%
Fibra de Vidro	0,05%	68%
	0,10%	77%
PET	0,05%	63%
	0,10%	75%
Nylon	0,05%	51%
	0,10%	63%

A adição de fibras em pequenos volumes já se apresenta um método eficiente de controle de fissuração, porém apesar dos inúmeros estudos que são realizados no tema, o efeito da sua adição sobre a retração livre do concreto ainda não é claramente compreendido. O que pode ser observado é que a incorporação de fibras de polipropileno, PVA ou fibra de carbono não apresentaram influência na perda de água das misturas (WONGTANAKITCHAROEN; NAAMAN, 2007)

Alguns trabalhos apresentam que, a utilização de fibras pode reduzir a retração de CAD em até 65% (SUN et al., 2001). Outros autores mostram que a utilização de fibras com elevado módulo de elasticidade pode se mostrar eficazes também para o controle da retração autógena (TAZAWA; et al., 2000)

Nas primeiras idades, concretos utilizando fibras metálicas praticamente não apresentam influência no controle do fenômeno de retração livre, sendo seu principal efeito percebido em ensaios de retração restringida, onde apresenta aumento da idade de fissuração do compósito (KOVLER, 1994)

Segundo (BORG; BALDACCHINO; FERRARA, 2016), ao realizar a incorporação de fibras no concreto, há uma melhora na capacidade resistir à fissuração ocasionada pela retração por secagem de até 68,7% para uma incorporação de 1,5% de fibras em volume.

Estudos realizados por CORINALDESI & MORICONI (2011) também mostram diminuição da retração por secagem em concretos com adição de fibras, sendo que misturas contendo fibras metálicas mostraram maior eficiência quando comparadas com fibras de Acetato de Polivinila e Polipropileno.

FERRARA *et al.* (2015) apresenta que, concretos que apresentam baixa relação A/C e adição de fibras, apresentam uma capacidade de auto

cura devido à sinergia existente entre os materiais (fibra-matriz). A matriz ao apresentar fissuração, expõe os grãos de cimento não hidratados, tornando possível reações devido ao seu contato com a umidade do ambiente e, foi observado a recuperação do desempenho mecânico das amostras e foi possível correlacionar uma estimativa de fechamento de fissura, tendo em base o desempenho mecânico da amostra.

NASSIF, *et al.* (2016) apresenta melhoria no desempenho de concretos autoadensáveis reforçados com fibra de polipropileno quanto ao combate da deformação livre e dos efeitos de fissuração do concreto. Na ocasião, a adição de 0,20% de fibra ao concreto resultou em 9% de redução da deformação livre das amostras estudadas e, quando restringidas, apresentou aumento na idade de fissuração em 9 dias e diminuiu a área fissurada.

MA *et al.* (2004) apresenta a redução do tamanho das fissuras apresentadas pelo concreto conforme se aumenta a incorporação de fibras de polipropileno, chegando em até 88% para o teor de 0,15%, porém resultando em maior quantidade de fissuras mais pequenas. Os autores ainda investigaram a influência entre o volume de fibra, temperatura e umidade relativa nos resultados obtidos, estes podendo ser relacionados por uma equação linear trivariável, onde dos fatores estudados, o teor de fibra é o que apresenta maior interferência, sendo seguidos pela temperatura ambiente e umidade relativa.

É possível obter ainda melhoria da utilização de fibras ao acrescentar material de tamanhos diferentes, de modo que o compósito atue em escalas diferentes. Enquanto microfibras agem na restrição da pasta/argamassa, as macrofibras são restringidas pelos agregados graúdos. (YOO *et al.*, 2014)

Em estudos apresentados por LONG *et al.*,(2016), ao utilizar a combinação de fibras de polipropileno, microfibras basálticas e PVA não foi apresentada diferença significativa nos resultados quanto as propriedades mecânicas e a retração livre dos concretos, porém ao ser utilizado os três tipos de fibra, ocorreu a redução da consistência do concreto.

A combinação de técnicas também se mostra uma solução, conforme mostrado por (YOO *et al.*, 2014), onde o uso combinado de fibras metálicas e aditivo redutor de retração apresentou benefício nos resultados de retração e também melhoramento do desempenho mecânico da mistura.

2.5 Síntese do capítulo

A incorporação de fibras em misturas de concreto se faz, principalmente, com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas das matrizes cimentícias. O compósito resultante dessa adição apresenta maior ductilidade, uma vez que, a fibra passa a atuar como ponte de transferência de esforços, diminuindo os pontos de concentração de tensão e, proporcionando resistência após fissuração do concreto.

A eficiência do compósito resultante depende das proporções e propriedades dos materiais utilizados, tanto para a confecção do concreto, quanto da fibra utilizada. Isso porque, para se obter um melhor desempenho, deve se buscar uma compatibilidade entre os módulos de elasticidade entre as misturas de concreto e a fibra escolhida.

Além disso, as características da fibra como: comprimento, diâmetro, fator de forma (λ), resistência à tração e volume de fibra utilizado acaba interferindo não só nas propriedades do estado endurecido, mas como também afetam as propriedades do material em seu estado fresco, podendo inviabilizar a aplicação do compósito.

Uma vez que o fenômeno de retração se dá basicamente em virtude de perda de umidade da mistura, a geometria das fibras não afeta em sua magnitude. Porém é encontrado uma melhora do controle de fissuração, de acordo com a fibra utilizada.

A incorporação de fibras de baixo módulo de elasticidade no concreto resulta em diminuição da deformação obtida nos ensaios de retração livre, apesar de pouco entendimento do mecanismo que age sobre este fenômeno. Porém, ao ser submetido ao ensaio de retração restringida, ocorre a diminuição do tamanho das fissuras apresentadas pelo concreto, resultando em maior quantidade de microfissuras, devido à melhor distribuição de tensões no compósito, resultando aumento do tempo de fissuração do concreto.

Uma vez exposto as características das fibras que influencia na eficiência do CADRF e seu mecanismo de ação, é possível resumir a influência de fibras sintéticas, como a utilizada neste projeto, nas propriedades da mistura, conforme pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 - Resumo da influência da adição de fibras nas propriedades do concreto.

Propriedade	Influência
Resistência à compressão	<p>Ajudam a restringir a formação de microfissuras, reduzindo a perda de rigidez e permitindo uma maior transferência de tensão. (YEHIA et al., 2016)</p> <p>Porém em elevadas dosagens, as fibras podem produzir redução da resistência à compressão devido à concentração de fibras em uma mesma seção do concreto. (GENCEL et al., 2011)</p>
Resistência à flexão	<p>As fibras sintéticas se apresentam deformáveis à baixos carregamentos, permitindo uma distribuição uniforme das tensões. (YEHIA et al., 2016). Se faz necessário uma distribuição uniforme das fibras para otimizar o desempenho à flexão. (ACI COMMITTEE 544, 2002)</p>
Resistência à tração	<p>A adição de fibras tende a aumentar a resistência à tração do concreto (GENCEL et al., 2011; KHALAJ; NAZARI, 2012; LABIB; EDEN, 2004; MAZAHERIPOUR et al., 2011), porém dosagens excessivas podem resultar em aumento de ar incorporado, resultando em menor capacidade de resistência à tração. (CORINALDESI; MORICONI, 2011)</p>
Módulo de elasticidade	<p>As fibras podem aumentar o módulo de elasticidade em até 90%, havendo uma correlação positiva com o teor de fibras adicionado (PELISSER et al., 2010). Apesar disso, concretos autoadensáveis</p>

	reforçados com fibras podem apresentar tensão máxima menor que os concretos autoadensáveis sem fibras, mas em geral haverá um aumento do módulo de elasticidade das composições. (BOULEKBACHE et al., 2012)
Controle de Fissuração	As fibras sintéticas ajudam a restringir a formação de microfissuras dentro de uma seção transversal.(CORINALDESI; MORICONI, 2011; DOMONE, 2006; PELISSER et al., 2010; ROESLER et al., 2004) (CORINALDESI; MORICONI, 2011; PELISSER et al., 2010; ROESLER et al., 2004), em geral, para um mesmo volume, esta capacidade se mostra inferior às fibras metálicas.(BURATTI; MAZZOTTI; SAVOIA, 2011)
Falha microestrutural	Diferenças na rigidez dos constituintes do concreto podem afetar a interface pasta/cimento, gerando fissuras e enfraquecendo a interação(YEHIA; ALHAMAYDEH; FARRAG, 2014). Isso é mais significativo quando ocorre adição de fibras, uma vez que as mesmas são substancialmente mais duras que a pasta de cimento. (YEHIA et al., 2016)

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A fim de alcançar os objetivos traçados, o programa experimental proposto aborda a investigação do efeito da incorporação de elevados teores de microfibras em matriz de concreto autoadensável de alto desempenho quanto ao fenômeno de retração e, suas influências nas propriedades mecânicas da matriz. O presente estudo está inserido no projeto “Combate à retração para prevenção da fissuração do concreto de alto desempenho e de materiais de base cimento usados na construção e no reparo de estruturas” - PD-0061-0001/2010. Trata-se de um projeto ANEEL, ciclo 2010, gerenciado por Luiz Roberto da Silva (Companhia Energética de São Paulo – CESP) e coordenado pelo Professor Wellington Longuini Repette (Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC). O projeto foi realizado entre 2 de fevereiro de 2012 e 31 de dezembro de 2016.

Muitos outros estudos têm sido desenvolvidos pelo grupo NanoTec objetivando avaliar as alternativas para combate à retração, como pode ser encontrado em MELO NETO (2007); KUMM (2009); ONGHERO; REPETTE (2010); ONGHERO; PILAR; REPETTE (2012).

Neste capítulo, será descrito o procedimento de dosagens e as variáveis fixadas para a realização do trabalho, os materiais utilizados e os procedimentos experimentais adotados em cada ensaio. Além disso, serão abordadas as etapas do programa experimental e as justificativas que nortearam as tomadas de decisões.

3.1 DOSAGEM DO CADRF

Ao compararmos as diversas pesquisas realizadas com CRF, CAA e CAARF, é possível perceber que, ao ser incorporado as fibras na mistura, se faz necessário um acréscimo de aglomerante para garantir coesão e consistência da mistura. Como o escopo deste estudo é a comparação do efeito da adição de fibras sem perder as propriedades de estado fresco e endurecido nas misturas de concreto, se fez necessário fixar a proporção volumétrica entre os demais materiais.

Desse modo, pode-se afirmar que foram usados apenas: um tipo de cimento (CP V); um aditivo redutor de água, à base de poliacarbolixalato; um tipo de fibra (microfibra de vidro). Como ponto de partida para a abertura dos traços, é necessário determinar o teor volumétrico de microfibras a ser utilizado para a produção de 1 m³ de CADRF. Uma vez de conhecimento deste percentual, a proporção dos demais materiais possuem percentuais fixos em função do volume restante de mistura.

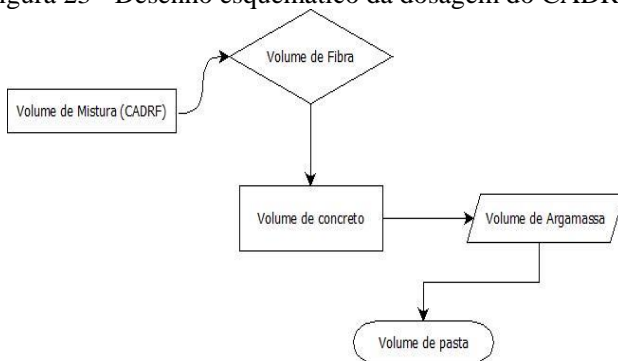
Sabe-se que a fração volumétrica, a densidade e o módulo de elasticidade dos principais componentes, além das características da zona de transição na interface, determinam o comportamento elástico do concreto. Em muitos casos, pode-se assumir que o módulo de elasticidade à compressão do concreto está entre os valores de módulo da pasta e do agregado. Consequentemente, o aumento da fração volumétrica do agregado será acompanhado por um incremento do módulo de elasticidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Com o intuito de não haver reduções, significativas, no módulo estático de elasticidade à compressão dos concretos estudados, foi adotado o percentual volumétrico de 35 % para compor a fração do agregado graúdo, em relação ao volume total de concreto.

Estudos preliminares indicaram que a brita pertencente à faixa granulométrica 4,75/12,5 (ABNT NBR 7211, 2009) era condizente com fluidez desejada das misturas. Cabe destacar que o agregado graúdo, antes de ser usado, foi lavado com o objetivo de reduzir e homogeneizar o teor de material pulverulento presente no lote de agregado graúdo utilizado.

Do volume restante (argamassa), 30% foi composto por agregado miúdo. O agregado miúdo foi composto por duas areias naturais, uma fina e outra média, com uma proporção entre ambas de 60% e 40%, respectivamente. Também foi fixada a proporção de 10% de sílica ativa em relação a massa de aglomerante. Todos os agregados foram secos em estufa e guardados em tambores plásticos com tampa. Na figura 23 é apresentado um esquema de como se realizou a dosagem dos CADRF desenvolvidos para este estudo, sendo o ponto de partida o volume de CADRF desejado produzir. Do volume de CADRF a ser produzido, é descontado a quantidade de fibra, de acordo com o percentual volumétrico a ser utilizado, resultando em um volume de concreto sem reforço.

Figura 23 - Desenho esquemático da dosagem do CADRF.



No que refere especificamente aos CADRF, pode-se pontuar que todos os concretos possuíram, aproximadamente, o mesmo volume de pasta e agregados e a mesma proporção entre os agregados miúdos e graúdos, independentemente da relação A/Agl.

Para a realização da pesquisa, foram assumidas como variáveis independentes a relação água aglomerante (A/Agl), o teor de fibras de vidro e a idade de hidratação da mistura. A proporção entre os agregados do concreto foi baseada no método de dosagem de concreto autoadensável Repette-Melo.

Portanto foram assumidas duas relações A/Agl de 0,25 e 0,32, em massa, com o objetivo de obter concretos de elevada resistência mecânica.

Referente a menor relação A/Agl, pode-se observar, por meio de estudos preliminares, que as misturas de concretos propostas nos moldes deste trabalho necessitam de um consumo mínimo de água de 190 litros, para viabilizar a homogeneização dos materiais constituintes de maneira adequada em misturador de eixo horizontal (betoneira).

A relação A/Agl de 0,32 é um valor próximo do escolhido por vários pesquisadores, os quais buscam o entendimento de misturas de CAD. Ao mesmo tempo, permite uma análise da eficiência da utilização de fibras para combate à retração para diferentes consumos de água.

Outro aspecto considerado na escolha das relações A/Agl, foi a possibilidade de comparar com as demais pesquisas realizadas pelo grupo, sendo assim escolhido trabalhar com as relações A/Agl, sendo elas 0,25 e 0,32. (KUMM, 2009; MELO, 2005; ONGHERO; REPETTE, 2009; ONGHERO; REPETTE; PILAR, 2012)

Para obter-se o consumo dos agregados, em massa, foi multiplicado o volume de cada material pelo seu, respectivo, valor de massa específica. O consumo de aglomerante, em massa, é obtido pela (9). Percebe-se que o consumo de aglomerante é inversamente proporcional à relação A/Agl, e que os demais parâmetros serão mantidos, relativamente, constantes para todas as misturas de concretos.

$$m_{aglomerante} = \frac{V_p}{\frac{1}{\rho_{ag}} + \frac{a}{ag}} \quad (9)$$

Onde:

$m_{aglomerante}$: massa de aglomerante (kg);

V_p = volume de pasta/m³ de concreto (m³);

ρ_{ag} = densidade do aglomerante (kg/m³), e

A/Agl = relação A/Agl (kg/kg).

Nota-se que a densidade do aglomerante é uma média das densidades do cimento Portland e da sílica ativa, ponderada pela proporção entre ambos. Admitindo uma proporção fixa de 10% de sílica ativa em relação à massa de cimento, pode-se obter a densidade do aglomerante, conforme Equação 10.

$$\rho_{ag} = \rho_c \times (1 - 0,1) + \rho_{mc} \times 0,1 \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

ρ_{ag} = massa específica do aglomerante (g/cm³);

ρ_c = massa específica do cimento (g/cm³); e

ρ_{mc} = massa específica da sílica ativa (g/cm³).

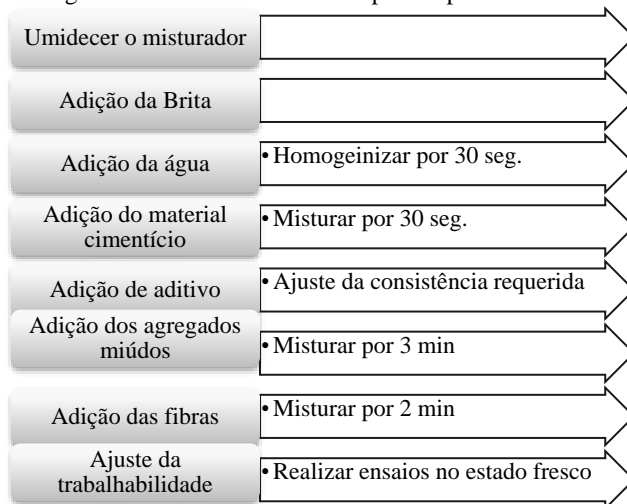
Com base nos objetivos desta pesquisa, buscou-se produzir concretos de alto desempenho, o que implica em compor essas misturas com baixas relações água / aglomerante (inferior a 0,40) e incorporar a mistura alguma adição mineral, em muitos casos (AITCIN, 2004).

Como limite inferior, optou-se pela relação A/Agl 0,25, em massa. Esse valor foi baseado em estudos preliminares, os quais mostraram uma grande dificuldade em homogeneizar os materiais constituinte em betoneira e, conseqüentemente, atingir um valor espalhamento próximo a 70 cm para relações A/Agl inferiores a 0,25. Cabe destacar que as misturas com relação A/Agl de 0,25 já necessitavam de uma ordem de mistura especial, com adição inicial de toda a água de amassamento e, aproximadamente, 80% do aditivo redutor de água.

Caso não fosse respeitada essa ordem de mistura, esses concretos não alcançavam o objetivo de se tornarem concretos autoadensáveis, para teores usuais de superplastificante. Para o limite superior, assumiu-se o valor de 0,32 para a relação A/Agl por representar um valor intermediário entre o 0,25 e o 0,40. Portanto, todas as misturas estudadas neste trabalho podem ser classificadas como de alto desempenho pelo critério da relação água / aglomerante.

Portanto, a padronização do procedimento adotado para a confecção do concreto evitando que ocorra variações de comportamento da mistura, principalmente em seu estado fresco pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 - Processo de mistura padrão para o estudo.



Para determinar a teores de fibras a serem estudados, foi realizado testes em menor escala, utilizando um misturador vertical, onde foi realizado o traço referência de cada concreto e, a partir de então foi executado adições 0,03 g de fibras de vidro, sendo verificado a abertura de cada mistura na mesa de abatimento e ajustando a sua consistência da mistura com aditivo sempre que necessário. Foi determinado que a escolha do teor de fibra seria o máximo de fibra que a mistura conseguisse suportar, desde que mantivesse as propriedades no estado fresco semelhante à apresentada pela mistura de referência.

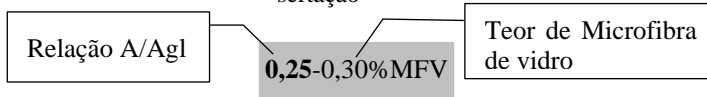
Como resultado deste teste preliminar, foi obtido como teor máximo de fibra possível de 0,326% do volume da mistura. Portanto, para trabalhar com misturas mais estáveis, optou-se em realizar o estudo proposto com volume de fibra proporcional a 0,2%, 0,25% e 0,3% do volume de mistura.

Este procedimento foi realizado para as duas relações A/Agl fixadas. O ensaio foi executado até o momento em que o concreto não apresentasse a consistência requerida e, o acréscimo de aditivo, resultaria em exsudação e segregação do concreto.

Com o objetivo de facilitar a leitura dos resultados em gráficos, tabelas ou no próprio corpo do texto, o nome das misturas foi abreviado, respeitando a relação A/Agl e teor de microfibras incorporado. Por exemplo, na Figura 25, a sigla 0,25- 0,30% MFV refere-se a um concreto com

0,30% de incorporação de microfibras de vidro (MFV) para uma relação água / aglomerante de 0,25.

Figura 25 - Esquema explicativo da nomenclatura das misturas adotado na dissertação



O resumo dos traços unitários em massa e o consumo de material por metro cúbico das misturas de concreto é apresentado nas Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7 - Quadro resumo dos traços unitários em massa.

	Cimento	Microsiflica	Areia natural	Areia Média	Brita 0	Fibra	Água
0,25_0%	1	0,111	0,438	0,286	1,306	0	0,278
0,25_0,2%	1	0,111	0,438	0,286	1,306	0,008	0,278
0,25_0,25%	1	0,111	0,438	0,286	1,306	0,010	0,278
0,25_0,3%	1	0,111	0,438	0,286	1,306	0,011	0,278
0,32_0%	1	0,111	0,491	0,321	1,463	0	0,356
0,32_0,2%	1	0,111	0,491	0,321	1,463	0,009	0,356
0,32_0,25%	1	0,111	0,491	0,321	1,463	0,011	0,356
0,32_0,3%	1	0,111	0,491	0,321	1,463	0,013	0,356

Tabela 8 - Quadro resumo do consumo de material em kg/m³.

	Cimento	Microsiflica	Areia natural	Areia Média	Brita 0	Fibra	Água
0,25_0%	706	78	309	202	922	0,00	196
0,25_0,20%	705	78	309	202	920	5,36	196
0,25_0,25%	704	78	309	202	920	6,70	196
0,25_0,30%	704	78	309	201	919	8,04	196
0,32_0%	630	70	309	202	922	0,00	224
0,32_0,20%	629	70	309	202	920	5,36	224
0,32_0,25%	628	70	309	202	920	6,70	223
0,32_0,30%	628	70	309	201	919	8,04	223

3.2MATERIAIS

A seguir são descritos os materiais empregados na pesquisa e suas respectivas caracterizações, as quais embora sejam resultados, são apresentadas neste item para facilitar a leitura do documento.

3.2.1 Cimento

Para o desenvolvimento do estudo em CADRF, foi Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), de massa específica $3,12 \text{ kg/dm}^3$, determinada conforme a ABNT NM 23 (2001).

Este material foi escolhido pelo fato de apresentar baixo teor de adições minerais, dentre os cimentos utilizados atualmente no mercado, fabricado a partir de clínquer, gesso, material carbonático e cinza volante.

A distribuição granulométrica das partículas do cimento foi obtida em equipamento Microtrac S3500, sem meio dispersante, a qual é mostrada na Figura 26. Nota-se que o d_{50} do cimento foi $13\mu\text{m}$. O d_{50} refere-se que 50% das partículas, em volume, ficariam retidas em uma peneira de malha de diâmetro especificado como o valor do próprio d_{50} . Pode-se observar ainda que 95% das partículas do cimento têm dimensão inferior a $52,33 \mu\text{m}$. Os dados da Tabela 9 referem-se aos tamanhos de partículas inferiores ao respectivo percentual, ou seja, 90% das partículas do cimento têm diâmetro inferior a $47,56 \mu\text{m}$.

A Tabela 10 apresenta as características químicas e físicas do cimento informadas pelo fabricante, estando todas em conformidade com a ABNT NBR 5733 (1991). Paralelamente aos dados fornecidos pelo fabricante, foi realizado a determinação química quantitativa dos óxidos por meio de espectrometria de fluorescência de raio-x (FRX), com pastilha fundida, conforme apresentado na Tabela 11.

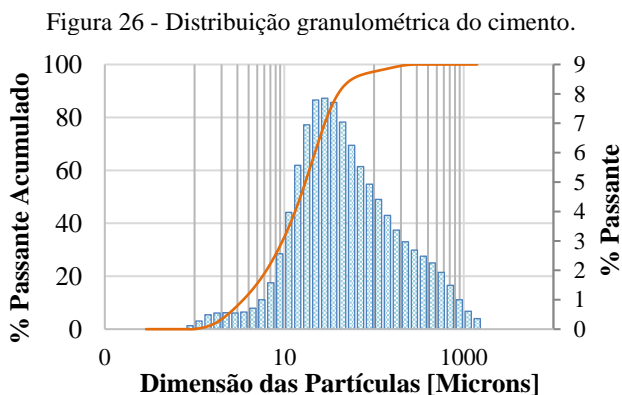


Tabela 9 - Valores percentuais da distribuição granulométrica do cimento.

Material	D10	D50	D90	Dmáx
Cimento CPV-Ari	$2,75 \mu\text{m}$	$13,08 \mu\text{m}$	$47,56 \mu\text{m}$	$209,30 \mu\text{m}$

Tabela 10: Caracterização química e física do cimento CP V ARI

Caracterização física	Área específica Blaine (NBR 7224/84) (cm ² /g)	4071	
	Expansibilidade a quente (NBR 11582/91) (mm)	0,20	
	Finura - resíduo na peneira	#200 (%)	0,47
		#325 (%)	3,05
	Tempo de pega (NBR 11581/91)	Início (min.)	145
		Fim (min.)	183
	Resistência à compressão (NBR 7215/91)	1 dia (MPa)	22,4
3 dias (MPa)		37,5	
7 dias (MPa)		42,8	
28 dias (MPa)		51,1	
Caracterização química (%)	Perda ao fogo	2,93	
	Resíduo insolúvel	0,64	
	MgO	4,51	
	SO ₃	2,85	

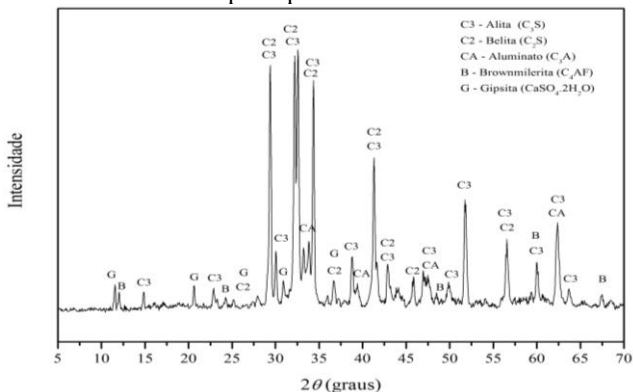
Fonte: Cimentos Itambé (abril de 2014).

Tabela 11 - Determinação da análise química quantitativa do cimento.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Mn ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	P.F. ¹
18,9	3,69	0,5	0,41	2,76	0,26	63	4,22	0,05	0,03	3,1	3,2

¹P.F. = Perda ao fogo.

Figura 27: Espectros de Raio-X obtidos para o cimento com a identificação dos seus principais constituintes.

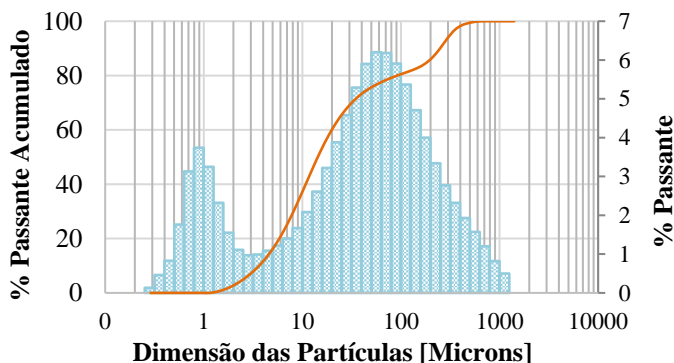


A caracterização do cimento pela técnica de raio-X foi realizada no Laboratório Nanotec, no Departamento de Engenharia Civil da UFSC, utilizando o equipamento Rigaku, modelo Miniflex II Desktop X-Ray Diffractometer, com radiação Cu K-alfa; $\alpha=1,5406 \text{ \AA}$; $5^\circ \leq 2\alpha \leq 85^\circ$ com passo de $0,01^\circ$ por segundo. Na Figura 27 é apresentado o espectro de raio-X obtido para o cimento Portland. As fases cristalinas identificadas foram alita e a belita.

3.2.2 Sílica Ativa

Para o desenvolvimento do estudo, foi utilizado sílica ativa 920 U, fabricada pela Elken, contendo grau de pureza de 95% e massa específica $2,22 \text{ kg/dm}^3$. A distribuição granulométrica das partículas do cimento foi obtida em equipamento Microtrac S3500, sem meio dispersante. Na Figura 28, é apresentada a distribuição granulométrica da sílica.

Figura 28 - Distribuição granulométrica da Sílica Ativa.



Pode-se observar que 95% das partículas do cimento têm dimensão inferior a $296 \text{ }\mu\text{m}$. Os dados da Tabela 12 referem-se aos tamanhos de partículas inferiores ao respectivo percentual, ou seja, 90% das partículas do cimento têm diâmetro inferior a $248,9 \text{ }\mu\text{m}$. Neste caso, é observado que o diâmetro máximo da sílica ativa é superior ao do cimento, porém este fato se deve ao fato da amostragem testada conter grumos, dificultando a análise.

Tabela 12 - Valores percentuais da distribuição granulométrica da sílica ativa.

Material	D10	D50	D90	Dmáx
Cimento CPV-Ari	$3,3 \text{ }\mu\text{m}$	$13,1 \text{ }\mu\text{m}$	$248,9 \text{ }\mu\text{m}$	$592,0 \text{ }\mu\text{m}$

Ainda foi realizado a caracterização química do material através de espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX), utilizando equipamento de espectrômetro S2 ranger Xflash Technology, com pastilha fundida. Para a realização deste ensaio foi contratado um laboratório externo da universidade e, os resultados podem ser observados na Tabela 13.

Tabela 13 - Determinação da análise química quantitativa da sílica ativa.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Mn ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	P.F. ¹
94,64	<0,04	1,3	0,49	0,06	<0,02	0,2	0,34	0,04	0,14	0,1	2,68

¹P.F. = Perda ao fogo.

3.2.3 Agregados

Os agregados obtidos para dosagem dos CADRF são originários de jazida da região de Florianópolis – SC, sendo empregado uma areia fina, de origem quartzosa, provida de dunas e uma areia média extraída de cava de rio. A areia fina possui massa específica de 2,66 kg/dm³ e módulo de finura igual a 0,90. A areia média possui massa específica de 2,60 kg/dm³ e módulo de finura igual a 2,97.

O agregado graúdo de britagem usado na dosagem dos CADRF foi de origem granítica, pertencente à zona granulométrica 4,75/12,5 (brita 0), conforme a ABNT NBR 7211 (2005). A massa específica da brita é de 2,61 kg/dm³, com módulo de finura igual a 5,95. A percentagem retida acumulada de cada agregado é mostrada na Tabela 14.

Tabela 14 - Distribuição do percentual retido acumulado dos agregados que foram usados no programa experimental.

Abertura [mm]	Brita 0	Areia Fina	Areia Média
12,5	0,6%	0,0%	0,0%
9,5	21,3%	0,0%	0,0%
6,3	72,0%	0,0%	0,4%
4,8	91,1%	0,1%	2,3%
2,4	95,4%	0,1%	13,9%
1,2	96,3%	0,2%	41,2%
0,6	96,5%	0,3%	63,9%
0,3	96,9%	4,7%	81,2%
0,15	97,5%	84,3%	94,9%
0,075	98,0%	99,1%	97,8%
Fundo	100,0%	100,0%	100,0%

3.2.4 Aditivo Superplastificante

Para a obtenção da fluidez desejada para mistura foi utilizado aditivo superplastificante à base de policarboxilato ADVA 585 fornecido pela empresa GRACE. É comercializado no mercado brasileiro, a sua massa específica é de $1,04 \text{ g/cm}^3$, possuindo teor de sólidos de 30% e o seu uso é recomendado em pré-fabricados e concreto autoadensável.

Figura 29: Equipamento para análise de FTIR.



(a) FTIR-4200 Jasco



(b) Acessório ATR

O aditivo foi analisado pela técnica de espectroscopia de infravermelho (FTIR) em um espectrômetro JASCO modelo FT-IR-4200 (Figura 29a), com acessório de ATR (refletância total atenuada) PRO450-S/470-H, o qual possui cristal de seleneto de zinco (Figura 29b). Foram realizadas 2 varreduras (scans) com $0,5 \text{ cm}^{-1}$ de resolução por espectros, no intervalo de número de onda de 4000 a 550 cm^{-1} . Para a análise, colocou-se uma gota de amostra no compartimento cobrindo todo o cristal do acessório ATR. Todos os espectros foram avaliados pelos programas Spectral analysis da empresa JASCO e pelo Knowitall® da Bio-Rad Laboratories.

Pela análise de infravermelho (Figura 30) pode-se assumir, conforme Janowska-Renkas (2013), que a região do pico de transmitância para o número de onda de 2924 cm^{-1} refere-se ao grupo alifático (CH_2 e CH_3). A região do pico de 1639 cm^{-1} é correlata ao grupo carboxílico (R-COOH). Por fim, a região do pico para o número de onde de 1084 cm^{-1} é referente ao grupo éter poliglicol ($\text{CH}_2\text{-O-CH}_2$).

Figura 30: Espectro de infravermelho do aditivo superplastificante

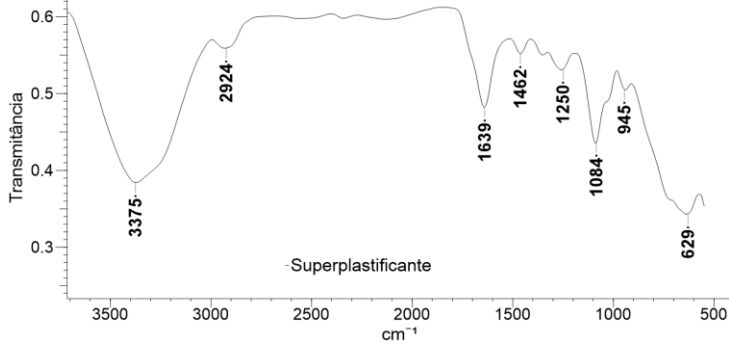
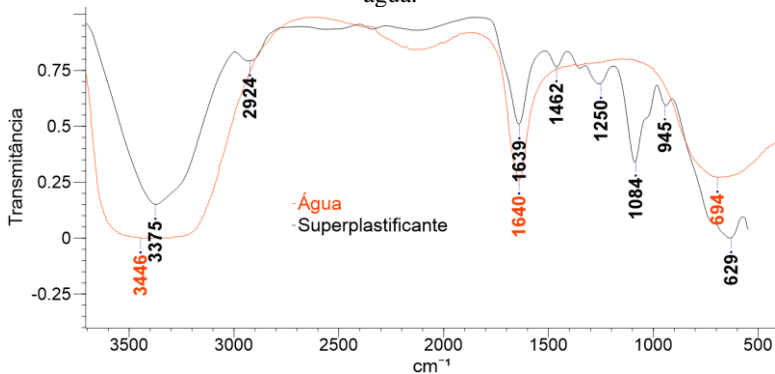


Figura 31: Espectros de infravermelho do aditivo superplastificante e água.



As leituras nas regiões dos picos de transmitância para o número de onda de 3375 cm^{-1} , 1639 cm^{-1} e 629 cm^{-1} estão, possivelmente, majoradas pela presença de água na composição do aditivo superplastificante, conforme pode ser observado na Figura 31, a qual sobrepõe os espectros de infravermelho da água com o do aditivo superplastificante. A região do pico de 3446 cm^{-1} é referente a hidroxila (OH).

3.2.5 Fibra

O reforço de fibra escolhido para a realização deste estudo foi microfibras de vidro fabricadas e disponibilizada pela empresa MM Fibras. A Tabela 15 apresenta as propriedades do material fornecido pelo fabricante.

Tabela 15 - Propriedades da fibra utilizada.

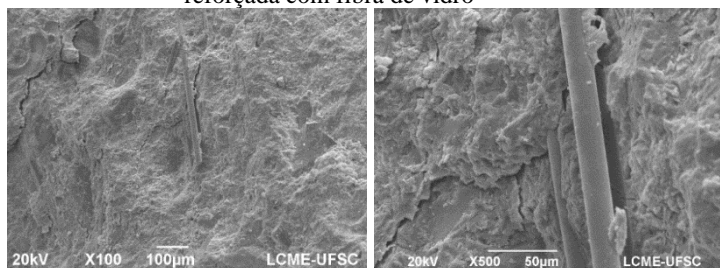
	Vidro
Resistência à Tração	1698 MPa
Módulo de Young	72 GPa
Comprimento	13 mm
Diâmetro	20 μm
Fator de forma (l/d)	650
Deformação a ruptura	2 – 3,5%
Massa específica	2,68 g/cm^3

Figura 32 – Imagem da amostra de fibra de vidro encontrada no mercado.



Fonte: MM Fibras, 2015.

Figura 33 – Imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da matriz reforçada com fibra de vidro



3.3 MÉTODOS

Para avaliação da performance do compósito, foram realizados ensaios para a obtenção das propriedades no estado fresco e endurecido das misturas de CADRF. Os ensaios referentes à estas propriedades foram executadas no laboratório de materiais de construção civil (LMCC).

Os ensaios de retração livre e restringida, foco principal deste estudo, foram realizados nas dependências do laboratório de aplicações de nanotecnologia em construção civil (NANOTEC). Ambos laboratórios fazem parte do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Portanto, foi designado o programa experimental conforme observado na Tabela 16.

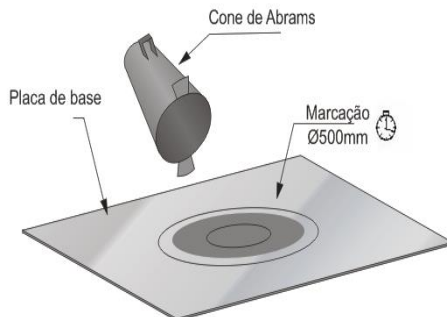
Tabela 16 - Quadro resumo dos ensaios realizados.

ENSAIO	IDADE	PROPRIEDADE AVALIADA	NORMA	AMOSTRAS
Espalhamento	-	Fluidez, Tensão de escoamento	NBR 15823-2	1
Massa específica	-	Massa específica, teor de ar incorporado	NBR9833	1
Retração Livre	Até os 7 dias	Retração	ASTM C 157	3
Retração Restringida	Até os 7 dias	Tensão de fissuração do concreto	ASTM C1581	3
Resistência à compressão	3,7 e 28 dias	Resistência do concreto ao esforço de compressão	NBR 5739	6
Carga de Fissuração	3 e 7 dias	Carga máxima capaz de induzir a fissuração do concreto	UNE 83515	12
Módulo de elasticidade estático	28 dias	Rigidez do material	NBR 8522	3
Módulo de elasticidade dinâmico	3,7 e 28 dias	Rigidez do material	ASTM E1876	6

3.3.1 Avaliação tecnológica no estado fresco

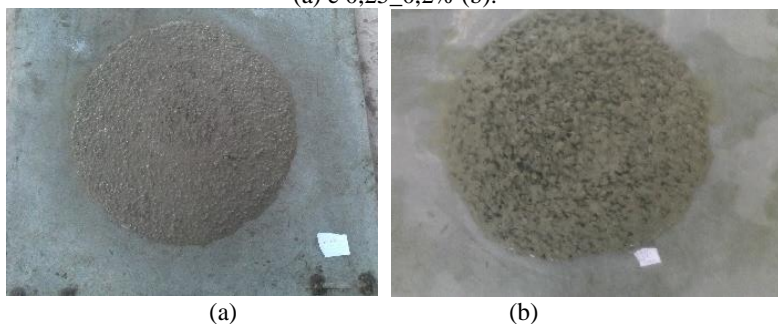
Com a finalidade de se obter os parâmetros da mistura ainda em estado fresco, foi realizado o ensaio de espalhamento (*slump flow*) imediatamente após o termino do processo de mistura dos concretos, uma vez que este foi o parâmetro de aceitação das composições no estado fresco. Foi realizado o ensaio de massa específica do concreto pelo método gravimétrico, segundo a ABNT NBR 9833 (2008). Através deste procedimento, é possível calcular o teor de ar incorporado no procedimento de mistura e, conseqüentemente o consumo real dos materiais do traço.

Figura 34 - Aparatos utilizados para ensaio de espalhamento (slump flow).



FONTE: adaptado da NBR 15823 (2010) em SCHANKOSKI (2014).

Figura 35 – Ensaio de espalhamento realizado na mistura de 0,25_0% (a) e 0,25_0,2% (b).



3.3.2 Bancada de retração autóloga livre

A deformação autóloga livre foi obtida por meio de leituras da deformação linear medida nas extremidades longitudinais de prismas de concretos propostos no programa experimental. Para alcançar esse objetivo foi utilizado uma bancada formada por quatro formas metálicas cada uma com 10 cm de altura, 10 cm de base e 28,5 cm de comprimento.

As laterais internas e o fundo de cada forma metálica foram revestidos, inicialmente, com uma dupla camada de um filme plástico, a fim de evitar restrições provindas do molde metálico.

Propositalmente, a camada dupla foi colocada com excesso em cada lateral de modo a permitir que fosse dobrado sobre o concreto recém

moldado, com o objetivo de dificultar a saída de água do prisma de concreto. Entre as duas camadas plásticas foi adicionado um lubrificante pastoso altamente viscoso à base de ácidos graxos e cálcio (graxa NGLI-2), com o objetivo de reduzir o atrito lateral entre a fôrma e os prismas.

Posteriormente, as paredes internas das fôrmas metálicas foram revestidas com placas de polipropileno expandido (isopor) de 1 cm de espessura, exceto no fundo. Para evitar que o concreto aderisse no isopor, novamente foi colocado uma dupla camada de filme plástico com excessos nas laterais, a qual era trocada toda vez que se realizava o ensaio de retração. O isopor foi uma alternativa adotada para evitar ao máximo o surgimento de esforços contrários ao sentido de deformação dos prismas. Na Figura 36a é mostra a fôrma metálica e na Figura 36c um prisma de concreto moldado, com destaque para as paredes laterais revestidas com isopor.

As duas faces longitudinais das fôrmas metálicas tinham uma abertura central de 10 mm de diâmetro. Essa abertura permitiu que fosse colocado, em ambos os lados, uma barra de aço rosqueada de 5 mm de diâmetro e 80 mm de comprimento. Esse pino rosqueado foi posicionado 30 mm para dentro da forma metálica, de modo a permitir a conexão entre o prisma de concreto e o transdutor de deslocamento. Os dois pinos de cada prisma foram posicionados com auxílio de um gabarito com o objetivo de garantir a mesma distância livre (L_0) para todas as leituras de deformação.

A conexão entre o pino e o transdutor de deslocamento foi feita por meio de uma porca de 10 mm de comprimento, como mostrado na Figura 36c. Duas contra porcas sextavada foram utilizadas para minimizar a folga na ligação pino/porca/transdutor. Entre a abertura da forma e o pino rosqueado foi colocado uma espuma vinílica acetinada (EVA), a qual era retirada após moldagem os prismas, conforme mostrado na Figura 36c.

Dos quatro prismas moldados com o mesmo concreto da bancada, três foram instrumentados para retração e um para umidade e temperatura, chamado neste documento de prima de sacrifício.

Assim, após a moldagem foi colocado mais um filme plástico na face superior do prisma e feita as quatro dobras de filme plásticos excedentes, citados anteriormente. As dobras foram feitas intercalando os lados, com a última aba fixada com fita adesiva à forma.

No prisma de sacrifício foi colocado um tubo plástico com o fundo tampado no centro da forma metálica já moldada com concreto, a uma profundidade de 50 mm em relação ao topo da forma metálica. Quando a mistura apresentava consistência que impedisse o concreto de subir pelo tubo, era retirado o sistema que bloqueava o fundo do tubo e colocado a sonda de umidade. Nota-se que a sonda não ficou em contato direto com

o concreto, mas teve acesso livre ao ambiente interno das composições estudadas. Na Figura 36b é mostrado o furo do prisma de concreto após a retirada do tubo guia e da sonda.

A bancada de retração foi colocada em uma sala com controle de temperatura de 23 ± 2 °C. A deformação linear foi obtida nas duas extremidades longitudinais de cada um dos três prismas, por meio de transdutores de deslocamento da marca Solartron, modelo VS/10/GU. Os transdutores de deslocamento foram fixados por meios braços articulados com base magnética. Antes de cada leitura, os transdutores foram alinhados e postos no mesmo nível dos pinos inicialmente posicionados. A temperatura e a umidade interna dos concretos foram monitoradas por uma sonda da marca Vaisala, modelo HMP 155. Todas as leituras de deslocamento, temperatura e umidade foram gerenciadas por aquisitor de dados da marca Datataker, modelo DT 85 com auxílio de um microcomputador de mesa.

As leituras de deformação, umidade e temperatura foram aquisitadas a cada 5 min. Como a alimentação dos transdutores de deslocamento e da sonda de umidade é em corrente contínua, foi utilizado uma fonte de corrente contínua da marga Agilent, modelo 6642a. Todos os equipamentos eletrônicos foram alimentados por uma fonte de energia ininterrupta de 1500 W (*No-Break*), dimensionada para suportar, aproximadamente, 6 h de leituras sem alimentação da rede elétrica.

Figura 36: Forma metálica (a), vista superior da forma metálica moldada com concreto, em destaque as paredes revestidas com isopor (b); detalhe da conexão do pino solidarizado ao concreto e ao transdutor de deslocamento (c).

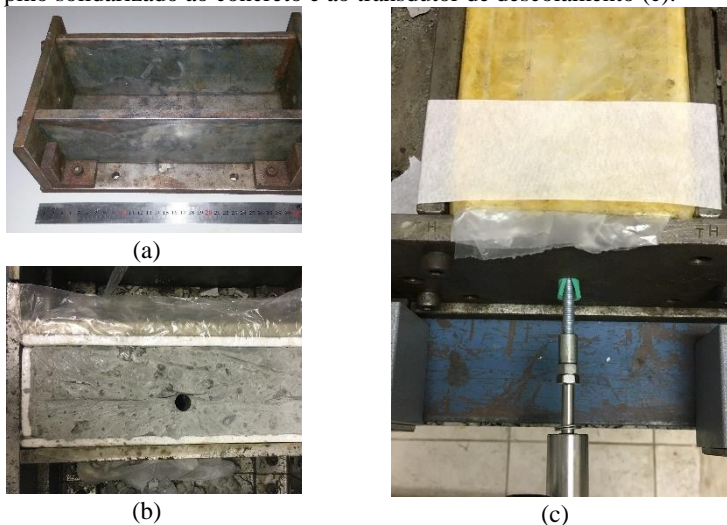


Figura 37: Vista geral da banca de retração pronta para usar (esquerda), com ensaio em andamento (direita).



Na Figura 37 é mostrado a bancada de retração montada para ser utilizada (esquerda) e em uso (direita), com os transdutores de deslocamento e os braços articulados e as sondas de umidade e temperatura. Nota-se que ao mesmo tempo pôde-se instrumentar dois traços de concretos.

A deformação autógena de cada prisma foi calculada conforme a Equação 11. Devido à elevação da temperatura em decorrência reações exotérmicas da hidratação do cimento, houve a necessidade de corrigir a leituras de deformação, por um curto intervalo de tempo, segundo Equação 12.

$$L = \frac{(L_{t1} + L_{t2})}{L_0} \quad (11)$$

$$L_{t\text{térmico}} = \alpha \times \Delta t \quad (12)$$

Onde:

L : é a deformação autógena, retração ou expansão ($\mu\text{m}/\text{m}$);

L_{t1} e L_{t2} : são as leituras de deformação linear obtidas pelos transdutores de deformação (μm);

L_0 : é o comprimento livre entre os dois pinos colocados nos prismas (240.10^{-3} m);

$L_{t\text{térmico}}$: é a deformação térmica ($\mu\text{m}/\text{m}$);

α : é o coeficiente de dilatação térmica linear ($8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$); e

Δt : é a variação térmica observado pelos prismas de concreto ($^\circ\text{C}$).

O coeficiente de dilatação térmico do concreto (α) é função dos materiais constituintes da mistura, como: cimento, agregados, idade de

hidratação, entre outros fatores (NEVILLE, 2016). Zhou *et al.* (2014) demonstraram que o coeficiente de dilatação térmica do concreto pode variar entre $7,3$ a $12,8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, dependendo do tipo de agregado graúdo empregado. CUSSON; HOOGEVEEN (2007) estudaram a variação do coeficiente de dilatação térmica de um concreto de alto desempenho, nas primeiras idades, com agregado graúdo de calcário.

Os autores observaram que o coeficiente de dilatação variou de 8 a $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ entre 12 a 168 h. Assim, este trabalho assumiu o valor de $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ para o coeficiente de dilatação térmica dos concretos, por se tratar de um resultado encontrado nas primeiras idade para concretos de alto desempenho. Cabe destacar que deformação autógena foi, relativamente, pequena, uma vez que a temperatura interna dos concretos subiu, na média, apenas 3°C dentro de um período de 24 horas.

3.3.3 Retração autógena restringida

O ensaio de retração restringida pelo anel se deu segundo a ASTM C 1581 (2009). Essa técnica foi utilizada para avaliar a idade de fissuração em concretos sob retração restringida. O ensaio consiste em moldar o concreto entre dois anéis metálicos concêntricos, conforme mostrando na Figura 38.

A escolha deste ensaio se deu ao fato de que as tensões geradas devido à retração do concreto são transferidas uniformemente em todo o comprimento, podendo ser calculada a tensão de tração média no anel de concreto em função da deformação da medida do anel metálico.

Figura 38 - Aparato para ensaio de retração restringida de acordo com a ASTM 1581 (2009).



Nota-se que o anel externo serve apenas de fôrma, enquanto que o anel interno servirá como barreira restritiva de deformação, impedindo a

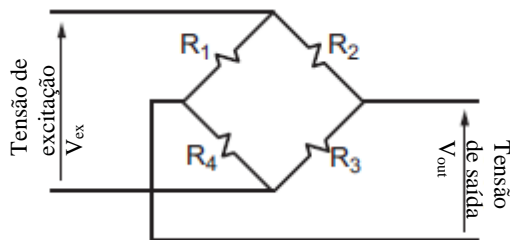
retração do anel de concreto. O anel interno é instrumentado, com *strain gauges*, com o objetivo de quantificar as deformações sofridas pelo aço e, conseguinte, do concreto. A idade de fissuração é obtida pelo acompanhamento da evolução da deformação induzida do anel de aço induzida pelo anel de concreto, uma vez que, quando houver um alívio na deformação, admite-se que o concreto fissurou.

Um dos principais fatores que pode interferir nas leituras de retração restringida no anel é o atrito da base com o concreto. Para evitar ao máximo essa restrição na base, foi colocado na base metálica um duplo filme plástico. Entre as duas camadas plásticas foi adicionado um lubrificante pastoso altamente viscoso à base de ácidos graxos e cálcio.

Para cada traço foram moldados três anéis de concreto. Cada anel interno de aço foi instrumentado por 3 pares de *strain gauges*, os quais foram fixados em três pares e colados na superfície que não estava em contato com o concreto. Cada par *strain gauges* foi posicionado de modo que as leituras de deformação do anel fossem obtidas no sentido horizontal (direção da deformação resultante à retração do concreto) e outra no sentido vertical (deformação do aço devido à variação térmica), a meia altura do anel metálico. Tomando como referência o centro do anel metálico interno, os pares de *strain gauges* foram posicionados de modo a formarem entre si um ângulo de 120° . Para sua instalação, foi utilizado a configuração de pontes de strain gauges de 4 fios, onde a tensão de excitação para o circuito é fornecida pela fonte interna do aquisitor de dados utilizado (Datataker DT 85), e seu valor é de aproximadamente 4,5 V.

O uso das pontes de Wheatstone para a leitura de strain gauges normalmente são utilizados devido à sensibilidade que este circuito apresenta. Essas pontes são projetadas de maneira que, em condições de repouso, as relações R_1 / R_4 e R_2 / R_3 (Figura 39) sejam iguais, resultando em uma tensão de saída zero (V_{out}).

Figura 39 - Representação da ponte de Wheatstone



Qualquer alteração em qualquer das resistências causará uma mudança correspondente em V_{out} , que pode ser medida com precisão usando a sensível faixa de 30 mV do DT85. A leitura de tensão V_{out} irá alterar conforme os strain gauges se deformarem, tanto quando serão comprimidos quanto tracionados. Conforme comentado anteriormente, cada strain gauge pode ser:

- Um elemento ativo: quando está submetido às forças atuante na estrutura.
- Um elemento de compensação de temperatura: um strain gauge acoplado na estrutura a ser monitorada, porém que não está sendo submetido aos esforços atuantes. Utilizado para anular o efeito de temperatura das deformações obtidas pelo gauge ativo.
- Um resistor de terminação: resistor de precisão com resistência igual à resistência nominal dos strain gauges utilizados.

Uma ponte cheia tem quatro gauges ativos, tipicamente dois em um lado de uma estrutura (sendo tracionados) e dois em outro (em compressão). Uma meia ponte tem dois indicadores ativos, sendo completos pelo uso de dois compensadores de temperatura ou resistências de terminação.

Finalmente, como utilizado neste experimento, um quarto de ponte tem apenas um indicador ativo. A complementação da ponte foi realizada pela utilização de um strain gauge compensado de temperatura e de duas resistências de terminação de ponte.

O cálculo das deformações é realizado através da devida programação do aquisitor de dados DT85, conforme explicado abaixo. Este retorna todas as medições de ponte em uma forma ratiométrica com unidades de partes por milhão (ppm), conforme a Equação 13.

$$B_{out} = \frac{V_{out}}{V_{ex}} \cdot 10^6 \quad (13)$$

Onde:

B_{out} = leitura da ponte de Wheatstone [ppm];

V_{out} = tensão mensurada na saída da ponte [mV]; e

V_{ex} = tensão de excitação [mV]

Sabendo que a relação de deformação da resistência é dada pela Equação (14).

$$strain = \frac{\Delta l}{l} = \frac{1.\Delta R}{G.R} \quad (14)$$

Onde:

L = comprimento original;

ΔL = variação do comprimento;

R = resistência original;

ΔR = variação da resistência medida; e

G = fator de gauge (depende das propriedades do strain gauge).

Como o aquisitor de dados utilizados realiza a leitura em termos de ppm (Equação 13), para a transformação da leitura realizada para a unidade desejada, no caso deformações, se utiliza da Equação 15.

$$strain = \frac{4}{G.N} \cdot B_{out} \quad (15)$$

Onde:

Strain = deformação medida pelo sistema [$\mu strain$]

G = fator de gauge;

N = número de strain gauges ativos; e

B_{out} = leitura realizada pelo aquisitor de dados [ppm].

Os *strain gauges* utilizados foram da marca TML, modelo FLA-6-11-1L, com capacidade de leitura de até 6 mm e resistência elétrica de 120 ohms. A deformação dos anéis metálicos foi medida a cada 5 min e gerenciadas por um aquisitor de dados da marca Datataker, modelo DT 85, com auxílio de um microcomputador de mesa.

Para garantir um sistema autógeno, logo após a moldagem, as faces superiores dos anéis de concreto foram seladas por uma película polimérica à base acrílica. Decorrido 24 horas, o anel metálico externo foi removido e, imediatamente, pintada a lateral externa do anel de concreto. Cada anel recebeu duas demãos de impermeabilizante. Na Figura 40: Ensaio de retração autógena restringida (a) e detalhe da impermeabilização dos anéis de concreto (b). Figura 40, é mostrada os três anéis de concreto, já impermeabilizados. Buscou-se também garantir que a base do anel de concreto fosse devidamente impermeabilizada

Figura 40: Ensaio de retração autógena restringida (a) e detalhe da impermeabilização dos anéis de concreto (b).



3.3.4 Resistência mecânica à compressão.

Para avaliar a resistência à compressão das misturas de CADRF, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm, conforme previsto na norma ABNT NBR 5739 (2007). Estas dimensões se adequam com o limite estabelecido pela ABNT NBR 5738 (2008), a qual determina que o diâmetro do molde cilíndrico deve ser de 4 vezes maior que a dimensão nominal máxima do agregado graúdo utilizado.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 3, 7 e 28 dias, e foi moldado 6 amostras para a avaliação desta propriedade. Foi utilizado moldes metálicos conforme a ABNT NBR 5738 (2008), sendo desmoldado após 24 horas e, posteriormente sendo armazenado em câmara úmida. Os ensaios de compressão foram realizados utilizando a Shimadzu, modelo UH-2000 KN.

O acondicionamento das misturas também seguirá o mesmo procedimento dos corpos de prova destinado à compressão, conforme citado acima, onde permanecerão até um dia antes de ser realizado, que foi realizada aos 3,7 e 28 dias após a moldagem. Para a realização do ensaio, as faces das amostras foram regularizadas através do uso de retífica para concreto, de forma que fosse diminuindo influência do procedimento de ensaio nos resultados obtidos.

3.3.5 Resistência à tração indireta.

Para analisar o comportamento da mistura quanto à resistência à fissuração indireta é um dos índices que pode ser obtido através do ensaio de duplo puncionamento, de acordo com a norma europeia UNE 83515 - *Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción, Ensayo Barcelona*.

O ensaio consiste em submeter um corpo de prova cilíndrico à compressão uniaxial em suportes de um quarto do diâmetro do corpo de prova (Figura 41a). A carga é aplicada através das placas de carregamento que produzem uma zona cônica de compressão. Isso resulta em esforços de tração perpendiculares à linha de compressão, que quando supera a resistência à tração do corpo de prova, rompe (Figura 41b e c). O cálculo da resistência indireta à tração pode ser realizado de acordo com a Equação 16.

$$f_{ct} = \frac{4.P_f}{9.\pi.a.h} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

- f_{ct} é a resistência à tração indireta (N/mm²);
- P_f é a carga máxima registrada no ensaio (N);
- f_{ctRx} é a resistência residual à tração indireta (N/mm²);
- a é a dimensão da placa de carga (mm); e
- h é a altura do corpo de prova (mm).

Por se tratar de uma metodologia menos comum na caracterização dos concretos reforçados com fibras, estudos para a investigação e validação do método tem sido proposto ao longo dos últimos anos. Diversos trabalhos vêm sendo publicados com o esforço de mostrar a potencial aplicação do método principalmente em comparação e/ou substituição aos métodos tradicionais de flexão de prismas.

É possível relacionar os resultados da capacidade de absorver energia realizado pelo ensaio de flexão de vigas com o ensaio de tenacidade pelo Ensaio Barcelona, isso para deformações semelhantes. Correlações superiores à 98 % foram obtidas por MOLINS; AGUADO; SALUDES, (2009) para diferentes tipos e quantidades de fibras, o que sugere a possibilidade da utilização do ensaio Barcelona.

Figura 41 – Etapas de realização do Ensaio Barcelona.



Este ensaio foi realizado com corpo de prova cilíndrico com 10 cm de diâmetro e possuindo altura de 10 cm, tamanho mínimo permitido por norma. Suas faces devem ser devidamente retificadas e, para realizar a concentração da carga de puncionamento, é utilizado um disco em cada face, este possuindo diâmetro igual à $\frac{1}{4}$ e altura igual à $\frac{1}{5}$ do diâmetro do corpo de prova, conforme previsto pela norma anteriormente citada.

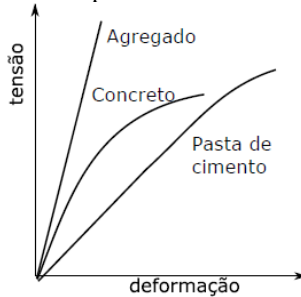
Durante a aplicação da carga, foi realizado a aquisição dos dados de deformação radial na altura média do corpo de prova, utilizando LVDT's com precisão de 0,001 mm, pertencentes à prensa. Os parâmetros de ensaios foram fixados conforme a norma, sendo assim a velocidade de aplicação de carga deverá ser de $0,5 \pm 0,05$ mm/min. os ensaios de compressão foram realizados utilizando a prensa Shimadzu, modelo UH-2000 KN, porém os dados de deslocamento das amostras não foram utilizados para o cálculo de tenacidade conforme o previsto pela norma, uma vez que houve muita oscilação dos dados obtidos.

3.3.6 Módulo estático de elasticidade à compressão e módulo de elasticidade dinâmica.

O módulo de elasticidade é uma característica fundamental dos materiais cimentícios, pois está relacionada à capacidade de deformação sob ação de tensões provenientes de carregamento, de ações térmicas e mesmo do fenômeno da retração. A sua importância, para os materiais à base de cimento, está na sua relação com o fenômeno de fissuração do material. Para que não haja fissuração, espera-se uma combinação favorável de certas condições como: retração mínima, resistência à tração e deformabilidade adequada do concreto em cada idade.

Segundo MEHTA; MONTEIRO (2014), quanto menor o módulo de elasticidade, menor a tensão de tração elástica induzida para uma dada magnitude de retração. Assim, o módulo de elasticidade é (junto com a deformação por retração e resistência à tração) mais um fator que pode induzir à fissuração.

Figura 42 – Comportamento da curva Tensão-Deformação dos concretos e seus componentes.



Fonte: Adaptado de Neville (2016)

MEHTA; MONTEIRO (2014) ainda comentam que o comportamento σ - ε de um compósito complexo não necessariamente se equivale a soma dos comportamentos de seus constituintes. No caso do concreto e dos materiais que o constituem, o comportamento dos diagramas tensão-deformação pode ser visualizado na Figura 42.

Analisando isoladamente os diagramas tensão-deformação dos constituintes do concreto (agregados e a pasta de cimento hidratada) é possível observar que os mesmos apresentam um comportamento essencialmente linear. Entretanto, o concreto apresenta um comportamento não-linear diferente dos seus componentes (NEVILLE, 2016). O fato do comportamento do concreto não ser equivalente ao dos seus constituintes é atribuído à existência das zonas de transições (ZT) na interface entre o agregado graúdo e a matriz de argamassa que podem acarretar o surgimento de microfissuras nessas regiões, dependentes da tensão aplicada (NEVILLE, 2016).

Para melhor explicar a evolução de fissuras no concreto, é apresentado na Tabela 17 um resumo do que ocorre em cada estágio, tanto para a zona de transição quanto na matriz de pasta de cimento, além de descrever o comportamento da curva tensão-deformação do material.

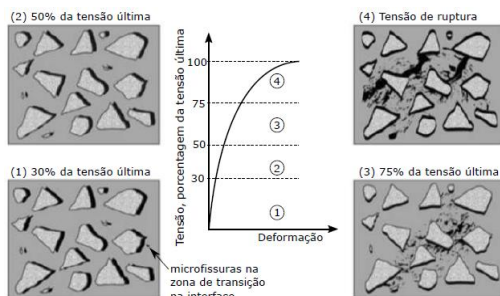
Tabela 17 - Resumo do avanço da microfissuração e do comportamento da curva tensão-deformação dos concretos em função da porcentagem da tensão última

Estágios	Porcentagem da tensão última	Avanço da microfissuração	Comportamento da Curva
1	Abaixo de 30%	ZT: sistema estável	Permanece linear
2	30% - 50%	ZT: parece existir um sistema estável; Matriz: fissurações são insignificantes;	Ocorre um desvio na linearidade
	50% - 60%	Fissuras começam a se formar na matriz	
3	60% - 75%	ZT: sistema instável; Matriz: aumenta a proliferação e propagação das fissuras;	Inclinação consideravelmente para a horizontal
4	Acima de 75%	Rápida propagação de fissuras na ZT e na matriz;	Alcança o nível crítico e o material se deforma até a ruptura

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014)

Essa microfissuração progressiva do concreto sob a ação de cargas é a explicação da não-linearidade da relação tensão-deformação e provêm de diversos estudos compilados por GLUCKLICH (1968) apud MEHTA; MONTEIRO (2014). A Figura 43 mostra o comportamento (σ - ϵ) do concreto submetido à carga de compressão uniaxial e o avanço das microfissuras internas que variam em função do nível de tensão aplicada em relação à tensão de ruptura (ou tensão última).

Figura 43 – Diagrama Tensão-Deformação e o avanço de microfissuras no interior do concreto em função do carregamento aplicado.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

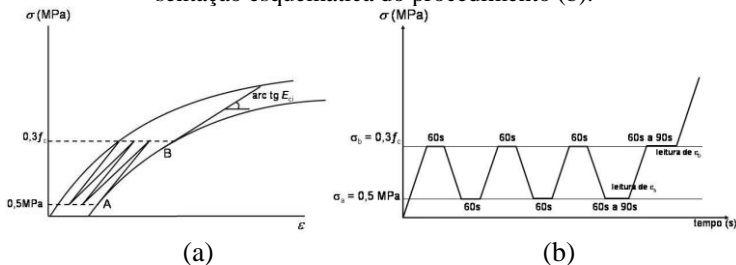
Neste trabalho foi obtido o resultado do módulo tangente inicial, que é considerado o módulo de deformação secante entre as cargas de 0,50 Mpa e 30% da resistência do concreto analisado. Estes valores de carga são utilizados porque, nesse nível de tensão, o comportamento do concreto obedece a lei de Hooke, ou seja, apresenta comportamento elástico, uma vez que com essa magnitude de carregamento ocorre apenas deformações diferenciais e surgimento de microfissuras na zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 2014)

O procedimento adotado para o ensaio de módulo de elasticidade estático seguirá a recomendação da ABNT NBR 8522 (2008). Este ensaio foi realizado nos mesmos corpos de provas destinados a resistência à compressão. Para a realização deste procedimento, a norma seguida sugere realizar três patamares de carregamento iniciais para então ser realizadas as leituras de deformações nas cargas definidas. Este procedimento tem o objetivo de acomodar possíveis perturbações de leituras atribuídas à imperfeição dos corpos de provas, instabilidade dos equipamentos utilizados no ensaio e acomodação da amostra no início do carregamento. Na

Figura 44 é possível visualizar um esquema contendo o procedimento de ensaio a ser seguido de acordo com a norma citada.

Uma prática comum entre pesquisadores e as normas realizar a determinação do módulo de elasticidade através de equações empíricas. Essas equações são correlações do módulo de elasticidade com outra propriedade do concreto, geralmente, com a resistência à compressão. As equações de previsão especificadas pela norma brasileira e por códigos internacionais estão descritas na Tabela 18.

Figura 44 – Representação esquemática do módulo tangente inicial (a) e representação esquemática do procedimento (b).



Fonte: NBR8522 (2008)

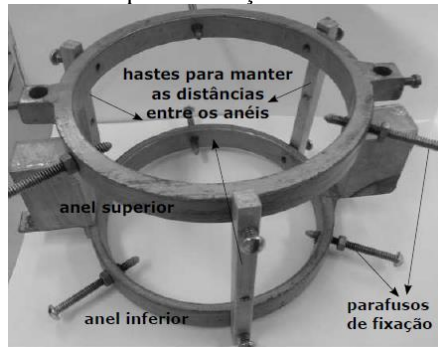
Tabela 18 - Expressões para a estimativa do módulo de elasticidade

Norma	Expressão	Observações
ABNT NBR 6118:2014	20 Mpa < f_{ck} < 50 Mpa $E_{ci} = \alpha_e \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$	- tangente à 0,3. f_c - arenito: $\alpha_e = 0,7$; - Calcário: $\alpha_e = 0,9$;
	55 Mpa < f_{ck} < 90 =MPa $E_{ci} = 21500 \cdot \alpha_e \cdot \sqrt[3]{\frac{f_{ck}}{10} + 1,25}$	- Basalto: $\alpha_e = 1,2$; - Granito e Gnaiss: $\alpha_e = 1,0$; $E_{cs} = \left[0,8 + 0,2 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{80} \right) \right] \cdot E_{ci}$
ACI 318-14	90 lb/ft ³ < ω_c < 160 lb/ft ³ $E_{ci} = w_c^{1,5} \cdot 33 \cdot \sqrt{f_c}$ (E_c em psi)	- secante à 0,45. f_c
	concretos de massa específica normal $E_{ci} = 57000 \cdot \sqrt{F_c}$ (E_c em psi)	- Resultados obtidos nos ensaios podem variar de 80% a 120% dos valores previstos
CEB-fib Model Code 2010	$E_{ci} = 21500 \cdot \alpha_e \cdot \sqrt[3]{\frac{f_{ck}+8}{10}}$ (E_c em MPa)	- tangente à 0,4. f_{ck} ; - α_E em função do agregado
Eurocode 2: 2004	$E_{ci} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$ (f_{cm} em MPa)	- secante à 0,4. f_{cm} ; - $E_c = 1,05 \cdot E_{cm}$

O método de ensaio utilizado neste trabalho toma como base o descrito na NBR 8522, e por ele foram determinadas as deformações sofridas pelo corpo de prova para suas respectivas tensões aplicadas e, com estes dados então é possível calcular o módulo de elasticidade da amostra.

Para cada mistura, o ensaio foi realizado em 5 corpos-de-prova, sendo ensaiados aos 3, 7 e 28 dias de hidratação. O aparato utilizado para monitoramento das deformações pode ser visualizado na Figura 45. Ele é composto por dois suportes metálicos presos ao corpo de prova por três parafusos cada. Nestes suportes são fixados dois relógios comparadores com resolução de $1 \pm 0,001$ mm e, posicionados em lados opostos da amostra a ser ensaiadas.

Figura 45 - Aparato utilizado para realização de módulo de elasticidade.



O módulo de elasticidade dinâmico é determinado através de ensaios não destrutivos. Entre os procedimentos existentes, SHEHATA (2011) destaca o método que correlaciona o módulo com frequência natural de vibração (por estímulos) e o método que correlaciona o módulo com a velocidade de propagação de ondas de ultrassom.

Este ensaio destina-se principalmente a detectar alterações no módulo dinâmico de elasticidade de amostras de laboratório ou de campo que podem estar submetidas à exposição a intempéries ou a outros tipos de influências potencialmente deterioradoras. O método de ensaio pode também ser utilizado para monitorar o desenvolvimento do módulo de elasticidade dinâmico com o aumento da maturidade das amostras de ensaio. O método de obtenção do módulo dinâmico por estímulo consiste, basicamente, na captação de impulsos acústicos que são produzidos através de impacto no corpo de prova com dimensões conhecidas. É possível ainda, obter diferentes resultados de módulos de elasticidade dinâmico variando a orientação do impacto e da captação da frequência e, dessa maneira, podem ser classificados como: módulos dinâmicos flexionais, longitudinais, ou ainda torcionais; esses se diferenciando de acordo com a posição do ponto de impacto e do acelerômetro (receptor). (COSSOLINO; PEREIRA, 2010)

Vibração longitudinal: Ondas longitudinais são aquelas em que a vibração ocorre na mesma direção do movimento da onda. A vibração longitudinal de barras de seção transversal quadrada ou circular é recomendada como o método de maior precisão na determinação do módulo de Young. No entanto se a seção se afastar muito da geometria quadrada,

os erros envolvidos no cálculo das propriedades elásticas podem ser grandes. Neste caso, o uso de vibrações longitudinais não é recomendado e o módulo pode ser obtido mais precisamente pela vibração flexional.

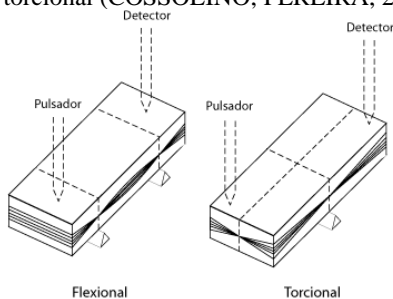
Vibração flexional: o modo flexional de vibração é o mais complexo entre os três modos, devido à maneira como a frequência de ressonância é afetada, não somente pelo comprimento e seção transversal, mas pela razão entre os dois, sendo mais recomendado seu uso para a determinação do módulo de Young de barras delgadas.

Vibração torcional: este modo permite calcular o módulo de cisalhamento, e em seguida a razão de Poisson. Porém, para obtermos as frequências torcionais o impacto deve ser fora do centro da barra.

Figura 46 - Posicionamento do detector e pulsador para a detecção da vibração longitudinal



Figura 47 - Posicionamento do detector e pulsador para a detecção da vibração flexional e torcional (COSSOLINO; PEREIRA, 2010)



Do ponto de vista experimental, a metodologia pode ser separada em duas partes: a primeira consiste na excitação, detecção e obtenção das frequências de ressonância, e a segunda, no emprego de relações matemáticas e dos procedimentos computacionais, para obtenção dos módulos

elásticos em corpo de prova cilíndrico a partir das frequências de ressonância longitudinal, flexional e torcional, conforme apresentado respectivamente nas Equações 17, 19 e 21.(CORIOLANO, [s.d.]

$$E = 16. m. f_1^2 . [L/(\pi. D^2. K)] \quad (17)$$

Onde:

E = módulo de Young (Pa);

L = comprimento do cilindro (mm);

D = diâmetro do cilindro (mm);

m = massa do cilindro (g);

f1 = frequência fundamental para o cilindro em modo longitudinal (Hz); e

K = Fator de correção para o módulo longitudinal, considerando a relação L/D e o coeficiente de Poisson do material;

A Equação 18 apresenta o cálculo para o fator de correção K.

$$K = 1 - \left[\frac{\pi^2. \mu^2. D^2}{8. L^2} \right] \quad (18)$$

Onde:

μ = coeficiente de Poisson;

D = diâmetro da amostra (mm); e

L = comprimento da amostra (mm).

$$E = 1,6067. m. f^2. (L^3/D^4). T'_1 \quad (19)$$

Onde:

E = módulo de Young (Pa);

L = comprimento do cilindro (mm);

D = diâmetro do cilindro (mm);

m = massa do cilindro (g);

f = frequência fundamental para o cilindro em modo flexional (Hz); e

T'₁ = Fator de correção, levando em consideração o comprimento, o diâmetro e o coeficiente de Poisson da amostra.

A Equação 20 apresenta o cálculo para o fator de correção T'₁, para amostras com fator L/D inferior a 20.

$$T'_1 = [1 + 4,939. (D/L)^2] \quad (20)$$

Onde:

L = comprimento do cilindro (mm);

D = diâmetro do cilindro (mm); e

T'₁ = Fator de correção, levando em consideração o comprimento, o diâmetro e o coeficiente de Poisson da amostra.

$$G = 16. m. f_t^2 . [L/(\pi D^2)] \quad (21)$$

Onde:

G = módulo de cisalhamento (Pa);

m = massa do cilindro (g);

D = diâmetro do cilindro (mm);

L = comprimento do cilindro (mm); e

ft = frequência fundamental para o cilindro em modo torcional (Hz)

Os resultados obtidos por meio desse ensaio são dependentes da qualidade da superfície e do interior das amostras a serem ensaiadas (moldagem ou extração das amostras, teor de umidade interna, dimensões). Os autores citam que a retificação dos topos, a presença impurezas aderidas na superfície, a existência de fissuras ou vazios no interior dos concretos podem influenciar nos resultados PACHECO; BILESKY; MORAIS (2014).

NEVILLE (2016) cita que as tensões aplicadas nas amostras são muito baixas e, por conseguinte, as deformações instantâneas também são e, por este motivo, o módulo dinâmico se assemelha ao módulo tangente inicial. Além de, por não submeter a amostra à uma tensão significativa, não há indução de microfissuração do concreto e ocorrência de fluência.

MEHTA; MONTEIRO (2014) comentam que os resultados dos módulos dinâmicos são superiores aos resultados dos módulos estáticos em cerca de 20% para concretos de alta resistência, 30% para concretos de resistência moderada e 40% para concretos de baixa resistência.

Apesar dessa diferença entre os valores entre os módulos estáticos e dinâmicos, há algumas relações empíricas que buscam relacionar estas duas propriedades, conforme pode ser observado na Tabela 19. Porém as relações abaixo consideram que não ocorra influência do ar incorporado, método de cura, condição de ensaio utilizada e tipo de cimento utilizado na mistura. (NEVILLE, 2016)

Nesta pesquisa, o módulo de elasticidade dinâmico foi realizado utilizando o equipamento Sonelastic, disponibilizado pelo grupo Nanotec. Este equipamento segue as recomendações das normas ASTM C215 (2015) e ASTM E1876 (2015), e relaciona a frequência natural de vibração do material com o seu módulo dinâmico.

Tabela 19 - Relações entre Módulo de elasticidade dinâmico e estático.

Proposto por	Expressão	Observação
Lydo & Balendran	$E_c=0,83.E_d$	
Norma BS CP 110:1972	$E_c=1,25.E_d-19$	Consumo de cimento < 500 kg/m ³ Concretos com agregados normais; Não utilizados para concretos com agregados leves
	$E_c=1,04.E_d-4,1$	
Popovics	$E_c=k.E_d^{1,4}\rho^{-1}$	

O ensaio foi realizado nos mesmos corpos de provas que foram utilizados para o ensaio de módulo estático e resistência à compressão. Por se tratar de um ensaio não destrutivo, possibilita a execução em maior quantidade de amostras, resultando em maior confiabilidade do ensaio.

Para esta propriedade, foi realizado ensaios ao 3,7 e 28 dias, mesmo tempo de hidratação que o utilizado para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade estático, possibilitando assim a comparação dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Avaliação tecnológica no estado fresco

O efeito da adição de fibras na mistura, quanto às propriedades no estado fresco podem ser observadas na Tabela 20, onde também é apresentado os valores de consumo real de cimento, o qual já considera o ar incorporado da mistura.

Tabela 20 - Resultado dos ensaios realizados em estado fresco.

Mistura	Slump [mm]	Massa específica [kg/m ³]	Cons. Cimento [kg/m ³]	Cons. Aditivo [kg/m ³]	Teor de Ar [%]
0,25_0%	650	2398	701	12,08	0,38
0,25_0,20%	240	2369	691	12,06	1,61
0,25_0,25%	220	2358	688	12,05	2,08
0,25_0,30%	230	2345	684	12,04	2,63
0,32_0%	685	2331	623	5,88	0,89
0,32_0,20%	690	2327	620	5,87	1,09
0,32_0,25%	705	2316	617	5,87	1,56
0,32_0,30%	725	2287	609	5,86	2,80

É possível observar também que em misturas muito viscosas, a restrição imposta pelas fibras é muito significativa, tanto que não foi possível atingir valores semelhantes aos de sua referência no ensaio de consistência, uma vez que a mistura foi levada ao seu limite de estabilidade e, qualquer adição de aditivo além desta poderia resultar em segregação da mistura.

Como resultado da incorporação da fibra, ainda foi possível verificar a diminuição da massa específica da mistura e o aumento do teor de ar incorporado para de acordo com o aumento do teor de fibra na mistura.

4.2 Bancada de retração autógena livre

Os resultados dos ensaios de retração livre realizados são apresentados nas Figura 48 e Figura 49. Neles está representado a deformação média de cada amostra, sendo que os resultados de cada ensaio estão sendo apresentados no Apêndice A.

Se faz de extrema relevância enfatizar que, na análise dos resultados obtidos, foi considerado como tempo inicial (T_0) sendo 8 horas após a realização da mistura.

A escolha deste tempo foi baseada na curva de liberação de calor das misturas (Apêndice C), onde é possível verificar que neste momento é quando ocorre o fim do período de indução do concreto, e começa a liberação de calor devido a reação de hidratação do cimento.

Figura 48 - Retração livre das misturas com relação A/Agl 0,25

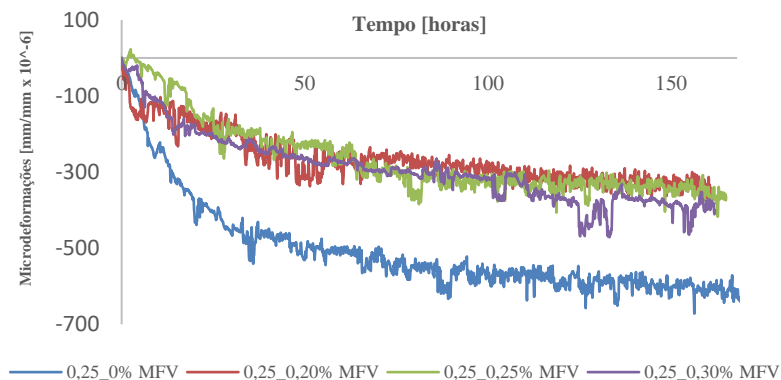
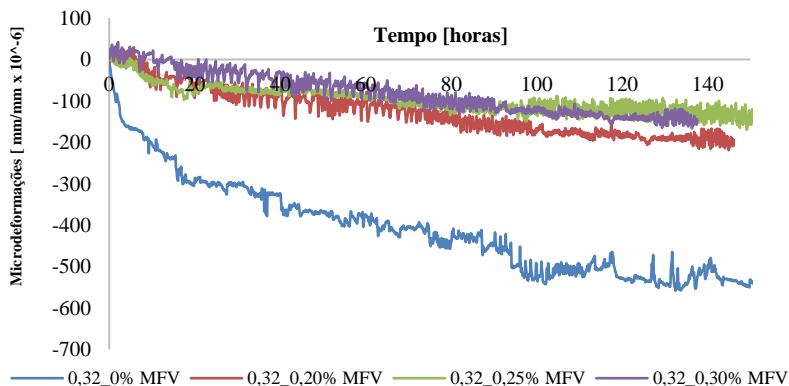


Figura 49 - Retração livre das misturas com relação A/Agl 0,32



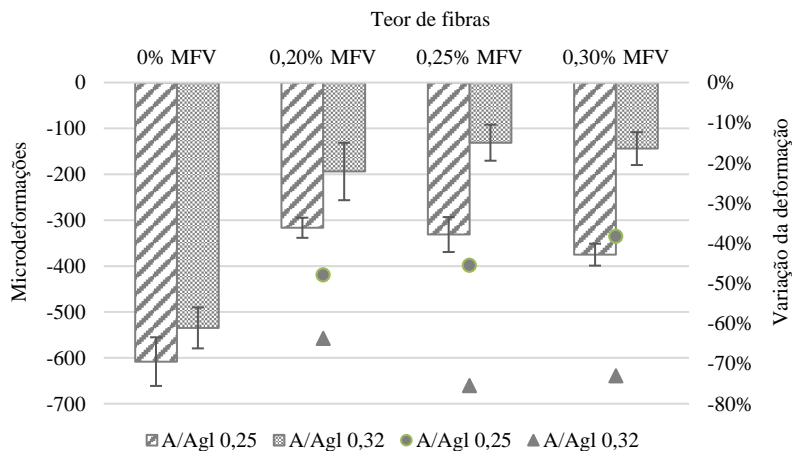
A deformação obtida nos ensaios de retração livre decai na medida que é adicionado as fibras na mistura, quando comparado com a amostra de referência. Porém, entre os teores testados, não foi observado diferença significativa. Este resultado se repetiu para as misturas de ambas relações A/Agl.

Na Figura 50, é apresentado o resultado médio de retração autógena livre dos três prismas de cada concreto estudado, referente à última hora de leitura. Essa abordagem negligencia o comportamento da curva de retração, mas pode ser usada para efeito de comparação ao final dos 7 dias de leitura. A média se justifica pela necessidade de evitar que oscilações no instante final da leitura de deformação resultem em dados distorcidos na retração total e permitir uma análise quantitativa do ensaio. Nesse sentido, pôde-se notar que a adição de fibras resulta em redução da deformação das amostras, porém não se diferenciando entre si para as misturas de mesma relação A/Agl. As misturas REF25 (-608,21 $\mu\text{m/m}$) e REF32 (-534,68 $\mu\text{m/m}$) apresentaram os maiores valores de retração livre aos sete dias.

Entre as misturas com a adição de fibra, as deformações encontradas para a relação A/Agl 0,32 é menor do que para as misturas com A/Agl 0,25, assim como ocorre com suas referências. Porém dentro da mesma relação A/Agl, os teores de fibras não apresentam diferença entre si, conforme pode ser observado na Figura 50.

A redução máxima da deformação obtida com a adição de fibras em relação à sua respectiva referência foi de 48% para a mistura 0,25_0,20%MFV e 75,5% para 0,32_0,25%MFV. Estas misturas apresentaram deformação final de -316,49 $\mu\text{m/m}$ e -131,10 $\mu\text{m/m}$ respectivamente

Figura 50 - Influência das fibras na deformação das misturas às 140 horas.



Este fato foi atribuído ao fato de que o menor teor testado já seja o teor crítico, apresentando pequeno espaçamento entre as fibras e, o aumento na quantidade de fibras não resultaria em melhoria desta propriedade.

Utilizou-se da teoria de Romualdi (1963), conforme apresentado na revisão de literatura deste documento, onde propõe o cálculo do espaçamento das fibras utilizando a Equação 4 e, considerando o alinhamento das fibras dentro da mistura sendo em três direções. Desta forma foi estimado o espaçamento e quantidade de fibra na mistura e, os resultados destes cálculos são apresentados Tabela 21.

Tabela 21 – Espaçamento entre fibras estimado.

Teor de Fibra [%]	0,20	0,25	0,30
Espaçamento [cm]	0,123	0,110	0,101

4.3 Retração autógena restringida

Os resultados dos ensaios de retração livre realizados são apresentados nas Figura 51 e Figura 52 . Neles está representado a deformação média do aço para cada concreto moldado, sendo que os resultados de cada ensaio estão sendo apresentados no Apêndice B.

Figura 51 - Retração restringida das misturas com relação A/Ag1 0,25

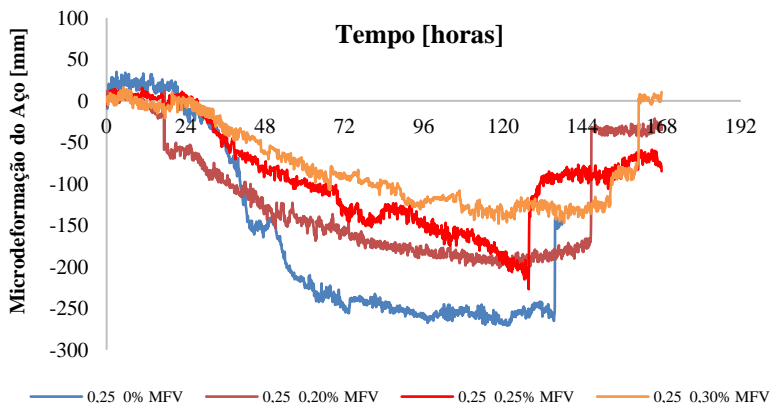


Figura 52 - Retração restringida das misturas com relação A/Ag1 0,32

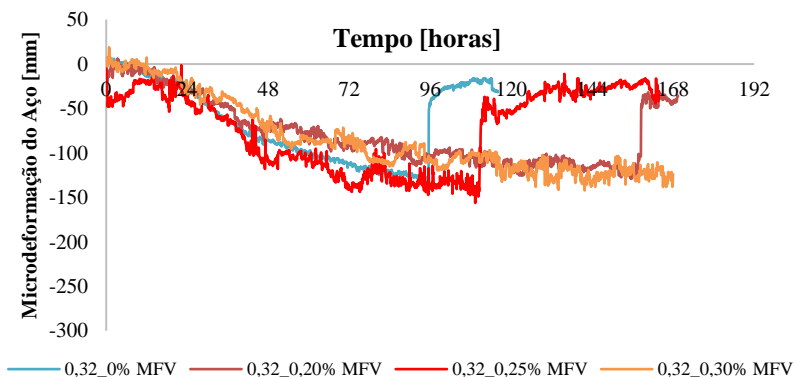
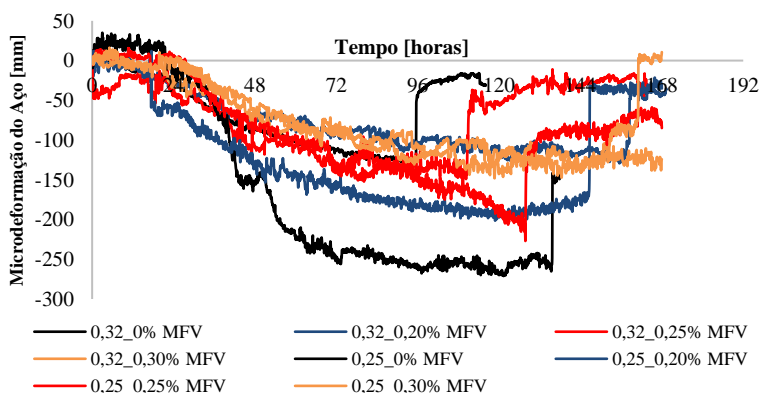


Figura 53 – Retração restringida média das misturas.



Através dos resultados obtidos é possível verificar que o concreto contendo fibra diminuiu a deformação do aço, o que nos mostra uma redução da retração do concreto, resultando em menor tensão gerada pela restrição. A maioria das misturas apresentaram ruptura do concreto antes dos 7 dias, porém foi possível observar que as composições contendo 0,30% de fibra retardaram a ocorrência de fissura significativamente.

Foi possível observar uma relação entre o tempo necessário para o rompimento da amostra e a leitura de deformação do aço obtida. Quanto ao tempo necessário para a ocorrência da fissuração do concreto, este ensaio se mostrou muito variável, sendo que, com a quantidade de amostragem utilizada neste ensaio, não foi possível concluir a influência da fibra na idade de fissuração. A Tabela 22 apresenta a descrição dos valores

obtidos para o tempo de fissuração do concreto no ensaio de retração restringida, apresentando os valores máximo, mínimos média e desvio padrão.

Tabela 22 – Descrição da amostragem do ensaio de retração restringida.

Amostra	N	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
0,25_0% MFV	3	5,33	5,00	5,70	0,35
0,25_0,20% MFV	3	7,07	6,10	8,30	1,12
0,25_0,25% MFV	3	4,97	4,80	5,30	0,29
0,25_0,30% MFV	3	6,40	5,80	6,70	0,52
0,30_0% MFV	3	3,97	3,20	4,70	0,75
0,30_0,20% MFV	3	5,13	3,80	6,60	1,40
0,30_0,25% MFV	3	4,50	3,90	5,00	0,56
0,30_0,30% MFV	3	6,37	5,60	7,00	0,71

A análise de variância (ANOVA) foi realizada para identificar os efeitos individuais e interativos das variáveis sobre a resistência à compressão dos concretos. Os resultados estatísticos referentes à idade de fissuração do concreto devido à restrição imposta pelo aparato metálico estão apresentados na Tabela 23. Em relação aos fatores isolados, percebeu-se que tanto a relação A/Agl quanto o teor de microfibras apresentam influência significativa. A interação entre os dois fatores não apresentou influência, com 95% de confiabilidade.

Tabela 23 - Teste Anova para a data de ruptura obtida no ensaio restringido

Efeito	SS	Grau de Liberdade	SS	F	p
A/Agl	5,41	1	5,415	8,511	0,010*
% MFV	14,68	3	4,892	7,689	0,002*
A/Agl*% MFV	3,32	3	1,107	1,74	0,199

4.4 Resistência mecânica à compressão.

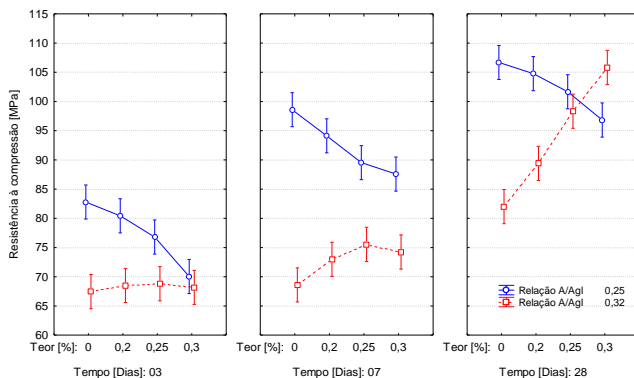
Quanto à resistência à compressão, concretos reforçados com fibras com relação A/Agl 0,25 apresentaram diminuição do desempenho mecânico, principalmente nas primeiras idades e, esta queda da resistência é diretamente proporcional ao teor de adição utilizada, como pode ser observado na Figura 54.

Este decréscimo da resistência pode ser atribuído por falha na fabricação da amostra devido à grande viscosidade da mistura e elevada quantidade de fibra incorporada, resultando em heterogeneidade do CADRF. (KHAN; ALI, 2016). Além disso, trabalhar com elevados teores de fibra resulta em acréscimo do teor de ar incorporado na mistura (YEHIA et al., 2016), conforme comprovado no ensaio de estado fresco e, resultando em diminuição das propriedades mecânicas do CADRF.

Já para as misturas com relação A/Agl 0,32, nas primeiras idades a adição de fibra causou pouco efeito na resistência à compressão, porém aos 28 dias foi observado que as misturas aumentaram o desempenho mecânico à medida que foi incorporado fibra.

Além deste fator, é conhecido que, ao se trabalhar com matrizes mais resistente, se faz necessário maior volume de fibras para manter a eficiência mecânica do compósito, uma vez que, para o mesmo volume de fibra, em menores relações A/Agl ocorrerá maior solicitação da fibra, podendo leva-la à ruptura, perdendo sua função no compósito.

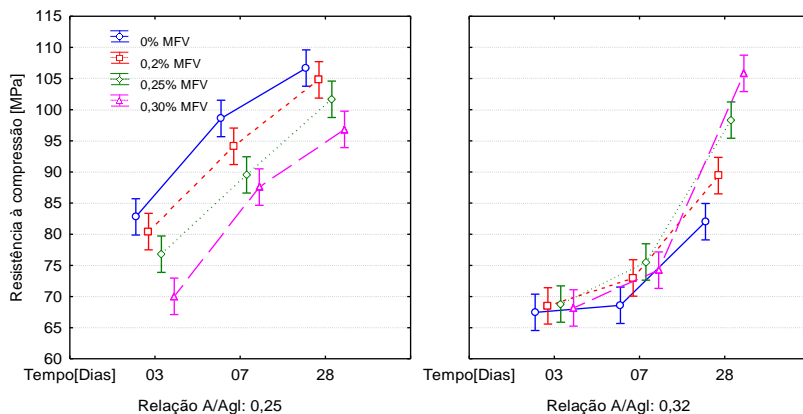
Figura 54 - Influência do teor de MFV na resistência à compressão dos compósitos nem diferentes idades.



Foi possível verificar que a evolução da resistência mecânica nos compósitos estudados foi maior para os concretos com relação A/Agl 0,32, principalmente entre os 7 e 28 dias. Nas primeiras idades, estas misturas apresentaram pouco ganho de resistência e, não apresentando diferença significativa entre as amostras contendo fibras e a referência (0%MFV), conforme pode ser observado na Figura 55.

As misturas com A/Agl 0,25, desde as primeiras idades apresentam queda de resistência com a incorporação de fibra na mistura, porém esta diferença se mantém praticamente constante durante até os 28 dias.

Figura 55 – Evolução da resistência à compressão de cada mistura estudada.



Após o exposto anteriormente, foi realizado o Teste Duncan com 5% de significância para testar a homogeneidade dos grupos de mistura, sendo para esta análise descartado a influência da idade de ruptura nos resultados obtidos. O resultado desta análise pode ser visto na Tabela 31 do Apêndice D, onde é possível verificar que, com exceção de quatro casos, os grupos estudados não apresentam diferença significativa entre si.

Tabela 24 - Teste Anova para o ensaio de resistência à compressão

Efeito	SS	Grau de Liberdade	MS	F	p
Relação A/Agl	2813	1	2813	444,1	0,000*
Teor de Fibra [%]	21	3	7	1,1	0,35
Tempo [Dias]	7827	2	3913	617,9	0,000*
Relação A/Agl*Teor de Fibra [%]	1152	3	384	60,6	0,000*
Relação A/Agl*Tempo [Dias]	457	2	229	36,1	0,000*
Teor de Fibra [%]*Tempo [Dias]	313	6	52	8,2	0,000*
Relação A/Agl*Teor de Fibra [%]*Tempo [Dias]	233	6	39	6,1	0,000*

A fim de avaliar os efeitos individuais e interativos das variáveis neste ensaio, foi realizado o teste de análise de variância (ANOVA). Os resultados estatísticos referentes estão apresentados na Tabela 24 Em relação aos fatores isolados, percebeu-se que nos resultados de resistência à compressão, diferentemente do que ocorre com a relação A/Agl e idade

de hidratação, como já era esperado. Porém, a interação entre os fatores mostrou apresentar influência com 95% de confiabilidade

4.5 Resistência a tração indireta.

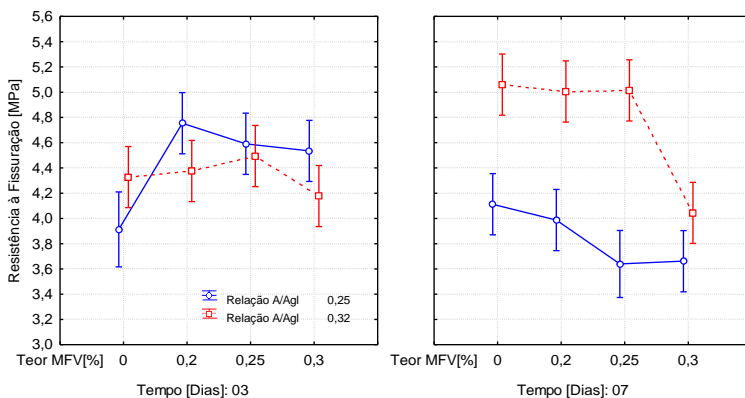
Os resultados obtidos neste ensaio apresentaram grande variação, além de um decréscimo do valor obtido para elevados teores de utilização de MFV, conforme pode ser observado na Figura 56. Estes efeitos estão relacionados à dispersão e quantidade das fibras dentro da amostra ensaiada, conforme sugerido por KHAN & ALI, (2016)

Conforme comentado anteriormente, a adição de elevado consumo de fibra resulta no aumento do ar incorporado na mistura, resultando em decréscimo da propriedade mecânica. (YEHA et al., 2016)

Apesar disso, é possível visualizar que, para misturas com menor relação A/Agl, a adição das fibras aumentou a resistência à fissuração aos 3 dias, o que colabora com o combate à fissuração do concreto. Já aos 7 dias essa incorporação apresentou uma pequena queda de desempenho.

As misturas com A/Agl 0,32 não apresentaram diferença significativa entre os resultados de resistências obtidos aos 3 dias, porém com 0,30% de adição obteve-se uma leve queda, desprezível se considerar o desvio padrão das amostras. Porém, aos 7 dias, esta mesma mistura apresentou uma queda de 25% em relação à referência deste grupo de misturas.

Figura 56 – Relação entre Resistência à tração indireta.



Após o exposto anteriormente, foi realizado o Teste Duncan com 5% de significância para testar a homogeneidade dos grupos de mistura, sendo para esta análise descartado a influência da idade de ruptura nos resultados obtidos. Como resultado desta análise pode ser verificado que

35,7% dos grupos estudados não apresentam homogeneidade entre si. Através deste teste é possível verificar quais misturas possuem correlação. O seu resultado é apresentado Tabela 32, no Apêndice D.

A análise de variância (ANOVA) foi realizada para identificar os efeitos individuais e interativos das variáveis sobre a resistência à tração indireta dos concretos. Os resultados estatísticos referentes estão apresentados na Tabela 25. Em relação aos fatores isolados, percebeu-se que a incorporação de fibra apresenta influência nos resultados obtidos nos ensaios de tração indireta. A idade de hidratação da mistura, isoladamente, não apresentou influência com 95% de confiabilidade, porém ao ser analisado em combinação com os demais fatores, a idade do concreto passa a influenciar no resultado.

Tabela 25 - Teste Anova para o ensaio de tração indireta

Efeito	SS	Grau de		F	p
		Liberdade	Ms		
Relação A/Agl	3,92	1	3,92	44,15	0,000*
Teor de Fibra [%]	2,39	3	0,79	8,98	0,000*
Tempo [Dias]	0,15	1	0,15	1,68	0,199
Relação A/Agl*Teor de Fibra [%]	1,69	3	0,56	6,34	0,001*
Relação A/Agl*Tempo [Dias]	6,16	1	6,16	69,4	0,000*
Teor de Fibra [%]*Tempo [Dias]	2,77	3	0,92	10,38	0,000*
Relação A/Agl*Teor de Fibra [%]*Tempo [Dias]	0,93	3	0,31	3,51	0,019*

4.6 Módulo estático de elasticidade à compressão e módulo de elasticidade dinâmica.

A incorporação de fibra de vidro nos concretos resultou em diminuição do módulo de elasticidade dinâmico das amostras nas primeiras idades, principalmente para as misturas de menor relação A/Agl. Aos 28 dias, a mistura com relação A/Agl 0,32 não apresenta diferença significativa entre os valores encontrados, já as misturas com A/Agl ,25 apresentam grande acréscimo do valor de o módulo de elasticidade dinâmico, conforme pode ser observado na Figura 57.

Figura 57 – Influência do teor de MFV no módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos.

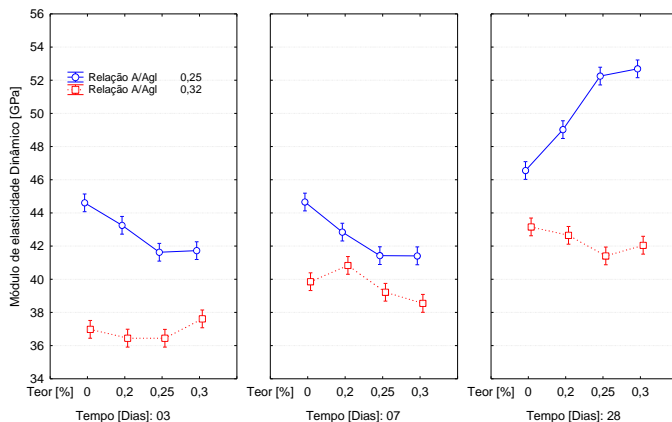
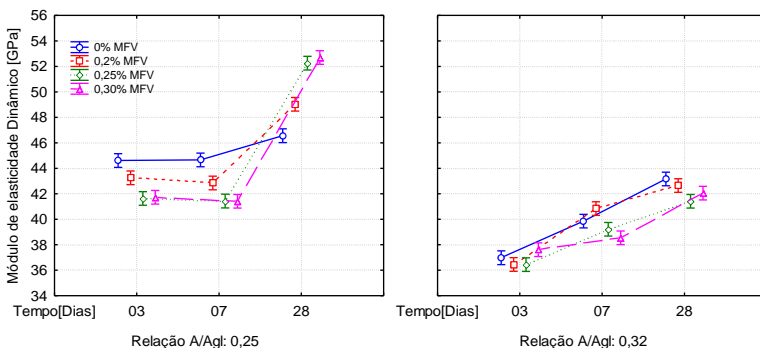


Figura 58 – Evolução do módulo dinâmico em relação da idade de hidratação.



Outro fator interessante é que para A/Agl 0,32, os resultados obtidos se mantiveram muito próximos para todas as idades, não se diferenciando significativamente entre si, como pode ser observado na Figura 58. O aumento do valor do módulo dinâmico com o passar do tempo de hidratação é atribuído pelo aumento da rigidez do CADRF.

Ainda é possível verificar que a evolução de crescimento do módulo dinâmico nas misturas contendo fibra se dá de maneira bem mais acentuada do que na amostra de referência.

Após o exposto anteriormente, foi realizado o Teste Duncan com 5% de significância para testar a homogeneidade dos grupos de mistura, sendo para esta análise descartado a influência da idade de ruptura nos

resultados obtidos. O resultado desta análise nos mostra que 28,6% dos grupos estudados apresentam diferença significativa entre si. O resultado deste teste de agrupamento pode ser observado na Tabela 30 do Apêndice D.

A análise de variância (ANOVA) foi realizada para identificar os efeitos individuais e interativos das variáveis sobre módulo de elasticidade dinâmico dos concretos. Os resultados estatísticos estão apresentados na Tabela 26 Tabela 23. Para esta propriedade, tanto isoladamente quanto suas interações, todas os efeitos apresentaram influência com 95% de confiabilidade.

Tabela 26 - Teste Anova para o ensaio de módulo dinâmico

Efeito	SS	Grau de Liberdade	MS	F	p
Relação A/Agl	1610	1	1610	4160	0,000*
Teor de Fibra [%]	7	3	2	6	0,001*
Tempo [Dias]	1601	2	800	2068	0,000*
Relação A/Agl*Teor de Fibra [%]	18	3	6	16	0,000*
Relação A/Agl*Tempo [Dias]	216	2	108	279	0,000*
Teor de Fibra [%]*Tempo [Dias]	205	6	34	88	0,000*
Relação A/Agl*Teor de Fibra [%]*Tempo [Dias]	228	6	38	98	0,000*

Se tratando do módulo elástico estático, assim como nos resultados acima discutidos, a diferença se mostra mais significativa nas misturas com menor relação A/Agl e, para essas misturas, a diferença se mostra maior para misturas aos 28 dias.

As misturas com relação A/Agl 0,25 apresentaram grande variação nos valores obtidos para o módulo de elasticidade aos 3 dias, não sendo possível avaliar o comportamento das fibras nesta idade para este grupo de amostras.

Figura 59 – Influência do teor de MFV no módulo de elasticidade estático dos compósitos em diferentes idades.

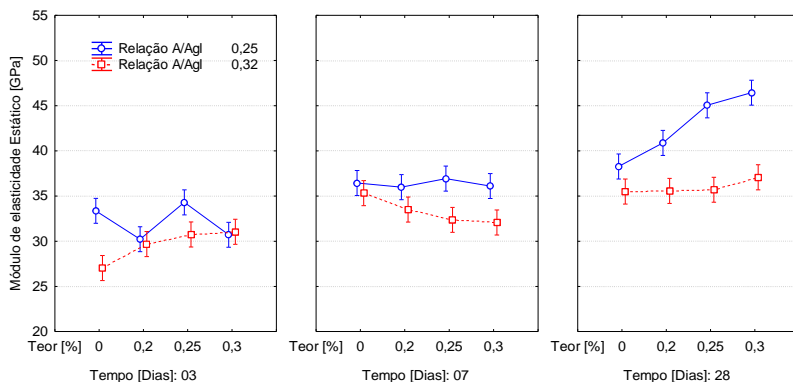
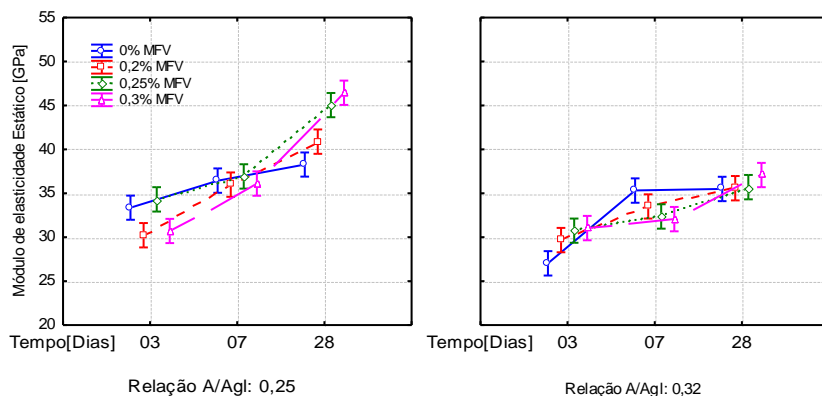


Figura 60 – Evolução do módulo de elasticidade estático para os teores de adição de MFV.



Com os resultados obtidos, foi realizado uma comparação dos valores encontrados nos ensaios com os modelos definidos pelas normas citadas na bibliografia. Estes valores foram calculados para cada idade, separadamente, e são apresentados na Tabela 27. Nesta comparação, é possível perceber que o ensaio de módulo dinâmico realizado obteve resultado maior para todas as misturas, assim como o obtido pelos modelos teóricos apresentado pelas normas.

Tabela 27 - Diferença entre os resultados obtidos pelos modelos em relação ao ensaio de módulo à compressão.

	Idade	Ensaio Dinâmico	NBR	CEB- 2010	Euro- code 2(2004)	Lydo & Balendr- an	Norma BS CP 110(1972)
0,25_0%MFV	3	36%	37%	34%	24%	13%	29%
0,25_0,20% MFV	3	42%	50%	47%	36%	18%	34%
0,25_0,25% MFV	3	21%	30%	28%	18%	1%	14%
0,25_0,30% MFV	3	36%	41%	39%	28%	13%	28%
0,32_0% MFV	3	37%	59%	56%	44%	14%	27%
0,32_0,20% MFV	3	23%	45%	43%	32%	2%	14%
0,32_0,25% MFV	3	19%	41%	38%	28%	-1%	11%
0,32_0,30% MFV	3	21%	39%	36%	26%	0%	12%
0,25_0%MFV	7	20%	32%	30%	20%	0%	14%
0,25_0,20% MFV	7	19%	31%	30%	20%	-2%	12%
0,25_0,25% MFV	7	13%	26%	24%	15%	-6%	6%
0,25_0,30% MFV	7	15%	28%	26%	17%	-4%	9%
0,32_0% MFV	7	13%	22%	20%	11%	-6%	6%
0,32_0,20% MFV	7	21%	31%	29%	19%	0%	14%
0,32_0,25% MFV	7	20%	37%	35%	25%	0%	12%
0,32_0,30% MFV	7	22%	38%	35%	25%	1%	14%
0,25_0%MFV	28	19%	28%	27%	17%	-1%	13%
0,25_0,20% MFV	28	19%	19%	18%	9%	-1%	14%
0,25_0,25% MFV	28	16%	7%	6%	-2%	-3%	12%
0,25_0,30% MFV	28	14%	3%	1%	-6%	-5%	10%
0,32_0% MFV	28	21%	28%	26%	17%	0%	14%
0,32_0,20% MFV	28	20%	31%	29%	19%	-1%	13%
0,32_0,25% MFV	28	16%	34%	32%	22%	-4%	9%
0,32_0,30% MFV	28	15%	32%	30%	20%	-5%	8%

Aos 7 dias, os resultados obtidos para a menor relação A/Agl não apresentaram diferenças entre si para todos os teores de adição de MFV, enquanto o grupo A/Agl 0,32 apresenta um leve decréscimo com o aumento da quantidade de fibras na mistura.

Porém aos 28 dias, as misturas com relação A/Agl 0,32 não apresentaram diferença significativa, porém para as relações A/Agl 0,25, os

teores de 0,25% e 0,30% apresentaram acréscimo no seu módulo de elasticidade, assim como o obtido no módulo de elasticidade dinâmico.

A análise de variância (ANOVA) foi realizada para identificar os efeitos individuais e interativos das variáveis sobre o módulo de elasticidade à compressão dos concretos. Os resultados estatísticos estão apresentados na Tabela 28. Para esta propriedade, tanto isoladamente quanto suas interações, todas os efeitos apresentaram influência com 95% de confiabilidade.

Tabela 28 - Teste Anova para o ensaio de módulo à compressão.

Efeito	SS	Grau de Liberdade	MS	F	p
Relação A/Agl	301,3	1	301,3	211,8	0,000*
Teor de Fibra [%]	35,8	3	11,9	8,4	0,000*
Tempo [Dias]	852,1	2	426,1	299,5	0,000*
Relação A/Agl*Teor de Fibra [%]	23,7	3	7,9	5,5	0,002*
Relação A/Agl*Tempo [Dias]	62	2	31	21,8	0,000*
Teor de Fibra [%]*Tempo [Dias]	83,7	6	13,9	9,8	0,000*
Relação A/Agl*Teor de Fibra [%]*Tempo [Dias]	76	6	12,7	8,9	0,000*

O teste de homogeneidade das misturas é apresentado na Tabela 29, localizada no Apêndice D.

5 CONCLUSÕES

Concluiu-se, portanto, para os teores estudados, a incorporação de fibra auxiliou na diminuição da deformação devido à retração autógena livre, principalmente para as misturas com relação A/Ag1 0,32, onde apresentou diminuição da deformação em até 75% em relação com sua referência.

Através do ensaio de retração restringida, foi possível notar que ao adicionar fibra, o concreto apresentou menor deformação, porém, como foi apresentado anteriormente, estatisticamente não foi observada diferença significativa entre as misturas quanto ao tempo necessário para a fissuração do concreto.

Quanto às propriedades mecânicas, ao incorporar fibra, ocorreu a diminuição dos valores de resistência à compressão e de módulo de elasticidade da mistura até os 7 dias, período onde é de extrema importância quando se espera combater a fissuração por retração autógena.

Este decréscimo da resistência pode ser atribuído por falha na fabricação da amostra devido à grande viscosidade da mistura e elevada quantidade de fibra incorporada, resultando em heterogeneidade do CADRF. Além disso, trabalhar com elevados teores de fibra resulta em acréscimo do teor de ar incorporado na mistura conforme comprovado no ensaio de estado fresco e, resultando em diminuição das propriedades mecânicas do CADRF.

Portanto, é possível afirmar que, mesmo que seja diminuída a deformação de retração da mistura com a incorporação de microfibras de vidro, a capacidade de o concreto resistir aos esforços de tração gerados por essa deformação não apresentou diferença significativa entre os teores testados, assim demonstrando que para estes níveis de adição não há diferença significativa quanto à capacidade portante de esforços de tração nas primeiras idades, uma vez que a quantidade estudada já se apresenta acima do limite trazido pela literatura e o espaçamento entre as fibras devem estar influenciando no desempenho do material.

Além disso, é possível afirmar que a incorporação de fibra possui influência nas propriedades mecânicas, como foi comprovado através dos testes estatísticos realizados, porém se deve estudar melhor o volume de fibras a ser incorporados, uma vez que elevados teores pode resultar em perda de eficiência mecânica, como mostrado neste documento, assim não proporcionando o benefício que se busca ao incorporar as fibras no concreto.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT 1265. **Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento**. Rio de Janeiro: 2015
- ___ ABNT 6118. **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. 2014
- ___ABNT NBR 5739. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndrico**. 2007
- ___ABNT NBR 8522. **Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. 2008
- ___ABNT NBR 9833. **Concreto Fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. 2008
- ___ABNT NM 23. **Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. 2001
- ___ABNT NBR 15575-1 2013. **Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1 : Requisitos gerais Prefácio**. 2013
- ___ABNT NBR 5738. **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos -de-prova**. 2008
- ABUKHASHABA, M. I.; MOSTAFA, M. A.; ADAM, I. A. Behavior of self-compacting fiber reinforced concrete containing cement kiln dust. **Alexandria Engineering Journal**, v. 53, n. 2, p. 341–354, 2014.
- ACI COMMITTEE 544. State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete Reported by ACI Committee 544. **ACI Structural Journal**, v. 96, n. Reapproved, 2002.
- AITCIN, P.-C.; NEVILLE, A.; ACKER, P. Integrated View of Shrinkage Deformation. **Concrete International**, v. 19, n. 9, p. 35–41, 1 set. 1997.
- AITCIN, P. C. **High-Performance Concrete**. Québec, Canadá: E & FN SPON, 2004.
- ALBERTI, M. G.; ENFEDAQUE, A.; GÁLVEZ, J. C. On the mechanical properties and fracture behavior of polyolefin fiber-reinforced self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 274–288, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM C 1581. **Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage**. ASTM International. **Anais...2009** Disponível em: <www.ASTM.org>
- ___ASTM C 157. **Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and**. 2016
- ASTM C 845. **Standard Specification for Expansive Hydraulic**

Cement 1. 1996

____ASTM E1876. **Standard Test Method for Dynamic Young ' s Modulus , Shear Modulus , and Poisson ' s Ratio by Impulse Excitation of Vibration 1.** Annual Book of ASTM Standards. **Anais...**2015

____ASTM C215, A. **Standard Test Method for Fundamental Transverse , Longitudinal , and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens 1.** 2015

AVESTON, J.; KELLY, A. Theory of multiple fracture of fibrous composites. **Journal of Materials Science**, v. 8, n. 3, p. 352–362, 1973.

BENTUR, A.; ALEXANDER, M. G. A review of the work of the RILEM TC 159-ETC: Engineering of the interfacial transition zone in cementitious composites. **Materials and Structures**, v. 33, n. March, p. 82–87, 2000.

BENTUR, A.; MINDNESS, S. Fiber Reinforced Cementitious Composites. In: **Fiber Reinforced Cementitious Composites**. [s.l.] Taylor & Francis Group, 2007. p. 625.

BENTZ, D. P. et al. Influence of Cement Particle-Size Distribution on Early Age Autogenous Strains and Stresses in Cement-Based Materials. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 84, n. 1, p. 129–135, jan. 2001.

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

BORG, R. P.; BALDACCHINO, O.; FERRARA, L. Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 108, p. 29–47, 2016.

BOULEKBACHE, B. et al. Influence of yield stress and compressive strength on direct shear behaviour of steel fibre-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 6–14, 2012.

BUITELAAR, P. Heavy Reinforced Ultra High Performance Concrete. In: GEISENHANSLÜKE, M. S. E. F. C. (Ed.). **Ultra High Performance Concrete (UHPC) Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete**. Kassel: Die Deutsche Bibliothek, 2004.

BURATTI, N.; MAZZOTTI, C.; SAVOIA, M. Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 2713–2722, 2011.

CASAGRANDE, C. A. **AVALIAÇÃO DO EFEITO DA FUNCIONA- AÇO COM SILANOS EM MATRIZ DE CON- CRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO**. [s.l.] Universidade Federalde Santa Catarina, 2014.

CHOI, S. J. et al. Shrinkage and corrosion resistance of amorphous metallic-fiber-reinforced cement composites. **Composite Structures**, v. 107, p. 537–543, 2014.

COOK, R. A.; HOVER, K. C. Mercury porosimetry of hardened cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 6, p. 933–943, jun. 1999.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G. Characterization of self-compacting concretes prepared with different fibers and mineral additions. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 5, p. 596–601, 2011.

CORIOLANO, R. Manual de programação e operação. v. 55, n. 11, [s.d.].

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização. **Informativo Técnico-Científico ITC-ME/ATCP**, n. Cossolino LC, p. 30, 2010.

CRAEYE, B. et al. Effect of mineral filler type on autogenous shrinkage of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 6, p. 908–913, 2010.

CUSSON, D.; REPETTE, W. L. Early-age cracking in reconstructed concrete bridge barrier walls. **ACI Structural Journal**, v. 97, n. 4, p. 438–446, 2000.

CUSSON, D. T. H.; HOOGEVEEN, T. An Experimental approach for the analysis of early-age behaviour of high-performance concrete structures under restrained shrinkage. **Concrete**, v. 37, n. 2, p. 200–209, 2007.

D.J.HANNANT. Fiber Reinforced Concrete. In: EDINBURGH), J. N. (IMPERIAL C. L. B. S. C. (SCHOOL OF THE B. E. N. U. (Ed.). . **Advanced Concrete Technology**. First ed. [s.l: s.n.]. p. 6/1-6/17.

DINIZ, J. Z. F.; FERNANDES, J. F.; KUPERMAN, S. C. RETRAÇÃO E FLUÊNCIA. In: ISAÍÁ, G. (Ed.). . **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto, 2011. p. 672–703.

DOMOME, P. Part 3 - Concrete. In: DOMOME, P.; ILSTON, J. (Eds.). . **Construction Materials**. [s.l: s.n.]. p. 127–148.

DOMONE, P. L. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. 2006.

DONZA, H.; CABRERA, O.; IRASSAR, E. . High-strength concrete with different fine aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 11, p. 1755–1761, nov. 2002.

ESPING, O. **Investigation of early age deformation in self-compacting concrete**. 2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering. **Anais...RILEM Publications**, 11 set. 2006Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/257924930_INVESTIGATION_OF_EARLY_AGE_DEFORMATION_IN_SELF-COMPACTING_CONCRETE>. Acesso em: 24 fev. 2016

FERRARA, L. et al. Autogenous Self Healing of High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites. **High Performance Fiber**

Reinforced Cement Composites (HPFRCC7), Stuttgart, Germany, n. 1, p. 71–78, 2015.

FERREIRA, L. E. T.; HANAI, J. B. E. Mecânica da Fratura. In: ISAIA, G. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 241–280.

FIGUEIREDO, A. D. DE. **Concreto reforçado com fibras**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2011.

FOLLIARD, K. et al. EVALUATION OF ALTERNATIVE MATERIALS TO CONTROL DRYING-SHRINKAGE CRACKING IN CONCRETE BRIDGE DECKS. 2003.

GENCEL, O. et al. Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres. **Materials Research Innovations**, v. 15, n. 3, p. 216–225, 12 jun. 2011.

GENG, Y.; LEUNG, C. K. Y. A microstructural study of fibre/mortar interfaces during fibre debonding and pull-out. **Journal of Materials Science**, v. 31, n. 5, p. 1285–1294, 1996.

GRABOIS, T. M.; CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. T. Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 104, p. 284–292, 2016.

GRAY, R. J. Analysis of the effect of embedded fibre length on fibre debonding and pull-out from an elastic matrix. **Journal of Materials Science**, v. 19, n. 3, p. 861–870, mar. 1984.

GRZYBOWSKI, M.; SHAH, S. P. Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete. **Materials Journal**, v. 87, n. 2, p. 138–148, 1 mar. 1990.

HAYSPARK, N. P. et al. DEFORMAÇÃO POR RETRAÇÃO E FLUÊNCIA. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1. ed. São Paulo: [s.n.]. p. 655–686.

HILLERBORG, A.; MODÉER, M.; PETERSSON, P. E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. **Cement and Concrete Research**, v. 6, n. 6, p. 773–781, 1976.

HOLLAWAY, L.; PURNEL, P. Fibre composites. In: ILLSTON, J.; PETER, D. (Eds.). **Construction Materials**. 4^a ed. [s.l.: s.n.]. p. 317–396.

HOLT, E.; LEIVO, M. Cracking risks associated with early age shrinkage. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 5, p. 521–530, 1 jul. 2004.

HORNE, A. T.; RICHARDSON, I. G.; BRYDSON, R. M. D. Quantitative analysis of the microstructure of interfaces in steel reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 12, p. 1613–1623, 2007.

HOSSAIN, A. B.; WEISS, J. Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens. **Cement and**

Concrete Composites, v. 26, n. 5, p. 531–540, jul. 2004.

HUA, C.; ACKER, P.; EHRLACHER, A. Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1457–1468, out. 1995.

IGARASHI, S.; BENTUR, A.; KOVLER, K. Autogenous shrinkage and induced restraining stresses in high-strength concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 11, p. 1701–1707, nov. 2000.

ISAÍÁ, G. A água no concreto. In: ISAÍÁ, G. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 311–346.

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.

KELLY, J. W. Cracks in concrete - the causes and cures. **Concrete Construction**, v. 9, p. 89–93, 1964.

KHALAJ, G.; NAZARI, A. Modeling split tensile strength of high strength self compacting concrete incorporating randomly oriented steel fibers and SiO₂ nanoparticles. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 4, p. 1887–1892, 2012.

KHAN, M.; ALI, M. Use of glass and nylon fibers in concrete for controlling early age micro cracking in bridge decks. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 800–808, 2016.

KIM, D. JOO; EL-TAWIL, S.; NAAMAN, A. E. Rate-dependent tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites. **Materials and Structures**, v. 42, n. 3, p. 399–414, 2009.

KIM, J. H. J. et al. Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 39, n. 3, p. 442–450, 2008.

KOVLER, K. Testing system for determining the mechanical behaviour of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage. **Materials and Structures**, v. 27, n. 6, p. 324–330, 1994.

KUMM, T. C. **Influencia Do Emprego De Psa Nas Propriedades De Materiais À Base De Cimento Portland**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

LABIB, W.; EDEN, N. An investigation into the use of fibres in concrete industrial ground-floor slabs. p. 466–477, 2004.

LARANJEIRA, F. et al. Framework to predict the orientation of fibers in FRC: A novel philosophy. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 6, p. 752–768, 2012.

LEE, S. J.; WON, J. P. Shrinkage characteristics of structural nano-synthetic fibre-reinforced cementitious composites. **Composite Structures**, v. 157, p. 236–243, 2016.

LEE, Y.; KANG, S. T.; KIM, J. K. Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix. **Construction and**

Building Materials, v. 24, n. 10, p. 2030–2041, 2010.

LIAO, W. C. et al. Self-Consolidating High Performance Fiber Reinforced Concrete: SCHPFRC. **High Performance Fiber ...**, n. December, p. 76, 2006.

LONG, W. et al. Shrinkage of Hybrid Fiber Reinforced Self-Consolidating Concrete with Recycled Aggregate. [s.d.].

LURA, P.; VAN BREUGEL, K.; MARUYAMA, I. Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 12, p. 1867–1872, 2001.

MA, Y. et al. Effect of Y type polypropylene fiber on plastic shrinkage cracking of cement mortar. **Materials and Structures**, v. 37, n. March, p. 92–95, 2004.

MARKOVIC, I. **High-Performance Hybrid-Fibre Concrete**. Belgrado, Sérvia: DUP Science, 2006.

MAZAHERIPOUR, H. et al. The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 1, p. 351–358, 2011.

MEHTA, P.; MEHTA, P.; AİTCIN, P.-C. Principles Underlying Production of High-Performance Concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 12, n. 2, p. 70, 1990.

MELO, K. A. DE. Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário. 2005.

MOLINS, C.; AGUADO, A.; SALUDES, S. Double Punch Test to control the energy dissipation in tension of FRC (Barcelona test). **Materials and Structures**, v. 42, n. 4, p. 415–425, 24 maio 2009.

MONTEIRO, P. J. M.; GJORV, O. E.; MEHTA, P. K. Microstructure of the steel-cement paste interface in the presence of chloride. **Cement and Concrete Research**, v. 15, n. 5, p. 781–784, 1985.

MOUNANGA, P. et al. Autogenous deformations of cement pastes: Part I. Temperature effects at early age and micro–macro correlations. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 1, p. 110–122, 2006.

NAAMAN, A. E. Fiber to matrix bond mechanisms in FRC composite. **8th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete: challenges and opportunities (BEFIB 2012)**, p. 598–610, 2012.

NAAMAN, A. E.; REINHARDT, H. W. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites HPRCC-4: International RILEM Workshop. **Materials and Structures**, v. 36, n. 10, p. 710–712, 2003.

NASSIF, H.; GHANCHI, Z.; NA, C. Crack Resistance of Polypropylene Fiber Reinforced Self-Consolidating Concrete under Restrained Shrinkage Condition. [s.d.].

NEVILLE, A. **Propriedades do Concreto**. 5ª Edição ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2016.

NILI, M.; AFROUGHSABET, V. The effects of silica fume and

polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 6, p. 927–933, 2010.

NOUN, M. R.; MORSHEDIAN, J. Impact, compressive and flow properties of fibre reinforced cementitious composites. **Iranian Journal of Polymer Science and Technology**, v. 4, n. 2, 1995.

NUNES, N. L. **CONTRIBUIÇÃO PARA A APLICAÇÃO DO CONCRETO**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2006a.

NUNES, N. L. Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos - [Tese de Doutorado]. p. 276, 2006b.

ONGHERO, L.; REPETTE, W. L. **O efeito de diferentes teores de aditivo redutor de retração na reologia de pastas de cimento auto-adensáveis**IBRACON, , 2009.

ONGHERO, L.; REPETTE, W. L.; PILAR, R. **Uso de polímeros super absorvente como agente de cura interna para argamassa alto-adensável**.Maceió, BrasilIBRACON, , 2012.

PACHECO, J.; BILESKY, P.; MORAIS, T. Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto. **Brasileiro do Concreto**, 2014.

PELISSER, F. et al. Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 11, p. 2171–2176, 2010.

PERSSON, B. Self-desiccation and its importance in concrete technology. **Materials and Structures**, v. 30, n. 5, p. 293–305, jun. 1997.

PINCHIN, D. J.; TABOR, D. Interfacial phenomena in steel fibre reinforced cement I: Structure and strength of interfacial region. **Cement and Concrete Research**, v. 8, n. 1, p. 15–24, 1978.

PROVINDAR K. MEHTA; PAULO J. MONTEIRO. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4. ed. [s.l: s.n.].

RANADE, R. et al. **Development of High Strength High Ductility Concrete**RILEM, , 2011. Disponível em: <<http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/94195>>. Acesso em: 26 abr. 2016

RANAIVOMANANA, N.; MULTON, S.; TURATSINZE, A. Basic creep of concrete under compression, tension and bending. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 173–180, 2013.

REPETTE, W. L. Concreto para fins especiais. In: ISAÍÁ, G. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1807–1842.

REPETTE, W. L.; MAILVAGANAM, N. P. Prehydrated High-Alumina Cement- Based Admixture For Compensating Autogenous Shrinkage in High-Performance Concrete. **Special Publication**, v. 186, p. 39–58, 1 maio 1999.

RILEM TC 162-TDF. Recommendations of RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete Design of steel fibre reinforced concrete using the sigma-epsilon method: principles and applications. **Materials and Structures**, v. 35, n. 249, p. 262–278, 2002.

ROESLER, J. R. et al. Fracture of Plain and Fiber-Reinforced Concrete Slabs under Monotonic Loading. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 5, p. 452–460, out. 2004.

RUSSEL, G. H.; GRAYBEAL, B. A. Ultra-High Performance Concrete : A State-of-the-Art Report for the Bridge Community. n. June, p. 176, 2013.

SANT, G.; LURA, P.; WEISS, J. Measurement of Volume Change in Cementitious Materials at Early Ages: Review of Testing Protocols and Interpretation of Results. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1979, p. 21–29, 28 jan. 2006.

SCHLANGEN, E.; KOENDERS, E. A. B.; VAN BREUGEL, K. Influence of internal dilation on the fracture behaviour of multi-phase materials. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 74, n. 1–2, p. 18–33, 2007.

SHEHATA, L. C. D. Propriedades Elasto-Plásticas do concreto. In: ISAÍÁ, G. (Ed.). . **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. ed. São Paulo: [s.n.]. p. 653–672.

SUN, W. et al. The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 4, p. 595–601, 2001.

TANESI, J.; FIGUEIREDO, A. D. Fissuração por retração em concretos reforçados com fibras de polipropileno (CRFP). v. 5, p. 25, 1999.

TAZAWA, E. et al. Work of JCI Committee on autogenous shrinkage. In: **PRO 17: International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete - “Shrinkage 2000”**. [s.l: s.n.].

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.

TUTIKIAN, B.; HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: ISAÍÁ, G. (Ed.). . **Materiais de construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 415–452.

WECHARATANA, M.; SHAH, S. P. a Model for Predicting Fracture Resistance of Fiber Reinforced Concret. **Cement and Concrete Research**, v. 13, n. c, p. 819–829, 1983.

WILLIAN D. CALLISTER, J. .; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 8ª Edição ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2012.

WONGTANAKITCHAROEN, T.; NAAMAN, A. E. Unrestrained early age shrinkage of concrete with polypropylene, PVA, and carbon fibers. **Materials and Structures**, v. 40, n. 734, p. 289–300, 2007.

YEHIA, S. et al. Mechanical and durability evaluation of fiber-reinforced self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 120–133, 2016.

YEHIA, S.; ALHAMAYDEH, M.; FARRAG, S. High-Strength Lightweight SCC Matrix with Partial Normal-Weight Coarse-Aggregate Replacement: Strength and Durability Evaluations. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 11, p. 4014086, 2014.

YOO, D. Y. et al. Shrinkage and cracking of restrained ultra-high-performance fiber-reinforced concrete slabs at early age. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 357–365, 2014.

YOO, D. Y.; KANG, S. T.; YOON, Y. S. Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 67–81, 2014.

APÊNDICE A

Nesta seção é apresentado o resultado de todos os prismas ensaiados para o ensaio de retração livre durante o programa experimental realizado.

Figura 61 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura relação A/Ag1 0,25

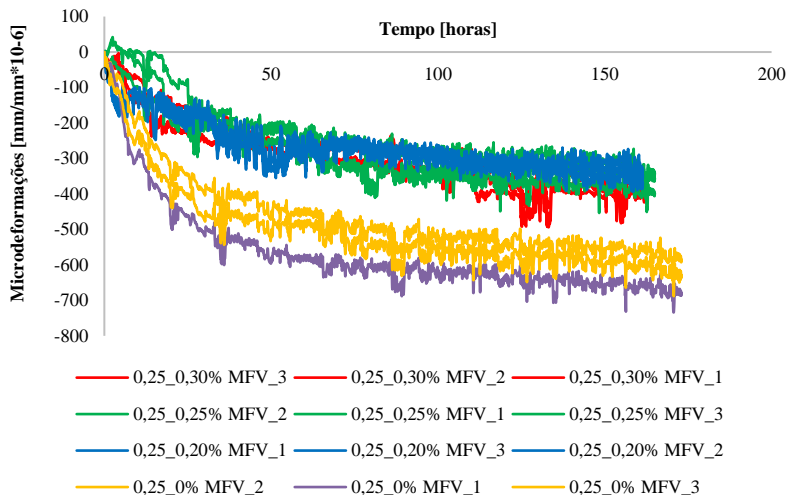


Figura 62 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura 0,25_0,20%

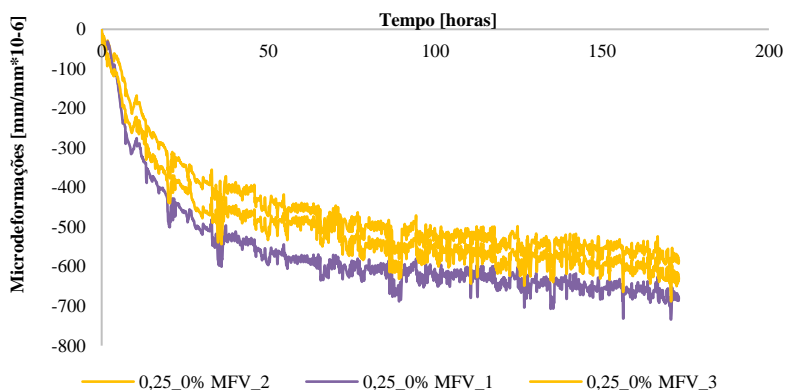


Figura 63 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura 0,25_0,20%

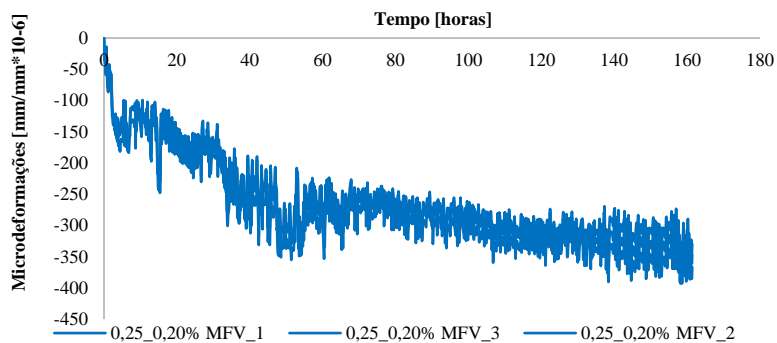


Figura 64 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura 0,25_0,25%

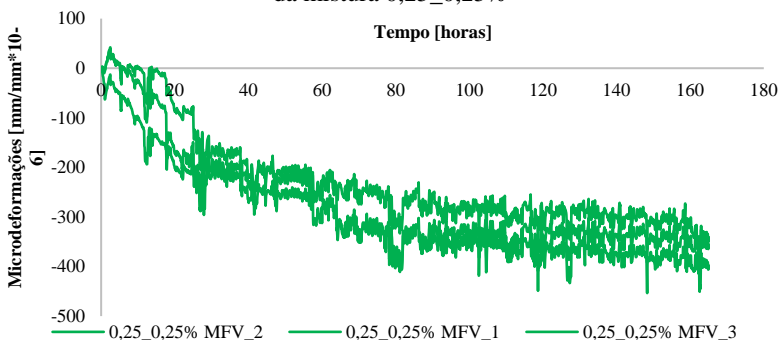


Figura 65 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura 0,25_0,30%

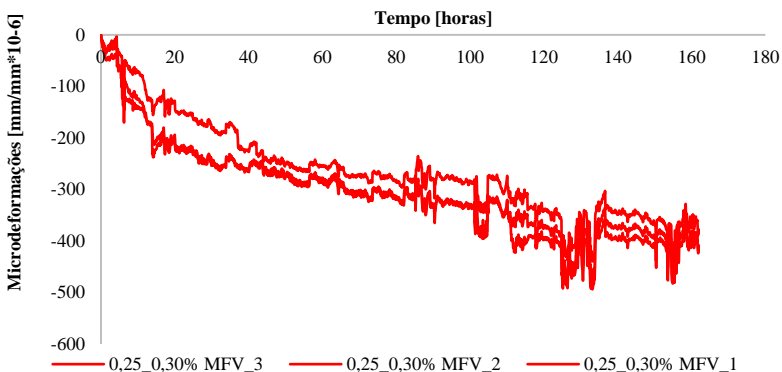


Figura 66 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura relação A/Ag1 0,32

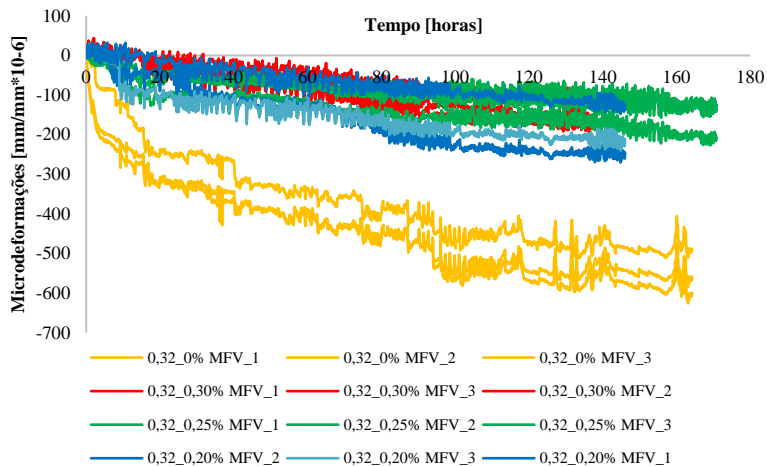


Figura 67 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura 0,30_0,0 %MFV.

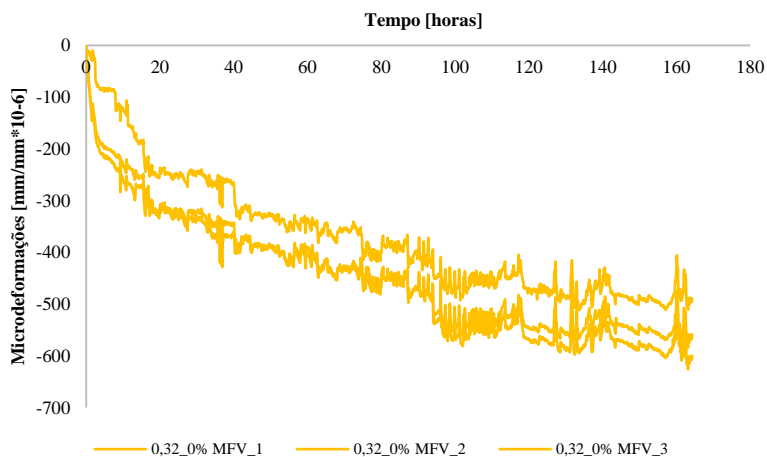


Figura 68 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura 0,30_0,20 %MFV.

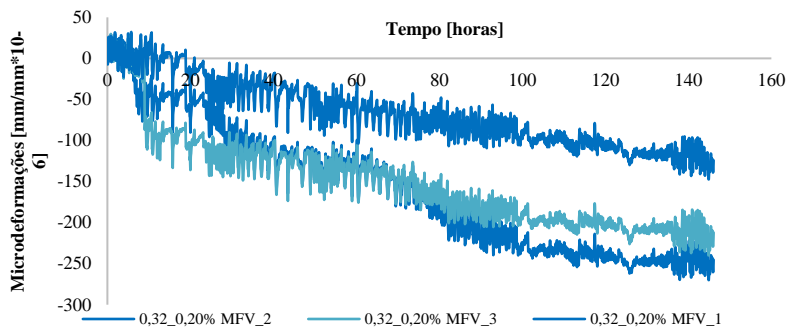


Figura 69 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura 0,30_0,25 %MFV.

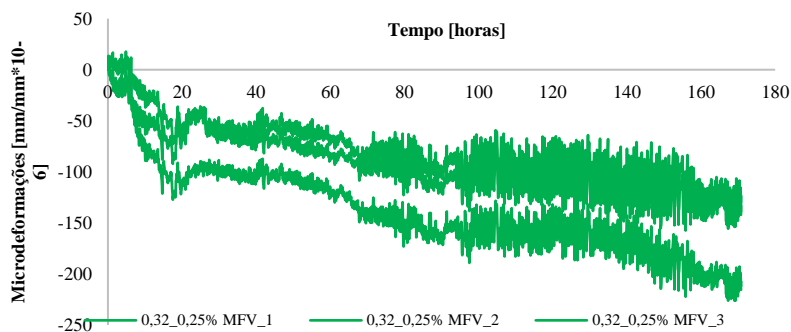
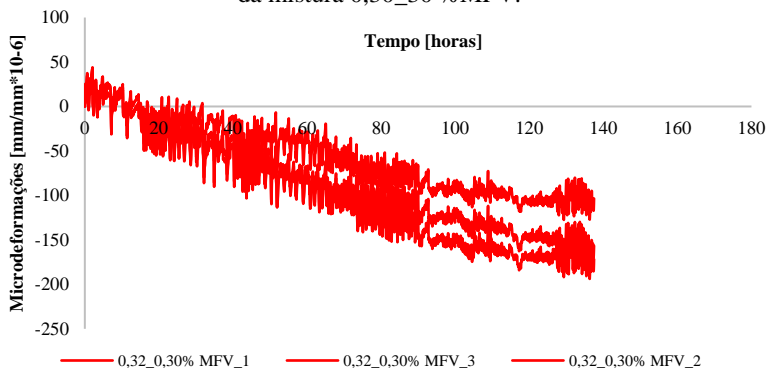


Figura 70 - Resultados obtidos no ensaio de retração livre para todos os prismas da mistura 0,30_30 %MFV.



APÊNDICE B

Nesta seção é apresentado o resultado de todos os anéis produzidos para o ensaio de retração restringida durante o programa experimental realizado. Todos os resultados obtidos nos ensaios de restrição

Figura 71 - Resultados obtidos no ensaio de retração restringida em todos os strain gauges para as misturas 0,25_0%MFV.

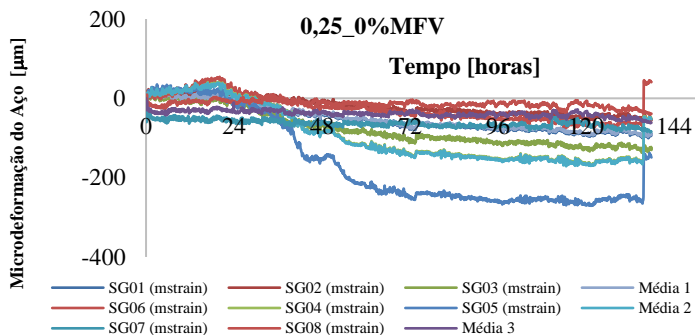


Figura 72 - Resultados obtidos no ensaio de retração restringida em todos os strain gauges para as misturas 0,25_0,2%MFV.

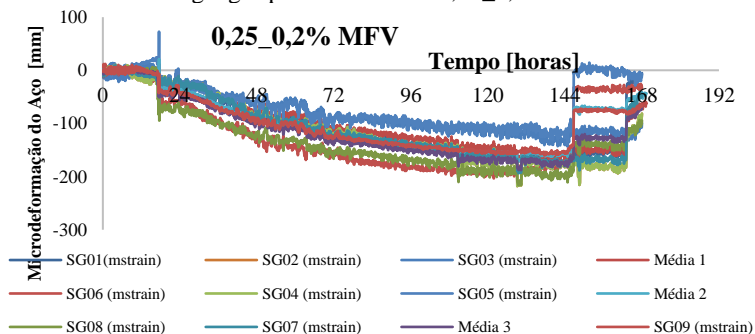


Figura 73 - Resultados obtidos no ensaio de retração restringida em todos os strain gauges para as misturas 0,25_0,25% MFV.

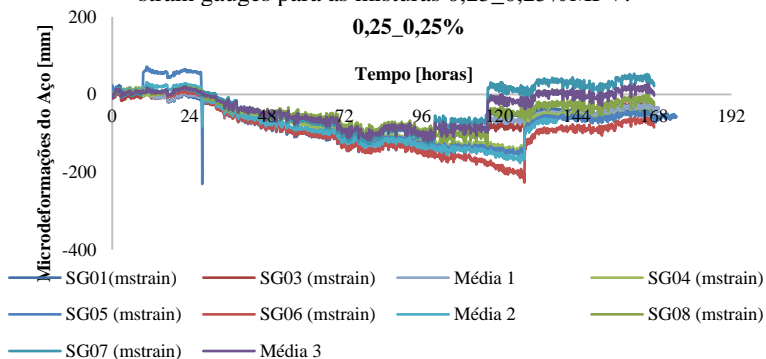


Figura 74 - Resultados obtidos no ensaio de retração restringida em todos os strain gauges para as misturas 0,25_0,3% MFV.

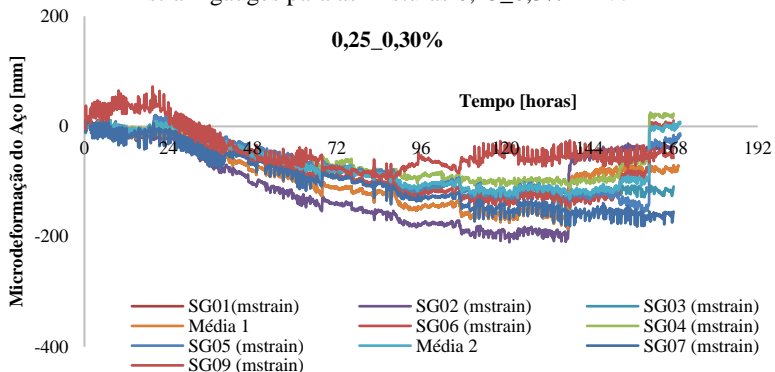


Figura 75 - Resultados obtidos no ensaio de retração restringida em todos os strain gauges para as misturas 0,32_0 % MFV.

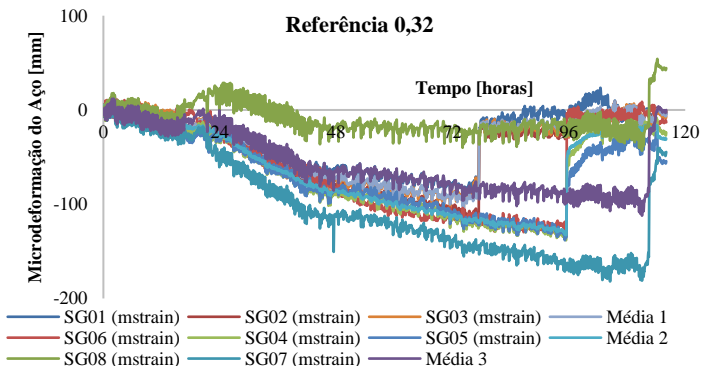


Figura 76 - Resultados obtidos no ensaio de retração restringida em todos os strain gauges para as misturas 0,32_0,2% MFV.

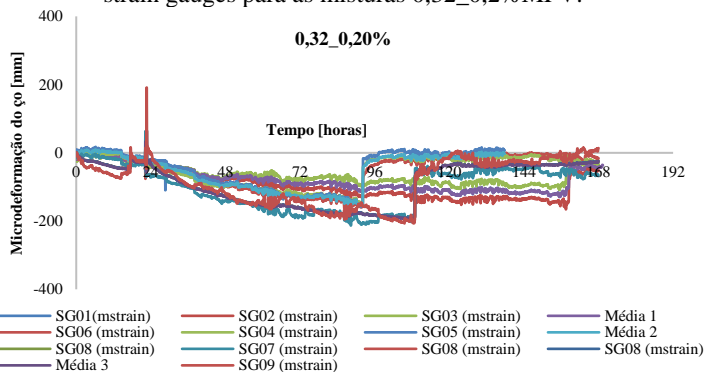


Figura 77 - Resultados obtidos no ensaio de retração restringida em todos os strain gauges para as misturas 0,32_0,25% MFV.

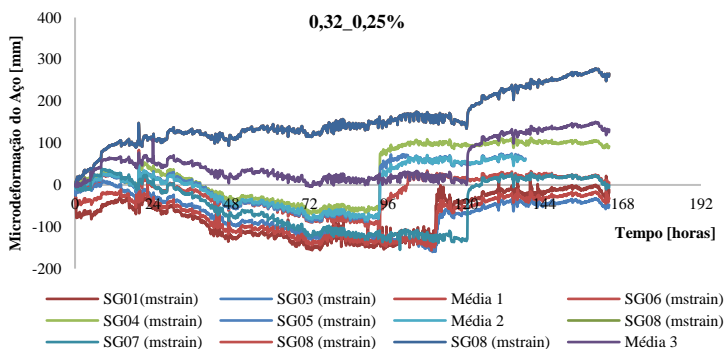
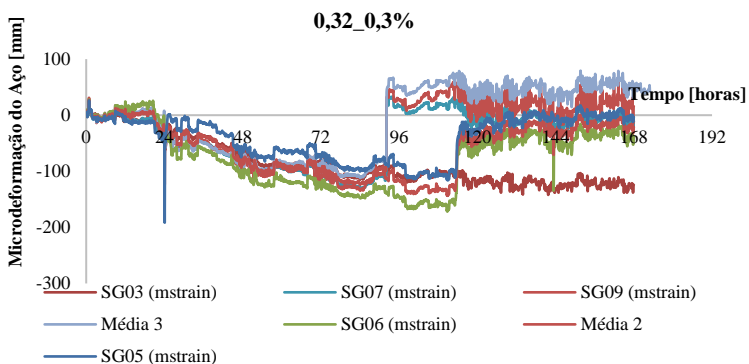


Figura 78 - Resultados obtidos no ensaio de retração restringida em todos os strain gauges para as misturas 0,32_0,3% MFV.



APÊNDICE C

Nesta seção é apresentado o resultado do ensaio de calorimetria dos traços de referência, utilizado para a escolha do ponto inicial para a análise dos resultados de deformação livre.

Figura 79 – Taxa de liberação de calor para as misturas de referência.

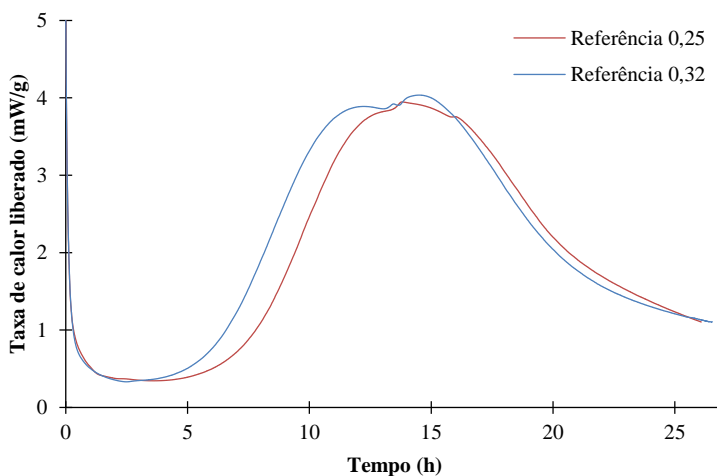


Figura 80 – Calor total liberado nas misturas de referência.

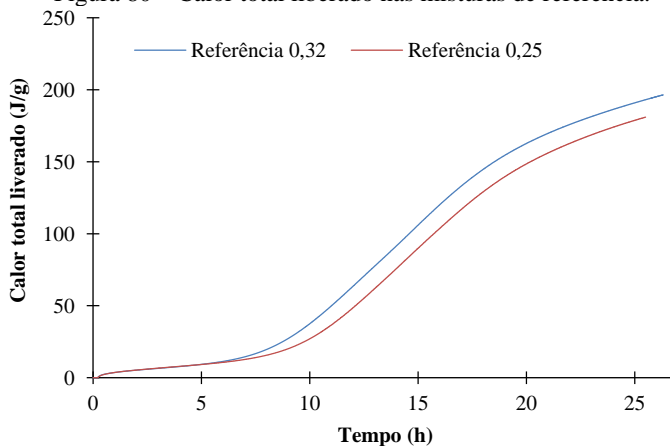


Tabela 32 - Teste de significância entre os grupamentos para os ensaios de tração indireta.

A/AgI	%MFV	Idade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0,25	0	3															
2	0,25	0	7	0,31														
3	0,25	0,2	3	0,00	0,00													
4	0,25	0,2	7	0,68	0,51	0,00												
5	0,25	0,25	3	0,00	0,02	0,36	0,00											
6	0,25	0,25	7	0,15	0,02	0,00	0,07	0,00										
7	0,25	0,3	3	0,00	0,04	0,24	0,01	0,75	0,00									
8	0,25	0,3	7	0,16	0,02	0,00	0,08	0,00	0,90	0,00								
9	0,32	0	3	0,04	0,25	0,03	0,09	0,19	0,00	0,29	0,00							
10	0,32	0	7	0,00	0,00	0,12	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00						
11	0,32	0,2	3	0,02	0,18	0,06	0,06	0,27	0,00	0,40	0,00	0,79	0,00					
12	0,32	0,2	7	0,00	0,00	0,16	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	0,77	0,00				
13	0,32	0,25	3	0,00	0,05	0,18	0,01	0,61	0,00	0,82	0,00	0,38	0,01	0,50	0,01			
14	0,32	0,25	7	0,00	0,00	0,17	0,00	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,80	0,00	0,96	0,01		
15	0,32	0,3	3	0,19	0,71	0,00	0,33	0,04	0,01	0,07	0,01	0,39	0,00	0,29	0,00	0,10	0,00	
16	0,32	0,3	7	0,49	0,70	0,00	0,75	0,01	0,04	0,02	0,05	0,15	0,00	0,10	0,00	0,02	0,00	0,48

Tabela 33 - Teste de significância entre os grupamentos para a idade de ruptura obtida nos ensaios de retração restringida.

A/AgI	%MFV	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,25	0							
2	0,25	0,2	0,024961						
3	0,25	0,25	0,601794	0,010181					
4	0,25	0,3	0,139313	0,321385	0,062941				
5	0,32	0	0,075009	0,000597	0,164259	0,004047			
6	0,32	0,2	0,762872	0,015339	0,801406	0,091179	0,117663		
7	0,32	0,25	0,256054	0,002712	0,484159	0,018285	0,425057	0,370833	
8	0,32	0,3	0,132311	0,323768	0,064003	0,959936	0,004137	0,090486	0,018663