



INVESTIGAÇÃO DO FENÔMENO DE AUTO-CICATRIZAÇÃO DE  
FISSURAS EM MICROCONCRETO DE ALTA PERFORMANCE  
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO E SISAL

Tamara Nunes da Cunha Moreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Rio de Janeiro  
Março de 2017

INVESTIGAÇÃO DO FENÔMENO DE AUTO-CICATRIZAÇÃO DE  
FISSURAS EM MICROCONCRETO DE ALTA PERFORMANCE  
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO E SISAL


Tamara Nunes da Cunha Moreira

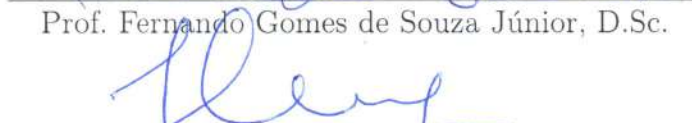
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO  
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE  
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
CIVIL.

Examinada por:

  
Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D.Sc.

  
Prof. Otávio da Fonseca Martins Gomes, D.Sc.

  
Prof. Fernando Gomes de Souza Júnior, D.Sc.

  
Prof. Samir Maghous, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
MARÇO DE 2017

Moreira, Tamara Nunes da Cunha

Investigação do fenômeno de auto-cicatrização de fissuras em microconcreto de alta performance reforçado com fibras de aço e sisal/Tamara Nunes da Cunha Moreira.  
– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XXI, 160 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 156 – 160.

1. selamento. 2. fibras de sisal. 3. fibras de aço. 4. auto-cicatrização. I. Toledo Filho, Romildo Dias. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*"Give me a place to stand and I  
will move de world"  
Arquimedes*

# Agradecimentos

Quero agradecer primeiro à Deus, que me deu a família que eu tenho, sem eles eu nada seria e por certo não estaria aqui. Foram meus pais que me ensinaram o valor da vida, das conquistas, das amizades, de saber ganhar e também desistir.

Agradeço a minha mãe por ter feito eu nunca me sentir sozinha, por sempre acreditar em mim até quando eu duvidava, por perseverar comigo e pelas inúmeras conversas ao pé da cama; por ter me mostrado que descobrir o que a gente gosta é mais importante do que apenas continuar. Sem ela hoje eu não estaria aqui.

Agradeço ao meu pai, aquele que eu sempre vi como exemplo e que através de um olhar consegue me dar forças pra prosseguir. Obrigada pai por acreditar que eu consigo mudar o mundo e por estar sempre ao meu lado para que eu possa fazer isso. Minhas inspirações são as histórias de vida sua e da mamãe.

Agradeço ao meu irmão, que por ser tão diferente de mim é exatamente o que eu preciso. Obrigada, Nunes, pelos ensinamentos de cálculo nos cafés da manhã, sem eles eu não seria a profissional que sou, e sem você não seria a pessoa que sou.

Ao meu namorado, companheiro de todas as horas, agradeço por suportar todos os compromissos desmarcados, todas as conversas de engenharia e todo o mau-humor que só quem se relaciona com um futuro mestre pode saber. Você é minha dose diária de alegria e de força.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Romildo Toledo, por todos os ensinamentos que me proporcionaram crescimento; e a todos os professores do PEC que me guiaram durante esses 2 anos de dura e satisfatória pesquisa. Agradeço à todo o apoio técnico que tive no NUMATS para realização de toda a minha pesquisa. Aos meus amigos do laboratório nessa jornada: Olívia, Dani, Mayara, Carol R, Carol G, Jéssica, Vanessa, Yassin, Alfredo, Karyne, Mostafa, Visar, Saulo, Berta e tantos outros que por lá passaram. Agradeço, também, aos técnicos por todo o tempo dispensado à mim: Anderson, Márcio, Renan, Alessandro, Rosângela, Hidekel, Alex.

Agradeço ao Professor Otávio por disponibilizar as instalações do CETEM para que eu pudesse realizar meus ensaios e ao Professor Ricardo e a Thaís do LIN, por toda dedicação e paciência durante os ensaios de tomografia.

Tenho a convicção de que saio hoje melhor do que eu entrei, dessa forma meu objetivo foi cumprido.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

INVESTIGAÇÃO DO FENÔMENO DE AUTO-CICATRIZAÇÃO DE  
FISSURAS EM MICROCONCRETO DE ALTA PERFORMANCE  
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO E SISAL

Tamara Nunes da Cunha Moreira

Março/2017

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Programa: Engenharia Civil

Nesta dissertação foi estudada a auto-cicatrização de fissuras de microconcretos de cimento-escória reforçados com frações volumétricas de fibras curtas ( $l_f=13$  mm) de aço e sisal de 1,0-1,28% e 0,28-0,64%, respectivamente. Fissuras de  $200 \mu\text{m}$  de abertura foram induzidas sob cargas de tração direta, aos 28 dias de idade, em corpos de prova de  $30 \times 60 \times 300$  mm, extraídos de placas de  $30 \times 600 \times 900$  mm. As amostras foram condicionadas em água (A) ou realizando-se ciclos de molhagem e secagem (M&S) durante 3 e 6 meses. Ensaios de tração direta foram realizados após o condicionamento e a partir dos resultados obtidos foram calculados os índices de recuperação da capacidade de carga (IRT) e de recuperação da rigidez (IRD). Ensaios termogravimétricos foram realizados para identificação das fases presentes na matriz e no material de preenchimento da fissura. Para o estudo da interação fibra-matriz e da cicatrização de microfissuras formadas nessa região foi realizado um pré-arrancamento de  $200 \mu\text{m}$  da fibra de aço da matriz e, após o condicionamento, ensaios de arrancamento. Através de tomografia computadorizada determinou-se o efeito da orientação/concentração das fibras ao longo da espessura e comprimento da placa que foram correlacionados com o comportamento na tração direta pós-cicatrização das amostras. A presença das fibras porosas de sisal permitiu uma maior nucleação de produtos hidratados ( $\text{CaCO}_3$  e CAH) nas fissuras pré-induzidas na tração direta. Microfissuras menores que  $60 \mu\text{m}$  foram seladas, resultando na recuperação do IRT. Resultados de tomografia indicaram maior concentração de fibras de aço no terço inferior das amostras resultando em fissuras de menor abertura e maior cicatrização. Fissuras de  $200 \mu\text{m}$  presentes na face superior das amostras apresentaram selamento parcial, afetando a performance do IRD.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

INVESTIGATION OF SELF-HEALING PHENOMENON IN HIGH  
PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE WITH STEEL AND  
SISAL FIBERS

Tamara Nunes da Cunha Moreira

March/2017

Advisor: Romildo Dias Toledo Filho

Department: Civil Engineering

In this dissertation was studied the self-healing phenomenon of cement-slag microconcretes reinforced with volumetric fractions of short fibers ( $l_f=13$  mm) of steel and sisal of 1,0-1,28% and 0,28-0,64%, respectively. Crack opening of 200  $\mu\text{m}$  were induced under direct tensile loads at 28 days of age in 30x60x300 mm specimens drawn from 30x600x900 mm slabs. Samples were conditioned in water (W) or wet and dry cycles (W&D) cycles for 3 and 6 months. Direct tensile tests were performed after conditioning and from the obtained results were calculated the load capacity recovery (IRT) and stiffness recovery (IRD) indexes. Thermogravimetric tests were performed to identify the phases present in the matrix and in the filler filling material. For the study of the fiber-matrix interface and the healing of microcracks formed in this region, a pre-slip of 200  $\mu\text{m}$  of a steel fiber from the matrix was conducted and, after conditioning, pull-out tests was performed. Computed tomography determined the effect of the orientation/concentration of fibers along the thickness and length of the slab and that were correlated with the behavior in the direct tensile post-healing behaviour of the samples. The presence of the porous sisal fibers allowed a higher nucleation of hydrated products ( $\text{CaCO}_3$  and CAH) in the pre-induced cracks in direct tensile. Micro-cracks smaller than 60  $\mu\text{m}$  were sealed resulting in IRT's recovery. CT Scan results indicated a higher concentration of steel fibers in the lower third of the samples, resulting in smaller cracks and greater healing. Cracks of 200  $\mu\text{m}$  located on the upper face of the samples showed partial sealing, affecting IRD performance.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	4
1.3 Organização do trabalho . . . . .	5
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>6</b>
2.1 Auto-cicatrização de concretos . . . . .	6
2.1.1 Definição . . . . .	6
2.1.2 Cicatrização de fissuras por processos naturais . . . . .	11
2.1.3 Fibra vegetal com papel de agente cicatrizador de fissuras . . . . .	16
2.1.4 Controle de Abertura de Fissura . . . . .	18
2.1.5 Recuperação Mecânica . . . . .	20
<b>3 Materiais e Métodos</b>	<b>22</b>
3.1 Materiais . . . . .	22
3.1.1 Cimento . . . . .	22
3.1.2 Escória . . . . .	23
3.1.3 Areia . . . . .	24
3.1.4 Fibras . . . . .	24
3.2 Métodos . . . . .	25
3.2.1 Método de mistura . . . . .	27
3.2.2 Ensaio de compressão . . . . .	29
3.2.3 Formação da fissura por tração direta e morfologia da fissura . . . . .	30
3.2.4 Ensaio de arrancamento . . . . .	32
3.2.5 Análise térmica . . . . .	34
3.3 Indicadores de recuperação mecânica - IRT e IRD . . . . .	35



<b>4</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>38</b>
4.1	Comportamento tensão x deformação na compressão . . . . .	38
4.2	Formação da Fissura das amostras sob tração direta . . . . .	39
4.3	Pré-indução das fissuras: curvas tensão x deslocamento na fissuração	56
4.3.1	Mistura 1 [A1,28S0,28] . . . . .	56
4.3.2	Mistura 2 [A1,28] . . . . .	60
4.3.3	Mistura 3 - [A0,64S0,64] . . . . .	68
4.3.4	Mistura 4 - [A1,00S0,28] . . . . .	74
4.4	Auto-cicatrização . . . . .	80
4.4.1	Resultados de auto-cicatrização obtidos para a mistura M1 . .	80
4.4.2	Resultados de auto-cicatrização obtidos para a mistura M2 . .	87
4.4.3	Resultados de auto-cicatrização obtidos para a mistura M3 . .	100
4.4.4	Resultados de auto-cicatrização obtidos para a mistura M4 . .	114
4.5	Produtos de hidratação formados nas matrizes e materiais de preen-	
	chimento . . . . .	126
4.5.1	Pastas de cimento <i>portland</i> . . . . .	126
4.5.2	Pasta de cimento + escória . . . . .	127
4.5.3	Material de preenchimento da fissura . . . . .	129
4.6	Cicatrização de fissuras na interface fibra-matriz . . . . .	130
4.6.1	Indução da fissura no ensaio de pré-arrancamento . . . . .	130
4.6.2	Estudo microestrutural da interface fibra-matriz . . . . .	133
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>136</b>
	<b>APPENDICES</b>	<b>138</b>
<b>A</b>	<b>Contagem de fibras</b>	<b>139</b>
A.0.1	[A1,28S0,28] . . . . .	139
A.0.2	[A1,28] . . . . .	144
A.0.3	[A0,64S0,64] . . . . .	148
A.0.4	[A1,00S0,28] . . . . .	152
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>156</b>

# Lista de Figuras

1.1	Descrição das rotas sintética e biológica capazes de conduzir à cicatrização. Adaptado de BLAISZIK <i>et al.</i> (2010) . . . . .	1
2.1	Definições de auto-cicatrização . . . . .	7
2.2	Possíveis mecanismos de <i>Self-Healing</i> (WU <i>et al.</i> , 2012) . . . . .	8
2.3	Exemplos de métodos de <i>Self-Healing</i> : (a) capsulas, (b) sistemas vasculares, (c) intrínseco. (BLAISZIK <i>et al.</i> , 2010) . . . . .	9
2.4	Sistema vascular de <i>self-healing</i> com tubo de vidro e agente cicatrizador: (a) tubo de vidro com o agente cicatrização (b) visão do tubo dentro do corpo de prova. (Traduzido de WU <i>et al.</i> (2012)) . . . . .	9
2.5	Esquema de funcionamento de <i>Self-Healing</i> com SAP (Adaptado de Ghent University - SECEMIN) . . . . .	10
2.6	Ramificação da fissura com introdução de SAP (Adaptado de Ghent University - SECEMIN) . . . . .	10
2.7	Precipitação de Carbonato de Cálcio na fissura. (KRELANI, 2015) .	12
2.8	Resultados de frequência de ressonância em concretos fissurados submetidos a diversos tratamentos. (Traduzido de YANG <i>et al.</i> (2011)) .	14
2.9	Curva típica tensão-deformação-abertura de fissura em compósitos engenheirados maduro. (Traduzido de YANG <i>et al.</i> (2009)) . . . . .	15
2.10	Taxa de cicatrização em compósitos engenheirados submetidos a ciclos de molhagem e secagem. (Traduzido de YANG <i>et al.</i> (2009)) . .	15
2.11	Frequência de ressonância em função do dano do material dos compósitos. (Traduzido de YANG <i>et al.</i> (2009)) . . . . .	16
2.12	Frequência de ressonância em função do tamanho da fissura em compósitos com fibras de PVA. (Traduzido de YANG <i>et al.</i> (2009)) .	17
2.13	Taxa de recuperação em função do número de fissuras (YANG <i>et al.</i> , 2009) . . . . .	17
2.14	Evolução da auto-cicatrização de fissuras com fibras vegetais (Toledo (1997)) . . . . .	18
2.15	Configuração do ensaio de tração direta utilizado em LI <i>et al.</i> (1996) <i>apud</i> YANG <i>et al.</i> (2009). Traduzido. . . . .	19

2.16	Flexão em quatro pontos para pré-fissuração. (SNOECK <i>et al.</i> , 2014)	19
2.17	Flexão em três pontos para pré-fissuração (FERRARA <i>et al.</i> , 2014)	19
2.18	Comparativo entre a recuperação da rigidez e o pré-dano imposto nas duas idades (3 dias e 6 meses). (Traduzido de YANG <i>et al.</i> (2009))	21
3.1	Granulometria do cimento	23
3.2	Granulometria da escória	23
3.3	Fibras: (a) aço; (b) sisal (13 mm)	25
3.4	Imagem da fibra de sisal e detalhe dos lúmens capazes de reter água. (Ferreira, 2016)	25
3.5	Programa experimental	26
3.6	Procedimento de moldagem para alinhamento de fibras	28
3.7	Corpo de prova cortado da placa e com entalhe lateral na seção transversal mediana (medidas em mm)	28
3.8	Corpos de prova escolhidos para indução da fissura aos, 28 dias, de acordo com cada mistura: (a) M1; (b) M2; (c) M3 e (d) M4	29
3.9	Nomenclatura adotada para os corpos de prova: exemplo com a amostra B26)	29
3.10	Configuração do ensaio de tração direta para indução da fissura, aos 28 dias: (a) ensaio, (b) detalhe do corpo de prova fissurado	30
3.11	Lupa com câmera digital: a) Medida da abertura de fissura b) grade para medir a abertura de fissura	31
3.12	Ilustração do local de contagem das fibras com as três regiões (R1, R2 e R3)	32
3.13	Corpo de prova de arrancamento com fibra protegida por cera	33
3.14	Ensaio final de arrancamento, em andamento, após 2 meses de ciclos de molhagem e secagem	33
3.15	Local de extração do material de preenchimento da fissura	35
3.16	Representação gráfica do valores utilizados para o cálculo do IRD	35
3.17	Representação gráfica do valores utilizados para o cálculo do $IRT_1$	36
3.18	Representação gráfica do valores utilizados para o cálculo do $IRT_2$	37
4.1	Curvas características de comportamento à compressão: (a) A1,28S0,28 (b) A1,28 (c) A0,64S0,64 (d) A1,00S0,28	39
4.2	Exemplo do padrão de fissuração nas faces para as amostras B26, C26 e A26	40
4.3	Ensaio de tomografia computadorizada na amostras A26 mostrando o corte na seção do topo para visualização das fibras na amostra A26:(a) Plano de corte, (b) Seção longitudinal xz	44

4.4	Ensaio de tomografia computadorizada na amostra A26 mostrando o corte na seção mediana para visualização das fibras:(a) Plano de corte, (b) Seção longitudinal xz . . . . .	44
4.5	Ensaio de tomografia computadorizada na amostras A26 mostrando o corte na seção do fundo para visualização das fibras:(a) Plano de corte, (b) Seção longitudinal xz . . . . .	45
4.6	Corte realizado na seção mediana do eixo X ao longo da altura em fotografia 3D da amostra A26 por meio de tomografia computadorizada	45
4.7	Ensaio de tomografia computadorizada na amostras B26 mostrando o corte ao longo da altura Y mostrando a diferença de concentração de fibras:(a) topo da amostra, (b) Seção mediana e (c) Seção do fundo da amostra . . . . .	46
4.8	Corte realizado na seção mediana do eixo X em fotografia 3D da amostra B26 por meio de tomografia computadorizada . . . . .	46
4.9	Seção transversal XY vista de cima com delimitações das regiões . . .	47
4.10	Distribuição de fibras na seção transversal das amostras: (a) A26, (b) B26 e (c) C26 . . . . .	48
4.11	Número de fibras em cada corpo de prova por região da seção transversal e por localização na placa na mistura M1 (a) Localização A, (b) Localização B e (c) Localização C . . . . .	49
4.12	Número de fibras em cada corpo de prova por região da seção transversal e por localização na placa na mistura M2 (a) Localização A, (b) Localização B e (c) Localização C . . . . .	50
4.13	Número de fibras em cada corpo de prova por região da seção transversal e por localização na placa na mistura M3 (a) Localização A, (b) Localização B e (c) Localização C . . . . .	51
4.14	Número de fibras em cada corpo de prova por região da seção transversal e por localização na placa na mistura M4 (a) Localização A, (b) Localização B e (c) Localização C . . . . .	52
4.15	Diferença no alinhamento das fibras ao longo da espessura dependendo da localização de extração da mesma. Exemplo com os corpos de prova: (a) A26 ; (b) B26 e (c) C26 . . . . .	55
4.16	Orientação das fibras de aço (0.5%) em matriz transparente (Adaptado de Van Mier <i>et al</i> , 2012) . . . . .	56
4.17	Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova C17, A18 e C18 da mistura A1,28S0,28 . . . . .	57
4.18	Formação da fissura da amostra C18 . . . . .	57
4.19	Formação da fissura da amostra C17 . . . . .	58

4.20	Formação da fissura da amostra A18 . . . . .	58
4.21	Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova B14, A16 e C14 da mistura A1,28S0,28 . . . . .	59
4.22	Formação da fissura da amostra C14 . . . . .	59
4.23	Formação da fissura da amostra B14 . . . . .	59
4.24	Formação da fissura da amostra A16 . . . . .	60
4.25	Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova B26, A26 e C26 da mistura 2 .	61
4.26	Formação da fissura da amostra C26 . . . . .	61
4.27	Formação da fissura da amostra B26 . . . . .	61
4.28	Formação da fissura da amostra A26 . . . . .	62
4.29	Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova B25, A25 e C25 da mistura 2	63
4.30	Formação da fissura da amostra C25 . . . . .	63
4.31	Formação da fissura da amostra B25 . . . . .	63
4.32	Formação da fissura da amostra A25 . . . . .	64
4.33	Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova B27, A23 e C27 da mistura 2 .	65
4.34	Formação da fissura da amostra C27 . . . . .	65
4.35	Formação da fissura da amostra B27 . . . . .	65
4.36	Formação da fissura da amostra A23 . . . . .	66
4.37	Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova B24, A24 e C24 da mistura 2 .	67
4.38	Formação da fissura da amostra C24 . . . . .	67
4.39	Formação da fissura da amostra B24 . . . . .	67
4.40	Formação da fissura da amostra A24 . . . . .	67
4.42	Formação da fissura da amostra C36 . . . . .	68
4.43	Formação da fissura da amostra B36 . . . . .	68
4.41	Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova B36, A36 e C36 da mistura 3 .	69
4.44	Formação da fissura da amostra A36 . . . . .	69
4.45	Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova B37 e C37 da mistura 3 . . . .	70
4.46	Formação da fissura da amostra C37 . . . . .	70
4.47	Formação da fissura da amostra B37 . . . . .	70
4.48	Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova A35, B35 e C35 da mistura 3 .	71
4.49	Formação da fissura da amostra C35 . . . . .	72

4.50	Formação da fissura da amostra B35 . . . . .	72
4.51	Formação da fissura da amostra A35 . . . . .	72
4.52	Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova A34, B34 e C34 da mistura 3 . . . . .	73
4.53	Formação da fissura da amostra C34 . . . . .	73
4.54	Formação da fissura da amostra B34 . . . . .	73
4.55	Formação da fissura da amostra A34 . . . . .	74
4.56	Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova A44, B46 e C46 da mistura 4 . . . . .	75
4.57	Formação da fissura da amostra C46 . . . . .	75
4.58	Formação da fissura da amostra A44 . . . . .	75
4.59	Formação da fissura da amostra B46 . . . . .	76
4.60	Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova C43, B43 e C47 da mistura 4 . . . . .	76
4.61	Formação da fissura da amostra C43 . . . . .	77
4.62	Formação da fissura da amostra C47 . . . . .	77
4.63	Formação da fissura da amostra B43 . . . . .	77
4.64	Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova A45 e C45 da mistura 4 . . . . .	78
4.65	Formação da fissura da amostra C45 . . . . .	78
4.66	Formação da fissura da amostra A45 . . . . .	79
4.67	Comparativo de tensões médias máxima e de primeira fissura aos 28 dias para todas as misturas . . . . .	79
4.68	Curvas de tensão x deslocamento para as amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A1,28S0,28] . . . . .	80
4.69	Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A1,28S0,28] . . . . .	82
4.70	Incompleto selamento da fissura do C18 . . . . .	82
4.71	Incompleto selamento da fissura do C17 . . . . .	83
4.72	Incompleto selamento da fissura do A18 . . . . .	83
4.73	Curvas de tensão x deslocamento para as amostras condicionadas em água durante 3 meses [A1,28S0,28] . . . . .	84
4.74	Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em água durante 3 meses [A1,28S0,28] . . . . .	85
4.75	Fissura de C14 após tratamento . . . . .	85
4.76	Fissura de B14 após tratamento . . . . .	86
4.77	Fissura de A16 após tratamento . . . . .	86

4.78	Curvas de tensão x deslocamento para as amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A1,28] . . . . .	87
4.79	Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A1,28] . . . . .	89
4.80	Incompleto selamento da fissura do C26 . . . . .	89
4.81	Incompleto selamento da fissura do B26 . . . . .	89
4.82	Incompleto selamento da fissura do A26 . . . . .	89
4.83	Curvas de tensão x deslocamento para as amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses [A1,28] . . . . .	90
4.84	Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses [A1,28] . . . . .	92
4.85	Selamento da fissura do C27 . . . . .	92
4.86	Incompleto selamento da fissura do B27 . . . . .	92
4.87	Incompleto selamento da fissura do A23 . . . . .	93
4.88	Curvas de tensão x deslocamento para as amostras condicionadas em água durante 3 meses [A1,28] . . . . .	93
4.89	Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em água durante 3 meses [A1,28] . . .	95
4.90	Selamento da fissura do C25 . . . . .	95
4.91	Incompleto selamento da fissura do B25 . . . . .	95
4.92	Incompleto selamento da fissura do A25 . . . . .	96
4.93	Curvas de tensão x deslocamento para as amostras condicionadas em água durante 6 meses [A1,28] . . . . .	96
4.94	Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em água durante 6 meses [A1,28] . . .	98
4.95	Selamento da fissura do C24 . . . . .	98
4.96	Incompleto selamento da fissura do B24 . . . . .	98
4.97	Incompleto selamento da fissura do A24 . . . . .	99
4.98	Curvas de tensão x deslocamento para as amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A0,64S0,64] . . . . .	101
4.99	Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A0,64S0,64] . . . . .	102
4.100	Incompleto selamento da fissura do C36 . . . . .	103
4.101	Incompleto selamento da fissura do B36 . . . . .	103
4.102	Incompleto selamento da fissura do A36 . . . . .	103

4.103	Nucleação de carbonato de cálcio na fibra de sisal da amostra C36: (a) Antes do condicionamento em ciclos de molhagem e secagem; (b) após o condicionamento em ciclos de molhagem e secagem . . . . .	104
4.104	Curvas de tensão x deslocamento para as amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses [A0,64S0,64] . . . . .	104
4.105	Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses [A0,64S0,64] . . . . .	106
4.106	Incompleto selamento da fissura do C37 . . . . .	106
4.107	Incompleto selamento da fissura do B37 . . . . .	106
4.108	Curvas de tensão x deslocamento para as amostras condicionadas em água durante 3 meses [A0,64S0,64] . . . . .	107
4.109	Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em água durante 3 meses [A0,64S0,64]	109
4.110	Incompleto selamento da fissura do C35 . . . . .	109
4.111	Incompleto selamento da fissura do B35 . . . . .	109
4.112	Incompleto selamento da fissura do A35 . . . . .	109
4.113	Nucleação de carbonato de cálcio na fibra de sisal . . . . .	110
4.114	Curvas de tensão x deslocamento para as amostras condicionadas em água durante 6 meses [A0,64S0,64] . . . . .	110
4.115	Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em água durante 6 meses [A0,64S0,64]	112
4.116	Incompleto selamento da fissura do C34 . . . . .	112
4.117	Incompleto selamento da fissura do B34 . . . . .	113
4.118	Incompleto selamento da fissura do A34 . . . . .	113
4.119	Curvas de tensão x deslocamento para as amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A1,00S0,28] . . . . .	115
4.120	Curvas de tensão x deformação de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A1,00S0,28] . . . . .	116
4.121	Incompleto selamento da fissura do C46 . . . . .	117
4.122	Incompleto selamento da fissura do B46 . . . . .	117
4.123	Incompleto selamento da fissura do A44 . . . . .	117
4.124	Nucleação de carbonato de cálcio na fibra de sisal na amostra C46 . .	117
4.125	Curvas de tensão x deslocamento para as amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses [A1,00S0,28] . . . . .	118
4.126	Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses [A1,00S0,28] . . . . .	120



4.127	Incompleto selamento da fissura do C47 . . . . .	120
4.128	Incompleto selamento da fissura do B43 . . . . .	120
4.129	Incompleto selamento da fissura do C43 . . . . .	120
4.130	Nucleação de carbonato de cálcio na fibra de sisal na amostra C43 . .	121
4.131	Curvas de tensão x deslocamento para as amostras condicionadas em água durante 3 meses [A1,00S0,28] . . . . .	121
4.132	Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em água durante 3 meses [A1,00S0,28]	123
4.133	Incompleto selamento da fissura do C45 . . . . .	123
4.134	Incompleto selamento da fissura do A45 . . . . .	124
4.135	Nucleação de carbonato de cálcio na fibra de sisal na amostra C45 . .	124
4.136	Curvas obtidas para a TG/DTG de pasta de cimento <i>portland</i> . . . .	127
4.137	TG/DTG de pasta de cimento + escória . . . . .	128
4.138	Análise térmica do produto de preenchimento da fissura. . . . .	129
4.139	Ensaio de arrancamento para pré-indução de fissuras . . . . .	130
4.140	Ensaio de arrancamento após 28 dias de cura . . . . .	131
4.141	Resultados dos ensaios de arrancamento após condicionamento em ciclos de molhagem e secagem durante 2 meses: (a) P2; (b) P5; (c) P6; (d) P7 . . . . .	132
4.142	Comparativo entre amostras controle e amostras fissuradas após 2 meses de condicionamento . . . . .	133
4.143	Interface fibra-matriz mostrando o deslizamento da fibra de aço na matriz aos 28 dias . . . . .	134
4.144	Densificação da interface fibra-matriz após 3 meses de ciclos de mo- lhagem e secagem resultando na formação de várias fissuras . . . . .	134
4.145	Tomografia computadorizada da amostra de pullout após indução de fissura: visão da fibra no interior da amostra de arrancamento . . . .	135
A.1	Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na loca- lização A da placa da mistura A1,28S0,28 . . . . .	140
A.2	Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na loca- lização B da placa da mistura A1,28S0,28 . . . . .	141
A.3	Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na loca- lização C da placa da mistura A1,28S0,28 . . . . .	142
A.4	Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na loca- lização A da placa da mistura A1,28 . . . . .	144
A.5	Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na loca- lização B da placa A1,28 . . . . .	145

A.6	Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização C da placa da mistura A1,28 . . . . .	146
A.7	Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização A da placa da mistura A0,64S0,64 . . . . .	148
A.8	Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização B da placa da mistura A0,64S,64 . . . . .	149
A.9	Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização C da placa da mistura A0,64S0,64 . . . . .	150
A.10	Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização A da placa da mistura A1,00S0,28 . . . . .	152
A.11	Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização B da placa da mistura A1,00S0,28 . . . . .	153
A.12	Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização C da placa da mistura A1,00S0,28 . . . . .	154

# Lista de Tabelas

2.1	Aberturas e números de fissura relacionadas à deformação imposta em concretos engenheirados. (Traduzido de YANG <i>et al.</i> (2011)) . . . . .	13
3.1	Composição química da escória de alto-forno . . . . .	24
3.2	Dosagem das misturas utilizadas (M1, M2, M3 e M4) . . . . .	27
3.3	Quadro resumo para misturas e tratamentos . . . . .	27
3.4	Procedimento de mistura . . . . .	28
4.1	Medida de abertura de fissura induzida em corpos de prova proveniente da mistura M1 [A1,28S0,28] . . . . .	41
4.2	Medida de abertura de fissura induzida em corpos de prova proveniente da mistura M2 [A1,28] . . . . .	41
4.3	Medida de abertura de fissura induzida em corpos de prova proveniente da mistura M3 [A0,64/S0,64] . . . . .	42
4.4	Medida de abertura de fissura induzida em corpos de prova proveniente da mistura M4 [A1,00/S0,28] . . . . .	43
4.5	Concentração de fibras por região da seção transversal ao longo das localizações A, B e C para as misturas M1 e M2 . . . . .	53
4.6	Concentração de fibras por região da seção transversal das amostras ao longo das localizações A, B e C para as misturas M3 e M4 . . . . .	53
4.7	Fração volumétrica de fibras calculada em cada região da seção transversal nas misturas M1 e M2 [%] . . . . .	54
4.8	Fração volumétrica de fibras calculada em cada região da seção transversal nas misturas M3 e M4 [%] . . . . .	54
4.9	Índices calculados das amostras de molhagem e secagem [A1,28S0,28] . . . . .	81
4.10	Índices calculados das amostras de água [A1,28S0,28] . . . . .	84
4.11	Índices calculados para as amostras de molhagem e secagem [A1,28] . . . . .	88
4.12	Índices calculados para as amostras de molhagem e secagem [A1,28] . . . . .	91
4.13	Índices amostras de submersão em água [A1,28] . . . . .	94
4.14	Índices amostras de submersão em água durante 6 meses [A1,28] . . . . .	97
4.15	Tabela resumo de índices M2[A1,28] . . . . .	99

4.16	Índices amostras de ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A0,64S0,64] . . . . .	102
4.17	Índices amostras de ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses [A0,64S0,64] . . . . .	105
4.18	Índices amostras de submersão em água durante 3 meses [A0,64S0,64]	108
4.19	Índices amostras de submersão em água durante 6 meses [A0,64S0,64]	111
4.20	Tabela resumo de índices M3[A0,64S0,64] . . . . .	114
4.21	Índices amostras de ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A1,00S0,28] . . . . .	116
4.22	Índices amostras de ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses [A1,00S0,28] . . . . .	119
4.23	Índices amostras de ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A1,00S0,28] . . . . .	122
4.24	Tabela resumo da mistura M4[A1,00S0,28] . . . . .	124
4.25	Porcentagens de produtos da pasta de cimento obtidos por análise térmica . . . . .	127
4.26	Porcentagens de produtos da TG/DTG da pasta de cimento + escória	128
A.1	Quantidade e concentração de fibras que cortam a seção transversal das amostras por região da placa da mistura 1 [A1,28S0,28] . . . . .	143
A.2	Quantidade e concentração de fibras que cortam a seção transversal das amostras por região da placa da mistura 2 [A1,28] . . . . .	147
A.3	Quantidade e concentração de fibras que cortam a seção transversal por região da placa da mistura 3 [A0,64S0,64] . . . . .	151
A.4	Quantidade e concentração de fibras que cortam a seção transversal por região da placa da mistura 4 [A1,00S0,28] . . . . .	155

# Lista de abreviaturas

**CAD** Concreto de Alto Desempenho

**LVDT** *Linear Variable Differential Transformer*

**CP** Corpo de Prova

**ASTM** *American Society for Testing and Materials*

**CPV-ARI** Cimento *Portland* tipo V - Alta Resistência Inicial

**ECC** *Engineered Cementitious Composites*

**EnCoRe** *Environmentally-friendly solutions for concrete with recycled and natural components*

**FRCC** *Fiber-Reinforced Cementitious Composites*

**SP** Superplastificante

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

A auto-cicatrização é um fenômeno antigo, datado desde a existência da vida. Plantas são capazes de se regenerar, animais, como as lagartixas, são capazes de se recompor, os seres humanos podem se recuperar de machucados, bem como re-cristalizar a estrutura óssea quando por algum motivo essa é danificada (BLAISZIK *et al.*, 2010). A Figura 1.1 apresenta a dinâmica de cicatrização biológica e sintética, demonstrando a capacidade de cicatrização que existe em seres não biológicos.

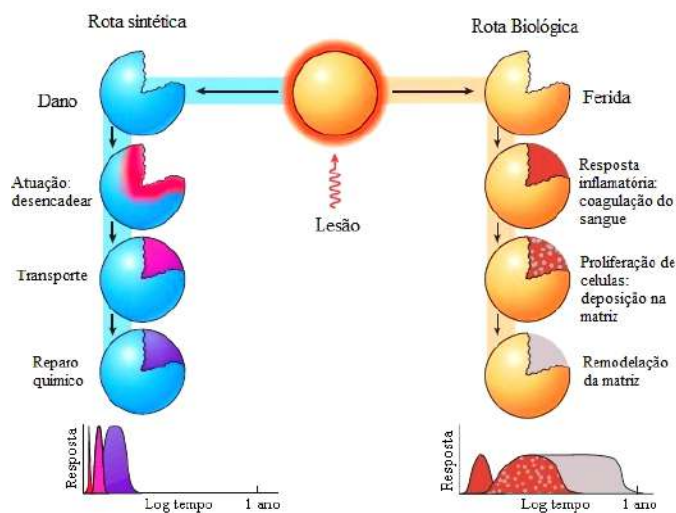


Figura 1.1: Descrição das rotas sintética e biológica capazes de conduzir à cicatrização. Adaptado de BLAISZIK *et al.* (2010)

Os altos custos com produção e manutenção das obras de estruturas e construção civil tem gerado uma demanda por estruturas com capacidade de auto-cicatrização, resultando em economia com serviços de manutenção, já que elas apresentariam maior durabilidade. Apenas a título de informação, a média anual de custos de manutenção de pontes nos EUA é aproximadamente \$5,2 bilhões e análises de ciclo

de vida revelam que custos indiretos com engarrafamentos e perdas associadas à produtividade representam 10 vezes o valor dos custos de reparo e manutenção das estruturas (TC, 2012). Isso reforça a prerrogativa de desenvolvimento de materiais auto-cicatrizantes.

O aparecimento de fissuras, em estruturas de concreto, durante a sua vida útil, seja devido a fenômenos naturais como gradiente térmico ou retração autógena, seja por ações de sobrecarga, provocando deformações excessivas ou outros fatores, é previsto na NBR 6118 que define uma abertura máxima de 0,4 mm para ambientes sem agressividade e de 0,2 mm ambientes com alta agressividade. (MIHASHI e NISHIWAKI, 2012). Fissuras, em uma visão geral, promovem um impacto negativo no compósito/estrutura, não apenas no comportamento mecânico mas também em sua durabilidade, criando caminhos para entrada de agentes agressivos que deterioram o concreto e suas armaduras, comprometendo sua vida útil (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013).

Na literatura, estudos mostram que o concreto possui a capacidade de se cicatrizar após exposto a específicas condições, sobretudo água ou umidade. A água tem uma papel importante no processo de cicatrização. O primeiro fenômeno é a combinação do dióxido de carbono ( $CO_2$ ) com água, resultando em  $H_2CO_3$  que se dissocia em  $CO_3^{2-}$ . Concretos são compostos por  $Ca^{2+}$  que combinado com  $CO_3^{2-}$  resulta em  $CaCO_3$  (carbonato de cálcio). Dessa maneira se dá a formação do carbonato de cálcio que se precipita na fissura de forma a selá-la. É importante ressaltar que o processo de cicatrização é uma combinação de hidratação tardia e selamento da fissura por carbonato de cálcio. Ferrara *et al* (2014) reportaram melhora na performance mecânica governadas pela auto-cicatrização.

No caso do concreto fibroso, para que ele seja auto-cicatrizante existem três premissas a serem perseguidas: a presença de agentes para a auto-cicatrização, intrínsecos ou não; volume de fibras suficiente para controle de fissuração e a definida orientação das fibras em relação aos esforços (FERRARA *et al.*, 2011).

No caso das matrizes cimentícias de alta performance, seu baixo fator água/cimento é fundamental para garantir a cicatrização intrínseca das fissuras, já que grãos anidros de cimento encontram-se na estrutura da mesma. Essa cicatrização ocorre através da hidratação desses grãos anidros quando em contato com a água, conferindo-o possível ganho de resistência através da formação de produtos hidratados. (NEVILLE, 2002)

A substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares, tais como a escória de alto-forno e cinza volante, além de permitir o barateamento da produção, por se tratar de materiais provenientes do resíduo do ferro gusa e da termoelétrica, traz outras vantagens ao concreto, como por exemplo, o apelo ambiental que a substituição evoca para o compósito, com a menor emissão de  $CO_2$  para a at-

mosfera; e por fim, a hidratação deste tipo de material não é tão rápida quanto a do cimento, conferindo, então, ao material maduro a possibilidade de auto-cicatrização.

É sabido que a capacidade de cicatrização depende da abertura de fissura que a amostra apresenta, já que fissuras menores podem se cicatrizar mais rápido que fissuras maiores. Os mais difundidos estudos de auto-cicatrização em concretos fibrosos ((FERRARA *et al.*, 2014), (YANG *et al.*, 2009), (SNOECK *et al.*, 2014), (KRELANI, 2015)) promoveram indução de fissuras, em formato triangular, através do ensaio de flexão, resultando em diversas fissuras com pequenas aberturas, o que faz com que a cicatrização seja mais rápida e eficaz. KRELANI (2015) estudou a cicatrização de concretos de alta performance, antes e após condicionamento, tendo constatado que a evolução do fechamento de fissuras sob cargas de flexão é visível e que os resultados tangentes à recuperação das propriedades mecânicas foram bastante significativos. As amostras mostraram uma capacidade de cicatrização significativa e, em alguns casos, um completo selamento da fissura. Contudo, por vezes, não é dessa maneira que as fissuras aparecem nas construções, principalmente em elementos sob tração direta, em que as faces das fissuras são paralelas. Assim, o objetivo dessa dissertação é a indução de uma única fissura através de ensaio de tração direta, de forma a estudar os mecanismos de cicatrização da mesma. As fissuras induzidas tinham abertura média de 200  $\mu\text{m}$  e para que isso fosse possível foi introduzido um entalhe para concentração de tensões e aporte de uma única fissura no compósito.

Para controle da fissuração e possibilidade de fechamento das fissuras, autores como YANG *et al.* (2009) e L. *et al.* (2014) utilizaram fibras de alto módulo em cargas de flexão. Da mesma forma, utilizou-se, nesta pesquisa, fibras de aço em volume adequado para controlar a indução de fissura. A fibra de aço adotada é a mesma utilizada pelo último autor. Escolheu-se, como referência, uma mistura com adição de 1,28% de fibras de aço da DRAMIX com comprimento de 13 mm e diâmetro de 0,16 mm. Foi prevista uma segunda mistura na qual 1% de fibras de aço foi utilizada. Essas frações foram escolhidas por se serem tradicionalmente utilizado como reforço em concretos de alta performance.

Como ambientes com elevada umidade auxiliam a auto-cicatrização, buscou-se, no presente estudo, a distribuição da umidade no interior dos corpos de prova, utilizando-se fibras curtas de sisal. Esse procedimento foi inspirado nos resultados obtidos por Toledo (1997), no qual amostras com inserção de fibras de sisal e coco apresentaram um fechamento de fissura em ambiente com 100% de umidade relativa. As fissuras apresentadas em Toledo (1997) eram resultantes da retração restrita e compósitos com fibras de sisal apresentaram a selagem de fissuras de até 200  $\mu\text{m}$ . Dessa maneira, adicionou-se em ambas as misturas 0,28% de fibras curtas de sisal com comprimento de 13 mm. Busca-se que o papel da fibra vegetal nessas duas



misturas seja o de promotor da cicatrização através da dispersão de umidade.

Por fim, uma última mistura, em que se reduziu o volume de fibras de aço para 0,64% e aumentou-se o de sisal para esse mesmo teor, foi estudada. Pretendia-se, nesse caso, verificar se as fibras de sisal poderiam adicionalmente ao papel promotor da cicatrização atuar como reforço secundário no controle da fissuração.

Busca-se o estudo dos fenômenos envolvidos na auto-cicatrização de microconcretos, bem como a avaliação do desempenho mecânico das misturas apresentadas. Os objetivos estão descritos com pormenores na seção seguinte.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho é composto por um objetivo principal que se resume no desenvolvimento de um microconcreto que seja capaz de cicatrizar fissuras com média de abertura de 200  $\mu\text{m}$ , produzidas sob cargas de tração direta, quando condicionados em água ou submetidos a ciclos de secagem e molhagem.

Para que fosse avaliada a efetividade da cicatrização, desenvolveu-se dois índices de recuperação mecânica: o índice de recuperação de capacidade de carga ( $IRT_1$ ) que é uma relação entre as tensões máximas pós-fissuração na idade de indução da fissura (28 dias) e na idade após o condicionamento realizado (3 ou 6 meses),  $IRT_2$  que representa a relação entre a tensão máxima na indução de fissura e a tensão no mesmo deslocamento após o condicionamento e o índice de recuperação do dano (IRD) que se configura na relação entre os módulos de elasticidade também nas duas idades citadas.

Para que o objetivo primário fosse alcançado, traçou-se quatro outros objetivos:

O primeiro se configura na avaliação da adição de 0,28% da fibra de sisal como agente acelerador da auto-cicatrização nas misturas com 1,00% e 1,28% de fibras de aço;

O segundo é a avaliação da fibra de sisal não apenas como agente cicatrizador mas também como agente de reforço secundário para controle da fissuração. Para tanto foi produzida uma mistura com 0,64% de fibras de aço e 0,64% com fibras de sisal;

O terceiro objetivo é avaliar a influência da distribuição e orientação das fibras. Para tanto foi moldada uma placa de 30 x 600 x 900 mm que permitiu uma orientação preferencial do reforço fibroso;

Por fim, o quarto e último objetivo visou entender o mecanismo de cicatrização na escala microestrutural. Para tanto, foram avaliados, através de análise térmica, tanto o produto de preenchimento das fissuras, bem como das matrizes de cimento e cimento + escória. Realizou-se, ainda, ensaios de arrancamento de uma única fibra de aço. Tais ensaios foram realizados após a cicatrização de micro-fissuras

formadas na zona interfacial pela imposição de um pré-arrancamento de 200  $\mu\text{m}$  da fibra. Ensaios de tomografia computadorizada foram realizados buscando identificar os micro-danos na região interfacial, antes e após o condicionamento em ciclos de molhagem e secagem.

### **1.3 Organização do trabalho**

A dissertação divide-se em 5 capítulos, a saber:

\* Capítulo 1: Introdução com apresentação de motivação, objetivos e organização do trabalho.

\* Capítulo 2: Apresentação da revisão bibliográfica dividida pelos temas que abordados na dissertação.

\*Capítulo 3: Descrição dos métodos e materiais empregados na pesquisa, bem como suas características e o porquê de sua aplicação e relação com o tema estudado.

\*Capítulo 4: Apresentação dos resultados e discussões atinentes a esses.

\*Capítulo 5: Apresentação de conclusões e sugestões para trabalho futuros.

Por fim, será apresentada a bibliografia referenciada neste trabalho.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

### 2.1 Auto-cicatrização de concretos

#### 2.1.1 Definição

Define-se por auto-cicatrização do concreto a propriedade do concreto em se recompor, auto-cicatrizando, realizando o fechamento de fissuras e muitas vezes recuperando as características mecânicas originais.

De acordo com o Instituto Japonês de Concreto (JCI), a auto-cicatrização se divide em dois grandes grupos. O primeiro denominado auto-cicatrização autógena e o último auto-cicatrização engenheirada. (TC , 2012)

Por auto-cicatrização autógena se traduz o processo natural de preenchimento e selamento das fissuras sem que haja nenhuma influência externa e/ou paralisações. De acordo com o JCI, *autogenous healing* é um fenômeno comum visto no corpo humano, machucados são cicatrizados automaticamente, sem a necessidade de intervenções cirúrgicas. O segundo grupo - auto-cicatrização engenheirada - é definido pela intencional e artificial cicatrização das fissuras, a auto-cicatrização é realizada por materiais ou instrumentos introduzidos previamente no concreto com essa função.

Combinações entre esses dois grandes grupos geraram derivações da definição de auto-cicatrização. A Figura 2.1 apresenta uma representação gráfica dessas derivações, a saber:

[1] Auto-cicatrização natural: compõe o grupo de auto-cicatrização de concreto onde o próprio se recompõe por alguma reação química ou obstrução mecânica, sendo as mesmas inerentes a ele.

[2] Auto-cicatrização autônoma: cicatrização involuntária de fissuras. Nesse caso, ocorrem introduções na composição do concreto como cinza volante e materiais expansivos.

[3] Auto-cicatrização com reparo ativado: é a auto-cicatrização proveniente de "materiais inteligentes" ou "smart systems", onde a mesma é estabelecida através de elementos artificiais e diferentes dos da composição do concreto.

As categorias supracitadas, ainda de acordo com o JCI, são associadas com os produtos formados, sendo o *natural healing* relacionado com hidratação residual de cimento anidro e carbonatação/precipitação de produtos de reações. (TC, 2012)

A RILEM (Associação Técnica de desenvolvimento de conhecimento das propriedades de materiais e performance de estruturas) propõe outra classificação, resumindo em um grupo denominado *self-healing* que se subdivide em *autogenic* e *autonomic*, a saber:

[1] Auto-cicatrização: qualquer processo desenvolvido pelo próprio material que envolva recuperação e melhora de performance.

[1.1] Autogênica: quando o processo de *self-healing* utiliza materiais que poderiam estar presente na composição do concreto e que não são especificamente utilizados para a auto-cicatrização.

[1.2] Autônoma: quando o processo utiliza materiais que não seriam encontrados na composição e foram apenas adicionado para este fim.

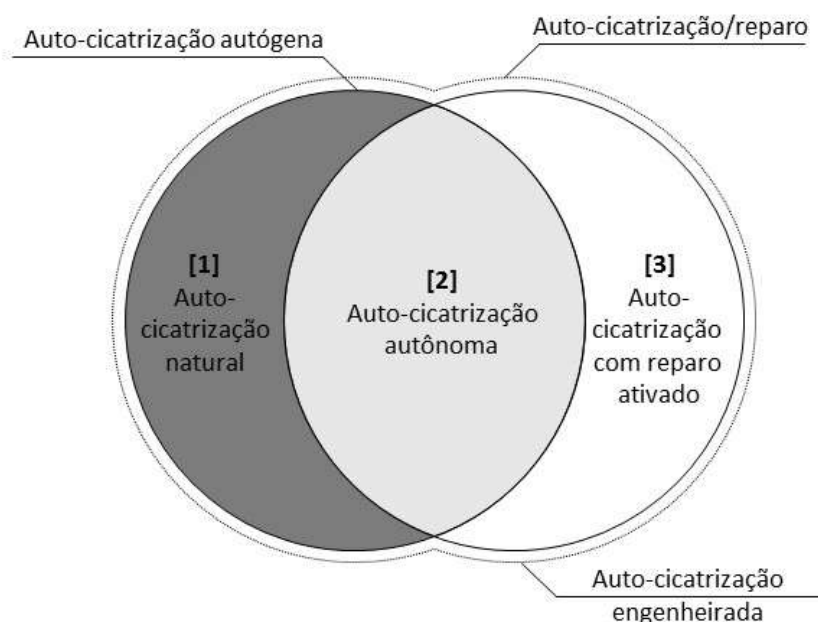


Figura 2.1: Definições de auto-cicatrização (Adaptada de KRELANI (2015) *apud* TC (2012))

Frisa-se que nenhuma dessas definições abarca o selamento da fissura sem recuperação das propriedades mecânicas.

Como reportado em WU *et al.* (2012) o fenômeno de *self-healing* é uma mistura de processos químicos e mecânicos. De acordo com experiências práticas e estudos, o fenômeno pode se dar devido a vários fatores, dentre eles podem ser destacados os expostos na Figura 2.2:

- a. Precipitação de carbonato de cálcio;
- b. Bloqueio das fissuras com impurezas da água e partículas soltas de concreto;
- c. Hidratação tardia de cimento anidro ou material cimentício
- d. Expansão do C-S-H

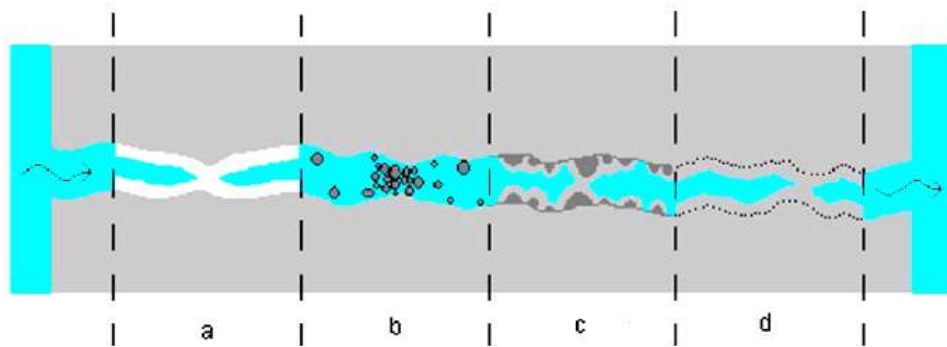


Figura 2.2: Possíveis mecanismos de *Self-Healing* (WU *et al.*, 2012)

Alguns desses fatores serão tratados mais detalhadamente no decorrer deste trabalho.

Quando Neville fez sua primeira abordagem sobre o assunto em 1995 concluiu que o *self-healing* era resultado da hidratação tardia dos grãos de cimento. Contudo, em trabalho posterior em 2002, ampliou sua definição para atestar que a auto-cicatrização por hidratação tardia ocorria apenas em concretos jovens, sendo a precipitação de carbonato de cálcio o motivo do *self-healing* em concretos envelhecidos em (NEVILLE, 2002).

Fato indiscutível na literatura é a presença de umidade para que o fenômeno de auto-cicatrização ocorra, tanto para a precipitação do carbonato de cálcio como para a hidratação tardia do cimento e material cimentício.

#### 2.1.1.1 Mecanismos de auto-cicatrização

Conforme apresentado, a auto-cicatrização pode ser dar naturalmente ou através da inserção de mecanismos para promover o fenômeno. Nessa última modalidade foram desenvolvidos alguns métodos, ilustrados na figura 2.3 e que serão brevemente descritos a seguir.

- a. e b. Cápsulas e sistemas vasculares

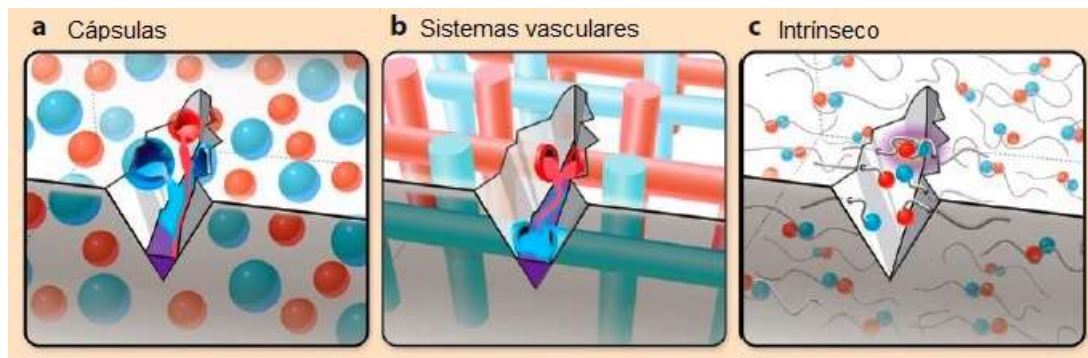


Figura 2.3: Exemplos de métodos de *Self-Healing*: (a) cápsulas, (b) sistemas vasculares, (c) intrínseco. (BLAISZIK *et al.*, 2010)

Capsúlas com agentes cicatrizadores são inseridos na mistura e ativados por um catalisador presente no concreto ao tempo que uma agente danificador atinge e fratura a cápsula, liberando o conteúdo da mesma. O mesmo princípio também pode ser aplicado em sistemas vasculares. É possível que o agente cicatrizar seja inserido dentro de fibras ocas, como fibras de vidro. A figura 2.4 traz um exemplo do sistema vascular com fibra de vidro, conforme discutido acima.

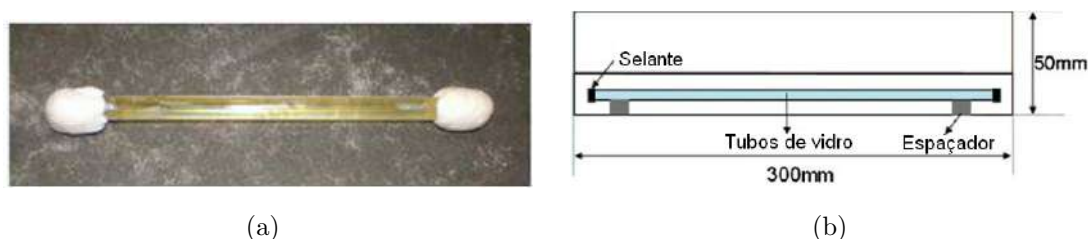


Figura 2.4: Sistema vascular de *self-healing* com tubo de vidro e agente cicatrizador: (a) tubo de vidro com o agente cicatrização (b) visão do tubo dentro do corpo de prova. (Traduzido de WU *et al.* (2012))

#### c. Intrínseco

A auto-cicatrização natural ocorre a partir de agentes internos que fazem parte da mistura, como, por exemplo, a hidratação tardia do cimento ou outros materiais cimentícios e a deposição de carbonato de cálcio por elementos presentes na mistura.

#### d. Uso do Polímeros Superabsorventes (SAP)

A auto-cicatrização com polímeros superabsorventes pode ocorrer pela simples inserção desses polímeros, possibilitando o aporte de água na matriz densa de concreto. Fato é, que a auto-cicatrização é dependente de umidade para ocorrer, nesse aspecto o SAP incha e mantém água em sua estrutura, liberando-a aos poucos para a matriz (KIM e SCHLANGEN, 2010). Outro fator relevante é a capacidade

do polímero de captar a umidade do ambiente, não necessitando contato direto com a água. Corpos de prova com presença de SAP apresentaram ganho de tensão entre 50-60% submetidos à umidade de 60%, enquanto corpos de prova em 90% de umidade apresentaram ganho de até 250% da tensão inicial (SNOECK *et al.*, 2014). O esquema básico de funcionamento é revelado pela Figura 2.5, onde as descrições das fases A, B e C estão nas linhas abaixo:

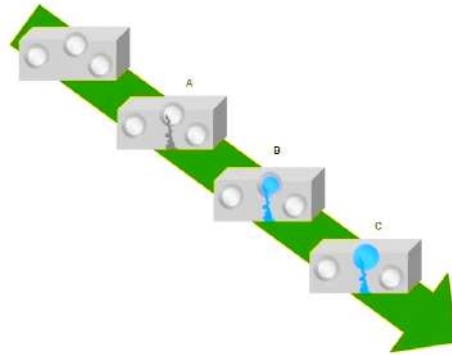


Figura 2.5: Esquema de funcionamento de *Self-Healing* com SAP (Adaptado de Ghent University - SECEMIN)

- A: Fissuração do concreto encontrando uma partícula do SAP
- B: Aporte de água pela fissura
- C: Inchamento completo do polímero e bloqueio da fissura

O polímero também funciona como contenção da fissura, derivando-a em menores fissuras e limitando a sua propagação, como se pode visualizar na Figura 2.6(Ghent University - SECEMIN)

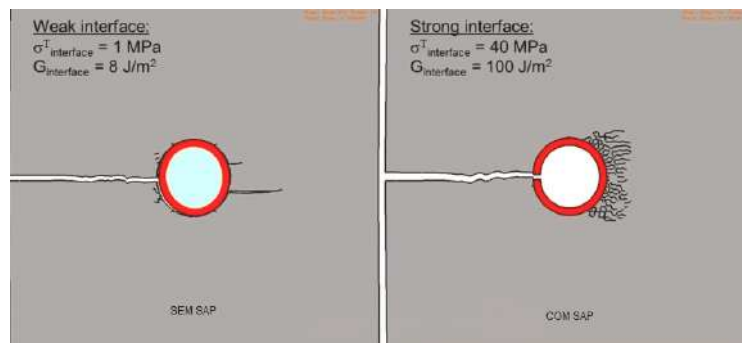


Figura 2.6: Ramificação da fissura com introdução de SAP (Adaptado de Ghent University - SECEMIN)

e. Bactérias

Existem dois métodos de formação de carbonato de cálcio pelas bactérias, autotrófico e heterotrófico. O primeiro ocorre na presença de dióxido de carbono, no qual os microrganismos transformam em carbonato. Já o segundo ocorre como resultado do crescimento de comunidades microbianas em diferentes habitats naturais, nos quais baseado nos sais e fontes de carbono presentes no meio, as bactérias são capazes de produzir cristais tais como carbonato de cálcio e carbonato de magnésio (SEIFAN *et al.*, 2016).

As precipitações de carbonato de cálcio na matriz cimentícia podem ainda ocorrer através de microrganismos urease positivo, por uma reação metabólica na presença de cálcio. Tal se resume na degradação da uréia em amônia e dióxido de carbono, o que aumenta o pH do meio e promove uma deposição de carbonato de cálcio na superfície (DE BELIE e DE MUYNCK (2008) *apud* SEIFAN *et al.* (2016)).

Estudos com bactérias embebidas no concreto possuem grande expressão no tocante a *self-healing*. A inserção das mesmas no concreto, porém, deve ser efetuada cuidadosamente, pois o pH elevado do ambiente pode inutilizar o organismo. Pesquisadores constataram que as bactérias, por mais resistentes que sejam, possuem uma vida útil limitada quando inseridas nas condições extremas do ambiente do concreto. Dessa maneira a introdução das mesmas sob a forma de esporo encapsuladas por materiais protetores como hidrogéis e argilas expandidas revela melhores condições para a sobrevivência da bactéria. Estudos também adotaram a opção de imersão em solução alcalina de modo a prepará-las para o ambiente do concreto (SEIFAN *et al.*, 2016).

### 2.1.2 Cicatrização de fissuras por processos naturais

Conforme discutido, existem inúmeros métodos para promover a cicatrização das fissuras presentes no concreto, desde elementos já presentes na mistura até inserção de bactérias. Dependendo do método escolhido o caminho para formação do carbonato de cálcio é diverso. Dessa maneira, a partir deste ponto, aduz-se apenas acerca do processo natural sem introdução de qualquer elemento externo.

A precipitação de carbonato de cálcio na superfície fissurada ocorre devido à presença de íons cálcio provenientes da dissolução de produtos de hidratação do cimento. Esse cálcio livre reage com o dióxido de carbono também dissolvido na água formando o carbonato de cálcio que precipita na fissura (EDVARDSEN, 1999).

De acordo com o autor, considerações termodinâmicas de formação do  $CaCO_3$  mostram que as circunstâncias a seguir apresentadas favorecem a precipitação do carbonato na fissura:

- \* Aumento da temperatura;



- \* Aumento do pH da água;
- \* Queda da pressão parcial do  $CO_2$  na água.

A figura 2.7 mostra o selamento de uma fissura em concreto através da deposição de carbonato de cálcio.



Figura 2.7: Precipitação de Carbonato de Cálcio na fissura. (KRELANI, 2015)

Pesquisa em estruturas compostas por argamassa com agregados de cal, presentes em uma companhia de água, revelam um alto índice de cicatrização por meio da precipitação de cristais de carbonato de cálcio (LUBELLI *et al.*, 2011). Tais estruturas estavam submetidas a um alto grau de umidade. Precipitações de carbonato de cálcio eram visíveis na superfície do muro, em fissuras com 50-70  $\mu\text{m}$  de abertura. A existência de carbonato de cálcio em finas camadas foi observada através de análise microscópica com polarização e fluorescência.

Outras estruturas também foram analisadas, onde o teor de umidade era variado, todas demonstraram re-precipitação de  $CaCO_3$ . A estrutura com umidade superior a 20% de umidade relativa revelou grandes cristais de carbonato de cálcio, enquanto a de menor umidade apresentou cristais pequenos. Umidades relativas superiores a 50% apresentaram além da formação de carbonato de cálcio, também portlandita e em algumas fissuras precipitações de gesso, o que revela a possibilidade de um potencial ataque de sulfato. Dessa forma, a existência de cal livre se revelou condição necessária para a cicatrização. Não obstante, a presença de umidade tem efeito determinante nesse fenômeno. Devido à baixa solubilidade dos componentes de cálcio, se faz necessário um aporte de água suficiente para dissolução e transporte para as regiões fissuradas (LUBELLI *et al.*, 2011).

YANG *et al.* (2011), em sua pesquisa de auto-cicatrização em pequenas idades com fibras de PVA de 13 mm, avaliaram o fechamento da fissura por meio de frequência de ressonância, comparando-a com os corpos de prova não fissurados. A fissuração feita por tração direta proporcionou diversos valores de abertura, dependendo da deformação imposta, conforme visualiza-se na tabela 2.1.

Os corpos de prova foram então submetidos a diferentes condicionamentos, tais

Abertura de fissura e quantidade em ECCs pré-fissurados

Deformação, %	0.3	0.5	1	2	3
Nº de fissuras	5	7	16	24	41
Média de abertura de fissura, $\mu\text{m}$	27	34	39	45	37
Máxima abertura de fissura, $\mu\text{m}$	50	50	60	70	95

Tabela 2.1: Aberturas e números de fissura relacionadas à deformação imposta em concretos engenheirados. (Traduzido de YANG *et al.* (2011))

quais:

CR1: molhagem e secagem 24h/24h, sendo que água era trocada a cada ciclo

CR2: molhagem e ar quente 24h/22h seguido de 2h de resfriamento, sendo que a água era trocada a cada ciclo

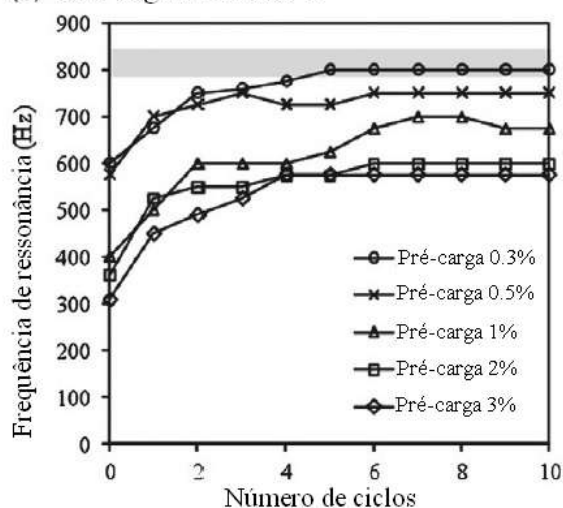
CR3: 90% U.R. e secagem 24h/24h

CR4: água a 20°C

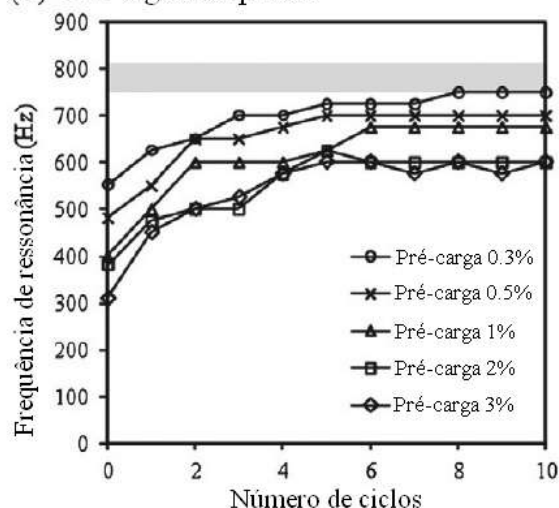
CR5: ar a 20°C e 50%U.R.

Os resultados obtidos estão esposados abaixo na figura 2.8. A faixa cinza representa um CP são, ou seja, que não foi submetido à fissuração. Observa-se que houve uma melhor recuperação para os CPs com abertura de fissura média de 27  $\mu\text{m}$  em todos os condicionamentos, exceto 90% de umidade/ar e apenas ar. À medida que a média da fissura aumenta o dano também é maior, mas existem ganhos significativos principalmente nas situações (a),(b) e (d).

(a) CR1- Água/ciclo de ar



(b) CR2- Água/ar quente



A hidratação contínua das partículas de cimento é mais rápida na água, sendo que essa também promove a dissolução do hidróxido de cálcio da matriz de concreto perto da superfície da fissura, o que é necessário para formação de carbonato de

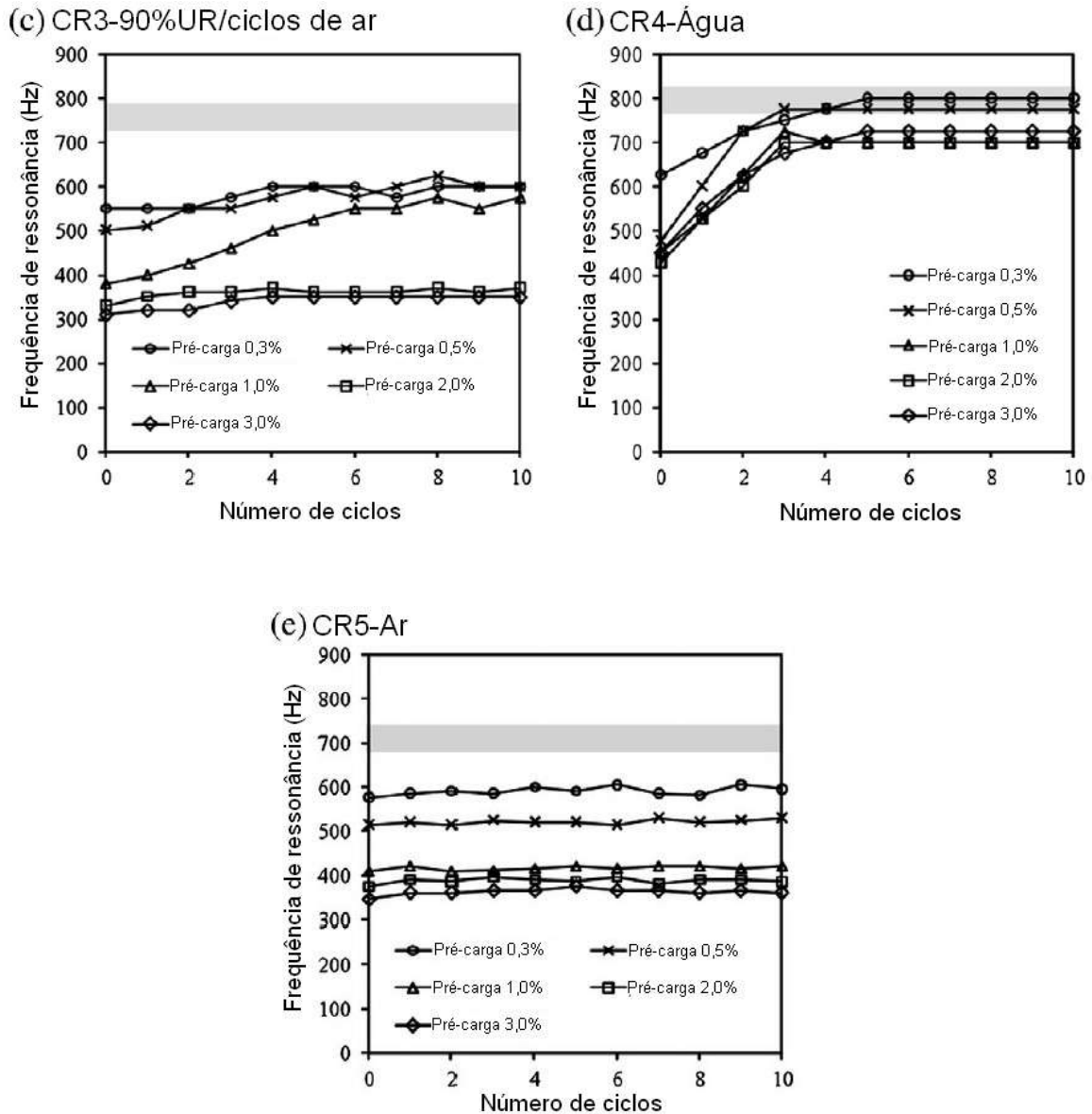


Figura 2.8: Resultados de frequência de ressonância em concretos fissurados submetidos a diversos tratamentos. (Traduzido de YANG *et al.* (2011))

cálcio. Mais importante, pela duração do ensaio, pouca carbonatação é capaz de ocorrer em ar. Dióxido de carbono em forma de gás reage com hidróxido de cálcio apenas em umidades relativas altas e após longos períodos de tempo. (NEVILLE (2002) *apud* YANG *et al.* (2011)).

Dessa forma, percebe-se que o meio e o tempo de condicionamento influenciam na cicatrização das fissuras, bem como no aparecimento e tamanho do carbonato de cálcio.

YANG *et al.* (2009) estudaram compósitos cimentícios engenheirados maduros (6 meses) condicionados em ciclos de molhagem e secagem. A abertura de fissura média localizada nos CPs pré-fissurados por tração direta foi de  $60 \mu\text{m}$  (3% de deformação),

conforme curva típica da tensão-deformação-abertura de fissura da figura 2.9.

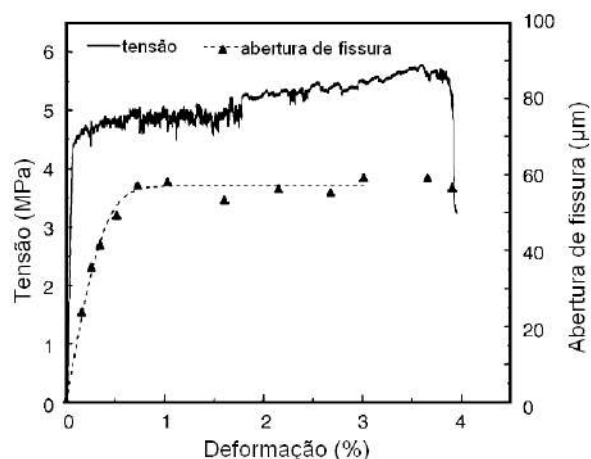


Figura 2.9: Curva típica tensão-deformação-abertura de fissura em compósitos engenheirados maduro. (Traduzido de YANG *et al.* (2009))

Os corpos de prova, submetidos a ciclos de molhagem e secagem, apresentaram a recuperação contida na figura 2.10 que apresenta a frequência de ressonância de CPs referente às diferentes deformações, bem como a amostra controle referente à faixa cinza do gráfico.

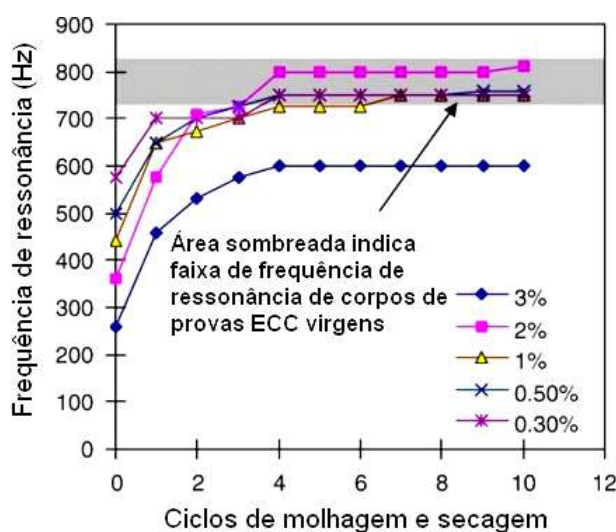


Figura 2.10: Taxa de cicatrização em compósitos engenheirados submetidos a ciclos de molhagem e secagem. (Traduzido de YANG *et al.* (2009))

De acordo com os autores, a frequência de ressonância de todos os corpos de prova estabilizou-se entre o quarto e quinto ciclo. Amostras submetidas a maiores deformações apresentam uma menor frequência após a fissuração devido à maior abertura e maior quantidade de fissuras. O artigo versa também sobre a relação entre o tamanho da fissura e o dano imposto ao concreto por ela. A figura 2.11 mostra o gráfico de deformação imposta versus a frequência de ressonância normalizada,

revelando que danos em formas de pequenas fissuras possuem um melhor cenário para cicatrização. É possível observar o aumento do dano com o caminhar do eixo X.

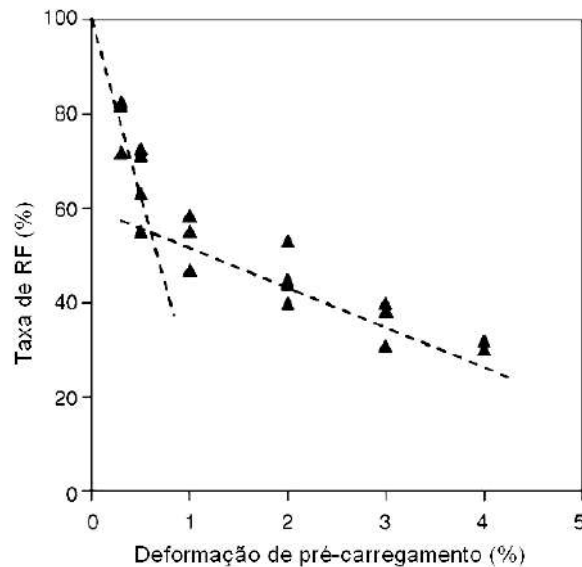


Figura 2.11: Frequência de ressonância em função do dano do material dos compósitos. (Traduzido de YANG *et al.* (2009))

Fora também realizado ensaio de tração direta com 0,5% de fibras de PVA para que fosse aberta apenas uma fissura, variando entre 0-300  $\mu\text{m}$ . A intenção era averiguar a relação entre cicatrização e abertura de fissura. A figura 2.12 mostra a recuperação das mesmas. Observa-se um limite de cicatrização em uma abertura de 150  $\mu\text{m}$ .

Fato é, conforme revela a figura 2.13, que à medida que o número de fissuras aumenta, o índice de dano normalizado também aumenta, quase chegando a 100%. Isto quer dizer que quanto maior a quantidade de fissuras, menor o dano que a matriz obtém, fazendo com que a cicatrização seja, por si só, mais fácil.

### 2.1.3 Fibra vegetal com papel de agente cicatrizador de fissuras

Toledo (1997) concluiu em sua pesquisa que fibras vegetais auxiliam no fechamento de fissuras. Apesar desse assunto não ser o cerne de sua pesquisa, constatou que fibras de coco e sisal adicionadas à matriz de concreto funcionaram como agente cicatrizantes, vez que as fissuras fecharam mais rapidamente do que no concreto sem a adição de tais fibras. As fissuras com tamanhos variando entre 50-900  $\mu\text{m}$  surgiram devido a restrições impostas à retração plástica e começaram a cicatrizar com 3 dias no compósito com fibra de sisal. A figura 2.14 mostra a evolução da auto-

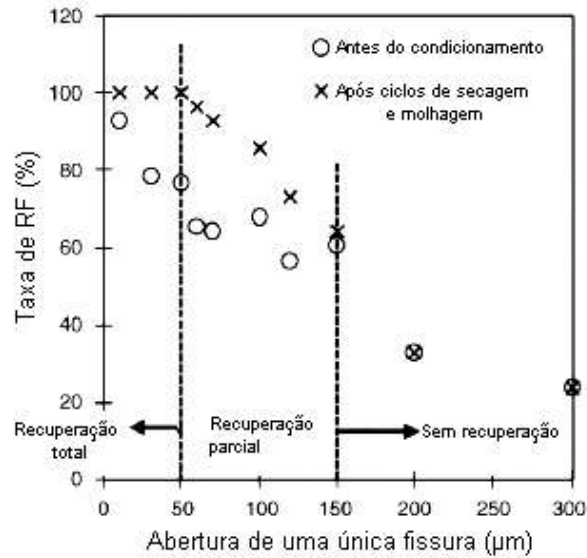


Figura 2.12: Frequência de ressonância em função do tamanho da fissura em compósitos com fibras de PVA. (Traduzido de YANG *et al.* (2009))

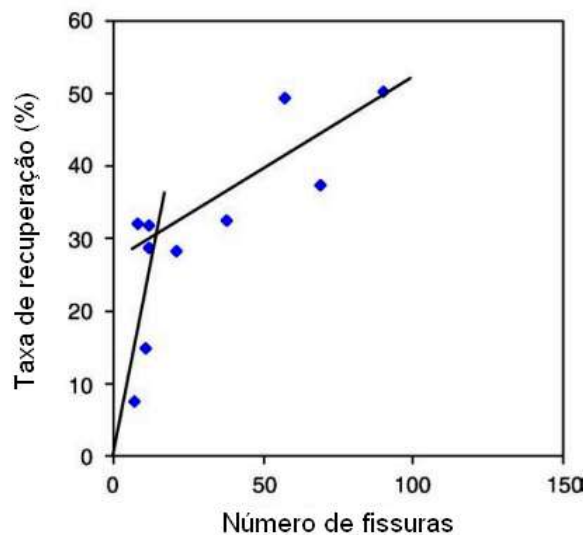


Figura 2.13: Taxa de recuperação em função do número de fissuras (YANG *et al.*, 2009)

cicatrização de fissuras com a introdução de fibras vegetais, bem como a amostra referência.

Observa-se que a amostra referência (A) apresentou uma diminuição das fissuras com o tempo, embora nenhuma tenha se cicatrizado. A amostra B, com fibras de sisal, com exceção de uma, apresentou cicatrização completa das fissuras. Por fim, a amostra com fibras de coco, obteve um desempenho intermediário, auto-cicatrizando algumas fissuras mas não todas. Tal diferença pode ser explicada pela diferença de capacidade de absorção de água entre a fibra de coco e a fibra de sisal.

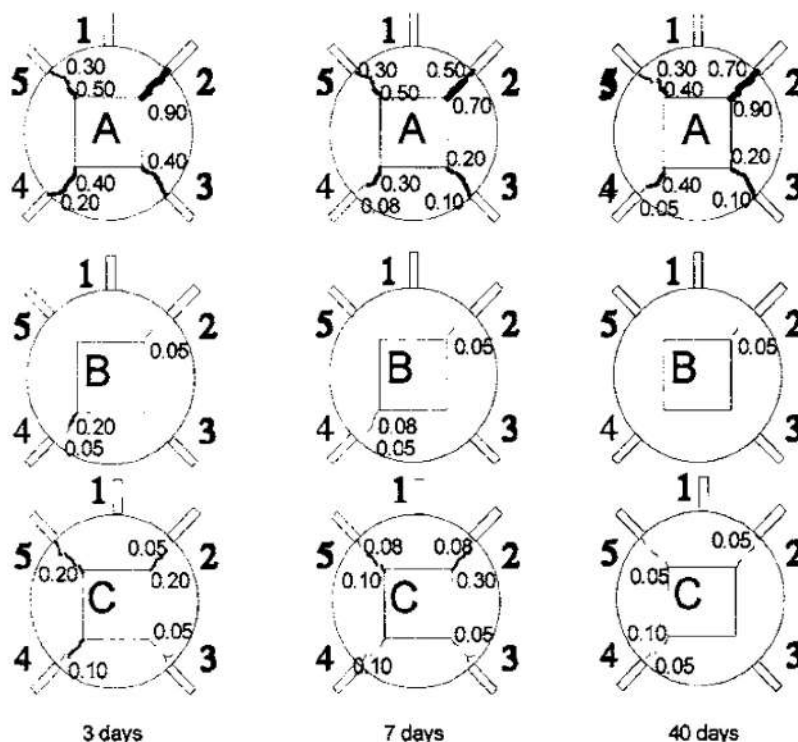


Figura 3.13 - Desenvolvimento das fissuras das espécimes A, B e C até 40 dias

Figura 2.14: Evolução da auto-cicatrização de fissuras com fibras vegetais (Toledo (1997))

## 2.1.4 Controle de Abertura de Fissura

YANG *et al.* (2009) desenvolveram em sua pesquisa um ECC com 2% de fibras de PVA para melhor controle de fissuras na múltipla fissuração e 0,5% para obter um comportamento de amolecimento e uma única fissura. Os autores versaram que para concretos convencionais e mesmo aqueles reforçados com de fibras de aço existe um desafio para controle da abertura de uma fissura na tração direta.

Como dito anteriormente, majoritariamente os estudos concernentes a *self-healing* optam pela abertura de fissura através do ensaio de flexão em três ou quatro pontos.

SNOECK *et al.* (2014) utilizaram mistura com 2% de PVA com 6 mm submetendo a ensaio de flexão em quatro pontos, conforme figura 2.16. Em uma velocidade de 0,002 mm/s, representando uma carga quase estática, foi constatado a formação de múltiplas fissuras com dimensões entre 6-50  $\mu\text{m}$ , resultando em uma abertura total aproximada entre 100-150  $\mu\text{m}$ .

FERRARA *et al.* (2014) utiliza o ensaio de flexão em três pontos, de acordo com Figura 2.17, para fissuração do corpo de prova resultando em fissuras residuais entre 100-200  $\mu\text{m}$ .

Dessa maneira, no tangente à indução de fissura através de flexão, o resultado

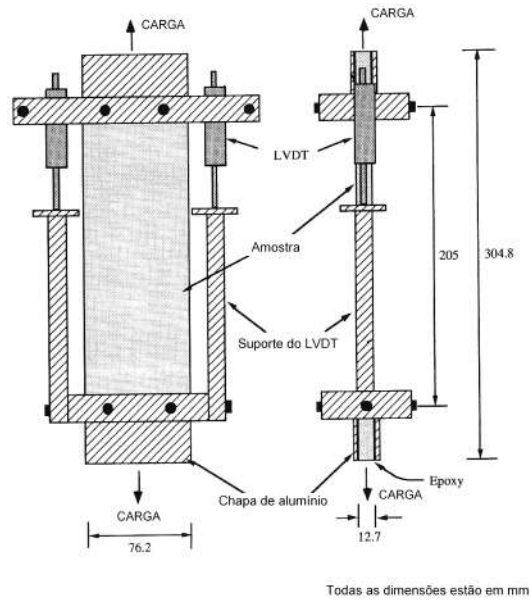


Figura 2.15: Configuração do ensaio de tração direta utilizado em LI *et al.* (1996) apud YANG *et al.* (2009). Traduzido.

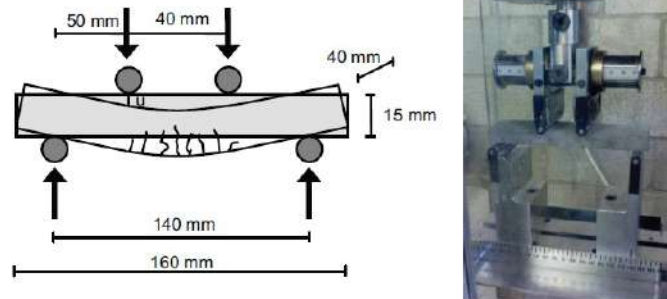


Figura 2.16: Flexão em quatro pontos para pré-fissuração. (SNOECK *et al.*, 2014)

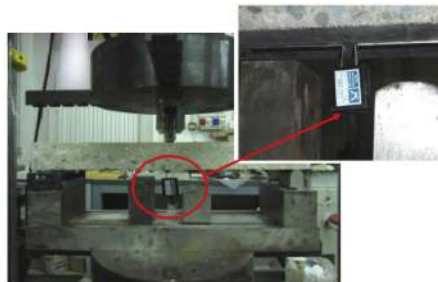


Figura 2.17: Flexão em três pontos para pré-fissuração (FERRARA *et al.*, 2014)



se dá com um valor de fissura total sendo a soma de pequenas fissuras menores. Ademais, o padrão de forma dessas fissuras auxiliam o processo de auto-cicatrização do concreto.

### 2.1.5 Recuperação Mecânica

A aferição da recuperação mecânica se dá a partir do reensaio dos corpos de prova após prévia indução de fissura e posterior condicionamento. Isto feito, os resultados são analisados através de gráficos comparando-os com valores de referência, ou através da elaboração de índices variados.

YANG *et al.* (2011) obtiveram um valor de fissuração média sob cargas de tração direta entre  $27 \mu\text{m}$  e  $45 \mu\text{m}$ , dependendo da deformação imposta, para compósitos do tipo ECC que tiveram fissuras pré-induzidas aos 3 dias de idade. A recuperação dos corpos de prova dependeu da forma de condicionamento (água/ar, água/ar quente e água) e de acordo com os autores, o melhor desempenho apresentado pelo compósito engenheirado (ECC) foi para o condicionamento em água e ar quente. No tocante à rigidez, os compósitos submetidos à maior deformação imposta, e também maior número de fissuras, apresentaram uma menor rigidez. O condicionamento que apresentou melhor desempenho foi o água/ar quente e a pior performance foi a submersão em água. O autor justifica o último através de uma possível alta pressão de umidade interna.

Os mesmos autores, em YANG *et al.* (2009), estudaram o fenômeno no mesmo ECC em matrizes maduras (6 meses) com 2% de fibras de PVA, conforme mencionado na seção anterior. A recuperação dependeu do dano imposto à amostra e seu condicionamento. Para o condicionamento em água foi relatado que a tensão de primeira fissura de todos os corpos de prova submetidos a cicatrização foi menor que a tensão de primeira fissura das amostras virgens (antes que qualquer dano fosse imposto).

A recuperação da rigidez se mostrou melhor na matriz mais madura do que na matriz jovem (ver figura 2.18). Os autores concluíram que a recuperação diminui à medida que aumenta o nível de dano imposto para as amostras com poucas idades. Para as amostras maduras, a recuperação foi mantida aproximadamente em 80% para todos os níveis de dano imposto. Essa diferença pode ter sido derivada do diferente padrão de fissuração sob o mesmo pré-dano imposto. Em geral, as amostras das primeiras idades desenvolveram um menor número de fissuras com uma maior abertura média quando comparado com as amostras maduras. As maiores fissuras nas primeiras idades refletem o menor desenvolvimento da interface fibra-matriz, que inclusive governa a rigidez e a abertura de fissura. (YANG *et al.*, 2011)

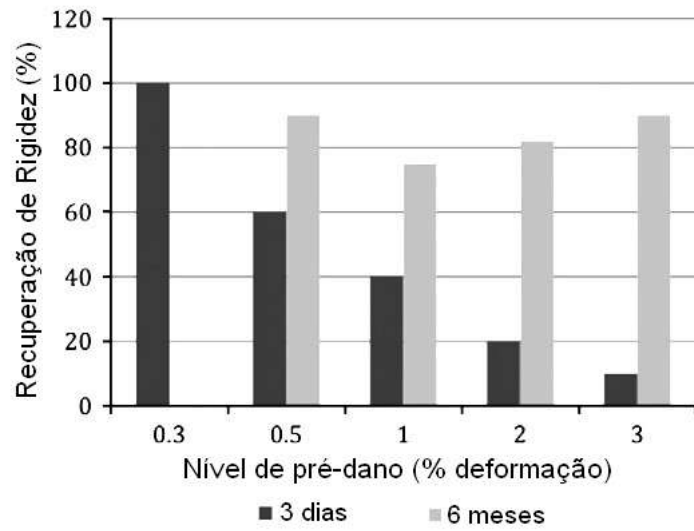


Figura 2.18: Comparativo entre a recuperação da rigidez e o pré-dano imposto nas duas idades (3 dias e 6 meses). (Traduzido de YANG *et al.* (2009))

# Capítulo 3

## Materiais e Métodos

Os materiais utilizados nessa pesquisa são todos encontrados no mercado nacional, com a exceção da fibra de aço, são eles: areia de rio, escória de alto forno, cimento brasileiro de alta resistência inicial (CPV-ARI) e fibras de sisal, além da água.

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Cimento

Foi utilizado cimento brasileiro de alta resistência inicial - CPV-ARI Maxx produzido pela Lafarge. A Figura 3.1 apresenta a granulometria do mesmo realizada através de análise a laser com lente 100, etanol e ultrassom durante 60 segundos. Os microconcretos de alta performance devem possuir constituintes finos, vez que isso é essencial para que alcancem altas resistências. Os parâmetros de controle desse tipo de cimento são observados na NBR 5733/91, na qual um resíduo máximo de 6% é aceito na peneira de 75  $\mu\text{m}$ .

Do ensaio de granulometria observa-se que cimento utilizado apresenta tamanho de partícula entre 0,2 - 200  $\mu\text{m}$ , com 60% da amostra com tamanho máximo de 20  $\mu\text{m}$ . Apresenta um resíduo de aproximadamente 2,9% retido na peneira 75  $\mu\text{m}$ .

Fora medida densidade do material através de picnômetro a gás Hélio para fins de dosagem da matriz, o resultado encontrado foi de 3,16  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

Com fulcro na NBR 7215/97, de forma a garantir a qualidade do cimento empregado realizou-se ensaio de resistência à compressão do mesmo, resultando em 49,9 $\pm$ 2,3 MPa de resistência à compressão aos 28 dias.

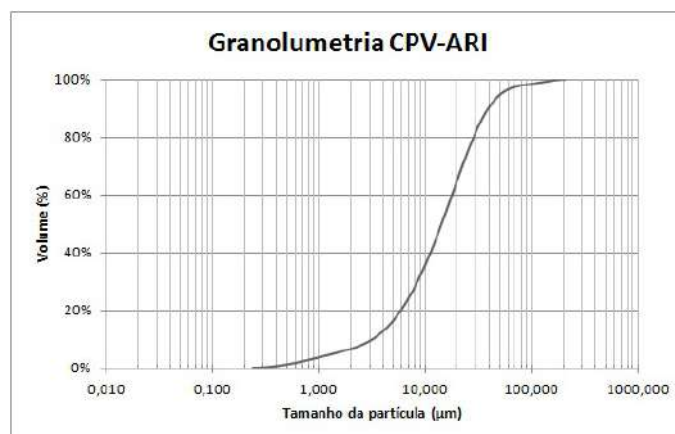


Figura 3.1: Granolometria do cimento

### 3.1.2 Escória

Foi realizada análise granulométrica na escória utilizada, no mesmo equipamento do cimento e com as mesmas condições de análise. A figura 3.2 apresenta o resultado obtido. Atualmente, não existem parâmetros de controle de qualidade na produção desse rejeito, dessa forma a análise prévia faz-se de extrema importância.

Dos resultados é possível concluir que a escória apresenta partículas com tamanho entre 0,3-200  $\mu\text{m}$ , com 60% da amostra com tamanho máximo aproximadamente 15  $\mu\text{m}$ . Apresenta um resíduo de 1,9% retido na peneira com abertura de 75  $\mu\text{m}$ .

A densidade do material foi medida através de picnômetro a gás Hélio resultando em uma massa específica igual a 2,98  $\text{g}/\text{cm}^3$  e área superficial média de 1,17  $\mu\text{m}^2$ . As partículas variam entre 0,3-200  $\mu\text{m}$  aproximadamente.

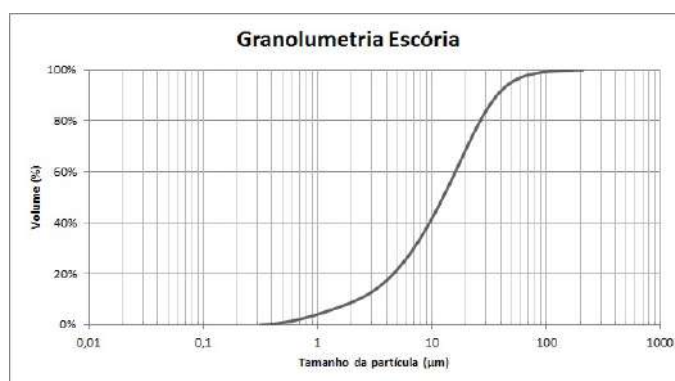


Figura 3.2: Granolometria da escória

A escória de alto forno utilizada possui a composição química apresentada na tabela 3.1. Observando essa composição é possível destacar a presença de grande quantidade de  $\text{CaO}$  e  $\text{SiO}_2$ , componentes essenciais para um material cimentício. Ressalta-se uma grande quantidade de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  quando comparado ao cimento utilizado, conforme esposado em AMARIO (2015).

Tabela 3.1: Composição química da escória de alto-forno

Composto	Composição(%)
CaO	48,00
<i>SiO<sub>2</sub></i>	29,02
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	12,86
MgO	5,12
<i>SO<sub>3</sub></i>	2,58
MnO	0,67
<i>TiO<sub>2</sub></i>	0,52
<i>K<sub>2</sub>O</i>	0,51
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	0,35
BaO	0,18
SrO	0,14
<i>ZrO<sub>2</sub></i>	0,05
<i>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	0,01

### 3.1.3 Areia

Foi utilizada na pesquisa areia lavada proveniente do Rio Guandu. A mesma fora seca ao sol durante 24h e peneirada em peneira de 2 mm, sendo utilizada a areia passante.

Possui massa específica igual a  $2,43 \text{ g/cm}^3$ , obtida com base na NBR 9776 para fins de dosagem da matriz.

### 3.1.4 Fibras

Conforme amplamente citado, fibras de sisal e aço foram utilizadas na mistura. A primeira derivada do beneficiamento da planta é uma fibra natural, por este motivo foi promovida uma lavagem para retirada das graxas e açúcares prejudiciais ao concreto. Após tal feito, as fibras foram secas em sala de  $38^\circ\text{C}$ , penteadas e cortadas em pedaços de 13 mm. A figura 3.3 apresenta as fibras utilizadas na mistura.

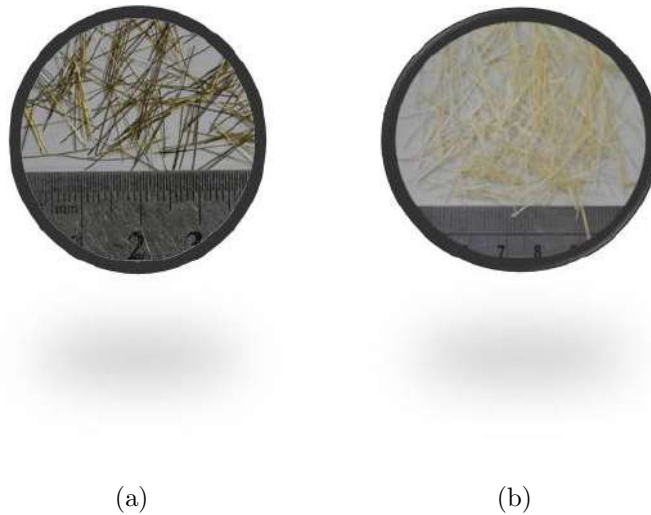


Figura 3.3: Fibras: (a) aço; (b) sisal (13 mm)

Para lavagem da fibra de sisal as mesmas foram imersas em água de torneira (21°C) e então aquecidas até 80°C. A temperatura foi mantida durante 2 horas, procedendo-se ao resfriamento. Após, as fibras foram lavadas em água corrente.

As fibras vegetais porosas detêm a propriedade de acumular água em seu interior e liberar para a matriz quando a mesma necessita. Na Figura 3.4 observa-se a estrutura de uma fibra de sisal e os lúmens acumuladores de água.

As fibras de aço utilizadas são do modelo DRAMIX OL 13/.16 mm da BEKA-ERT, de aço liso possuindo 13 mm de comprimento e 0,16 mm de diâmetro nominal. Módulo de elasticidade de 200 GPa e uma tensão de tração de 2750 N/mm<sup>2</sup>

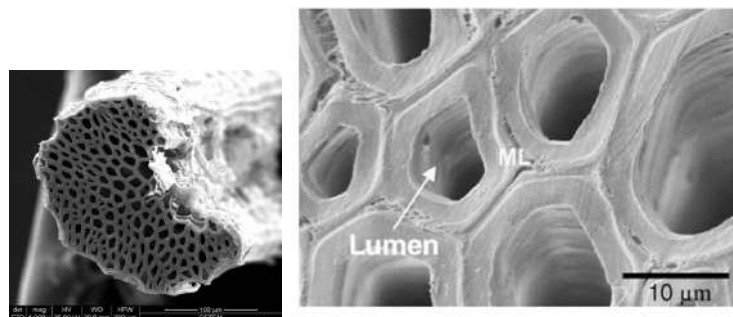


Figura 3.4: Imagem da fibra de sisal e detalhe dos lúmens capazes de reter água. (Ferreira, 2016)

## 3.2 Métodos

A metodologia deste trabalho foi assim pensada para que o fenômeno da autocicatrização fosse avaliado de forma máxima e concentrada. Perseguindo esse fim, estruturou-se planejamento experimental que melhor adequasse os ensaios aos objetivos finais, estando o mesmo apresentado na figura 3.5. A pesquisa foi dividida

em três fases: estudo do compósito, da interface e das matrizes. O primeiro foi realizado através da moldagem de quatro misturas, seguido de indução de fissura sob cargas de tração direta, condicionamento em água e ciclos de molhagem e secagem, seguido de novo ensaio de tração direta. Foram realizados ensaios de compressão para conhecimento da resistência obtida em cada mistura e ensaios de tomografia em algumas amostras para estudo da distribuição e orientação das fibras. A segunda fase compreendeu um estudo da interface fibra-matriz, buscando uma compreensão da evolução da adesão e a visualização do fechamento de micro-fissuras. Para tanto, foram realizados ensaios de arrancamento e micro-tomografia. Por fim, a terceira fase foi o estudo das matrizes de cimento e cimento + escória através de análises termogravimétricas no decorrer do tempo, buscando observar o papel da escória na dinâmica de hidratação e cicatrização. Nessa fase, foi também estudado, o material de preenchimento das fissuras através da mesma técnica.

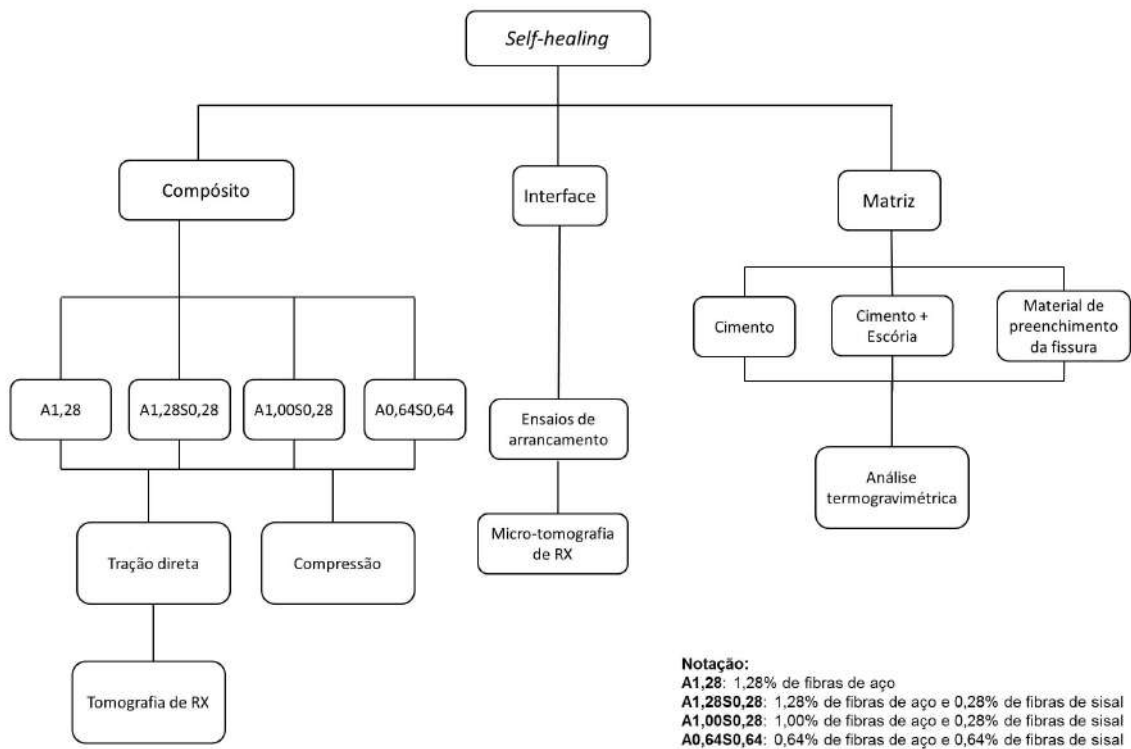


Figura 3.5: Programa experimental

Conforme supracitado, foram desenvolvidas 4 misturas de um microconcreto de alta performance reforçados com fibras de aço e sisal em distintas concentrações. As misturas, denominadas M1, M2, M3 e M4 e a dosagem das mesmas são apresentadas na tabela 3.2. A matriz utilizada foi adaptada da mistura que estava sendo estudada no âmbito do projeto de colaboração internacional (EnCoRe) apoiado pela União Europeia. A mistura utilizada como base foi a mesma estudada por KRELANI

(2015) em sua tese de doutorado no Instituto Politécnico de Milão.

Tabela 3.2: Dosagem das misturas utilizadas (M1, M2, M3 e M4)

Materiais	M1 [m <sup>3</sup> ]	M2 [m <sup>3</sup> ]	M3 [m <sup>3</sup> ]	M4 [m <sup>3</sup> ]
Cimento [kg]	600	600	600	600
Água [L]	200	200	200	200
Escória [kg]	500	500	500	500
Superplastificante [kg]	33	33	33	33
Areia [kg]	980	980	980	980
Fibras de aço [kg]	100	100	50	78
Fibras de sisal [kg]	3	-	7	3

De acordo com a Tabela 3.3 as misturas foram divididas de acordo com a quantidade de fibras e subdividida em tratamentos. Os tratamentos se desenvolveram durante três e seis meses dependendo da mistura selecionada.

Tabela 3.3: Quadro resumo para misturas e tratamentos

Mistura	Quantidade de fibras		Denominação	Tratamentos
	Aço [%]	Sisal [%]		
1	1,28	0,28	A1,28S0,28	3 meses em A e M&S
2	1,28	-	A1,28	3/6 meses em A e M&S
3	0,64	0,64	A0,64S0,64	3/6 meses em A e M&S
4	1,00	0,28	A1,00S0,28	3/6 meses em M&S e 3 meses em A

Notação: A: água  
M&S: Molhagem e Secagem

### 3.2.1 Método de mistura

A mistura foi produzida em laboratório com temperatura controlada ( $21 \pm 1^\circ\text{C}$ ) utilizando um misturador planetário com capacidade máxima de 50 L. O procedimento de mistura apresentado na tabela 3.4 foi comum a todas as misturas estudadas.

A figura 3.6 mostra a forma utilizada e ilustra como a moldagem da placa de 30 x 600 x 900 mm foi procedida. A moldagem foi realizada de forma propiciar o alinhamento das fibras, e para tanto, verteu-se o tambor, permitindo um deslizamento gradual do concreto auto-adensável da região inicial (ponto de lançamento) para o final da placa.

Depois de 48 horas a placa foi desmoldada e transferida para a câmara úmida (U.R. 95%). Após sete dias procedeu-se à preparação dos corpos de prova com o corte da placa. A placa de 90 cm foi cortada em 3 pedaços de aproximadamente 30



Tabela 3.4: Procedimento de mistura

<b>Atividade</b>	<b>Tempo (min)</b>
Adição e mistura dos secos (cimento + escória)	2
Adição de água e SP	2
Mistura da pasta	8
Adição da areia	2
Mistura da argamassa	8
Adição de fibras durante mistura	5
Mistura FRCC	5
<b>TOTAL</b>	<b>30</b>

em cada, sempre identificados em relação a orientação de moldagem. Dessa maneira, a parte referente ao pedaço mais perto do misturador foi chamada de C, enquanto a localizada no meio de B e, por fim, a localizada mais afastada de A (ver figura 3.6).

Após, procedeu-se ao corte dessas derivações em 9 corpos de prova com dimensões de 30 x 60 x 300 mm, resultando em 27 corpos de prova para cada mistura. O próximo passo se resumiu na inserção de entalhe de 10 mm em cada lado da seção transversal mediana, para concentração de tensões. A figura 3.7 mostra o estado final de cada corpo de prova após todo o procedimento de preparação.

Finalizado o procedimento, os corpos de prova foram devolvidos à câmara úmida até 28 dias de idade, quando foram induzidas as fissuras.

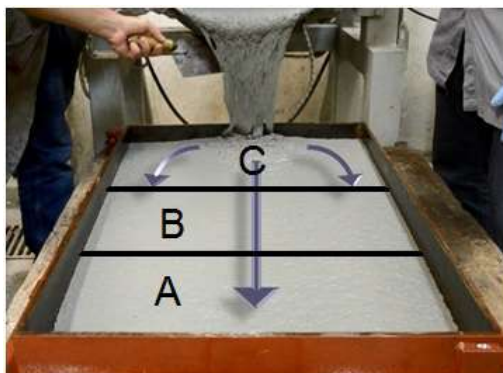


Figura 3.6: Procedimento de moldagem para alinhamento de fibras

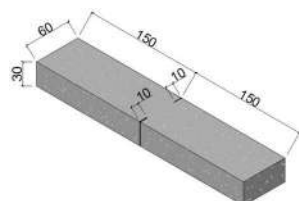


Figura 3.7: Corpo de prova cortado da placa e com entalhe lateral na seção transversal mediana (medidas em mm)

Para indução das fissuras foram escolhidos 3 corpos de prova das diferentes localizações da placa (A, B e C) para cada condicionamento, conforme mostrado em vermelho na figura 3.8. Além dessas amostras, foram selecionados, no mínimo, dois corpos de prova para atuarem como amostras de controle, isto é, amostras não fissuradas que seriam apenas referência no tempo de condicionamento (ver em laranja na figura 3.8).

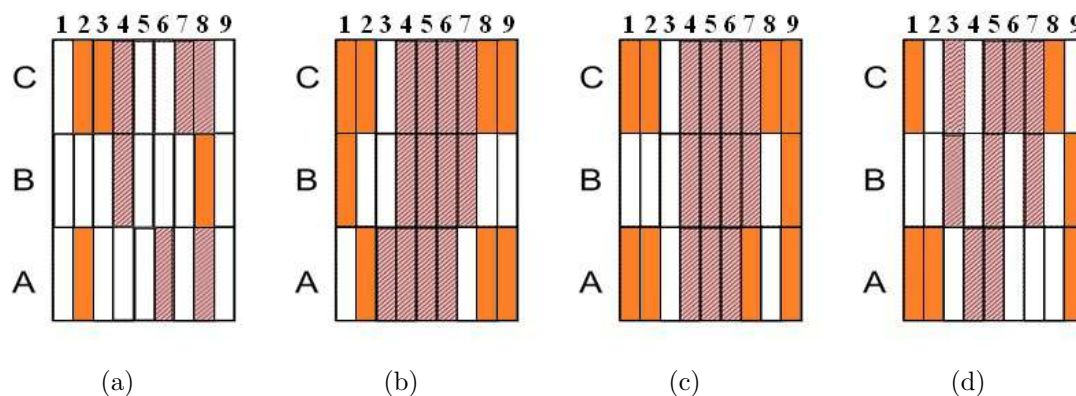


Figura 3.8: Corpos de prova escolhidos para indução da fissura aos, 28 dias, de acordo com cada mistura: (a) M1; (b) M2; (c) M3 e (d) M4

A nomenclatura desenvolvida para cada corpo de prova pretendeu englobar o número da mistura e a localização na placa em que o mesmo se encontra. Por exemplo, a amostra B26 pertence a mistura 2 na localização B da placa e posição 6. A figura 3.9 traduz o supracitado.

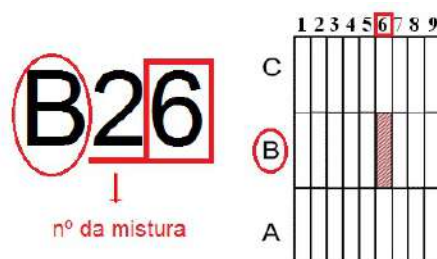


Figura 3.9: Nomenclatura adotada para os corpos de prova: exemplo com a amostra B26)

### 3.2.2 Ensaio de compressão

Apenas para conhecimento da resistência à compressão dos concretos, foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm, proveniente de cada mistura estudada. A desmoldagem foi realizada em 24 horas e as amostras ficaram em câmara úmida até 28 dias. Após esse período, foram realizados ensaios de compressão na máquina Shimadzu 1000 kN a uma velocidade de 0,3 mm/minuto.

### 3.2.3 Formação da fissura por tração direta e morfologia da fissura

As fissuras foram induzidas sob cargas de tração direta utilizando a prensa Shimadzu 300 kN. A abertura de fissura foi controlada por dois LVDTs posicionados um em cada lado do corpo de prova. A indução da fissura foi realizada com uma velocidade de 0,01 mm/min até que um dos LVDTs atingisse o deslocamento de 200  $\mu\text{m}$ . A figura 3.10 apresenta a configuração do procedimento de pré-fissuração.

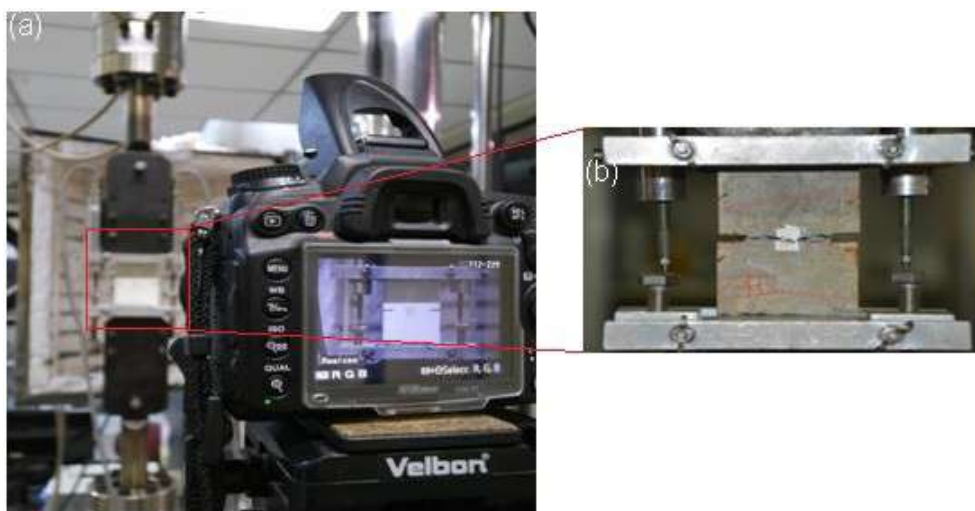


Figura 3.10: Configuração do ensaio de tração direta para indução da fissura, aos 28 dias: (a) ensaio, (b) detalhe do corpo de prova fissurado

#### 3.2.3.1 Medida de Abertura Fissura

Após a formação da fissura, os corpos de prova foram descarregados e suas fissuras pós-descarregamento medidas através de uma lupa com câmera digital de até 400x de aumento (veja Figura 3.11). Fotos foram tiradas ao longo da largura da fissura, sendo realizadas marcas com lápis para proporcionar análises de abertura de fissura no mesmo local após o condicionamento.

A imagem obtida foi processada usando o software Fiji, um processador de imagem. A abertura de fissura foi medida através de uma escala fixa de 90 pixels/mm e uma grade de área/pontos de 4 mm<sup>2</sup>, conforme Figura 3.11. Cerca de 20-30 medidas foram realizadas em cada corpo de prova, sendo quatro em cada quadro e 5-7 quadros no total. Foram, então, calculadas as médias de todas as aberturas medidas, resultando na abertura de fissura nas faces das amostras.

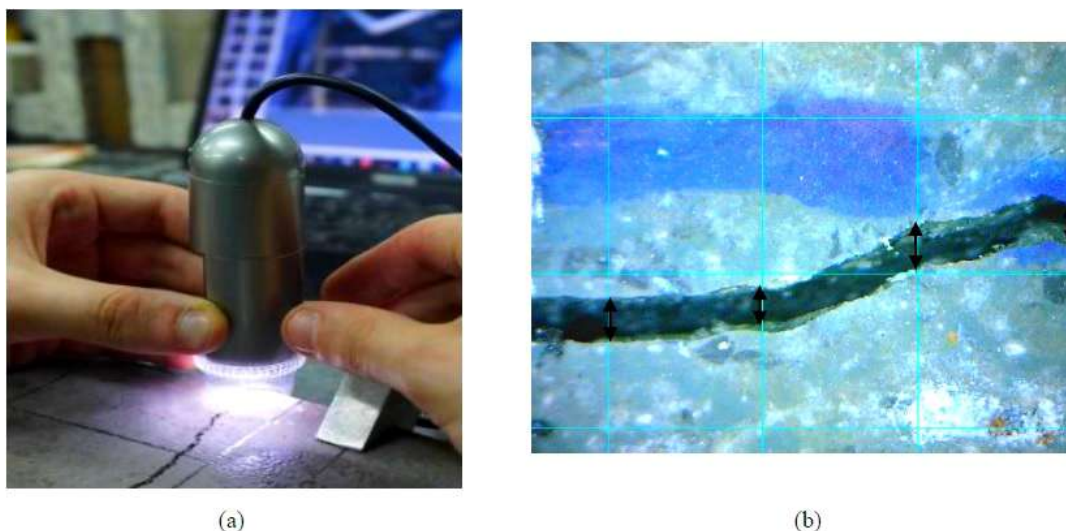


Figura 3.11: Lupa com câmera digital: a) Medida da abertura de fissura b) grade para medir a abertura de fissura

### 3.2.3.2 Condições de Cicatrização

Após a indução das fissuras e medida das fissuras abertas, os corpos de prova foram submetidos a dois condicionamentos: ciclos de molhagem e secagem [24h/24h] por 3 e 6 meses e condicionamento em água durante o mesmo período, conforme descrito na tabela 3.3.

O condicionamento foi realizado em laboratório com temperatura e umidade controladas ( $21 \pm 1^\circ\text{C}$  e  $65 \pm 3\%$ ).

Corpos de prova não fissurados foram submetidos às mesmas condições de cicatrização.

### 3.2.3.3 Medida de Fechamento de Fissura

Para acompanhamento da evolução do fechamento de fissuras, fotos com a lupa foram realizadas após 3 e 6 meses de condicionamento, utilizando o mesmo procedimento descrito no item *Medida de Abertura de Fissura*.

### 3.2.3.4 Ensaio de Tração Direta nas amostras cicatrizadas e de controle

Após decorrido o período de condicionamento, os corpos de prova foram ensaiados à tração direta até a ruptura. O ensaio foi realizado utilizando a mesma configuração e velocidade quando da indução da fissura.

### 3.2.3.5 Tomografia de raios X

De forma a determinar a distribuição das fibras na placa moldada foi realizado ensaio de tomografia computadorizada de raios X em algumas amostras após o ensaio

final de tração direta. Os ensaios foram realizados em tomógrafo vtomex—m 300, com tensão de 120 kV, corrente 250 uA e tamanho de pixel de 117 um.

### 3.2.3.6 Densidade de fibras

A densidade de fibras na seção transversal do entalhe foi desenvolvida através da captura de 91 imagens da seção transversal com auxílio de lupa. Após isso, as fotos foram reunidas em um mosaico e, com o auxílio do programa Fiji, foi identificada cada fibra com uma coordenada X e Y. As informações coletadas foram analisadas por código de programação desenvolvido no programa MatLab.

A seção transversal das amostras foi dividida em três regiões, quais sejam R1, R2 e R3, tomando-se como base a região próxima ao topo da placa (ver figura 3.12).

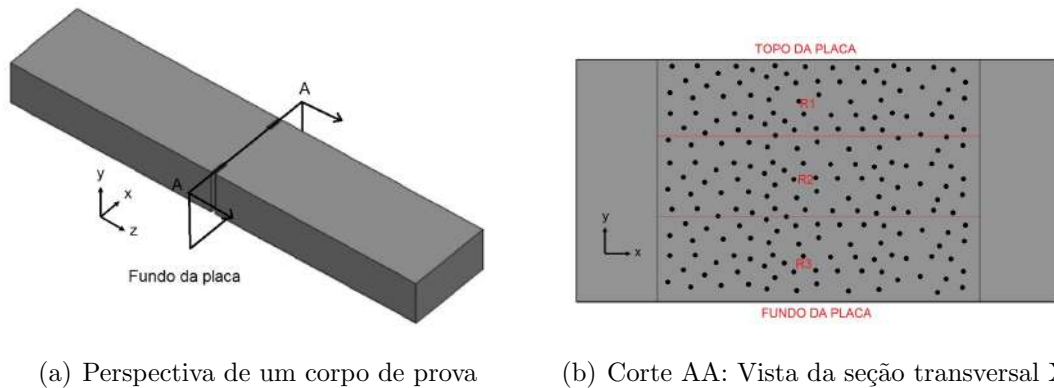


Figura 3.12: Ilustração do local de contagem das fibras com as três regiões (R1, R2 e R3)

Para calcular a densidade de fibras de cada região utilizou-se a fórmula abaixo:

$$\rho_{fibras} = \frac{Fibras_{regiao}}{Fibras_{total}}$$

## 3.2.4 Ensaio de arrancamento

Foram realizados ensaios de arrancamento de uma única fibra de aço, após a cicatrização de micro-fissuras formadas na zona interfacial pela imposição de um pré-arrancamento de 200  $\mu\text{m}$  da fibra, visando constatar a evolução da adesão fibra-matriz em um corpo de prova fissurado. Segue abaixo o procedimento do ensaio.

### 3.2.4.1 Formação da fissura

A indução da fissura foi realizada na máquina Tryton 250 kN com velocidade de 0,01 mm/min, sendo finalizado quando o deslocamento da garra atingisse um valor de 200  $\mu\text{m}$ .

### 3.2.4.2 Condições de Cicatrização

As amostras foram submetidas a condicionamento, ciclos de molhagem e secagem [24h/24h] durante 2 (dois) meses.

O reservatório de água utilizado estava localizado em sala com temperatura e umidade controladas ( $21\pm 1^\circ\text{C}$  e  $65\pm 3\%$ ). Corpos de prova não fissurados foram submetidos às mesmas condições de condicionamento. De forma a prevenir a fibra contra a oxidação, a mesma foi protegida com cera, conforme figura 3.13.



Figura 3.13: Corpo de prova de arrancamento com fibra protegida por cera

### 3.2.4.3 Tomografia de raios X

Foi realizada tomografia em uma amostra após a indução de fissura e antes de colocá-la em condicionamento, bem como após decorrido o tempo de condicionamento e antes do ensaio final.

A tomografia foi realizada com filtro de alumínio de 1 mm de espessura nas amostras, em tomógrafo skyscan 1173, tensão de 130 kV, corrente de 60  $\mu\text{A}$  e voxel de  $5,7 \mu\text{m}$ .

### 3.2.4.4 Ensaio final de arrancamento

Após dois meses em ciclos de molhagem e secagem as amostras foram ensaiadas até o arrancamento total da fibra. O procedimento foi realizado na Tryton 250 kN com velocidade de 0,01 mm/min, conforme exemplifica a figura 3.14.



Figura 3.14: Ensaio final de arrancamento, em andamento, após 2 meses de ciclos de molhagem e secagem

## **3.2.5 Análise térmica**

### **3.2.5.1 Matrizes**

Foram realizadas análises termogravimétricas em pastas de cimento e cimento + escória ao longo do tempo para determinação da dinâmica de hidratação.

Moldou-se pequenos corpos de prova de 2,5 cm de diâmetro por 2 cm de altura com duas diferentes composições. Todos eles utilizaram água e superplasticante Glenium 51. A primeira pasta foi realizada apenas com cimento e a segunda com cimento e adição de escória.

Foram moldadas 4 (quatro) amostras para cada pasta e as mesmas foram desmoldadas com 2 (dois) dias, permanecendo em câmara úmida até os 28 dias. Nessa idade foi realizada termogravimetria e então as amostras foram submetidas a ciclos de secagem e molhagem [24h/24h] durante 3 meses.

O método de preparação das amostras para o ensaio de análise térmica foi o descrito a seguir.

Na idade correspondente a cada análise, um pedaço de cada amostras das pastas era quebrado e moído, de forma a passar na peneira de 150  $\mu\text{m}$ . Após, foi interrompida a hidratação das amostras devido a não realização do ensaio logo após a preparação da mesma. A hidratação foi interrompida com álcool isopropílico (P.A.) por três dias e em seguida o material pulverizado foi mantido por mais três dias em estufa a 40°C, conforme ROCHA (2015).

As análises termogravimétricas foram realizadas em equipamento SDT Q600 TGA/DTA/DSC Simultâneo da TA Instruments, a uma taxa de aquecimento de 10°C/min, variando a temperatura de 35°C a 1000°C, com fluxo de nitrogênio de 100 ml/minuto e cadinho aberto de platina.

### **3.2.5.2 Material de preenchimento**

Foi realizada análise térmica no material identificado como preenchimento da fissura.

O material foi, cuidadosamente, raspado do interior da fissura (ver figura 3.15) com auxílio de uma espátula e submetido ao ensaio em equipamento SDT Q600 TGA/DTA/DSC Simultâneo da TA Instruments, a uma taxa de aquecimento de 10°C/min, variando a temperatura de 35°C a 1000°C, com fluxo de nitrogênio de 100 ml/minuto e cadinho aberto de platina.

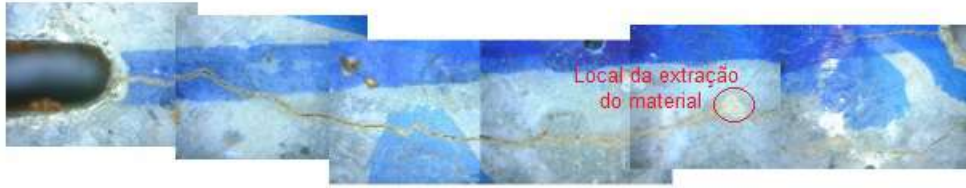


Figura 3.15: Local de extração do material de preenchimento da fissura

### 3.3 Indicadores de recuperação mecânica - IRT e IRD

A capacidade de auto-cicatrização foi mensurada em termos de recuperação das propriedades mecânicas. Para isso foram utilizados dois índices, baseados nos resultados dos ensaios mecânicos de tração direta realizados, e que serão definidos a seguir.

- **Índice de recuperação do dano (IRD)**

Representa a rigidez durante o carregamento após o tratamento ( $RG_{DT}$ ) em face da rigidez do carregamento no ensaio de indução à fissura ( $RG_{AT}$ ). É importante ressaltar que o cálculo da rigidez, nos dois casos, se deu no limite de 40% da tensão máxima, trecho usualmente considerado como comportamento elástico. Contudo, algumas amostras após a auto-cicatrização podem, e muitas vezes apresentam, um desvio de linearidade antes desse patamar.

A figura 3.16 apresenta a representação gráfica dos valores utilizados para o cálculo do índice em pauta.

$$IRD = \frac{RG_{DT}}{RG_{AT}}$$

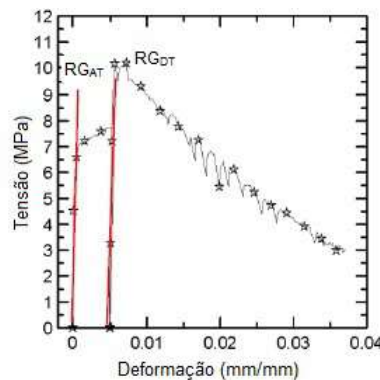


Figura 3.16: Representação gráfica dos valores utilizados para o cálculo do IRD



- **Índices de recuperação de capacidade de carga (IRT)**

Para avaliar essa recuperação são propostos dois índices,  $IRT_1$  e  $IRT_2$ .

O primeiro deles, denominado  $IRT_1$ , é calculado dividindo-se a tensão máxima após a tensão de primeira fissura, no ensaio de indução da fissura (AT) pela tensão máxima obtida nos ensaios realizados após o condicionamento (DT). O objetivo é avaliar a recuperação em termos de tensão da amostra no período.

A figura 3.17 apresenta esquema gráfico utilizado no calculo do índice  $IRT_1$ .

$$IRT_1 = \frac{t_{max.,DT}}{t_{max.,AT}}$$

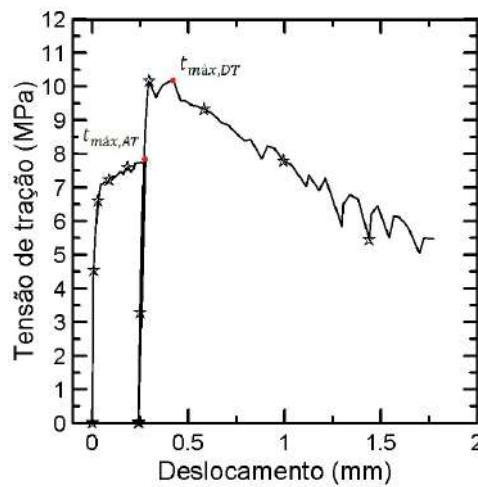
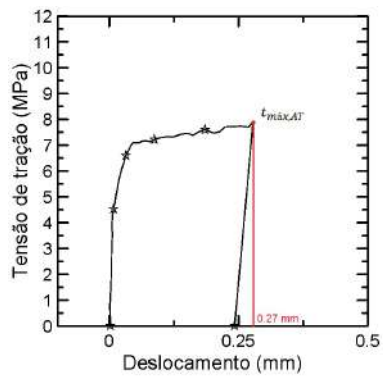


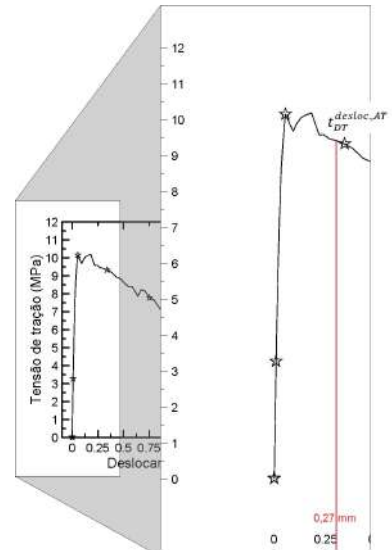
Figura 3.17: Representação gráfica dos valores utilizados para o cálculo do  $IRT_1$

Para cálculo do segundo índice, denominado  $IRT_2$ , dividiu-se a tensão no ensaio pós-condicionamento correspondente ao deslocamento obtido na tensão máxima pós-fissuração no ensaio de indução da fissura (DT) pela tensão máxima pós-fissuração, obtida do ensaio de indução da fissura (AT). A figura 3.18 apresenta esquema gráfico utilizado no calculo do índice  $IRT_2$ .

$$IRT_2 = \frac{t_{DT}^{desloc.,AT}}{t_{max.,AT}}$$



(a) Curva tensão x deslocamento na indução da fissura



(b) Curva tensão x deslocamento após condicionamento

Figura 3.18: Representação gráfica do valores utilizados para o cálculo do  $IRT_2$

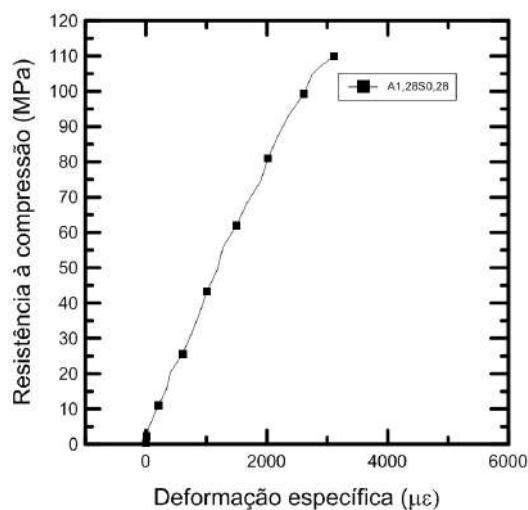
# Capítulo 4

## Resultados e Discussões

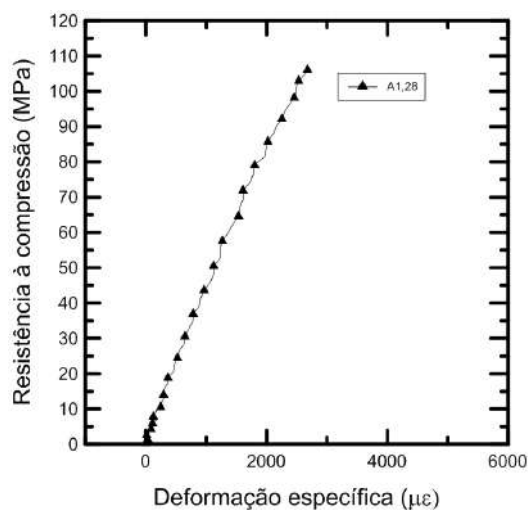
### 4.1 Comportamento tensão x deformação na compressão

A figura 4.1 apresenta curvas tensão x deformação típicas de cada mistura estudada.

A mistura M1 apresentou resistência a compressão média de  $111,05 \pm 2,28$  MPa e módulo de elasticidade de  $43 \pm 1$  GPa, enquanto M2 apresentou uma tensão máxima média de  $103,31 \pm 3,47$  MPa e módulo elástico de  $46 \pm 3$  GPa. A mistura M3, por sua vez, apresentou uma tensão máxima média de  $85,69 \pm 6,45$  MPa e módulo elástico de  $39 \pm 2$  GPa. Já a mistura M4 apresenta uma resistência a compressão média de  $107,66 \pm 4,32$  MPa e módulo elástico de  $42 \pm 1$  GPa.



(a) M1



(b) M2

É possível observar que as maiores resistências foram alcançadas para as misturas M1 e M4. As misturas M2 e M3 apresentaram redução de resistência de 7% e 23% em relação à mistura com melhor desempenho, M1. O comportamento da mistura

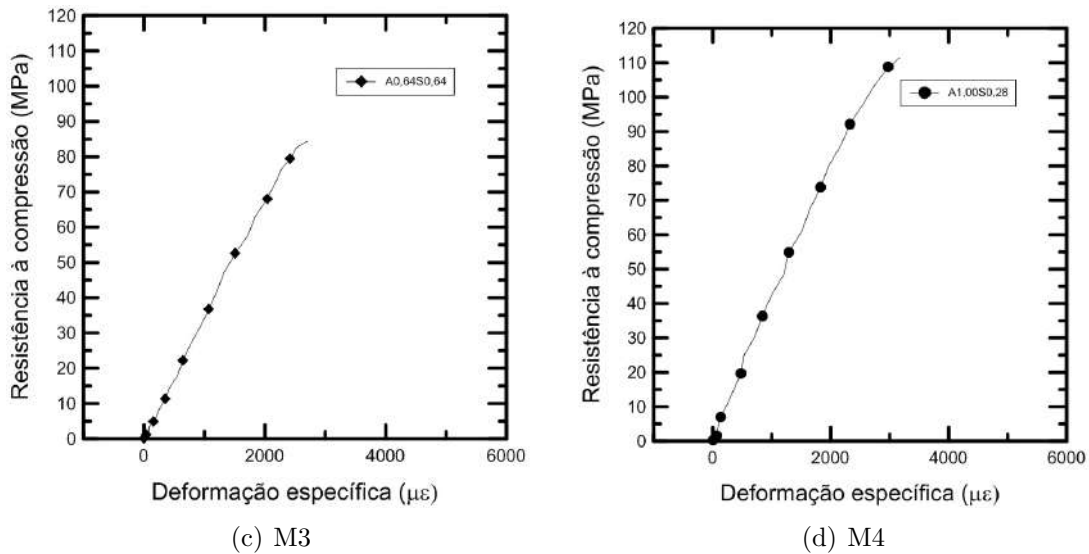


Figura 4.1: Curvas características de comportamento à compressão: (a) A1,28S0,28 (b) A1,28 (c) A0,64S0,64 (d) A1,00S0,28

M3 pode ser explicado pela introdução de maior volume de fibras de sisal, de baixo módulo, na matriz. Toledo (1997), já havia mostrado que a presença de fibras vegetais reduziu a resistência a compressão das matrizes entre 18% e 32% para  $V_f$  de até 3%.

Concretos de alta performance são assim denominados em consequência das altas resistências à compressão alcançadas, alto módulo de elasticidade e baixa permeabilidade. A NBR 6118 incluiu em sua última revisão que concretos com  $f_c$  compreendidos entre 50 e 90 MPa, podem ser denominados de alta resistência. De acordo com KOSMATKA *et al.* (2002) a resistência a compressão de um concreto de alta performance deve ser superior a 70 MPa aos 28 dias e 140 MPa para 91 dias, seguindo a ASTM C 39, bem como um módulo elástico maior que 40 GPa (ASTM C 469). Dessa maneira, conclui-se que as misturas M1, M2 e M4 apresentaram altas tensões máximas de compressão, superiores a 70 MPa aos 28 dias e módulos superiores a 40 GPa, podendo ser classificadas como de alta performance. A mistura M3 apresentou, também, tensão máxima alta, superior a 70 MPa, contudo de acordo com a classificação adotada encontra-se no limiar dos valores do módulo, com resultados variando entre 39 GPa e 41 GPa.

## 4.2 Formação da Fissura das amostras sob tração direta

A figura 4.2 apresenta exemplos do padrão de fissuração observados nas faces A e B das amostras submetidas a esforços de tração direta.

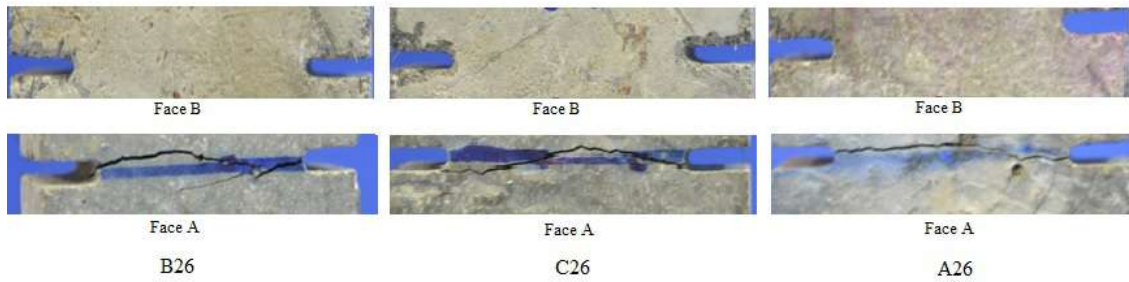


Figura 4.2: Exemplo do padrão de fissuração nas faces para as amostras B26, C26 e A26

Observa-se que as amostras apresentaram fissuras maiores na face de cima da placa (Face A) quando comparadas com a face do fundo da placa (Face B). Esse comportamento foi observado para praticamente todas as amostras estudadas. A medida das aberturas das fissuras ( $w$ ) nas duas faces foi realizada como explicado no item 3.2.3.1 e os resultados estão apresentados nas tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, que serão discutidas individualmente a seguir.

A tabela 4.1 apresenta as aberturas de fissuras obtidas para as amostras da mistura 1, reforçadas com 1,28% de fibras de aço e 0,28% de fibras de sisal. Observa-se uma grande variação na abertura das fissuras na Face A, sendo a menor abertura com medida de  $58 \mu\text{m}$  e a maior de  $361 \mu\text{m}$ . Para a Face B, as fissuras foram muito menores (variação de  $2\text{-}16 \mu\text{m}$  para as várias amostras estudadas). Fazendo-se a média das aberturas de fissuras nas duas faces das amostras da mistura M1, nota-se que a fissura média medida após o descarregamento das amostras variou de  $30 \mu\text{m}$  (amostra C14) até  $189 \mu\text{m}$  (amostra A16) com um valor médio de  $100 \pm 62 \mu\text{m}$ .

Apesar de se buscar, através da realização do processo de indução de fissuras sob cargas de tração, uma abertura similar nas duas faces, isso não foi possível devido a vários fatores que serão discutidos a seguir. A abertura média de  $100 \mu\text{m}$  após o descarregamento ficou consideravelmente inferior a abertura observada durante o processo de indução ( $200 \mu\text{m}$  controlado por um dos LVDTs). Essa diferença será discutida a seguir.

É importante destacar, ainda, conforme pode ser visualizado no item 4.3, que todas as fissuras principais de M1, observadas na Face A contaram com ramificações, o que fez com que tivesse uma fissura principal e outras fissuras menores adjacentes a ela.

A tabela 4.2 apresenta as medidas de abertura de fissura da mistura 2 (1,28% de reforço de fibras de aço). Pode ser notado que, da mesma forma do que foi observado na mistura 1, ocorreu uma grande variação no tamanho das fissuras em ambas as faces. A variação nesta mistura foi ainda mais expressiva, atingindo uma abertura de  $760 \mu\text{m}$  para a amostra A23 e a menor na amostra C24. As amostras obtidas da localização C apresentaram, em geral, menores aberturas de fissura, com exceção

Tabela 4.1: Medida de abertura de fissura induzida em corpos de prova proveniente da mistura M1 [A1,28S0,28]

CP	Face A w [ $\mu\text{m}$ ]	Face B w [ $\mu\text{m}$ ]	Média w [ $\mu\text{m}$ ]
C14	58	2	30
B14	100	3	52
A16	361	16	189
C17	116	1	59
A18	265	5	135
C18	269	7	138

da amostra C26. Os maiores valores de w foram obtidos, majoritariamente, para as amostras da localização A. Observa-se, também, que as fissuras são maiores na Face A do que na Face B, variando as últimas entre 2-200  $\mu\text{m}$ . Do mesmo modo da mistura 1, a maioria das amostras apresentou uma fissura principal e ramificações com fissuras menores.

Tabela 4.2: Medida de abertura de fissura induzida em corpos de prova provenientes da mistura M2 [A1,28]

CP	Face A w [ $\mu\text{m}$ ]	Face B w [ $\mu\text{m}$ ]	Média w [ $\mu\text{m}$ ]
C25	72	4	38
B25	454	5	230
A25	507	2	255
C26	357	6	182
B26	455	32	244
A26	368	15	192
C24	38	9	24
B24	131	7	69
A24	496	3	250
C27	89	9	49
B27	299	7	153
A23	760	200	480

A tabela 4.3 mostra o resultado das medidas das aberturas de fissura realizadas na mistura 3, reforçadas com 0,64% de fibras de aço e 0,64% de fibras de sisal. Pode ser notado que, da mesma forma do que foi observado nas misturas 1 e 2, ocorreu uma grande variação no tamanho das fissuras em ambas as faces. A variação nesta mistura atingiu uma abertura de 652  $\mu\text{m}$  para a amostra C34 e a menor na amostra A35. Fato que merece destaque é que sete amostras apresentaram aberturas acima de 250  $\mu\text{m}$ , sendo três acima de 500  $\mu\text{m}$  na Face A. Nesta mistura não ocorreu uma localização (A, B ou C) onde as fissuras fossem maiores ou menores. Os valores estão

bem diversos, como na amostra A35 com abertura de fissura de 90  $\mu\text{m}$  e na amostra A34 um valor de abertura de fissura de 498  $\mu\text{m}$  na Face A. Observa-se, também, que as fissuras são maiores na Face A do que na Face B, variando as últimas entre 2-7  $\mu\text{m}$ . Do mesmo modo das misturas anteriores, a maioria das amostras apresentou uma fissura principal e ramificações com fissuras menores.

Tabela 4.3: Medida de abertura de fissura induzida em corpos de prova proveniente da mistura M3 [A0,64/S0,64]

CP	Face A w [ $\mu\text{m}$ ]	Face B w [ $\mu\text{m}$ ]	Média w [ $\mu\text{m}$ ]
C35	289	5	147
B35	120	7	64
A35	90	4	47
C36	290	2	146
B36	179	3	91
A36	109	4	57
C34	652	5	329
B34	282	4	143
A34	498	4	251
C37	277	2	140
B37	585	3	294

Por fim, a tabela 4.4 apresenta os valores de abertura de fissura da mistura 4 (1,00% de fibras de aço e 0,28% de fibras de sisal).

Pode ser notado que ocorreu uma grande variação no tamanho das fissuras em ambas as faces. A variação nesta mistura foi de 461  $\mu\text{m}$  para a amostra C47 e a menor na amostra B43. As amostras obtidas das localizações A e B apresentaram, em geral, menores aberturas de fissura. Os maiores valores de w foram obtidos, majoritariamente, para as amostras da localização C. Observa-se, também, que as fissuras principais ocorreram tanto na Face A quanto na Face B, variando entre 59-166  $\mu\text{m}$  para a primeira e 153-461  $\mu\text{m}$  para a última, uma explicação seria a distribuição mais homogênea das fibras na seção transversal, contudo com pouco alinhamento. Ressalta-se que todas as amostras apresentaram uma fissura principal e ramificações com fissuras menores.

Conclui-se que as misturas M1, M2 e M3 apresentaram as maiores fissuras apenas na Face A, lançando a hipótese de acumulação de fibras na base da placa. Observou-se que o tamanho das fissuras apresentadas variou de acordo com a localização na placa de cada corpo de prova. De um modo geral, as amostras compreendidas na localizações B e C apresentaram menores fissuras para as misturas M1 e M2 e para as misturas M3 e M4 as menores fissuras foram apresentadas nas localizações A e B.

Tabela 4.4: Medida de abertura de fissura induzida em corpos de prova proveniente da mistura M4 [A1,00/S0,28]

CP	Face A w [ $\mu\text{m}$ ]	Face B w [ $\mu\text{m}$ ]	Média w [ $\mu\text{m}$ ]
C45	4	329	167
A45	4	153	79
C46	7	248	128
B46	166	3	85
A44	115	34	74
C47	2	461	232
C43	1	411	205
B43	59	13	36

As variáveis tangendo o desenvolvimento da abertura da fissura são inúmeras, já que ela varia de acordo com a distribuição de fibras na seção transversal, com o volume de fibras, principalmente de aço, e, ainda, com a inclinação e orientação de cada fibra. Estas relações não se estabelecem simplificadamente, contudo tentar-se-á uma explicação dos resultados de aberturas de fissuras obtidas através da análise de imagens de tomografia computadorizada dos corpos de prova A26, A28, A29, B26, C26, C27 e C29. As amostras A26, B26 e C26 estão esposadas abaixo.

As figuras 4.3, 4.4 e 4.5 mostram imagens de tomografia da amostra A26. Após tratamento em software Avizo e análise das imagens, observou-se a ocorrência de maior concentração de fibras de aço na parte inferior da placa (Face B). As imagens, claramente, demonstram uma maior quantidade de fibras no fundo da placa quando comparado ao topo da mesma.

No corte, realizado no topo da amostra A26 (Face A), mostrado na figura 4.3, percebe-se um menor volume de fibras de aço nessa região do corpo de prova. O corte realizado na seção intermediária da amostra (ver figura 4.4) mostra um maior volume de fibras nessa seção em comparação com a anterior. Finalmente, a seção na base da amostra (ver figura 4.5) revela uma alta quantidade de fibras, comprovando a acumulação das mesmas no fundo da placa.



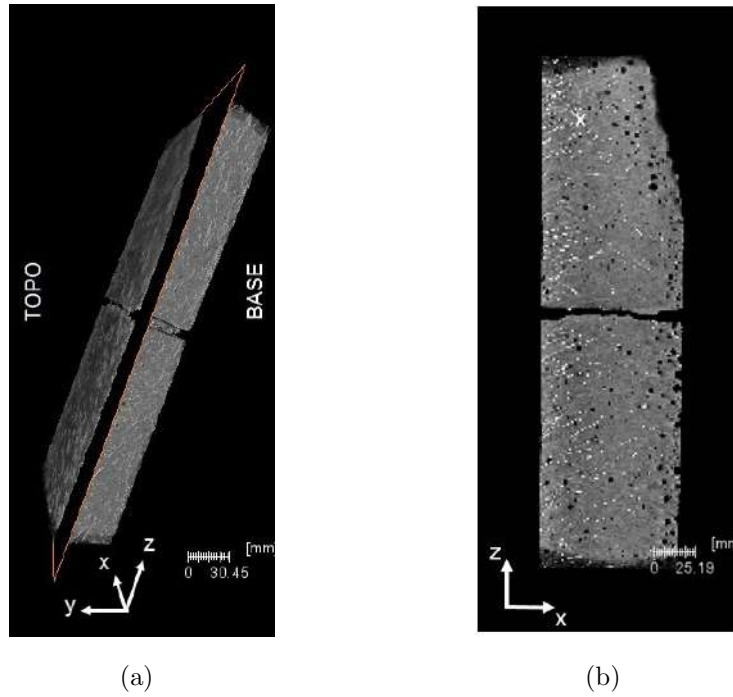


Figura 4.3: Ensaio de tomografia computadorizada na amostras A26 mostrando o corte na seção do topo para visualização das fibras na amostra A26:(a) Plano de corte, (b) Seção longitudinal xz

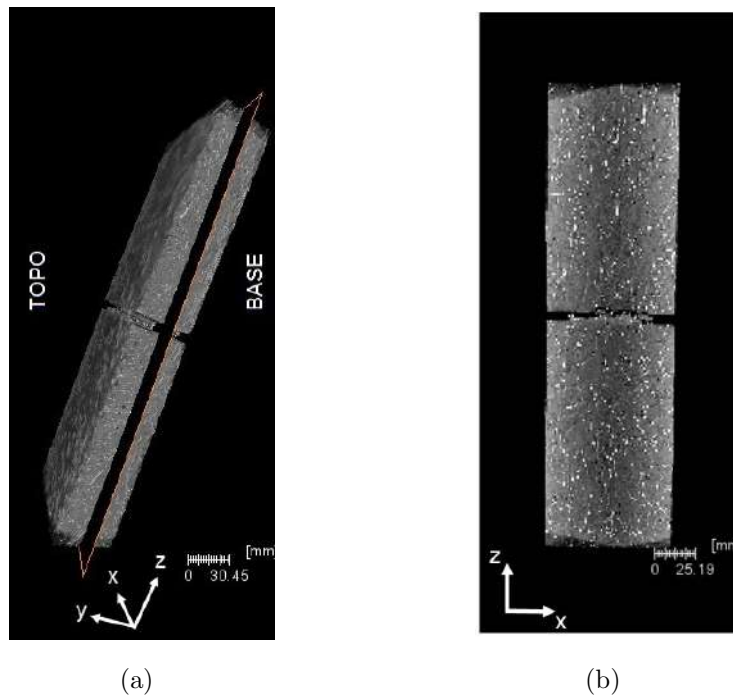


Figura 4.4: Ensaio de tomografia computadorizada na amostra A26 mostrando o corte na seção mediana para visualização das fibras:(a) Plano de corte, (b) Seção longitudinal xz

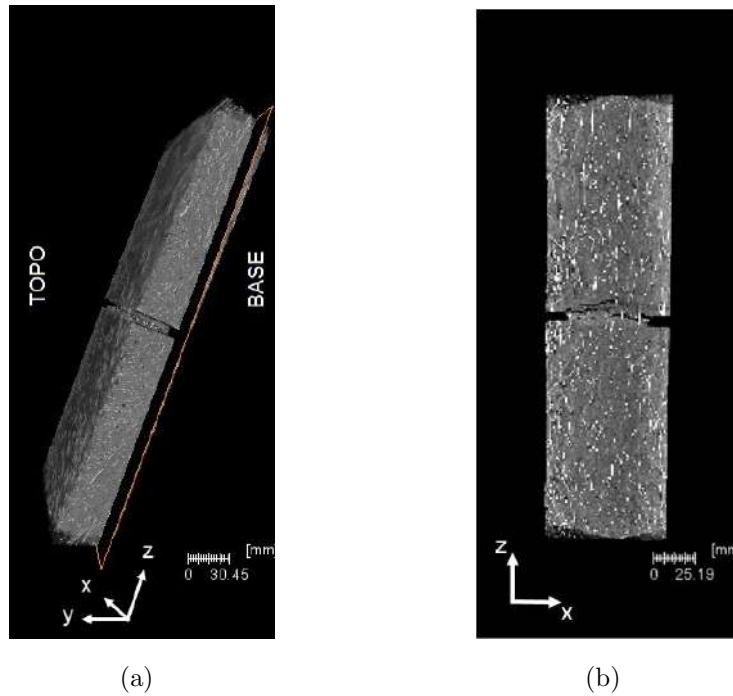


Figura 4.5: Ensaio de tomografia computadorizada na amostras A26 mostrando o corte na seção do fundo para visualização das fibras:(a) Plano de corte, (b) Seção longitudinal xz

De modo a tornar mais elucidativa a questão da distribuição das fibras nas amostras, a figura 4.6 mostra um corte no volume da amostra A26. Através desta, também, é possível perceber a existência de uma fina camada de matriz com poucas fibras no topo do corpo de prova, bem como uma maior concentração e melhor alinhamento no fundo. Tais observações correspondem ao relato acima realizado.

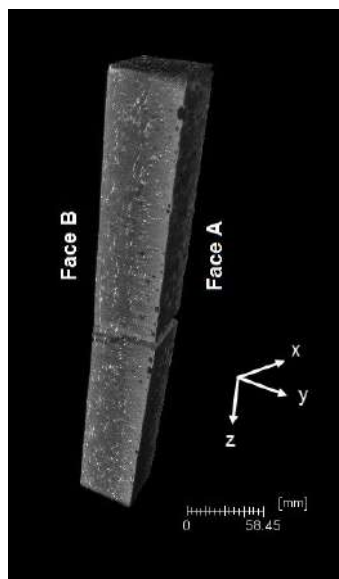


Figura 4.6: Corte realizado na seção mediana do eixo X ao longo da altura em fotografia 3D da amostra A26 por meio de tomografia computadorizada

A figura 4.7 mostra a concentração de fibras na amostra B26 em três diferentes planos do corpo de prova, seguindo a metodologia descrita para a amostra A26. É evidente uma maior concentração de fibras no fundo da amostra (c), enquanto o topo conta com menor volume de fibras, similar ao ocorrido na amostra A26. A figura 4.8 mostra o corte no volume da amostra B26. As conclusões são similares às obtidas para a amostra A26.

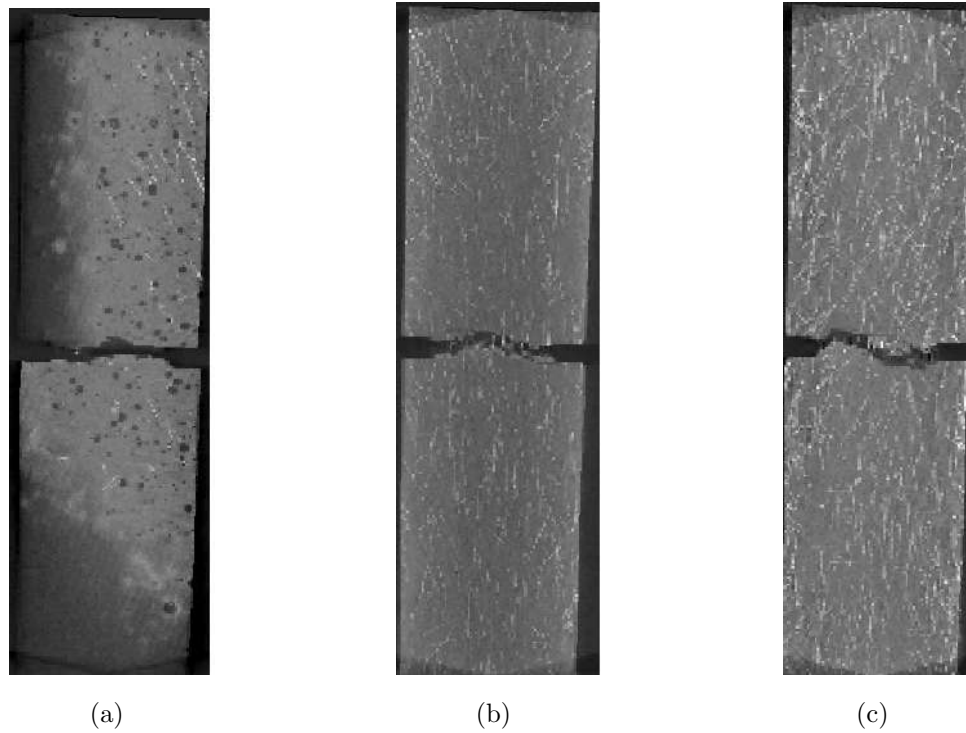


Figura 4.7: Ensaio de tomografia computadorizada na amostras B26 mostrando o corte ao longo da altura Y mostrando a diferença de concentração de fibras:(a) topo da amostra, (b) Seção mediana e (c) Seção do fundo da amostra

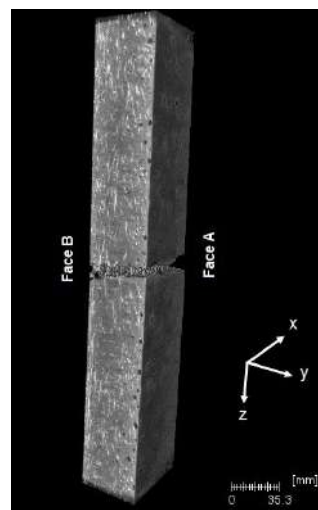


Figura 4.8: Corte realizado na seção mediana do eixo X em fotografia 3D da amostra B26 por meio de tomografia computadorizada

É sabido que a fissuração de um material reforçado com fibras é deveras dependente do comprimento da mesma, do alinhamento e do volume de fibras. No caso em tela, como as fibras apresentam mesmo comprimento o que varia é o volume das mesmas. Dessa forma, de modo a corroborar a hipótese de acumulação de fibras no fundo da placa e explicar a diferença de abertura de fissura, procedeu-se à quantificação de fibras ao longo da seção transversal de cada amostra.

A figura 4.9 apresenta exemplo de imagem da seção transversal, em vista superior, de um corpo de prova, obtida através de mosaico auferido por meio de imagens capturadas por lupa ótica. Para que fosse possível a contagem de fibras, as amostras foram igualmente divididas em três regiões (R1, R2 e R3), conforme figura 4.9, sendo cada uma referente a 1/3 da largura em Y.

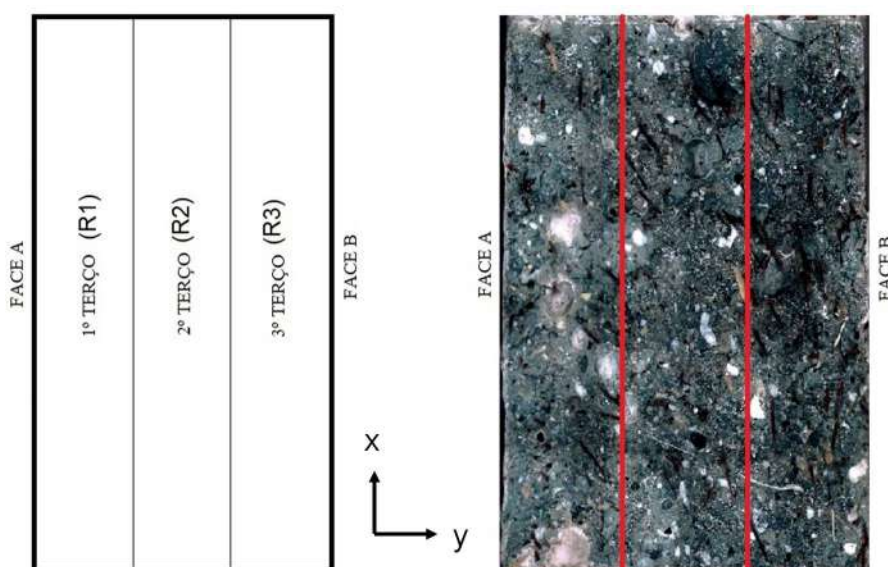


Figura 4.9: Seção transversal XY vista de cima com delimitações das regiões

Calculou-se o número total de fibras na seção XY de cada amostra, bem como os valores parciais em cada região (R1, R2, R3). As fibras foram contabilizadas através do programa Fiji e os dados receberam posterior processamento no programa MatLab. Ao final do processamento de cada amostra, obteve-se a fração de fibras em cada região, conforme apresentado na figura 4.10 para as amostras A26, B26 e C26 da mistura M2.

Percebe-se que a quantidade de fibras na região 1 da amostra A26 é visivelmente inferior às amostras B26 e C26. Percebe-se, também, nos corpos de prova B26 e C26, que existe uma diferença de concentração de fibras entre as regiões, principalmente entre R1 e R3.

As figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 mostram os resultados da contagem de fibras em cada região dos corpos de prova nas misturas A1,2S0,28; A1,28; A0,64S0,64 e

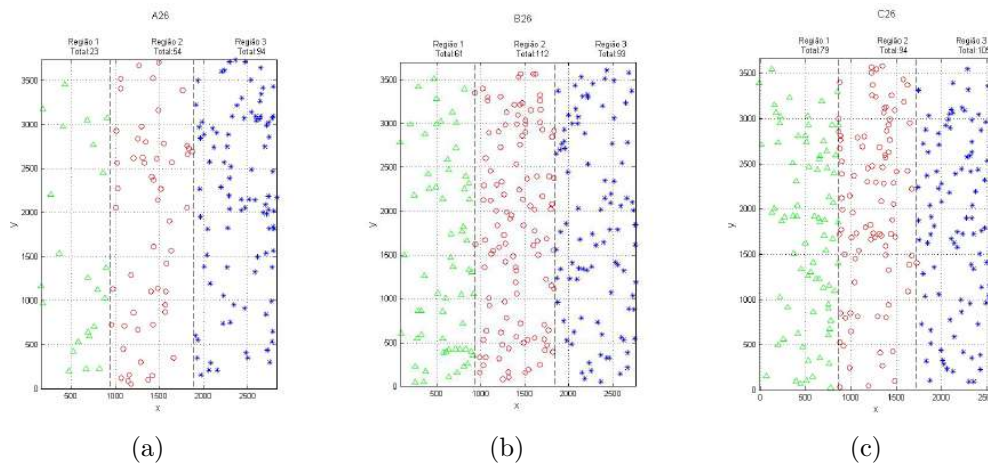


Figura 4.10: Distribuição de fibras na seção transversal das amostras: (a) A26, (b) B26 e (c) C26

A1,00S0,28, respectivamente. As imagens com a distribuição das fibras na seção estão apresentadas no Anexo I. Observando os resultados, percebe-se que a maioria das amostras apresentou padrão de distribuição de fibras com maior concentração em R3 (fundo do molde) e menor em R1 (topo). Em algumas amostras essa diferença chegou a atingir 40%. A concentração apresentada nas tabelas foi calculada dividindo-se a quantidade de fibras de cada região pelo número total de fibras cortando a seção transversal da amostra na sua região central (região analisada).

A figura 4.11 apresenta a quantidade de fibras na seção transversal de cada corpo de prova estudado na mistura 1, dividida ainda nas três regiões R1, R2 e R3 e localizações A, B e C. O resultado em números encontra-se na tabela A.1, no Anexo I. O menor resultado na quantidade de fibras total na mistura 1 foi de 178 fibras na amostra A18 e a maior de 291 fibras na seção da amostra C13. Observa-se uma maior quantidade de fibras na R3 em comparação a região R1. A diferença entre as concentrações nas regiões chega a ser de aproximadamente 25%, tomando por exemplo a amostra B15, o número de fibras na região R1 é de 18 enquanto que na região R3 é de 44 fibras. As amostras B15 e C17 possuem as maiores variações, enquanto as amostras C12 e C15 as menores. A diferença de concentração de R1 para R3 nessa mistura variou entre 1% e 26% dependendo do corpo de prova.

A figura 4.12 apresenta a quantidade de fibras na seção transversal de cada corpo de prova estudado na mistura 2, dividida ainda nas três regiões R1, R2 e R3 e localizações A, B e C. O resultado em números encontra-se na tabela A.2, no Anexo I. Destaca-se que a quantidade de fibras por corpo de prova é similar ao encontrado nas amostras de A1,28S0,28, fato que é esperado, vez que o volume de fibras de aço utilizado nas duas misturas foi o mesmo e as fibras de sisal não foram contabilizadas durante o método de quantificação. O menor resultado na quantidade de fibras

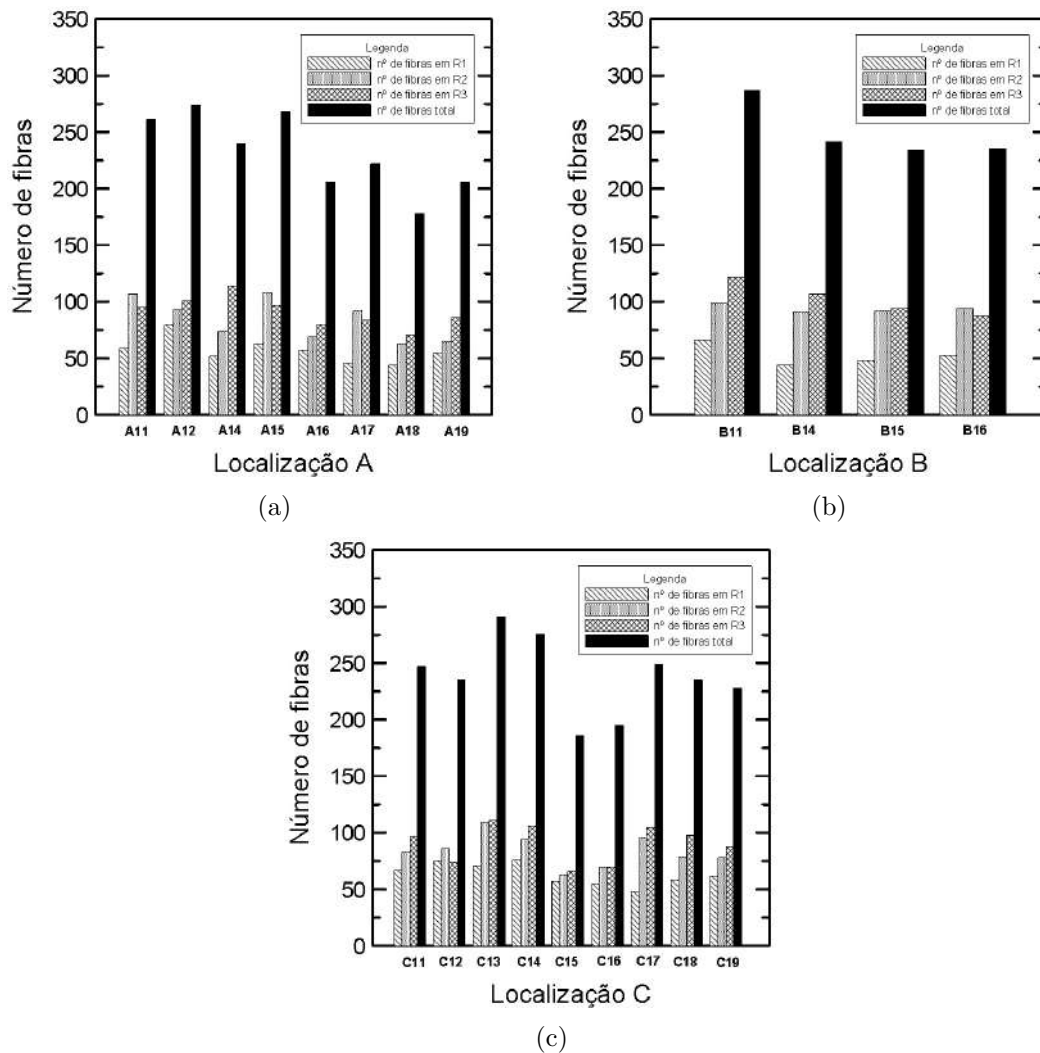


Figura 4.11: Número de fibras em cada corpo de prova por região da seção transversal e por localização na placa na mistura M1 (a) Localização A, (b) Localização B e (c) Localização C

total na mistura 2 foi de 171 fibras na amostra A26 e o maior de 312 fibras na seção da amostra A22. Observa-se maior quantidade de fibras na R3 em comparação a região R1, tal como ocorrido na mistura 1. A diferença entre as concentrações nas regiões chega a ser de aproximadamente 40%, tomando por exemplo a amostra A25, o número de fibras na região R1 é de 27 enquanto que na região R3 é de 75 fibras. Dessa forma, a concentração de fibras nas regiões da seção transversal da mistura A1,28 revelam o mesmo comportamento observado para a mistura A1,28S0,28. As amostras A26 e A23 possuem as maiores variações, enquanto as amostras C25 e B24 as menores. A diferença de concentração de R1 para R3 nessa mistura variou entre 3% e 42% dependendo do corpo de prova.

A figura 4.13 apresenta a quantidade de fibras na seção transversal de cada corpo de prova estudado na mistura 3, dividida ainda nas três regiões R1, R2 e R3 e localizações A, B e C. O resultado em números encontra-se na tabela A.3,

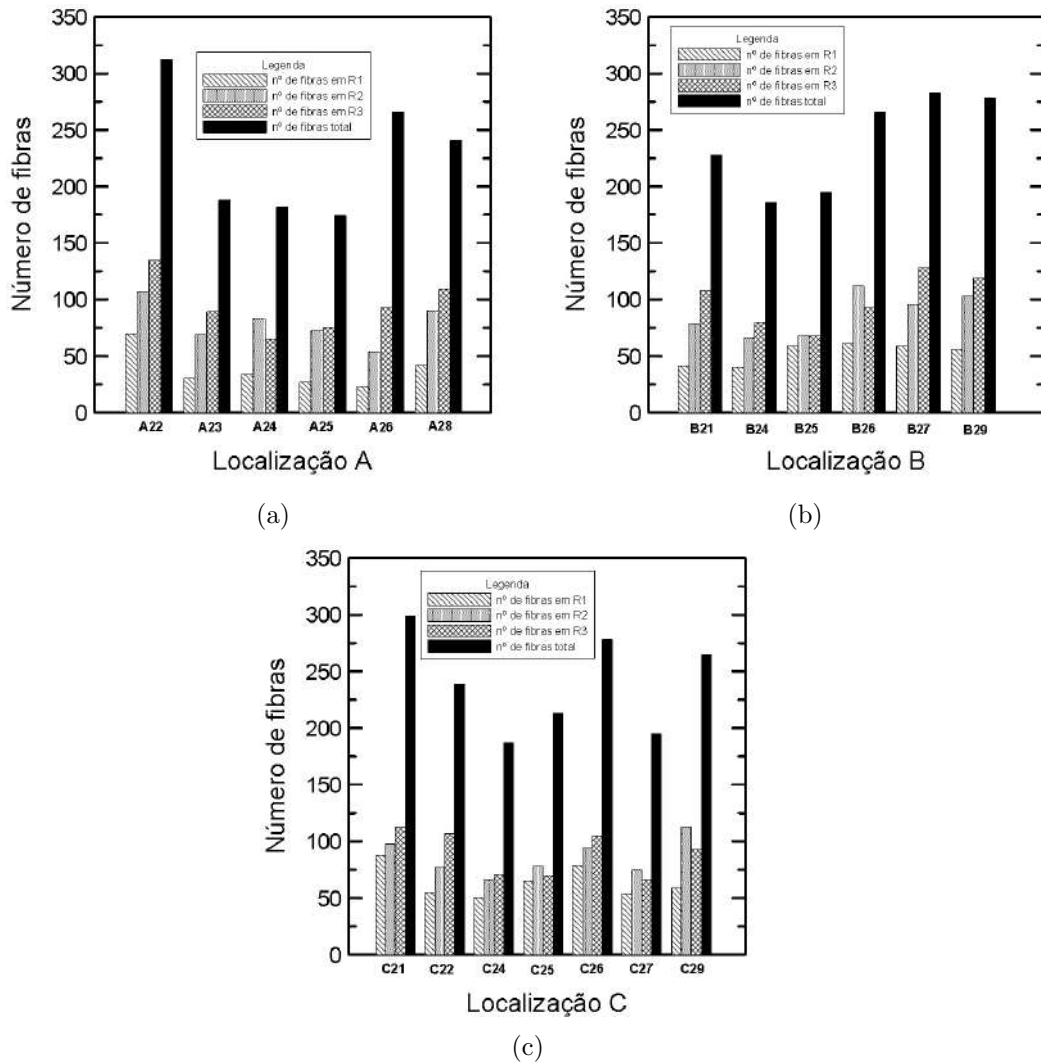


Figura 4.12: Número de fibras em cada corpo de prova por região da seção transversal e por localização na placa na mistura M2 (a) Localização A, (b) Localização B e (c) Localização C

no Anexo I. Esta mistura apresenta 0,64% de reforço de fibras de aço, fato pelo qual pressupõe-se uma menor quantidade absoluta de fibras na seção transversal das amostras. O menor resultado na quantidade de fibras total na mistura 3 foi de 96 fibras na amostra C31 e o maior de 175 fibras na seção da amostra A32, inferior às duas misturas já discutidas. Conforme será demonstrado no decorrer do trabalho, a concentração de fibras nas regiões é mais homogênea, contudo ainda é possível a verificação de maiores quantidades de fibras na região R3 do que na região R1. A diferença entre as regiões chega a ser de aproximadamente 20%, tomando por exemplo a amostra B34, o número de fibras na região R1 é de 20 enquanto que na região R3 é de 43 fibras. As amostras B34 e A34 possuem as maiores variações de concentração, enquanto as amostras C34 e C39 as menores. A diferença de concentração de fibras da região R1 para a região R3 nessa mistura variou entre 0%

e 24% dependendo do corpo de prova.

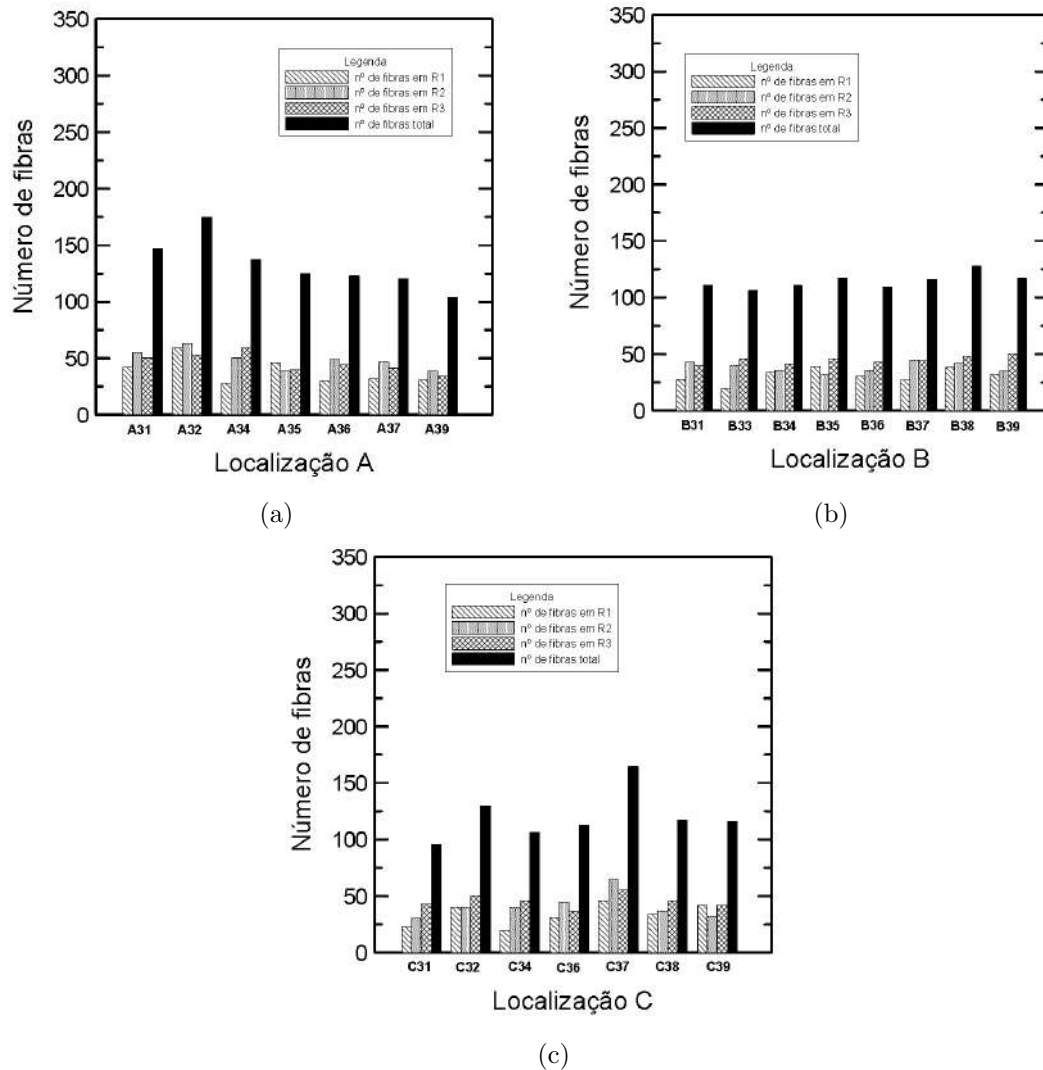


Figura 4.13: Número de fibras em cada corpo de prova por região da seção transversal e por localização na placa na mistura M3 (a) Localização A, (b) Localização B e (c) Localização C

A figura 4.14 apresenta a quantidade de fibras na seção transversal de cada corpo de prova estudado na mistura 4, dividida ainda nas três regiões R1, R2 e R3 e localizações A, B e C. O resultado em números encontra-se na tabela A.4, no Anexo I. Esta deveria apresentar uma maior quantidade de fibras do que M3 e menor que M1, e é isto que ocorre. A quantidade de fibras varia entre 112 como mínimo para a amostra A45 e 178 como máximo na amostra C43. Frisa-se que a diferença de concentração entre as regiões R1 e R3 também diminui nesta mistura, conforme ocorrido na mistura M3. Apesar disto, a concentração de fibras em R1 ainda é menor em algumas amostras como B45, A43, A49, A45, B46 e B43. A diferença entre as concentrações nas regiões chega a ser de aproximadamente 20%, tomando por exemplo a amostra B45, o número de fibras na região R1 é de 26 enquanto que



na região R3 é de 46 fibras. As amostras B45 e B43 possuem as maiores variações, enquanto as amostras A48 e B47 as menores. A diferença de concentração de R1 para R3 nessa mistura variou entre 1% e 24% dependendo do corpo de prova.

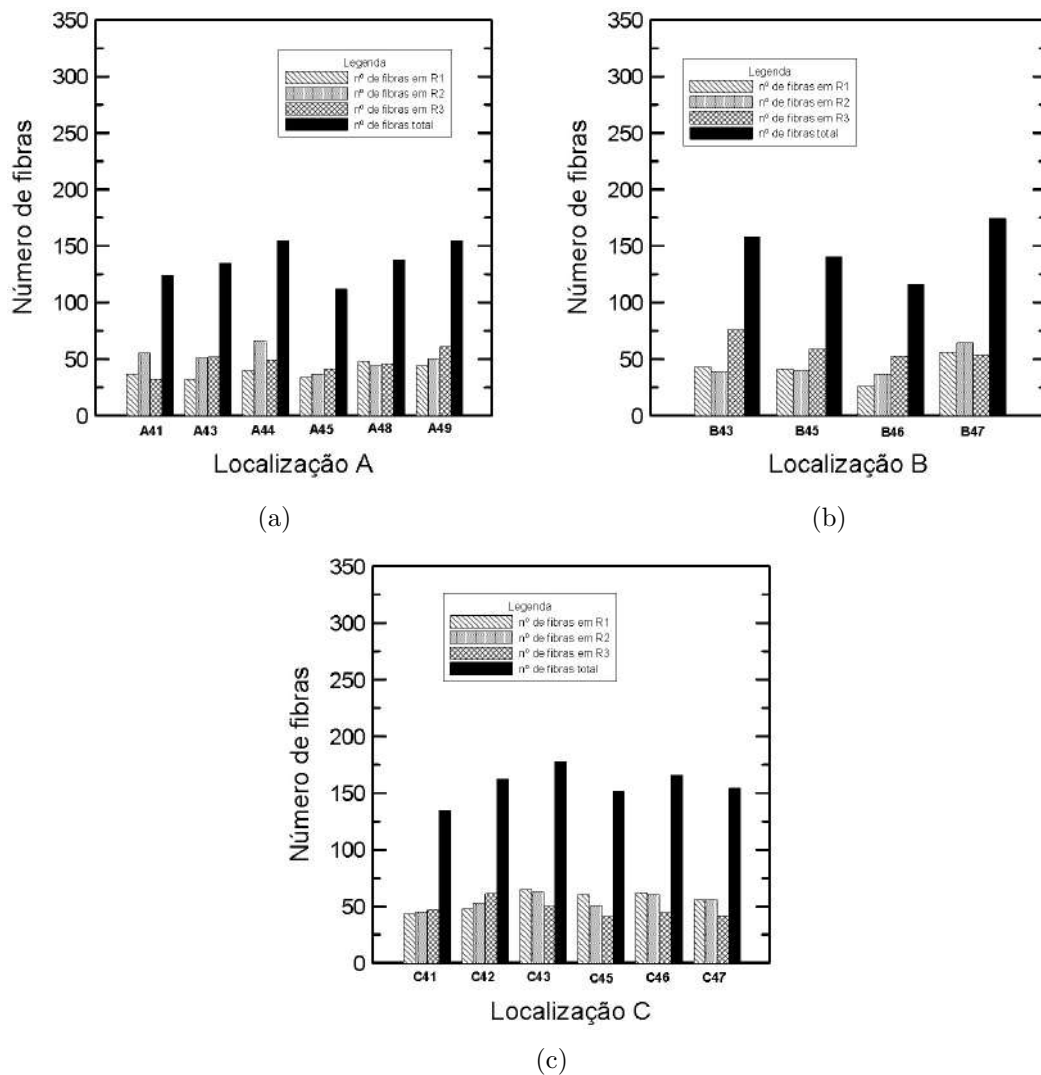


Figura 4.14: Número de fibras em cada corpo de prova por região da seção transversal e por localização na placa na mistura M4 (a) Localização A, (b) Localização B e (c) Localização C

A quantificação de distribuição dessas fibras, ao longo das faixas para as amostras estudadas, encontra-se mapeado em figuras presentes no Anexo I. A partir do mapeamento realizado é possível observar a existência de uma concentração menor de fibras nas proximidades da Face A da maioria dos corpos de prova. Este fato torna suscetível o surgimento e maior abertura de fissuras nessa região.

Utilizando os dados acima esposados e para que houvesse uma melhor comparação da concentração de fibras entre as regiões, foi calculada a porcentagem média de fibras por região e localização, para cada mistura. As tabela 4.5 e 4.6 apresentam os resultados obtidos por região (R1, R2 e R3) dependendo da loca-

lização da amostra na placa (A, B ou C) com seus respectivos desvios padrão.

Tabela 4.5: Concentração de fibras por região da seção transversal ao longo das localizações A, B e C para as misturas M1 e M2

Localização	M1			M2		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
C	27%±4%	35%±2%	38% ±3%	27%±3%	36%±4%	37%±4%
B	21%±2%	38%±2%	41%±3%	22%±4%	36%±3%	41%±5%
A	25%±3%	36%±4%	39%±4%	17%±3%	38%±5%	45%±6%
Total	24%±4%	36%±3%	39%±3%	22%±5%	37%±4%	41%±6%

Tabela 4.6: Concentração de fibras por região da seção transversal das amostras ao longo das localizações A, B e C para as mistura M3 e M4

Localização	M3			M4		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
C	30%±4%	30%±4%	37%±4%	35%±2%	35%±2%	30%±5%
B	27%±5%	34%±4%	39%±3%	28%±4%	30%±5%	42%±8%
A	29%±6%	37%±3%	35%±4%	29%±4%	37%±5%	34%±5%
Total	28%±5%	33%±4%	37%±4%	31%±5%	34%±5%	35%±7%

É possível deprender dos resultados mostrados nas tabelas 4.5 e 4.6 que a maior parte das fibras de aço se concentrou nas regiões 2 e 3, que representam os 2/3 finais do corpo de prova nas misturas M1 e M2. Ressalta-se que a diferença na concentração entre as regiões R1 e R2-R3, conforme já versado, diminui nas misturas misturas M3 e M4, principalmente na última que apresenta uma diferença de 4% entre as regiões R1 e R3, enquanto a mesma chega a ser de 15% na mistura M1 e 19% na mistura M2. Observa-se uma distribuição de aproximadamente 35% para todas as amostras na região R2.

Por fim, procedeu-se ao cálculo da média de distribuição de fibras apenas por localização na placa, sem levar em consideração as regiões da seção transversal do corpo de prova. Através dos cálculos dessa densidade total de fibras por localização na placa, conclui-se que as fibras encontram-se bem distribuídas na mistura M2, apresentando concentração de 31%, 35% e 35% em A, B e C, respectivamente. As mesmas conclusões foram auferidas para as outras misturas com concentrações de 33%, 35% e 32% para M1; 33%, 31% e 36% para M3 e 36%, 33% e 31% para M4. Dessa maneira, a diferença de concentração de fibras se atém apenas às regiões da seção transversal, conforme observado.

Finalizando-se a análise da distribuição das fibras na seção transversal das amostras apresenta-se nas tabelas 4.7 e 4.8 a fração volumétrica de fibras em cada região

e localização para as amostras avaliadas. Esse cálculo foi realizado multiplicando-se o número de fibras pela área da fibra de aço utilizada, dividida pela área da seção transversal de cada região. Assim foi possível fazer uma comparação com a fração volumétrica de fibras presente em cada mistura (1,28% em M1 e M2; 0,64% em M3 e 1,00% em M4). Os resultados encontram-se na tabela 4.7 indicam que a fração volumétrica calculada pela análise das imagens se aproxima da fração efetivamente utilizada em cada amostra. Na mistura M1, por exemplo, o volume medido de fibras foi de 1,20%, em média, o que se aproxima bastante da fração volumétrica efetivamente utilizada (1,28%), demonstrando a eficácia do procedimento utilizado. A mistura M2 apresenta uma fração volumétrica calculada de 1,16% em contrapartida aos 1,28% utilizados na moldagem. Já para mistura M3 calculou-se um  $V_f$  de 0,62%, muito próximo  $V_f$  efetivo de 0,64% utilizado na mistura. Por fim, a mistura M4 possui fração volumétrica calculada de 0,97%, bastante aproximada da fração efetivamente utilizada de 1,00%.

Tabela 4.7: Fração volumétrica de fibras calculada em cada região da seção transversal nas misturas M1 e M2 [%]

Localização	M1				M2			
	R1	R2	R3	Total	R1	R2	R3	Total
C	0,32	0,42	0,45	1,19±0,07	0,32	0,43	0,45	1,20±0,07
B	0,27	0,47	0,52	1,26±0,13	0,26	0,44	0,50	1,20±0,12
A	0,29	0,42	0,46	1,17±0,09	0,19	0,40	0,47	1,06±0,15
Média	1,20±0,04				1,16±0,08			

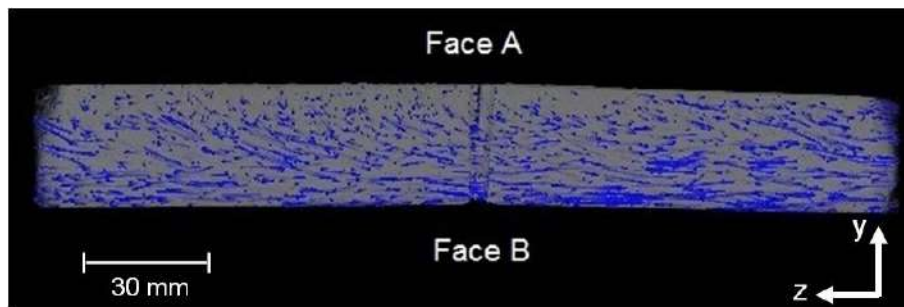
Tabela 4.8: Fração volumétrica de fibras calculada em cada região da seção transversal nas misturas M3 e M4 [%]

Localização	M3				M4			
	R1	R2	R3	Total	R1	R2	R3	Total
C	0,18	0,21	0,23	0,62±0,02	0,37	0,37	0,32	1,06±0,03
B	0,16	0,19	0,22	0,57±0,03	0,26	0,34	0,31	0,91±0,04
A	0,19	0,25	0,23	0,67±0,03	0,28	0,38	0,29	0,95±0,06
Média	0,62±0,05				0,97±0,07			

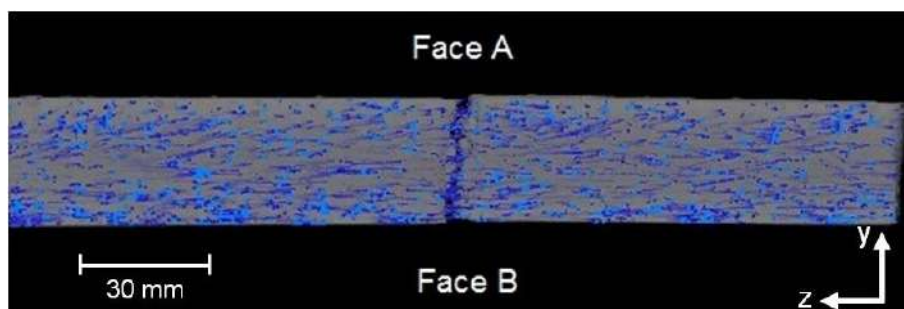
No tocante ao alinhamento das fibras, buscou-se um alinhamento preferencial na moldagem realizada vertendo o misturador de modo a obter um deslizamento do concreto auto-adensável ao longo do comprimento da placa. Tal feito permitiu que houvesse um alinhamento das fibras de aço paralelamente à força de tração direta, conforme é possível a visualização na figura 4.15.

Observando as tomografias de raios X dos corpos de prova A26, B26 e C26, notou-se que as fibras mais próximas do fundo estão quase que perfeitamente alinhadas e

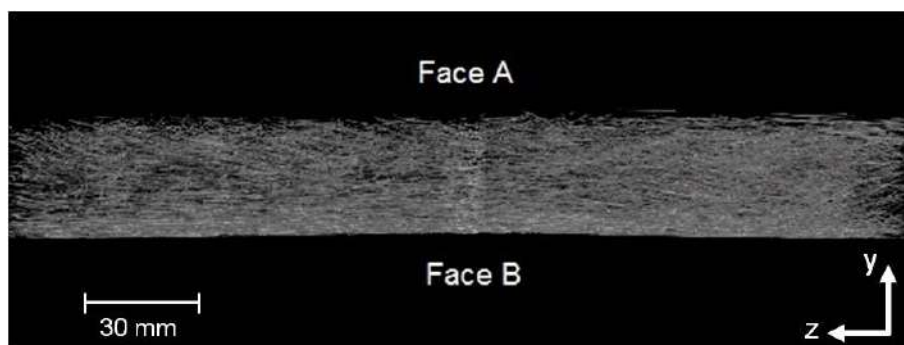
paralelas ao mesmo, enquanto que a partir da metade da espessura da placa, nota-se que as fibras rotacionaram, inclinando-se em relação ao fundo. Esse efeito é menos notado nas regiões B e C,



(a) Seção longitudinal yz da amostra A26 com fibras em azul



(b) Seção longitudinal yz da amostra B26 com fibras em azul



(c) Seção longitudinal yz da amostra C26 somente com as fibras

Figura 4.15: Diferença no alinhamento das fibras ao longo da espessura dependendo da localização de extração da mesma. Exemplo com os corpos de prova: (a) A26 ; (b) B26 e (c) C26

Comportamento similar foi observado por Van Mier *et al*, 2012. Utilizando uma matriz transparente com 0,5% de fibras de aço, o autor observou que as fibras tendem a ficar mais inclinadas em relação ao fundo do molde quanto mais próximas do topo da placa estiverem (ver figura 4.16).

Observando-se a figura 4.11(a) e 4.11(c) nota-se uma diferença no arranjo das fibras entre as localizações C até A, existindo uma tendência a maior rotação quanto

mais distante se encontra do ponto de lançamento, fato que pode ser observado na matriz transparente de Van Mier *et al*, 2012.



Figura 4.16: Orientação das fibras de aço (0.5%) em matriz transparente (Adaptado de Van Mier *et al*, 2012)

### 4.3 Pré-indução das fissuras: curvas tensão x deslocamento na fissuração

#### 4.3.1 Mistura 1 [A1,28S0,28]

A figura 4.17 apresenta as curvas tensão x deslocamento decorrente da indução das fissuras nos corpos de prova C18, A18 e C17 da mistura 1. Após a indução, as amostras foram submetidas a ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses.

Observando-se as curvas da figura 4.17, nota-se que todas as amostras apresentaram comportamento de endurecimento na tração direta, com aumento do valor da tensão após a formação da primeira fissura. O valor médio da tensão de primeira fissura para as amostras C18, A18 e C17 foi de  $5,75 \pm 0,16$  MPa. A tensão máxima média observada no processo de indução da fissura foi de  $9,20 \pm 0,74$  MPa. A rigidez inicial média dessas amostras foi de  $52 \pm 1$  GPa.

As amostras C18 e A18 apresentaram abertura de fissuras bastante similares ( $135 \mu\text{m}$  e  $138 \mu\text{m}$ , medida pela lupa digital), enquanto a amostra C17 apresentou abertura de fissura média de  $59 \mu\text{m}$ . Utilizando-se os dados de deslocamento residual obtidos a partir das leituras dos LVDTs (figura 4.17), identificou-se que as aberturas de fissura foram de  $98 \mu\text{m}$  para a amostra A18, de  $117 \mu\text{m}$  para a amostra C18 e de  $66 \mu\text{m}$  para a amostra C17. Observa-se uma diferença de cerca de 15% em média na medida das aberturas de fissura imediatamente após o descarregamento utilizando-se os LVDTs e os resultados obtidos com a lupa digital. É importante mencionar que as técnicas são diferentes, já que a técnica da lupa utiliza as imagens das faces A e B para o cálculo da abertura média das fissuras, enquanto os LVDTs medem um deslocamento residual na seção média das amostras, tomando-se para isso as leituras

medidas nas laterais da amostra (ver figura 3.10). Apesar de ambos tratarem de medida de abertura de fissura, levando em consideração os resultados de todas as amostras estudadas, chega-se a conclusão de que não é passível de comparação os resultados obtidos a partir da lupa e da média dos LVDTs por não apresentarem uma lógica de correlação. E ainda, escolhe-se o LVDT como parâmetros para cálculo de índices, quando se fizer necessário.

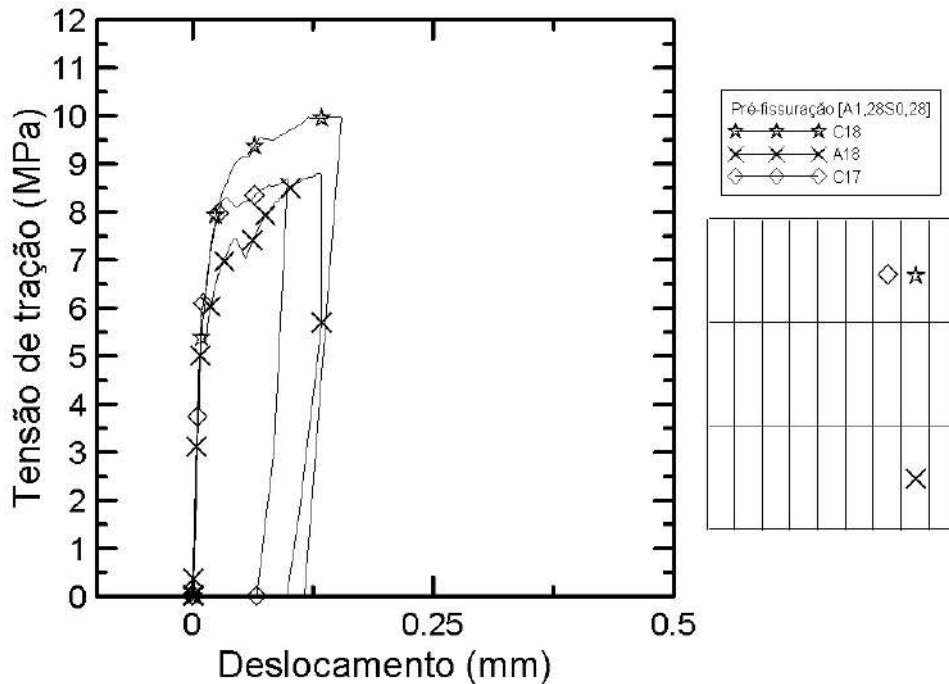


Figura 4.17: Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova C17, A18 e C18 da mistura A1,28S0,28

As figuras 4.18, 4.19 e 4.20 mostram as aberturas de fissuras obtidas após o descarregamento do ensaio de tração direta. Observa-se que todas as amostras apresentaram ramificações das fissuras principais, denominadas fissuras secundárias, as mesmas possuem aberturas da ordem de 5-30  $\mu\text{m}$ . É possível visualizar que a amostra C18 apresentou uma maior abertura do lado direito em relação ao lado esquerda da fissura.

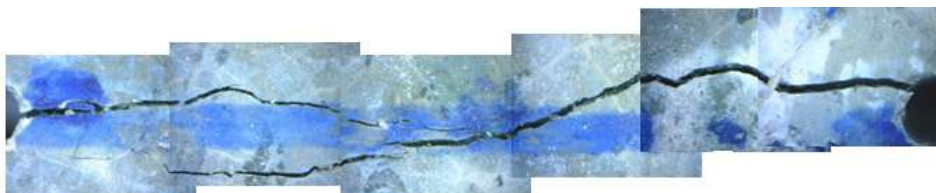


Figura 4.18: Formação da fissura da amostra C18

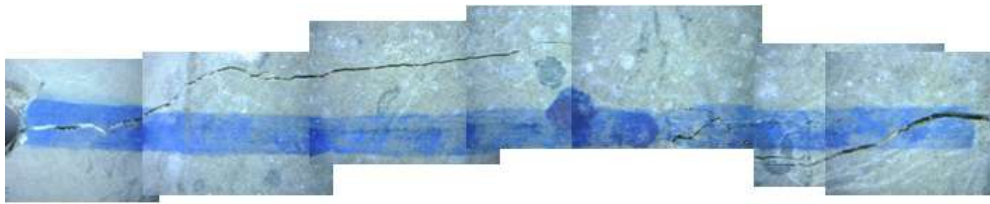


Figura 4.19: Formação da fissura da amostra C17

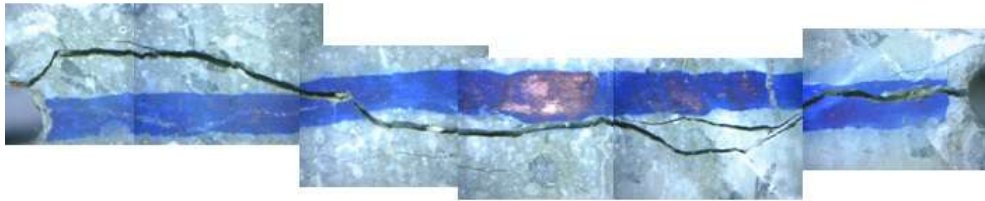


Figura 4.20: Formação da fissura da amostra A18

A figura 4.21 apresenta as curvas tensão x deslocamento decorrente da indução das fissuras nos corpos de prova B14, A16 e C14 da mistura 1. Após a indução, as amostras foram condicionadas em água durante 3 meses.

Observando-se as curvas da figura 4.21, é possível perceber que todas as amostras, também, apresentaram comportamento de endurecimento na tração direta. O valor médio da tensão de primeira fissura para as amostras B14, A16 e C14 foi de  $5,41 \pm 0,73$  MPa. A tensão máxima média observada no processo de indução da fissura foi de  $7,61 \pm 2,33$  MPa, sendo 7,05 MPa, 10,17 MPa e 5,62 MPa para B14, A16 e C14, respectivamente. A rigidez inicial média dessas amostras foi de  $48 \pm 3$  GPa.

Ressalta-se que dentre essas amostras C14 apresenta o maior volume de fibras (276), contudo há de ser observado que o ensaio referente a este corpo de prova foi encerrado prematuramente, sendo que C14 apresentava o mesmo comportamento de B14, podendo então chegar à tensão similar caso obtivesse a mesma abertura de fissura.

As fissuras apresentaram tamanhos diferentes dependendo da forma de medida realizada. De acordo com a lupa de mão as amostras C14, B14 e A16 apresentaram tamanho médio de fissura de  $30 \mu\text{m}$ ,  $52 \mu\text{m}$  e  $189 \mu\text{m}$ , respectivamente. Utilizando-se os dados de deslocamento residual obtidos a partir das leituras dos LVDTs (figura 4.21), identificou-se que as aberturas de fissura foram de  $53 \mu\text{m}$ ,  $155 \mu\text{m}$  e  $218 \mu\text{m}$  para as amostras C14, B14 e A16, respectivamente, de acordo com esse meio de medida.

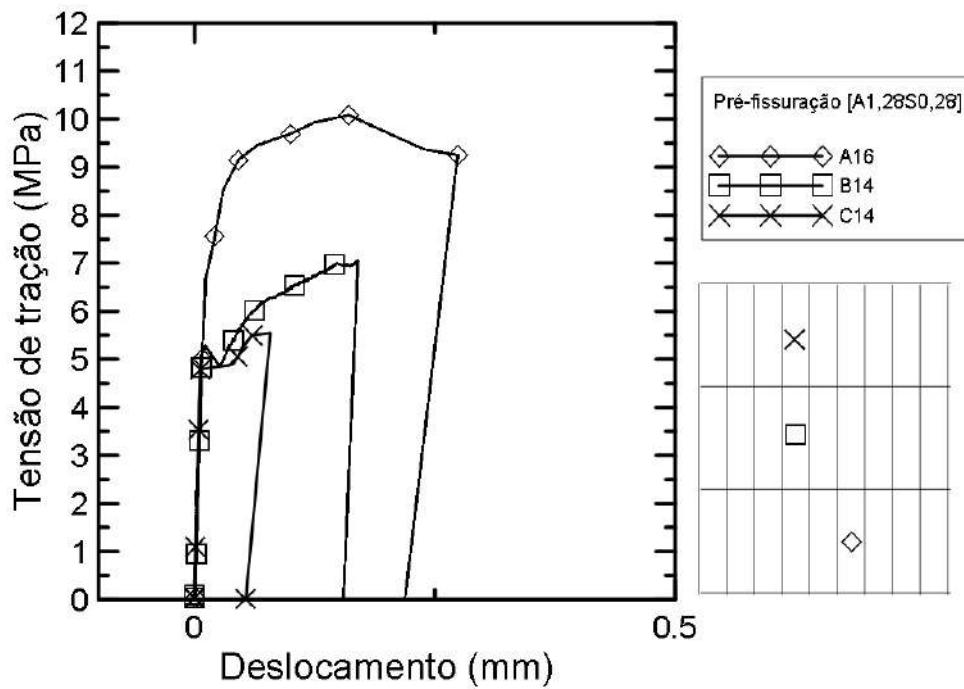


Figura 4.21: Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova B14, A16 e C14 da mistura A1,28S0,28

As figuras 4.22, 4.23 e 4.24 mostram as aberturas de fissuras obtidas após o descarregamento do ensaio de tração direta. Uma vez mais, observa-se que todas as amostras apresentaram ramificações das fissuras principais, essas possuem aberturas da ordem de 2-20  $\mu\text{m}$ .

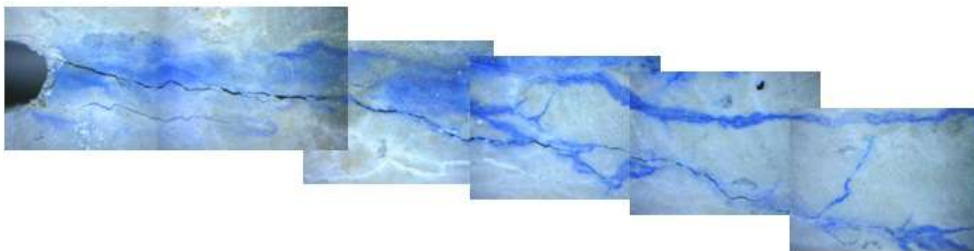


Figura 4.22: Formação da fissura da amostra C14

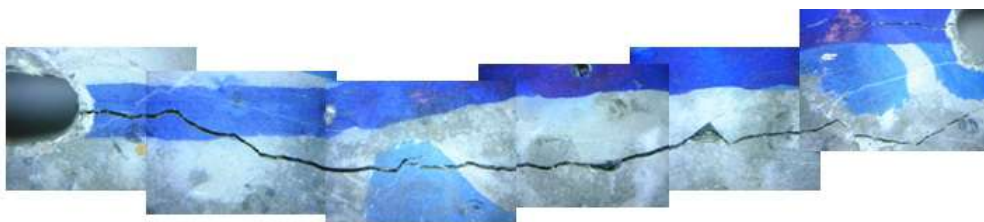


Figura 4.23: Formação da fissura da amostra B14



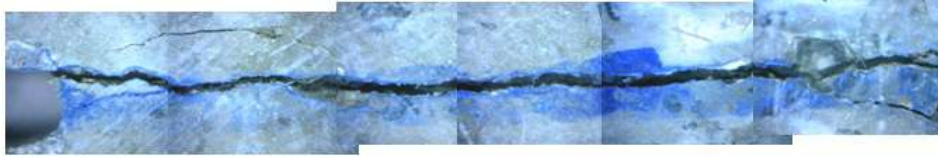


Figura 4.24: Formação da fissura da amostra A16

O valor médio máximo da tensão no ensaio de indução de fissura foi  $8,41 \pm 1,77$  MPa e a rigidez média de todos os corpos de prova nos resultados dessa indução foi de  $50 \pm 3$  GPa.

### 4.3.2 Mistura 2 [A1,28]

A figura 4.25 apresenta as curvas tensão x deslocamento decorrente da indução das fissuras nos corpos de prova B26, A26 e C26 da mistura 2. Após a indução, as amostras foram submetidas a ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses.

Observando-se as curvas da figura 4.25, nota-se B26 e C26 apresentaram comportamento de endurecimento na tração direta, com aumento do valor da tensão após a formação da primeira fissura. A amostra A26 apresentou um comportamento de amolecimento. Esse comportamento pode ser explicado pela menor quantidade de fibras no corpo de prova em pauta (171), sendo que apenas 13% desse total encontravam-se na região R1. O valor médio da tensão de primeira fissura para as amostras B26, A26 e C26 foi de  $5,48 \pm 0,64$  MPa. A tensão máxima média observada no processo de indução da fissura foi de  $6,91 \pm 0,90$  MPa, sendo que B26, A26 e C26 apresentaram tensões máximas de 7,93 MPa, 6,24 MPa e 6,56 MPa, respectivamente. A rigidez inicial média dessas amostras foi de  $47 \pm 4$  GPa.

As fissuras apresentaram tamanhos de abertura bastante similares nas duas formas de medida realizadas, a variação máxima entre os dois métodos foi observado para a amostra A26 que apresentou uma diferença de  $50 \mu\text{m}$  entre os métodos. As amostras A26, B26 e C26 apresentaram tamanho médio de fissura de  $192 \mu\text{m}$ ,  $244 \mu\text{m}$  e  $182 \mu\text{m}$ , respectivamente, quando medidas pela lupa de mão. Utilizando-se os dados de deslocamento residual obtidos a partir das leituras dos LVDTs (figura 4.25), esses mesmos corpos de prova apresentaram tamanhos de fissura de  $241 \mu\text{m}$ ,  $215 \mu\text{m}$  e  $150 \mu\text{m}$ , respectivamente.

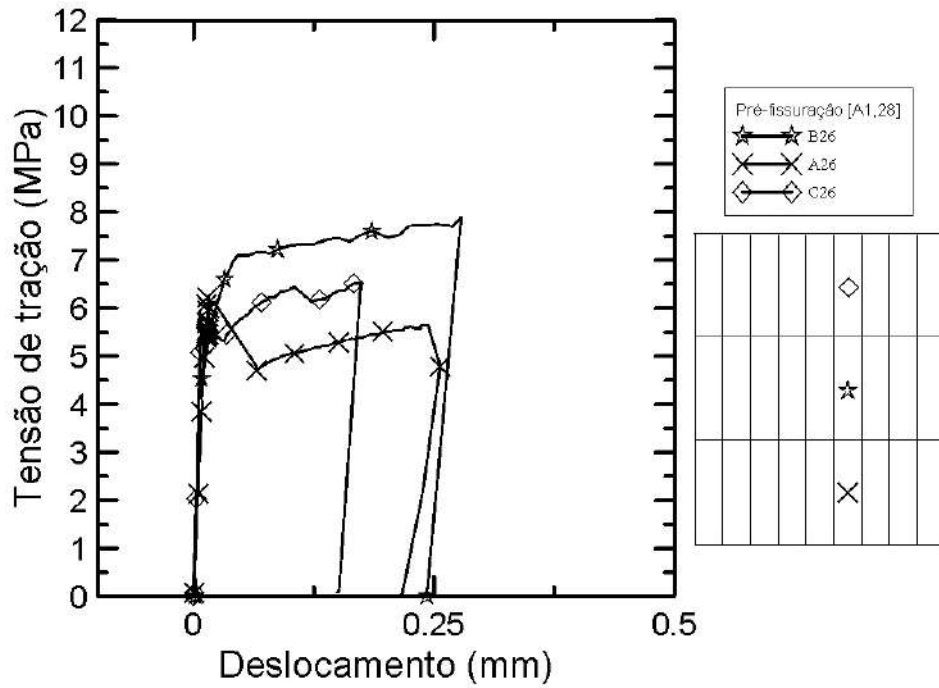


Figura 4.25: Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova B26, A26 e C26 da mistura 2

As figuras 4.26, 4.27 e 4.28 mostram as aberturas de fissuras obtidas após o descarregamento do ensaio de tração direta. Uma vez mais, observa-se que todas as amostras apresentaram ramificações das fissuras principais, essas possuem aberturas da ordem de 2-50  $\mu\text{m}$ .

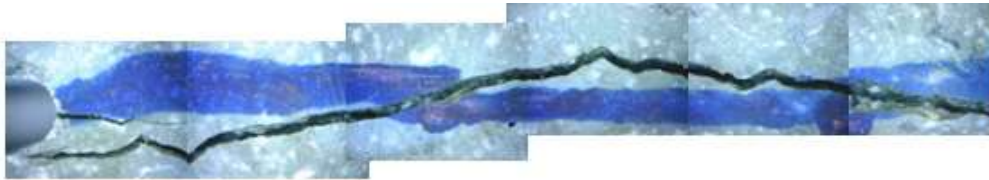


Figura 4.26: Formação da fissura da amostra C26

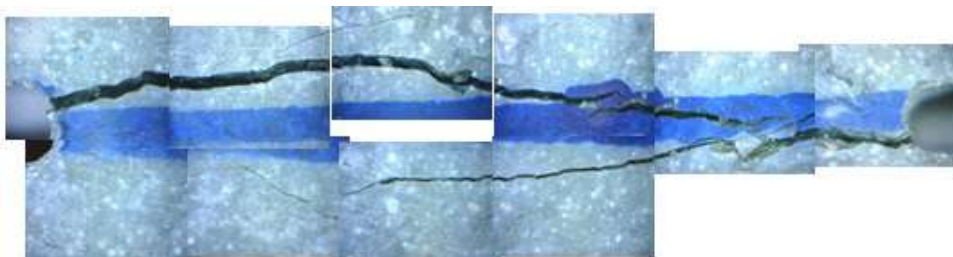


Figura 4.27: Formação da fissura da amostra B26

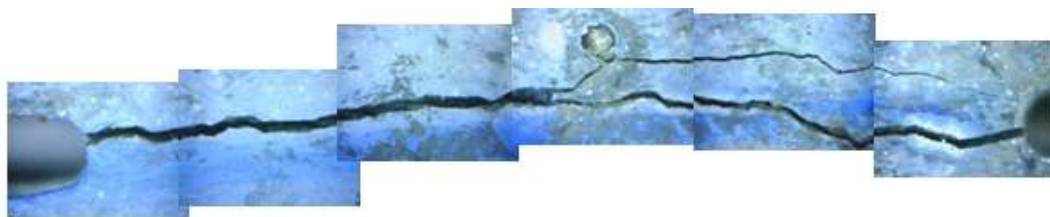


Figura 4.28: Formação da fissura da amostra A26

A figura 4.29 apresenta as curvas tensão x deslocamento decorrente da indução das fissuras nos corpos de prova B25, A25 e C25 da mistura 2. Após a indução, as amostras foram condicionadas em água durante 3 meses.

Observando-se as curvas da figura 4.29, nota-se que as amostras C25 e B25 apresentaram comportamento de endurecimento na tração direta, com aumento do valor da tensão após a formação da primeira fissura. A amostra A25 apresentou um comportamento de amolecimento com uma queda acentuada de tensão de, aproximadamente, 2,00 MPa após a tensão de primeira fissura. Esse comportamento pode ser explicado pela menor quantidade de fibras tanto na região R1 (16%) quanto no total (174 fibras), corroborando, também, a maior abertura de fissura medida pela lupa de mão (255  $\mu\text{m}$ ).

O valor médio da tensão de primeira fissura para as amostras B25, A25 e C25 foi de  $5,85 \pm 0,62$  MPa. A tensão máxima média observada no processo de indução da fissura foi de  $8,50 \pm 1,59$  MPa, sendo que B25, A25 e C25 apresentaram tensões máximas de 7,99 MPa, 7,23 MPa e 10,29 MPa, respectivamente. A rigidez inicial média dessas amostras foi de  $49 \pm 2$  GPa.

As fissuras apresentaram tamanhos variando em aproximadamente 100  $\mu\text{m}$  entre as medidas de lupa de mão e os deslocamento residuais obtidos pelos LVDTs, com maiores aberturas medidas no primeiro. As medidas médias auferidas pela lupa de mão para as amostras A25, B25 e C25 foram de 255  $\mu\text{m}$ , 230  $\mu\text{m}$  e 38  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Utilizando-se os dados de deslocamento residual obtidos a partir das leituras dos LVDTs (figura 4.29), esses mesmos corpos de prova apresentaram tamanhos de fissura 160  $\mu\text{m}$ , 147  $\mu\text{m}$  e 140  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

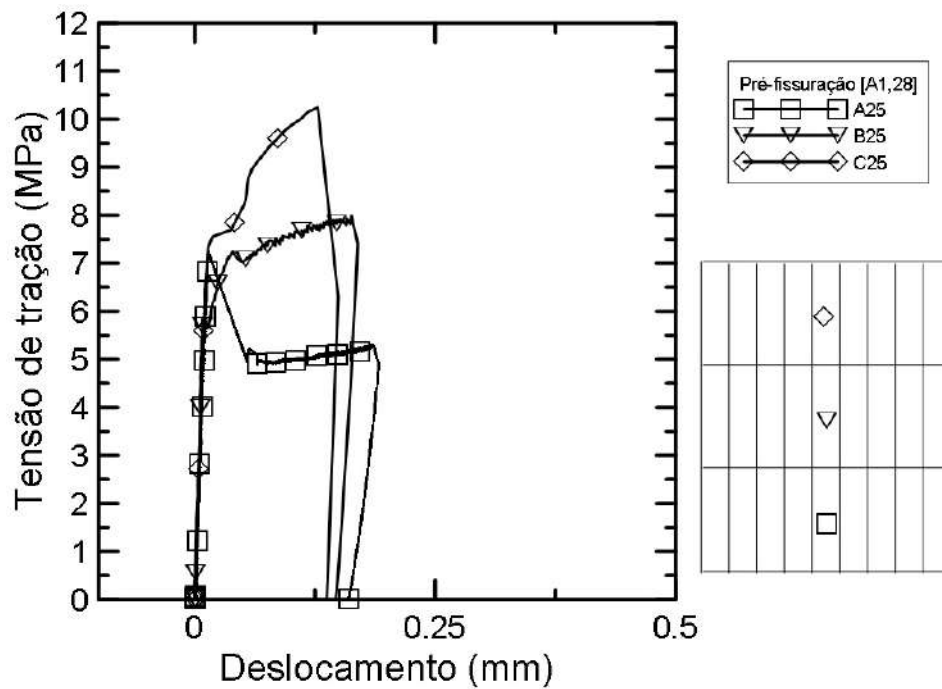


Figura 4.29: Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova B25, A25 e C25 da mistura 2

As figuras 4.30, 4.31 e 4.32 mostram as aberturas de fissuras obtidas após o descarregamento do ensaio de tração direta. Observa-se que as amostras C25 e A25 apresentaram ramificações das fissuras principais, em maior quantidade na primeira, possuindo aberturas da ordem de 1-15  $\mu\text{m}$ . A amostra B25 não apresentou fissuras secundárias.

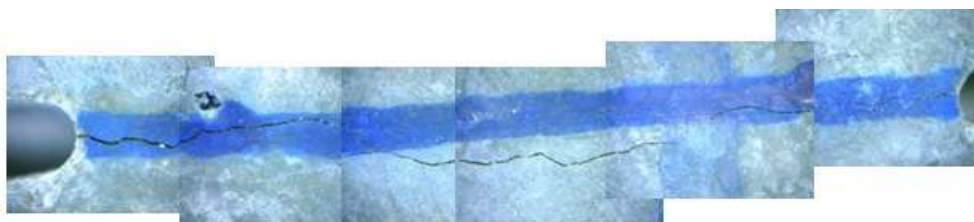


Figura 4.30: Formação da fissura da amostra C25

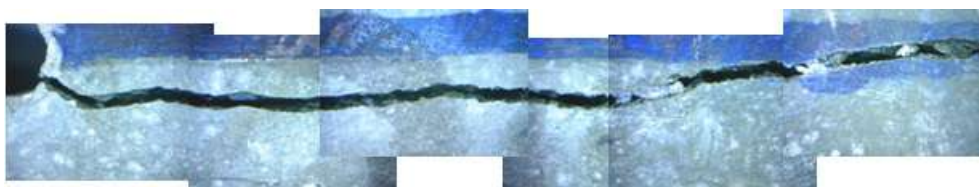


Figura 4.31: Formação da fissura da amostra B25



Figura 4.32: Formação da fissura da amostra A25

A figura 4.33 apresenta as curvas tensão x deslocamento decorrente da indução das fissuras nos corpos de prova B27, A23 e C27 da mistura 2. Após a indução, as amostras foram submetidas a 6 meses de ciclos de molhagem e secagem.

Observa-se que os corpos de prova C27 e B27 apresentaram um comportamento de endurecimento na tração direta fissura. A amostra A23 apresentou uma queda acentuada de tensão após a tensão de primeira fissura. Esse comportamento pode ser explicado pela menor quantidade de fibras tanto na região R1 (16%) quanto no total (188 fibras), corroborando, também, a maior abertura de fissura medida pela lupa de mão (480  $\mu\text{m}$ ).

O valor médio da tensão de primeira fissura para as amostras B27, A23 e C27 foi de  $5,30 \pm 0,55$  MPa. A tensão máxima média observada no processo de indução da fissura foi de  $7,14 \pm 1,15$  MPa, sendo que B27, A23 e C27 apresentaram tensões máximas de 7,63 MPa, 5,82 MPa e 9,73 MPa, respectivamente. A rigidez inicial média dessas amostras foi de  $49 \pm 4$  GPa.

As fissuras apresentaram tamanhos de abertura mais homogêneos para as duas formas de medida realizadas, com exceção da amostra C27. As amostras C27, B27 e A23 apresentaram tamanho médio de fissura de 49  $\mu\text{m}$ , 153  $\mu\text{m}$  e 480  $\mu\text{m}$ , respectivamente, quando medidas pela lupa de mão. Utilizando-se os dados de deslocamento residual obtidos a partir das leituras dos LVDTs (figura 4.33), esses mesmos corpos de prova apresentaram tamanhos de fissura de 81  $\mu\text{m}$ , 118  $\mu\text{m}$  e 435  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

As figuras 4.34, 4.35 e 4.36 mostram as aberturas de fissuras obtidas após o descarregamento do ensaio de tração direta. Observa-se que as amostras C27 e B27 apresentaram ramificações das fissuras principais, possuindo aberturas da ordem de 5-15  $\mu\text{m}$ . A amostra A23 não apresentou fissuras secundárias.

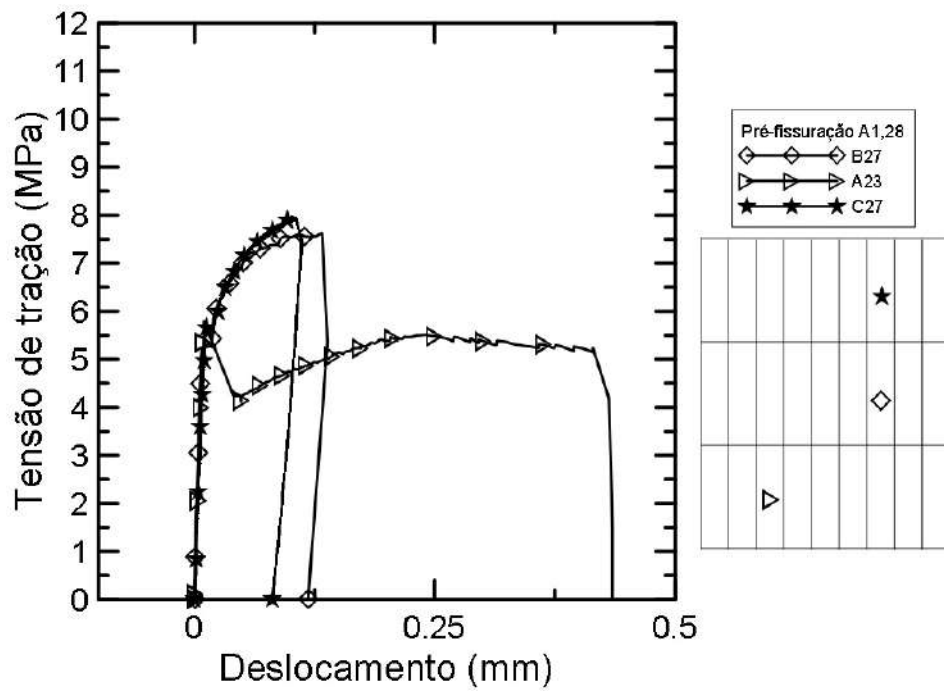


Figura 4.33: Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova B27, A23 e C27 da mistura 2

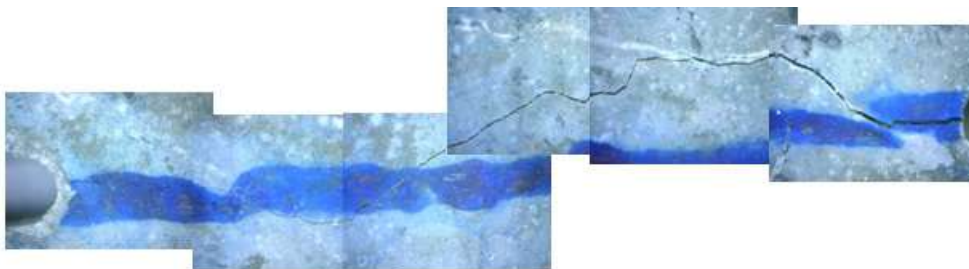


Figura 4.34: Formação da fissura da amostra C27

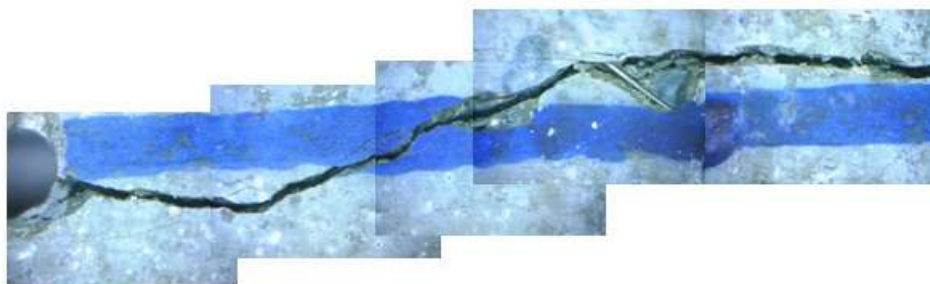


Figura 4.35: Formação da fissura da amostra B27



Figura 4.36: Formação da fissura da amostra A23

Por fim, a figura 4.37 apresenta as curvas tensão x deslocamento decorrente da indução das fissuras nos corpos de prova B24, A24 e C24 da mistura 2. Após a indução, as amostras foram condicionadas em água durante 6 meses.

Observando-se as curvas da figura 4.37, nota-se B24 e C24 apresentaram comportamento de endurecimento na tração direta, com aumento do valor da tensão após a formação da primeira fissura. A amostra A24 apresentou uma queda acentuada de tensão após a tensão de primeira fissura, seguido de uma leve recuperação. Esse comportamento pode ser explicado pela menor quantidade de fibras no corpo de prova em pauta (182), sendo que apenas 19% desse total encontravam-se na região R1. O valor médio da tensão de primeira fissura para as amostras B24, A24 e C24 foi de  $6,20 \pm 0,13$  MPa. A tensão máxima média observada no processo de indução da fissura foi de  $9,05 \pm 1,72$  MPa, sendo que B24, A24 e C24 apresentaram tensões máximas de 9,51 MPa, 7,15 MPa e 10,49 MPa, respectivamente. A rigidez inicial média dessas amostras foi de  $49 \pm 2$  GPa.

As fissuras apresentaram tamanhos de abertura diferentes para as duas formas de medida realizadas. As amostras C24, B24 e A24 apresentaram tamanho médio de fissura de  $24 \mu\text{m}$ ,  $69 \mu\text{m}$  e  $250 \mu\text{m}$ , respectivamente, quando medidas pela lupa de mão. Utilizando-se os dados de deslocamento residual obtidos a partir das leituras dos LVDTs (figura 4.37), esses mesmos corpos de prova apresentaram tamanhos de fissura de  $37 \mu\text{m}$ ,  $133 \mu\text{m}$  e  $192 \mu\text{m}$ , respectivamente.

As figuras 4.38, 4.39 e 4.40 mostram as aberturas de fissuras obtidas após o descarregamento do ensaio de tração direta. Observa-se que todas as amostras apresentaram ramificações das fissuras principais, possuindo aberturas da ordem de  $2\text{-}20 \mu\text{m}$ .

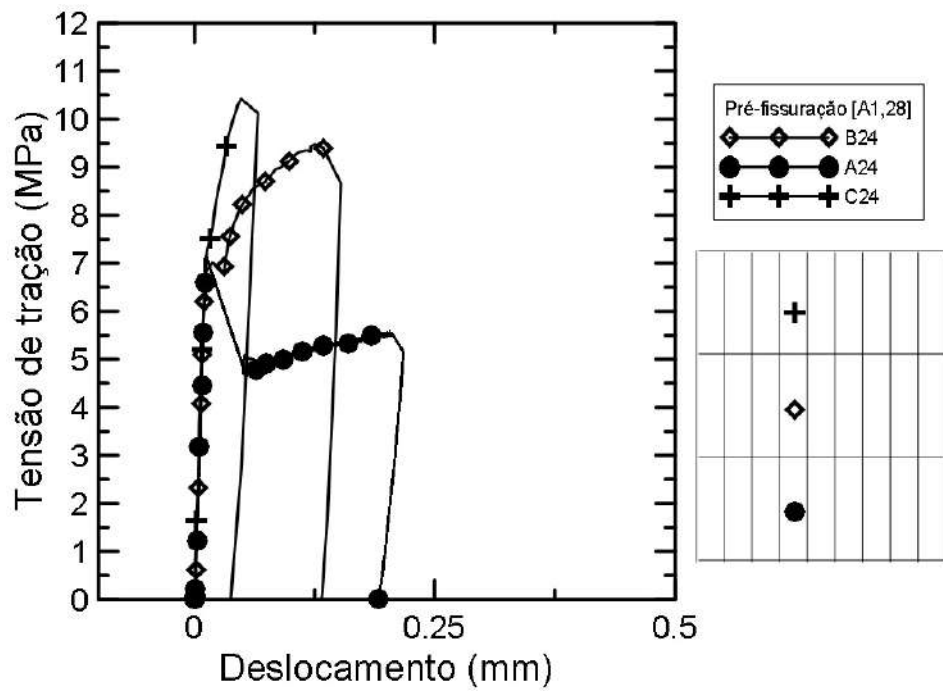


Figura 4.37: Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova B24, A24 e C24 da mistura 2



Figura 4.38: Formação da fissura da amostra C24

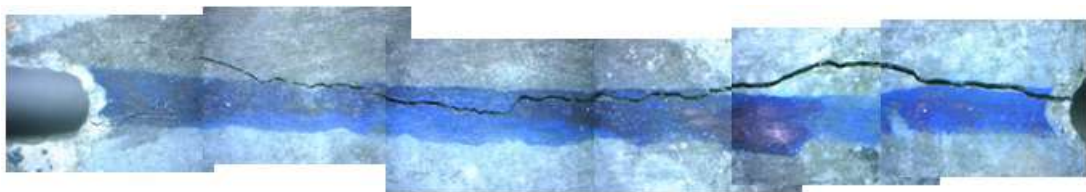


Figura 4.39: Formação da fissura da amostra B24



Figura 4.40: Formação da fissura da amostra A24



O valor médio máximo da tensão no ensaio de indução de fissura para todas as amostras estudadas nessa mistura foi  $8,05 \pm 1,60$  MPa e a rigidez inicial média de todos os corpos de prova dessa indução foi de  $49 \pm 3$  GPa.

### 4.3.3 Mistura 3 - [A0,64S0,64]

A figura 4.41 apresenta as curvas tensão x deslocamento decorrente da indução das fissuras nos corpos de prova B36, A36 e C36 da mistura 3. Após a indução, as amostras foram submetidas a ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses.

Observando-se as curvas da figura 4.41, nota-se que todas as amostras apresentaram comportamento de amolecimento na tração direta, com diminuição do valor da tensão após a tensão de primeira fissura. Isso se deveu ao fato de haver menor quantidade de reforço de fibras de aço no compósito. O valor médio da tensão de primeira fissura para as amostras B36, A36 e C36 foi de  $5,73 \pm 0,63$  MPa, igual ao valor da tensão máxima média haja vista o comportamento de amolecimento de todas as amostras. A rigidez inicial média dessas amostras foi de  $41 \pm 1$  GPa.

As fissuras apresentaram tamanhos de abertura mais similares para as duas formas de medida realizadas, com exceção da amostra A36. As amostras A36, B36 e C36 apresentaram tamanho médio de fissura de  $57 \mu\text{m}$ ,  $91 \mu\text{m}$  e  $146 \mu\text{m}$ , respectivamente, quando medidas pela lupa de mão. Utilizando-se os dados de deslocamento residual obtidos a partir das leituras dos LVDTs (figura 4.41), esses mesmos corpos de prova apresentaram tamanhos de fissura de  $131 \mu\text{m}$ ,  $99 \mu\text{m}$  e  $124 \mu\text{m}$ , respectivamente.

As figuras 4.42, 4.43 e 4.44 mostram as aberturas de fissuras obtidas após o descarregamento do ensaio de tração direta. Observa-se que todas as amostras apresentaram ramificações das fissuras principais, possuindo aberturas da ordem de  $10\text{-}50 \mu\text{m}$ .



Figura 4.42: Formação da fissura da amostra C36



Figura 4.43: Formação da fissura da amostra B36

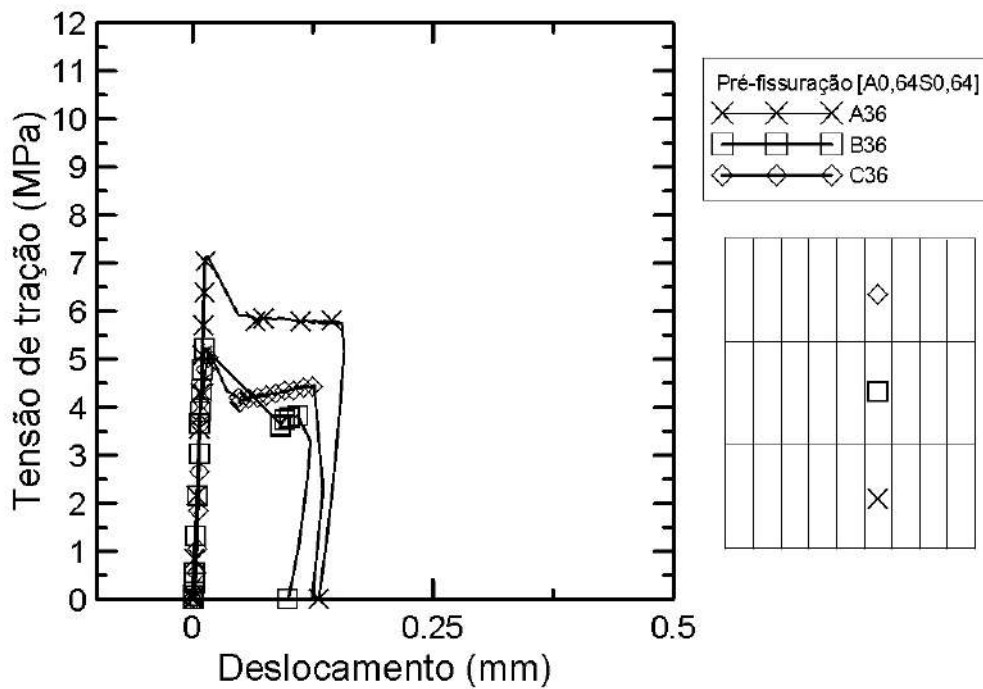


Figura 4.41: Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova B36, A36 e C36 da mistura 3

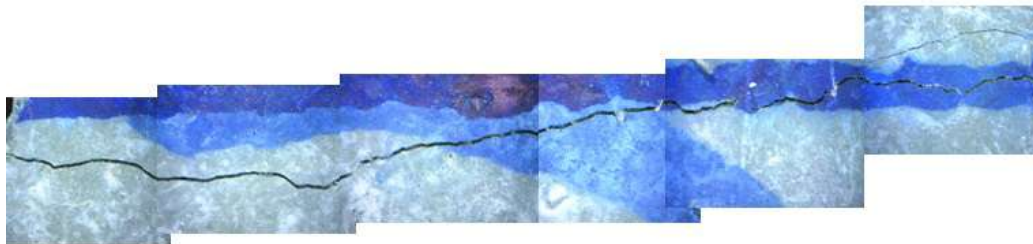


Figura 4.44: Formação da fissura da amostra A36

A figura 4.45 apresenta as curvas tensão x deslocamento decorrente da indução das fissuras nos corpos de prova B37 e C37 da mistura 3. Após a indução, as amostras foram submetidas a 6 meses de ciclos de molhagem e secagem.

Observando-se as curvas da figura 4.45, nota-se que a amostra C37 apresentou um comportamento de endurecimento na tração direta, com aumento do valor da tensão após a formação da primeira fissura. Isso se deveu a grande quantidade de fibras na seção transversal (165), sendo a segunda maior concentração de fibras dessa mistura. A amostra A37 apresentou um comportamento de amolecimento. O valor médio da tensão de primeira fissura para as amostras B37 e A37 foi de  $4,45 \pm 0,48$  MPa. A tensão máxima média observada no processo de indução da fissura foi de  $4,53 \pm 0,59$  MPa. A rigidez inicial média dessas amostras foi de  $40 \pm 1$  GPa.

As fissuras apresentaram tamanhos de abertura diversos para as duas formas de medida realizadas. As amostras B37 e C37 apresentaram tamanho médio de fissura de  $294 \mu\text{m}$  e  $140 \mu\text{m}$ , respectivamente, quando medidas pela lupa de mão.

Utilizando-se os dados de deslocamento residual obtidos a partir das leituras dos LVDTs (figura 4.45), esses mesmos corpos de prova apresentaram tamanhos de fissura de 183  $\mu\text{m}$  e 101  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

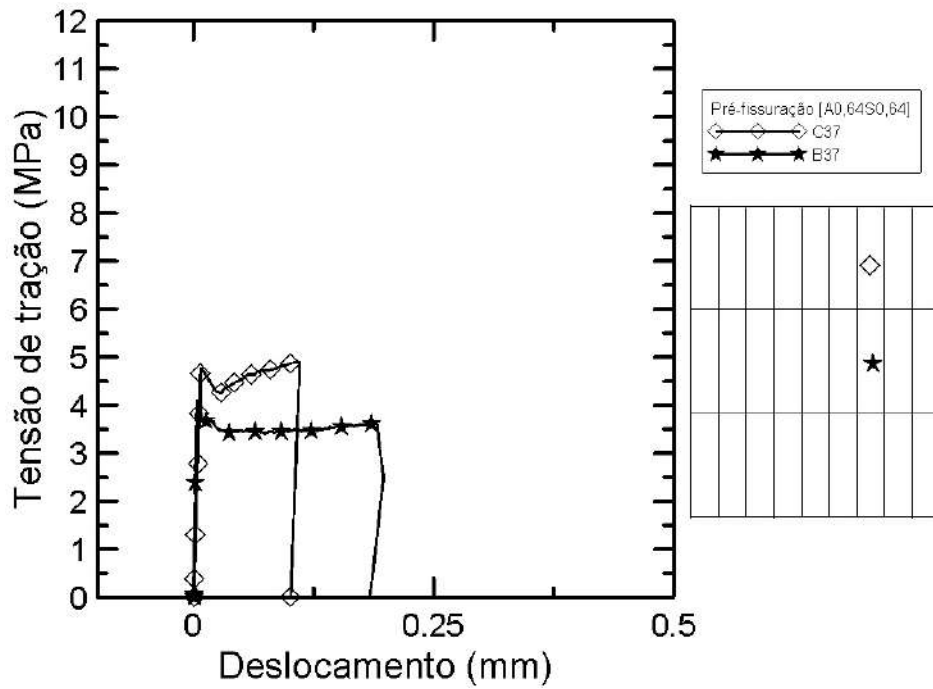


Figura 4.45: Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova B37 e C37 da mistura 3

As figuras 4.46 e 4.47 mostram as aberturas de fissuras obtidas após o descarregamento do ensaio de tração direta. Observa-se que todas as amostras apresentaram grande quantidade de ramificações das fissuras principais, possuindo aberturas da ordem de 20-80  $\mu\text{m}$ .

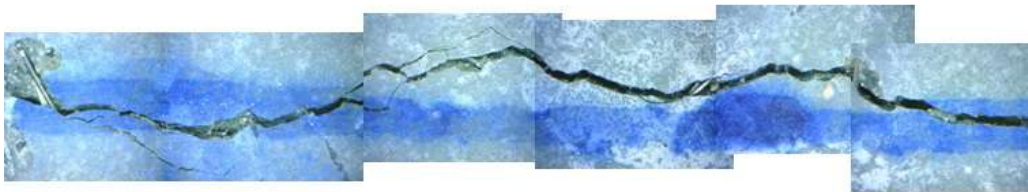


Figura 4.46: Formação da fissura da amostra C37

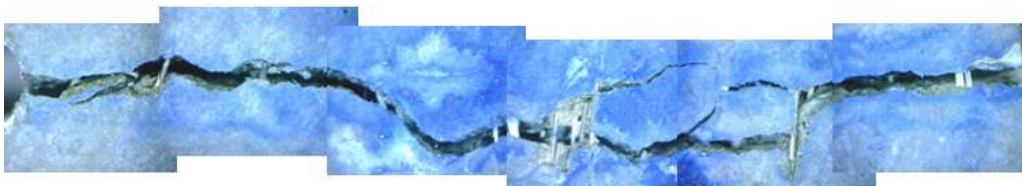


Figura 4.47: Formação da fissura da amostra B37

A figura 4.48 apresenta as curvas tensão x deslocamento decorrente da indução das fissuras nos corpos de prova A35, B35 e C35 da mistura 3. Após a indução, as amostras foram condicionadas em água durante 3 meses.

Observando-se as curvas da figura 4.48, nota-se que todas as amostras apresentaram comportamento amolecimento, com diminuição da tensão após a tensão de primeira fissura. Isso se deveu ao fato de haver menor quantidade de reforço de fibras de aço. O valor médio da tensão de primeira fissura para as amostras A35, B35 e C35 foi de  $5,73 \pm 0,63$  MPa, valor igual ao observado para a tensão máxima média observada no processo de indução da fissura, haja vista o comportamento de amolecimento de todas as amostras. A rigidez inicial média dessas amostras foi de  $45 \pm 5$  GPa.

As fissuras apresentaram tamanhos de abertura diferentes para as duas formas de medida realizadas. As amostras A35, B35 e C35 apresentaram tamanho médio de fissura de  $47 \mu\text{m}$ ,  $64 \mu\text{m}$  e  $147 \mu\text{m}$ , respectivamente, quando medidas pela lupa de mão. Utilizando-se os dados de deslocamento residual obtidos a partir das leituras dos LVDTs (figura 4.48), esses mesmos corpos de prova apresentaram tamanhos de fissura de  $137 \mu\text{m}$ ,  $134 \mu\text{m}$  e  $126 \mu\text{m}$ , respectivamente.

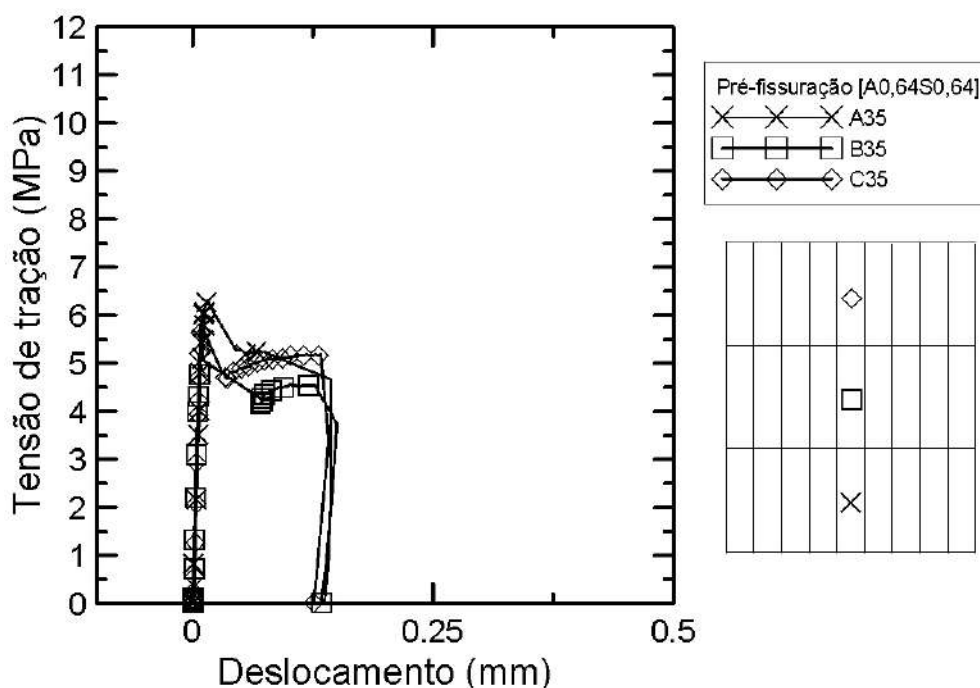


Figura 4.48: Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova A35, B35 e C35 da mistura 3

As figuras 4.49, 4.50 e 4.51 mostram as aberturas de fissuras obtidas após o descarregamento do ensaio de tração direta. Observa-se que todas as amostras apresentaram ramificações das fissuras principais, possuindo aberturas da ordem de  $2-50 \mu\text{m}$ .

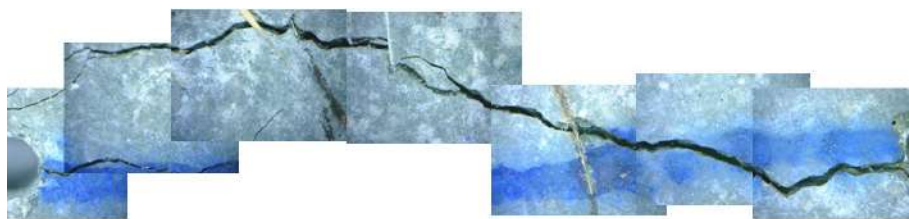


Figura 4.49: Formação da fissura da amostra C35

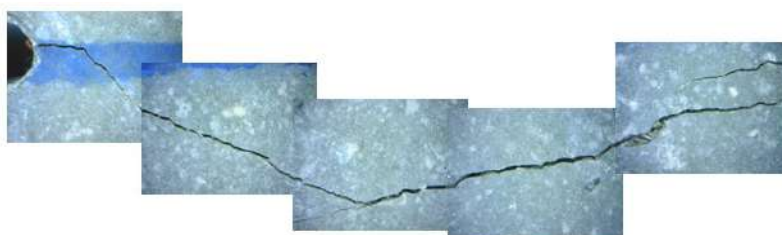


Figura 4.50: Formação da fissura da amostra B35



Figura 4.51: Formação da fissura da amostra A35

A figura 4.52 apresenta as curvas tensão x deslocamento decorrente da indução das fissuras nos corpos de prova A34, B34 e C34 da mistura 3. Após a indução, as amostras foram condicionadas em água durante 6 meses.

Observando-se as curvas da figura 4.52, nota-se que as amostras A34 e C34 apresentaram comportamento de amolecimento, com diminuição da tensão após a tensão de primeira fissura, enquanto a amostra B34 apresentou um comportamento de pseudo-endurecimento. Isso pode ter de dado devido a maior homogeneidade de distribuição das fibras ao longo da seção transversal do corpo de prova C34, com 33%, 32% e 35% na região R1, R2 e R3, respectivamente. O valor médio da tensão de primeira fissura para as amostras A34, B34 e C34 foi de  $4,88 \pm 0,25$  MPa. A tensão máxima média observada no processo de indução da fissura foi de  $5,46 \pm 0,77$  MPa. A rigidez inicial média dessas amostras foi de  $43 \pm 5$  GPa.

As fissuras apresentaram tamanhos de abertura diferentes para as duas formas de medida realizadas. As amostras C34, B34 e A34 apresentaram tamanho médio de fissura de  $329 \mu\text{m}$ ,  $143 \mu\text{m}$  e  $251 \mu\text{m}$ , respectivamente, quando medidas pela lupa de mão. Utilizando-se os dados de deslocamento residual obtidos a partir das leituras

dos LVDTs (figura 4.52), esses mesmos corpos de prova apresentaram tamanhos de fissura de 212  $\mu\text{m}$ , 118  $\mu\text{m}$  e 182  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

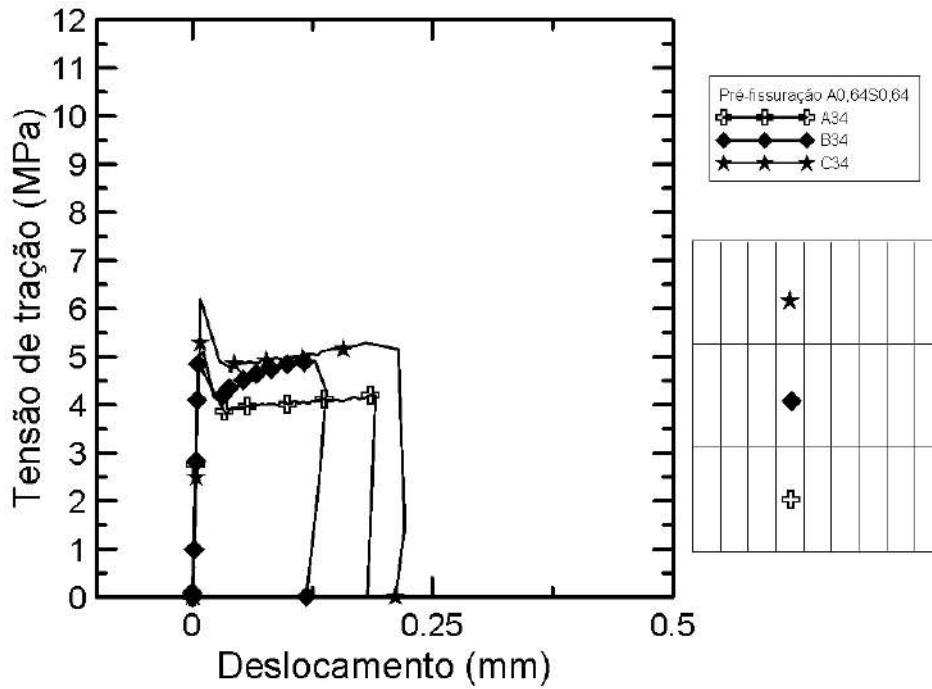


Figura 4.52: Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova A34, B34 e C34 da mistura 3

As figuras 4.53, 4.54 e 4.55 mostram as aberturas de fissuras obtidas após o descarregamento do ensaio de tração direta. Observa-se que todas as amostras apresentaram ramificações das fissuras principais, possuindo aberturas da ordem de 1-60  $\mu\text{m}$ .



Figura 4.53: Formação da fissura da amostra C34



Figura 4.54: Formação da fissura da amostra B34



Figura 4.55: Formação da fissura da amostra A34

Conclui-se que a maioria das amostras dessa mistura apresentaram um comportamento de amolecimento, com exceção dos corpos de prova situados na localização C da placa, quais sejam, C37, C36, C35 e C34; e também da amostra B35.

O valor médio máximo da tensão no ensaio de indução de fissura para todas as amostras dessa mistura foi de  $5,57 \pm 0,86$  MPa e a rigidez inicial média de todos os corpos de prova nos resultados dessa indução foi de  $43 \pm 4$  GPa.

#### 4.3.4 Mistura 4 - [A1,00S0,28]

A figura 4.56 apresenta as curvas tensão x deslocamento decorrente da indução das fissuras nos corpos de prova B46, A44 e C46 da mistura 4. Após a indução, as amostras foram submetidas a ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses.

Observando-se as curvas da figura 4.56, nota-se que todas as amostras apresentaram comportamento de endurecimento, com aumento da tensão após a tensão de primeira fissura. Observa-se, também, que o ensaio da amostra A44 se encerrou anteriormente aos outros, sendo que essa amostra poderia alcançar maiores valores de tensão caso o ensaio fosse conduzido às aberturas de fissura dos corpos de prova B46 e C46. O valor médio da tensão de primeira fissura para as amostras B46, A44 e C46 foi de  $5,78 \pm 0,58$  MPa. A tensão máxima média observada no processo de indução da fissura foi de  $8,19 \pm 0,75$  MPa. A rigidez inicial média dessas amostras foi de  $54 \pm 1$  GPa.

As fissuras apresentaram tamanhos de abertura diferentes para as duas formas de medida realizadas. As amostras B46, A44 e C46 apresentaram tamanho médio de fissura de  $85 \mu\text{m}$ ,  $74 \mu\text{m}$  e  $128 \mu\text{m}$ , respectivamente, quando medidas pela lupa de mão. Utilizando-se os dados de deslocamento residual obtidos a partir das leituras dos LVDTs (figura 4.56), esses mesmos corpos de prova apresentaram tamanhos de fissura de  $169 \mu\text{m}$ ,  $112 \mu\text{m}$  e  $179 \mu\text{m}$ , respectivamente.

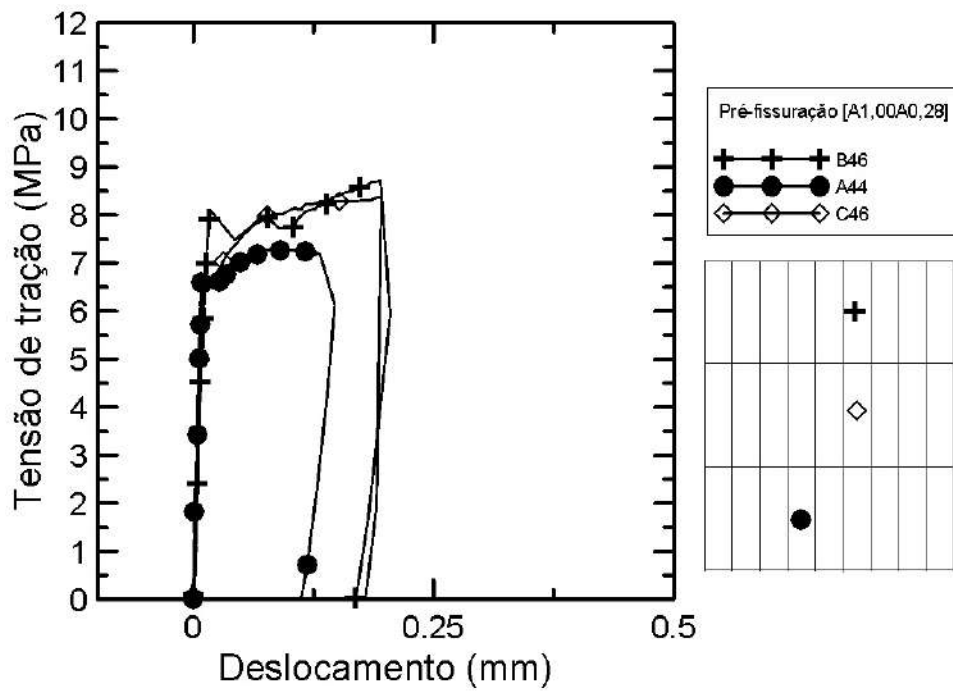


Figura 4.56: Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova A44, B46 e C46 da mistura 4

As figuras 4.57, 4.58 e 4.59 mostram as aberturas de fissuras obtidas após o descarregamento do ensaio de tração direta. Observa-se que todas as amostras apresentaram ramificações das fissuras principais, possuindo aberturas da ordem de 5-50  $\mu\text{m}$ .

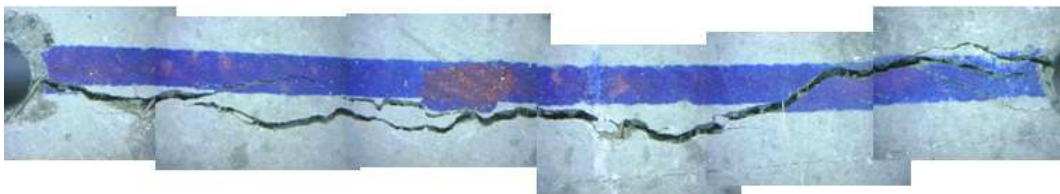


Figura 4.57: Formação da fissura da amostra C46

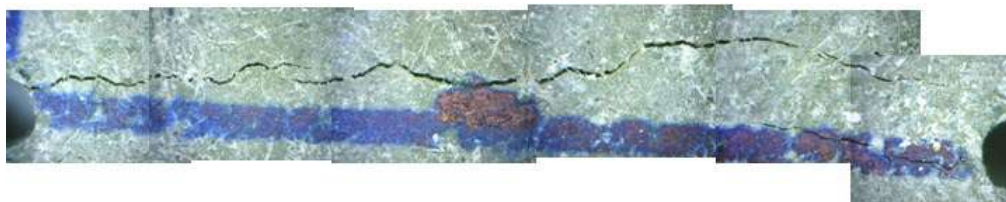


Figura 4.58: Formação da fissura da amostra A44



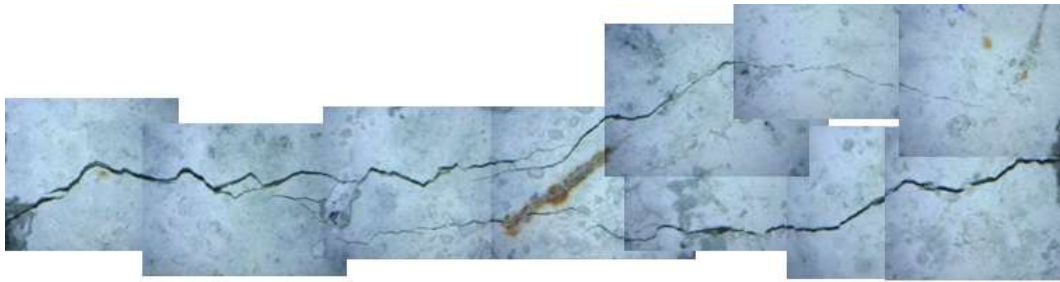


Figura 4.59: Formação da fissura da amostra B46

A figura 4.60 apresenta as curvas tensão x deslocamento decorrente da indução das fissuras nos corpos de prova B43, C43 e C47 da mistura 4. Após a indução, as amostras foram submetidas a ciclos de secagem e molhagem durante 6 meses.

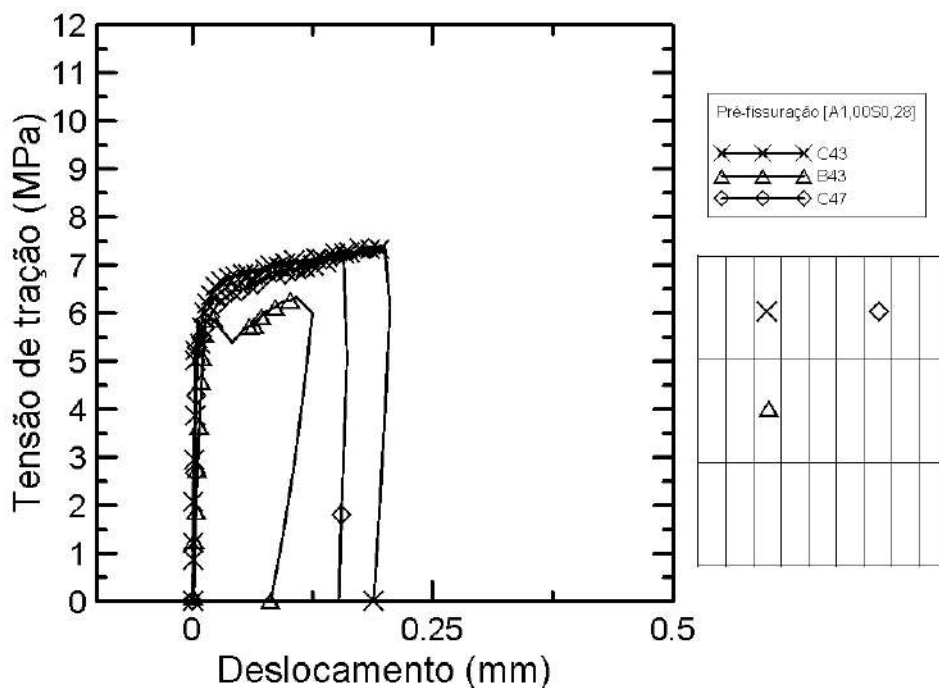


Figura 4.60: Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova C43, B43 e C47 da mistura 4

Observando-se as curvas da figura 4.60, nota-se que todas as amostras apresentaram comportamento de endurecimento, com aumento da tensão após a tensão de primeira fissura. Observa-se, também, que o ensaio da amostra B43 se encerrou anteriormente aos outros, sendo que essa amostra poderia alcançar maiores valores de tensão caso o ensaio fosse conduzido às aberturas de fissura dos corpos de prova C47 e C43. O valor médio da tensão de primeira fissura para as amostras B43, C43 e C47 foi de  $5,53 \pm 1,42$  MPa. A tensão máxima média observada no processo de indução da fissura foi de  $7,02 \pm 0,59$  MPa. A rigidez inicial média dessas amostras foi de  $56 \pm 5$  GPa.

As fissuras apresentaram tamanhos de abertura diferentes para as duas formas de medida realizadas. As amostras B43, C43 e C47 apresentaram tamanho médio de fissura de  $36\ \mu\text{m}$ ,  $205\ \mu\text{m}$  e  $232\ \mu\text{m}$ , respectivamente, quando medidas pela lupa de mão. Utilizando-se os dados de deslocamento residual obtidos a partir das leituras dos LVDTs (figura 4.60), esses mesmos corpos de prova apresentaram tamanhos de fissura de  $80\ \mu\text{m}$ ,  $188\ \mu\text{m}$  e  $152\ \mu\text{m}$ , respectivamente.

As figuras 4.61, 4.62 e 4.63 mostram as aberturas de fissuras obtidas após o descarregamento do ensaio de tração direta. Observa-se que todas as amostras apresentaram ramificações das fissuras principais, possuindo aberturas da ordem de  $5\text{-}50\ \mu\text{m}$ .

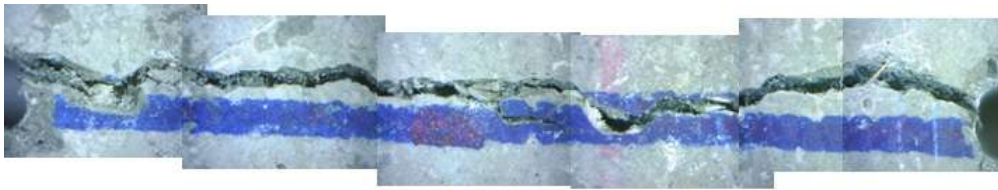


Figura 4.61: Formação da fissura da amostra C43

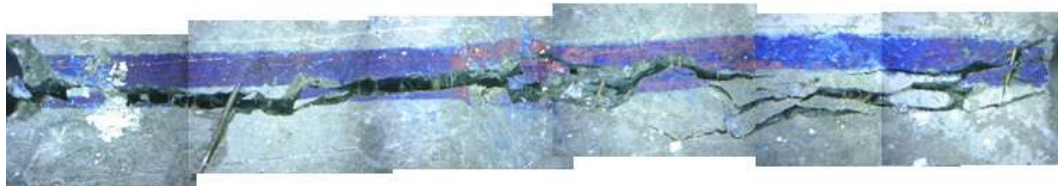


Figura 4.62: Formação da fissura da amostra C47



Figura 4.63: Formação da fissura da amostra B43

A figura 4.64 apresenta as curvas tensão x deslocamento decorrente da indução das fissuras nos corpos de prova A45 e C45 da mistura 4. Após a indução, as amostras foram condicionadas em água durante 3 meses.

Observando-se as curvas da figura 4.64, nota-se que todas as amostras apresentaram comportamento de endurecimento, com aumento da tensão após a tensão de primeira fissura. O valor médio da tensão de primeira fissura para as amostras A45 e C45 foi de  $5,25 \pm 0,14$  MPa. A tensão máxima média observada no processo de indução da fissura foi de  $5,73 \pm 0,41$  MPa. A rigidez inicial média dessas amostras foi de  $55 \pm 7$  GPa.

As fissuras apresentaram tamanhos de abertura similares para as duas formas de medida realizadas. As amostras A45 e C45 apresentaram tamanho médio de fissura de  $79 \mu\text{m}$  e  $167 \mu\text{m}$ , respectivamente, quando medidas pela lupa de mão. Utilizando-se os dados de deslocamento residual obtidos a partir das leituras dos LVDTs (figura 4.64), esses mesmos corpos de prova apresentaram tamanhos de fissura de  $91 \mu\text{m}$  e  $184 \mu\text{m}$ , respectivamente.

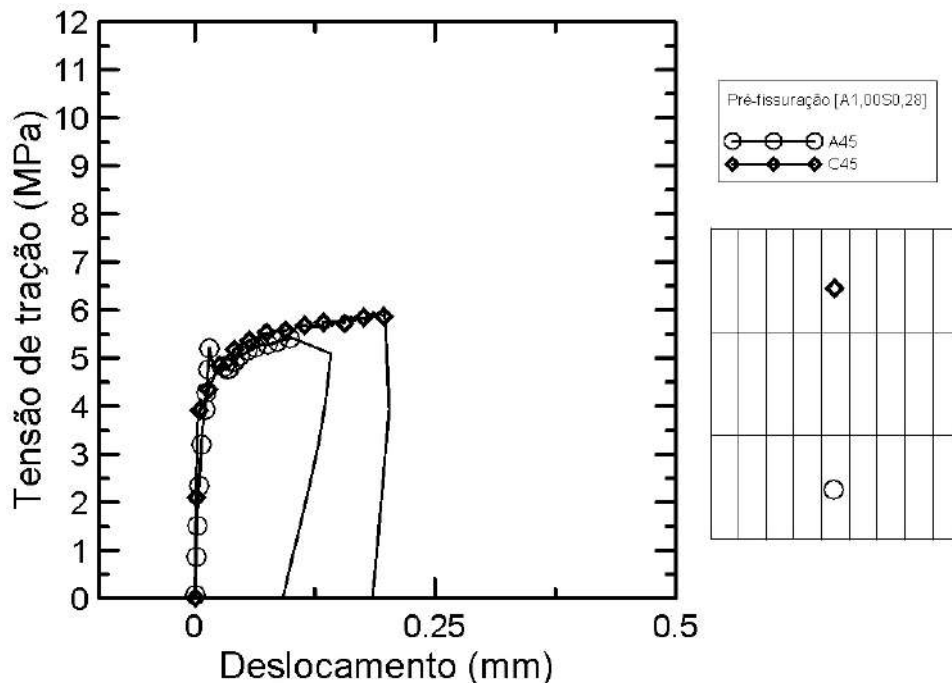


Figura 4.64: Curva tensão x abertura de fissura medida pelos LVDTs (média) para indução de fissura dos corpos de prova A45 e C45 da mistura 4

As figuras 4.65 e 4.66 mostram as aberturas de fissuras obtidas após o descarregamento do ensaio de tração direta. Observa-se que todas as amostras apresentaram ramificações das fissuras principais, possuindo aberturas da ordem de  $5\text{-}50 \mu\text{m}$ .

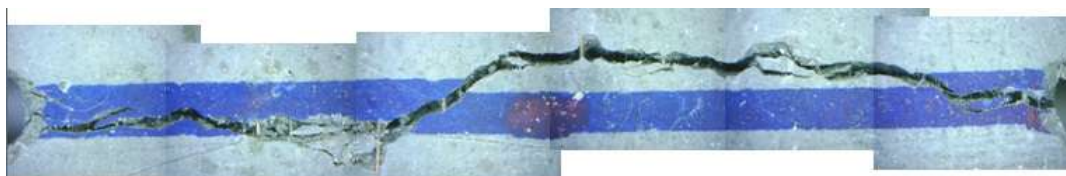


Figura 4.65: Formação da fissura da amostra C45

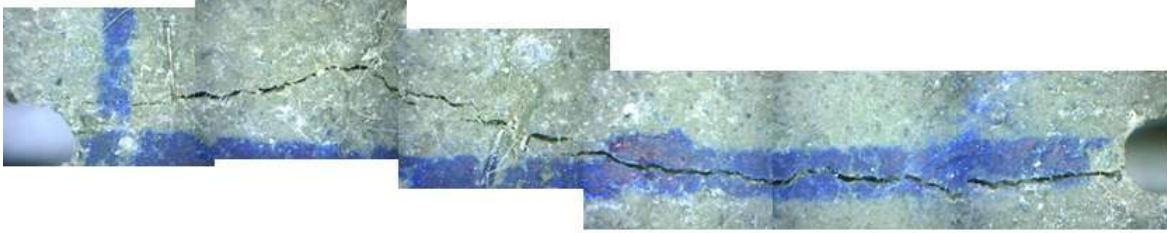


Figura 4.66: Formação da fissura da amostra A45

A tensão máxima dos corpos de prova estudados na mistura 4 foi de  $7,14 \pm 1,16$  MPa e a rigidez de  $55 \pm 1$  GPa. Observou-se que todas as amostras apresentaram comportamento de endurecimento com exceção da amostra A45.

A figura 4.67 mostra um resumo das médias da tensões de primeira fissura e máximas de todos os corpos de prova estudados.

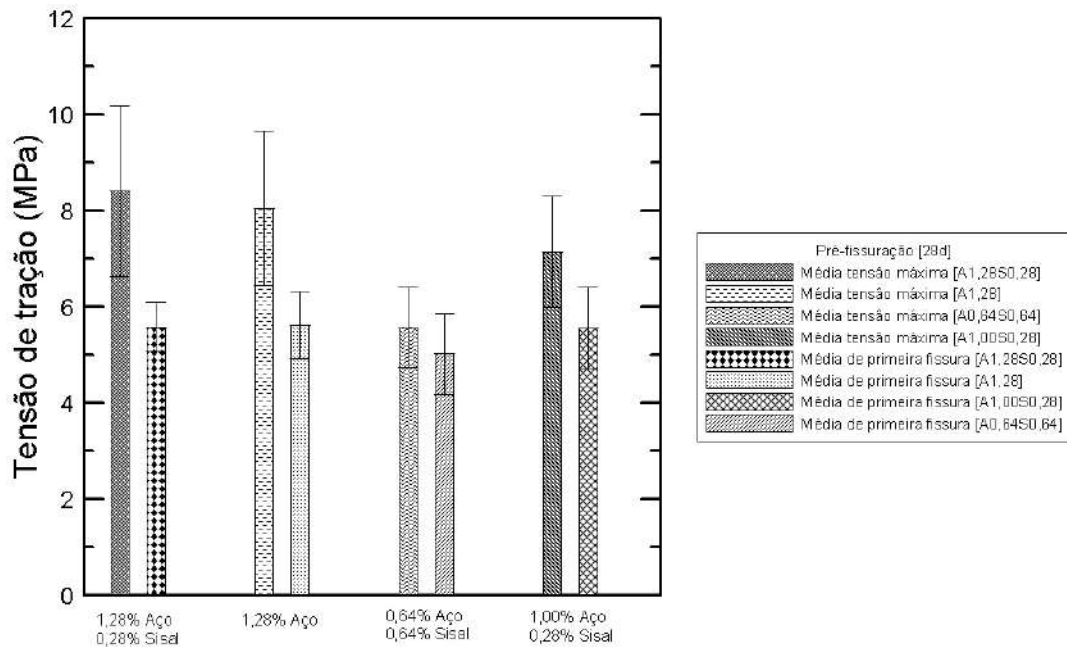


Figura 4.67: Comparativo de tensões médias máxima e de primeira fissura aos 28 dias para todas as misturas

Observa-se que as tensões médias de primeira fissura são similares nas misturas com A1,28S0,28; A1,28 e A1,00S0,28, tendo uma pequena diminuição para a mistura A0,64S0,64. Contudo, estatisticamente podem ser consideradas iguais, variando entre  $5,02 \pm 0,85$  MPa a  $5,62 \pm 0,69$  MPa, fato este esperado, haja vista a tensão de primeira fissura ser controlada pela matriz que é a mesma para todas as misturas. Destaca-se que o volume de fibra de sisal de 0,64% não foi suficiente para causar dano ao concreto e diminuição considerável da tensão de primeira fissura.

No tocante à tensão média máxima, observa-se um melhor desempenho da mistura A1,28S0,28, seguido de A1,28; A1,00S0,28 e finalmente A064S0,64, com tensões

de  $8,41 \pm 1,77$  MPa,  $8,05 \pm 1,60$  MPa,  $7,14 \pm 1,16$  MPa e  $5,57 \pm 0,85$  MPa, respectivamente. Nota-se que a tensão máxima aumenta a medida que a quantidade de fibras de aço na mistura aumenta. Esse comportamento também era esperado visto que as fibras são responsáveis pelo comportamento do compósito após a primeira fissura e as fibras de aço (alto módulo) representam melhor reforço que as fibras de sisal (baixo módulo).

Importante destacar que as médias de rigidez de todas as misturas foram similares, variando de  $42 \pm 4$  GPa para A0,64S0,64 a  $55 \pm 4$  GPa para A1,00S0,28.

## 4.4 Auto-cicatrização

### 4.4.1 Resultados de auto-cicatrização obtidos para a mistura M1

#### 4.4.1.1 Amostras submetidas a ciclos de molhagem e secagem

A figura 4.68 apresenta os resultados obtidos para ensaios de tração direta realizados nos corpos de prova C18, A18 e C17 submetidos a ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses. As curvas em cinza foram obtidas na etapa de indução da fissura, apresentada anteriormente, enquanto as curvas em preto apresentam o comportamento tensão x deslocamento após o condicionamento das amostras pré-fissuradas.

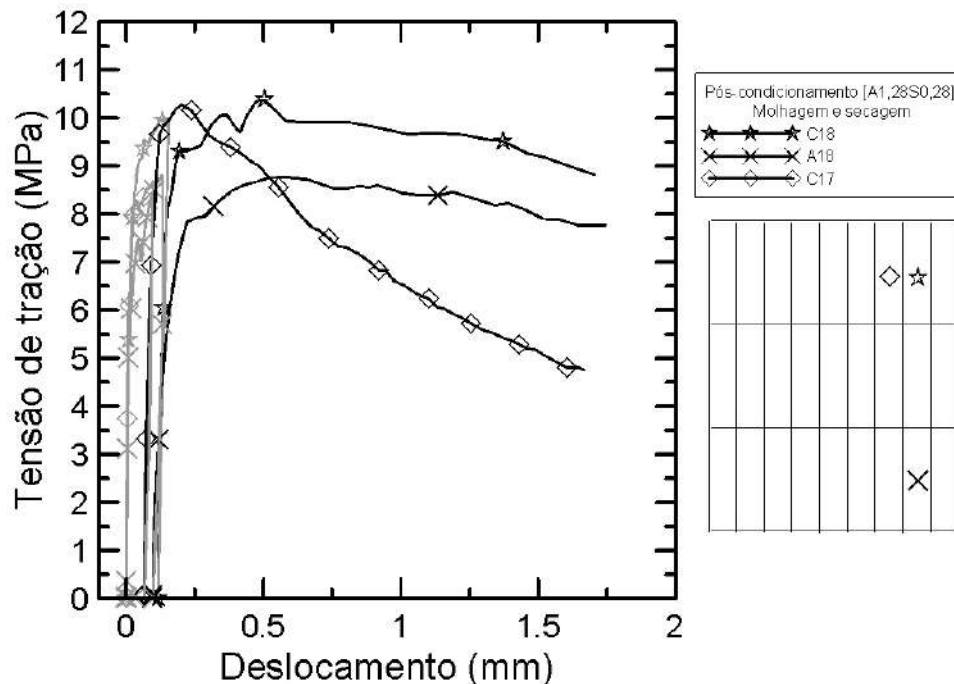


Figura 4.68: Curvas de tensão x deslocamento para as amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A1,28S0,28]

Observando-se as curvas da figura 4.68, nota-se que todos os corpos de prova apresentaram ganho ou mantiveram a tensão máxima obtida na fase de indução de fissura. A tensão máxima média observada no ensaio de tração direta após o condicionamento foi de  $9,84 \pm 0,88$  MPa, sendo que C18, A18 e C17 apresentaram tensões máximas de 10,41 MPa, 8,82 MPa e 10,28 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras pós-condicionamento foi de  $28 \pm 4$  GPa, sendo que C18, A18 e C17 apresentaram respectivas rigidez de 33 GPa, 24 GPa e 26 GPa.

A tabela 4.9 apresenta os índices,  $IRT_1$ ,  $IRT_2$  e IRD, calculados conforme explicitado no item 3.3. Os resultados obtidos para os índices  $IRT_2$  mostram que a tensão máxima pós-condicionamento, obtida para o deslocamento de  $101 \mu\text{m}$  na amostra C17, foi 16% maior do que o valor máximo medido durante a indução da fissura. As tensões máxima pós-condicionamento obtidas para as amostras A18 e C18, nos deslocamentos de  $133 \mu\text{m}$  e  $128 \mu\text{m}$ , foram 4% e 3% menores do que o valores máximos medidos na indução da fissura correspondente aos mesmos deslocamentos.

Os resultados obtidos para o  $IRT_1$  demonstram, portanto, que ocorreu manutenção na tensão máxima pós-fissuração para uma amostra, enquanto as outras duas obtiveram aumento de 4% e 18% da tensão máxima pós-fissuração apresentada na fase de indução de fissura.

O índice IRD variou de 0,47 a 0,63, indicando que não houve uma recuperação completa da rigidez das amostras. Esse comportamento pode estar relacionado com o não selamento completo da fissura principal, induzida nas amostras (ver figuras 4.70, 4.72 e 4.71).

Tabela 4.9: Índices calculados das amostras de molhagem e secagem [A1,28S0,28]

M1 [A1,28S0,28]			
CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD
C17	1,18	1,16	0,51
A18	1,00	0,94	0,47
C18	1,04	0,97	0,63

A figura 4.69 apresenta as curvas tensão x deslocamento obtidas a partir dos ensaios realizados nos corpos de prova controle e nos corpos de prova com fissura induzida, ambos após o condicionamento. É possível observar que as amostras controle apresentaram uma tensão média de  $10,81 \pm 0,09$  MPa, sendo que A12 e B18 apresentaram tensões máximas de 10,41 MPa e 10,28 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras de controle pós-condicionamento foi de  $51 \pm 1$  GPa, sendo que A12 e B18 apresentaram respectivas rigidez de 50 GPa e 52 GPa.

A relação entre a média das tensões máximas pós-fissuração das amostras pré-

fissuradas e das amostras de controle indica que ocorre uma redução de apenas 9% nessa propriedade.

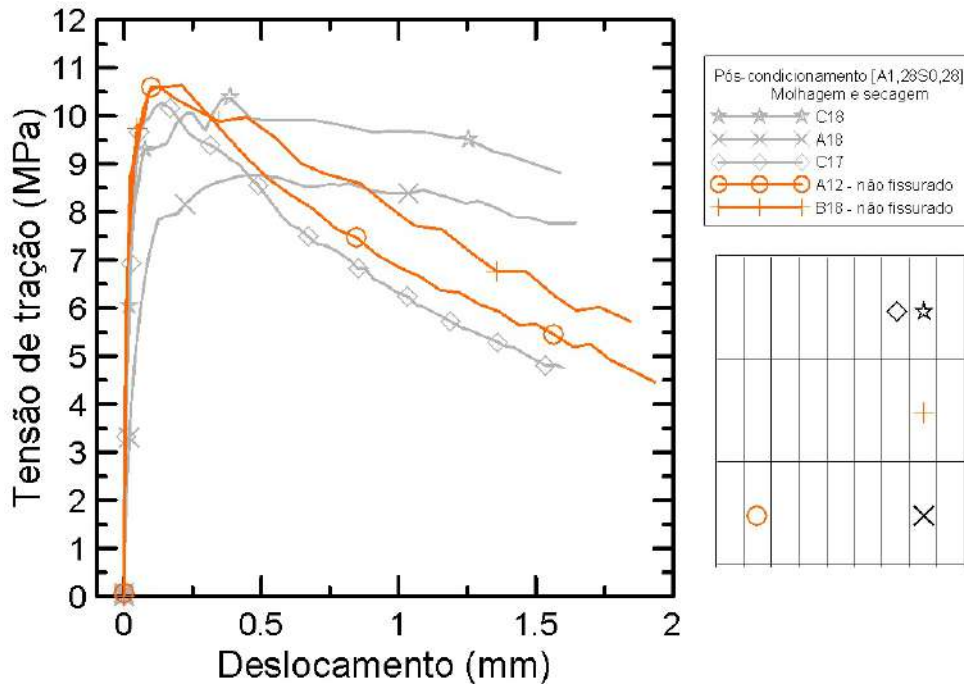


Figura 4.69: Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A1,28S0,28]

A rigidez média das amostras fissuradas ( $28 \pm 4$  GPa) é cerca de 45% menor do que das amostras de controle ( $51 \pm 1$  GPa).

Interessante se faz destacar que, apesar de não ter havido completo selamento da fissura principal em nenhum dos corpos de prova, houve uma recuperação mecânica significativa dos mesmos. A figura 4.70 mostra que o selamento parcial das fissuras principais foi incompleto, já as fissuras menores ao redor da fissura principal, foram majoritariamente seladas. O mesmo ocorre com os corpos de prova A18 e C17, conforme figuras 4.71 e 4.72.

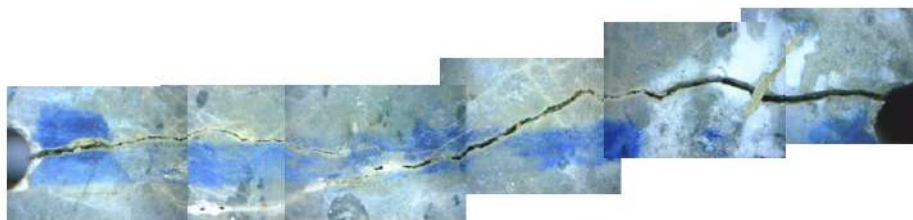


Figura 4.70: Incompleto selamento da fissura do C18

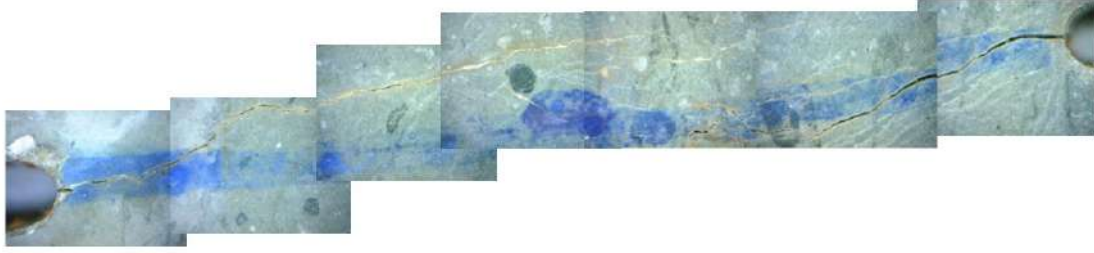


Figura 4.71: Incompleto selamento da fissura do C17

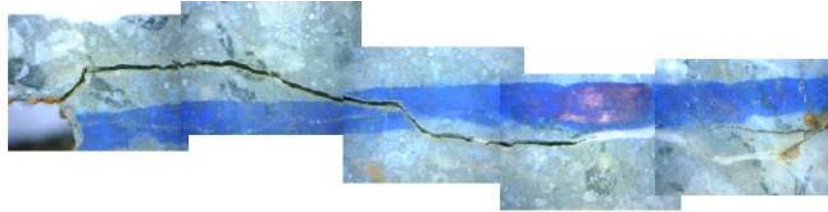


Figura 4.72: Incompleto selamento da fissura do A18

#### 4.4.1.2 Amostras condicionadas em água

A figura 4.73 apresenta os resultados obtidos para ensaios de tração direta realizados nos corpos de prova C14, B14 e A16 submetidos ao condicionamento em água durante 3 meses. As curvas em cinza foram obtidas na etapa de indução da fissura, apresentada anteriormente, enquanto as curvas em preto apresentam o comportamento tensão x deslocamento após o condicionamento das amostras pré-fissuradas.

Observando-se as curvas da figura 4.73, nota-se que todos os corpos de prova, com exceção da amostra A16, apresentaram ganho ou mantiveram a tensão máxima obtida na fase de indução de fissura. A tensão máxima média observada no ensaio de tração direta após o condicionamento foi de  $7,89 \pm 2,11$  MPa, sendo que C14, B14 e A16 apresentaram tensões máximas de 5,64 MPa, 8,21 MPa e 9,82 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras pós-condicionamento foi de  $30 \pm 5$  GPa, sendo que C14, B14 e A16 apresentaram respectivas rigidez de 33 GPa, 31 GPa e 24 GPa.

A tabela 4.10 apresenta os índices,  $IRT_1$ ,  $IRT_2$  e IRD, calculados conforme explicitado no item 3.3. Os resultados obtidos para os índices  $IRT_2$  mostram que a tensão máxima pós-condicionamento, obtida para o deslocamento de  $101 \mu\text{m}$  na amostra B14 foi 16% maior do que o valor máximo medido na indução da fissura. As tensões máxima pós-condicionamento obtidas para as amostras A16 e C14, nos deslocamentos de  $156 \mu\text{m}$  e  $71 \mu\text{m}$  foram 5% e 7% menores do que o valores máximos medidos na indução da fissura correspondente aos mesmos deslocamentos.

Os resultados obtidos para o  $IRT_1$  demonstram um aumento de tensão pós-fissuração em 16% para a amostra B14, a manutenção da tensão máxima para a



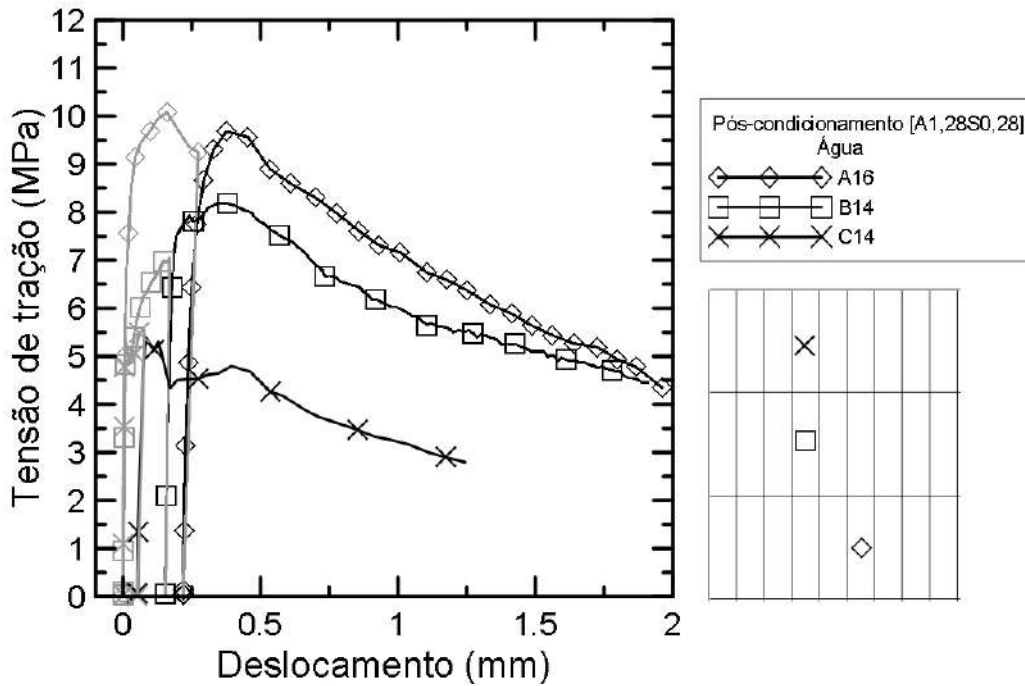


Figura 4.73: Curvas de tensão x deslocamento para as amostras condicionadas em água durante 3 meses [A1,28S0,28]

amostra C14 e uma redução de 3% na tensão máxima pós-fissuração para a amostra A16.

O índice IRD variou de 0,47 a 0,73, indicando que não houve uma recuperação completa da rigidez das amostras. Esse comportamento pode estar relacionado com o não selamento completo da fissura principal, induzida nas amostras (ver figuras 4.75, 4.76 e 4.77).

Tabela 4.10: Índices calculados das amostras de água [A1,28S0,28]

M1 [A1,28S0,28]			
CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD
C14	1,00	0,93	0,73
B14	1,16	1,16	0,65
A16	0,97	0,95	0,47

A figura 4.74 apresenta as curvas tensão x deslocamento obtidas a partir dos ensaios realizados nos corpos de prova controle e nos corpos de prova com fissura induzida, ambos após o condicionamento. É possível observar que as amostras controle apresentaram uma tensão média de  $10,27 \pm 0,88$  MPa, sendo que C12 e C13 apresentaram tensões máximas de 10,89 MPa e 9,65 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras de controle pós-condicionamento foi de  $52 \pm 0$  GPa, sendo que C12 e C13 apresentaram respectivas rigidez de 52 GPa e 52 GPa.

A relação entre a média das tensões máximas pós-fissuração das amostras pré-fissuradas e das amostras de controle indica que ocorre uma redução de 23% nessa propriedade.

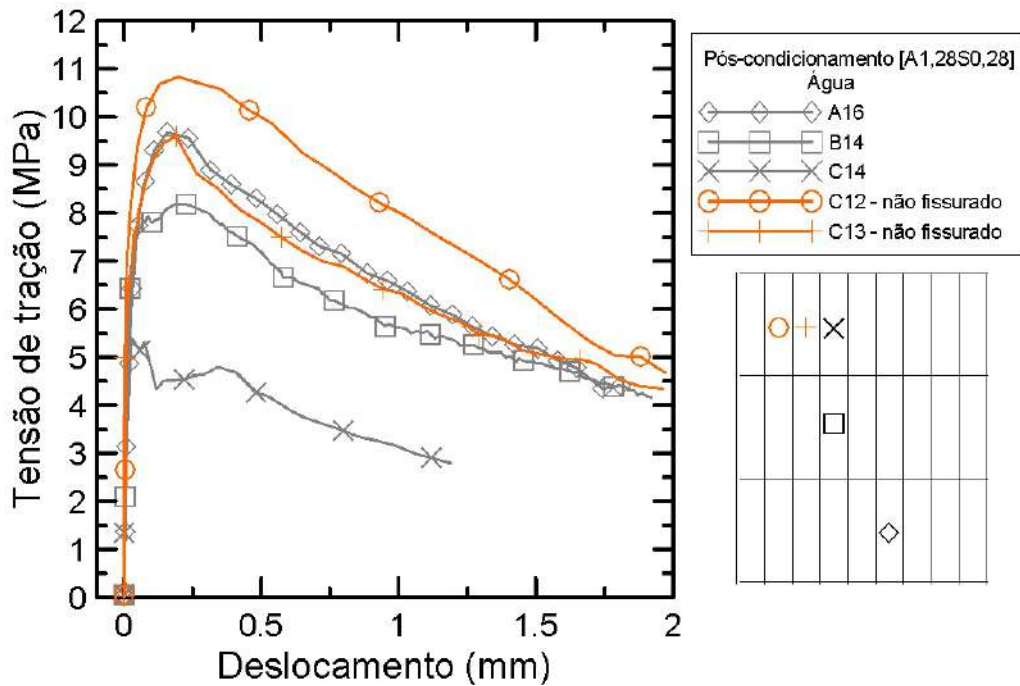


Figura 4.74: Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em água durante 3 meses [A1,28S0,28]

A rigidez média das amostras fissuradas ( $30 \pm 5$  GPa) é cerca de 42% menor do que das amostras de controle ( $52 \pm 0$  GPa).

As figuras 4.75, 4.76 e 4.77 mostram as fissuras após o tratamento em água. Na amostra C14 ocorreu total selamento da fissura, fato esperado já que a fissura apresentava  $30 \mu\text{m}$  de abertura. Observa-se que apesar do não selamento total da fissura principal da amostra A16, a mesma foi capaz de praticamente recuperar a tensão máxima obtida na fase de indução da fissura.



Figura 4.75: Fissura de C14 após tratamento

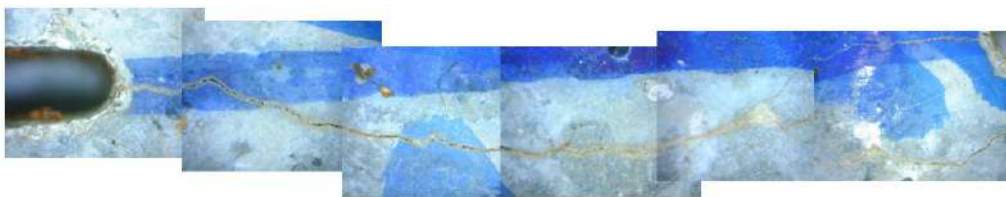


Figura 4.76: Fissura de B14 após tratamento



Figura 4.77: Fissura de A16 após tratamento

Os resultados apresentados nos dois condicionamentos supracitados para a mistura M1 mostram que a auto-cicatrização foi observada nos corpos de prova tanto submetidos a ciclos de molhagem e secagem quanto nos submersos em água. Não foram constatadas diferenças significativas entre as duas formas de condicionamento de acordo com o índice  $IRT_2$  (ver índices nas tabelas 4.9 e 4.10).

A recuperação de tensão máxima (índice  $IRT_1$ ) obteve um discreto aumento no condicionamento de molhagem e secagem. Quando comparados os corpos de prova na fase de indução de fissura (curva cinza) e os corpos de prova controle (curva laranja), é possível observar um aumento de tensão da matriz em aproximadamente 1,50 MPa para corpos de prova submetidos a ciclos de molhagem e secagem, representando a maturação do corpo de prova sem fissuração.

O índice de IRD, relativo a rigidez, apresentou um aumento no condicionamento à água [0,47-0,73] em comparação com o condicionamento em ciclos de molhagem e secagem [0,47-0,63]. Destaca-se a recuperação da rigidez foi menor nos corpos de prova com maiores aberturas de fissura (A16 e A18). Esse comportamento pode ser explicado pelo selamento incompleto da fissura, ocasionando não recuperação da rigidez original.

As fissuras maiores não selaram completamente em ambos os condicionamentos. Apenas é possível a observação de um material de preenchimento, que será identificado no decorrer do trabalho como cristais de carbonato de cálcio, mais delimitados nas amostras de água, como por exemplo na amostra A16.

## 4.4.2 Resultados de auto-cicatrização obtidos para a mistura M2

### 4.4.2.1 Amostras submetidas a ciclos de molhagem e secagem

#### 3 meses

A figura 4.78 apresenta os resultados obtidos para ensaios de tração direta realizados nos corpos de prova C26, A26 e B26 submetidos a ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses. As curvas em cinza foram obtidas na etapa de indução da fissura, apresentada anteriormente, enquanto as curvas em preto apresentam o comportamento tensão x deslocamento após o condicionamento das amostras pré-fissuradas.

Observando-se as curvas da figura 4.78, nota-se que todos os corpos de prova, com exceção da amostra C26, apresentaram ganho ou mantiveram a tensão máxima obtida na fase de indução de fissura. A tensão máxima média observada no ensaio de tração direta após o condicionamento foi de  $7,89 \pm 2,16$  MPa, sendo que C26, A26 e B26 apresentaram tensões máximas de 6,38 MPa, 6,93 MPa e 10,36 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras pós-condicionamento foi de  $24 \pm 5$  GPa, sendo que C26, A26 e B26 apresentaram respectivas rigidez de 28 GPa, 18 GPa e 26 GPa.

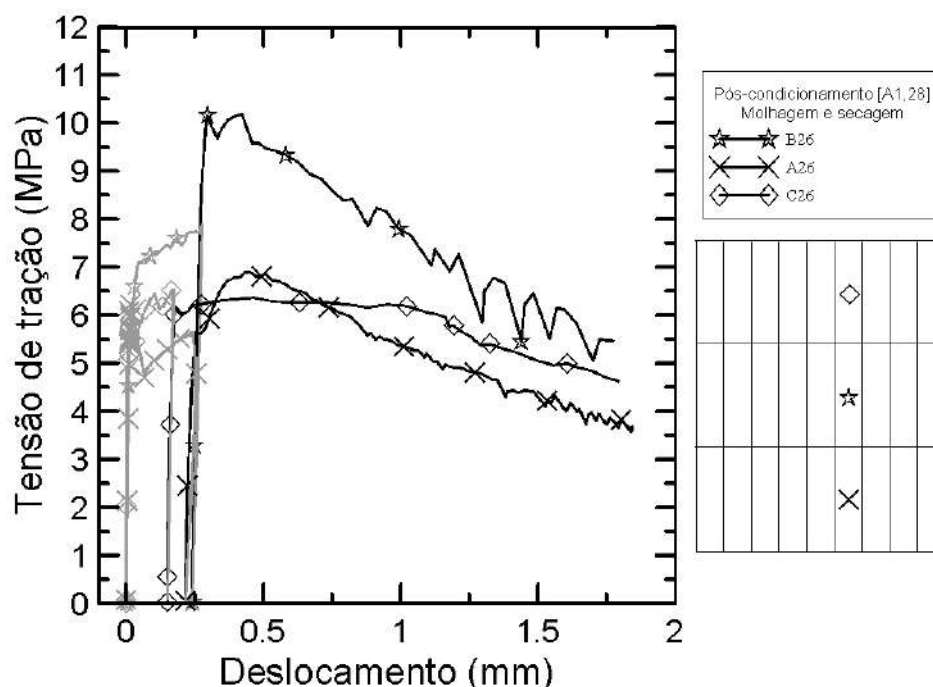


Figura 4.78: Curvas de tensão x deslocamento para as amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A1,28]

A tabela 4.11 apresenta os índices,  $IRT_1$ ,  $IRT_2$  e IRD, calculados conforme explicitado no item 3.3. Os resultados obtidos para os índices  $IRT_2$  mostram que

a tensão máxima pós-condicionamento, obtida para o deslocamento de 173  $\mu\text{m}$  na amostra C26 foi 4% menor do que o valor máximo medido na indução da fissura. As tensões máximas pós-condicionamento obtidas para as amostras A26 e B26, nos deslocamentos de 146  $\mu\text{m}$  e 278  $\mu\text{m}$  foram 6% e 20% maiores do que o valores máximos medidos na indução da fissura correspondente aos mesmos deslocamentos.

A partir dos resultados obtidos para o índice  $IRT_1$  observa-se um aumento de tensão em 23% e 31% para as amostras B26 e A26, bem como uma redução de tensão no valor de 3% para a amostra C26.

O índice IRD variou de 0,42 a 0,59, indicando que não houve uma recuperação completa da rigidez das amostras. Esse comportamento pode estar relacionado com o não selamento completo da fissura principal, induzida nas amostras (ver figuras 4.80, 4.81 e 4.82).

Tabela 4.11: Índices calculados para as amostras de molhagem e secagem [A1,28]

M2 [A1,28]			
CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD
C26	0,97	0,96	0,59
B26	1,31	1,20	0,52
A26	1,23	1,06	0,42

A figura 4.79 apresenta as curvas tensão x deslocamento obtidas a partir dos ensaios realizados nos corpos de prova controle e nos corpos de prova com fissura induzida, ambos após o condicionamento. É possível observar que as amostras controle apresentaram uma tensão média de  $8,49 \pm 0,16$  MPa, sendo que A29 e C29 apresentaram tensões máximas de 8,38 MPa e 8,60 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras de controle pós-condicionamento foi de  $47 \pm 1$  GPa, sendo que A29 e C29 apresentaram respectivas rigidez de 46 GPa e 48 GPa.

A relação entre a média das tensões máximas pós-fissuração das amostras pré-fissuradas e das amostras de controle indica que ocorre uma redução de apenas 7% nessa propriedade.

A rigidez média das amostras fissuradas ( $24 \pm 5$  GPa) é cerca de 49% menor do que das amostras de controle ( $47 \pm 1$  GPa).

As figuras 4.80, 4.81 e 4.82 mostram as fissuras após 3 meses de condicionamento. Conforme ocorrido com a mistura A1,28S0,28 não foi observado o total selamento das fissuras principais e selamento, apesar disso, ocorreu a a recuperação de tensão em praticamente todas as amostras. Observou-se o selamento de fissuras secundárias.

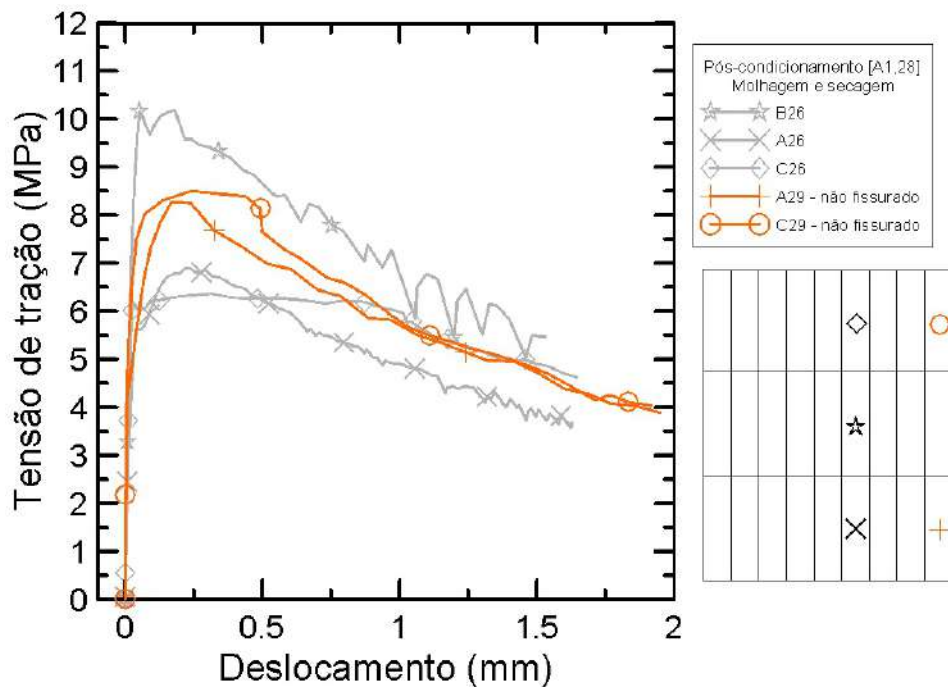


Figura 4.79: Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A1,28]

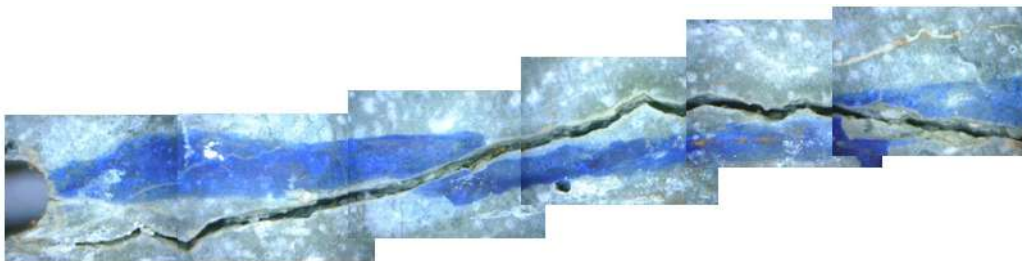


Figura 4.80: Incompleto selamento da fissura do C26

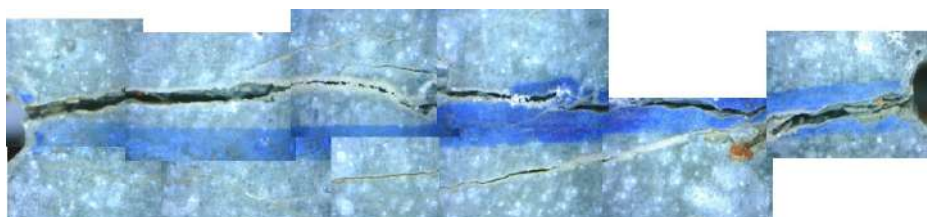


Figura 4.81: Incompleto selamento da fissura do B26

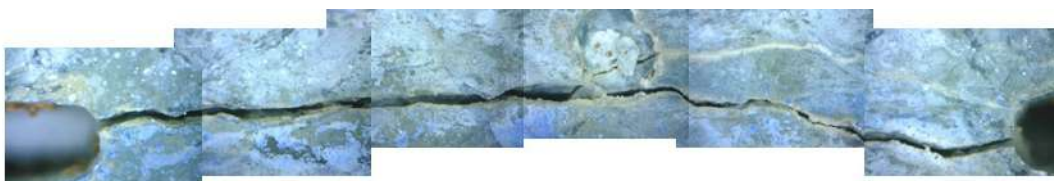


Figura 4.82: Incompleto selamento da fissura do A26

## 6 meses

A figura 4.83 apresenta os resultados obtidos para ensaios de tração direta realizados nos corpos de prova C27, A23 e B27 submetidos a ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses. As curvas em cinza foram obtidas na etapa de indução da fissura, apresentada anteriormente, enquanto as curvas em preto apresentam o comportamento tensão x deslocamento após o condicionamento das amostras pré-fissuradas.

Observando-se as curvas da figura 4.83, nota-se que todos os corpos de prova apresentaram ganho ou mantiveram a tensão máxima obtida na fase de indução de fissura. A tensão máxima média observada no ensaio de tração direta após o condicionamento foi de  $8,81 \pm 2,11$  MPa, sendo que C27, A23 e B27 apresentaram tensões máximas de 9,73 MPa, 6,40 MPa e 10,30 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras pós-condicionamento foi de  $29 \pm 9$  GPa, sendo que C27, B27 e A23 apresentaram respectivas rigidez de 37 GPa, 34 GPa e 18 GPa.

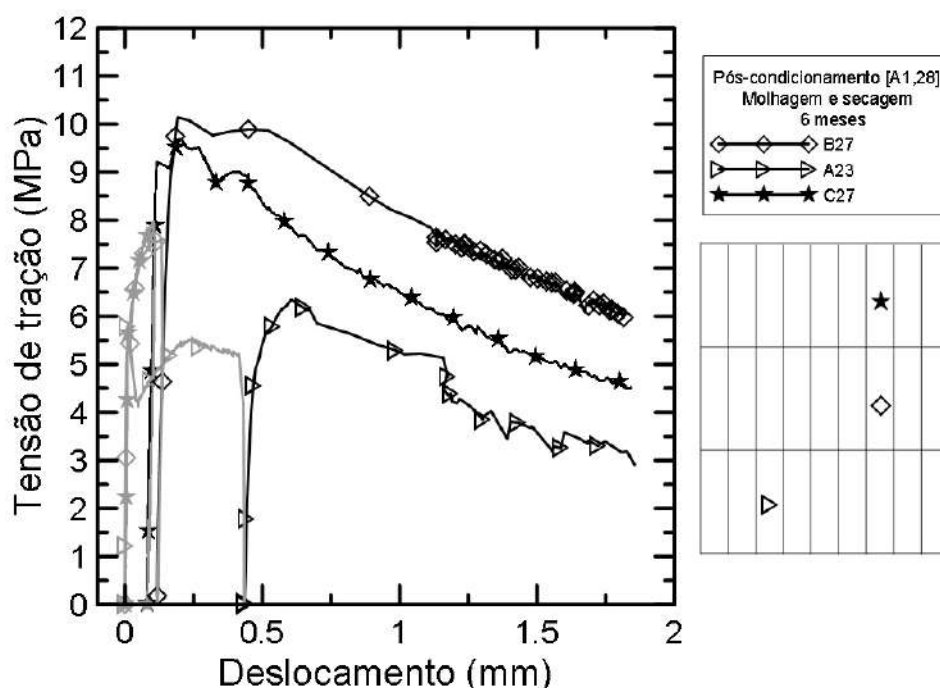


Figura 4.83: Curvas de tensão x deslocamento para as amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses [A1,28]

A tabela 4.12 apresenta os índices,  $IRT_1$ ,  $IRT_2$  e IRD, calculados conforme explicitado no item 3.3. Os resultados obtidos para os índices  $IRT_2$  mostram que as tensões máximas pós-condicionamento obtidas para as amostras A23, B27 e C27, nos deslocamentos de  $242 \mu\text{m}$ ,  $135 \mu\text{m}$  e  $102 \mu\text{m}$  foram, 11%, 28% e 19% maiores do que o valores máximos medidos na indução da fissura correspondente aos mesmos deslocamentos.

A partir dos resultados obtidos para o índice  $IRT_1$  observa-se um aumento de tensão máxima pós-fissuração em 22%, 29% e 18% para as amostras C27, B27 e A23, respectivamente.

O índice IRD variou de 0,36 a 0,76, indicando que não houve uma recuperação completa da rigidez das amostras. Esse comportamento pode estar relacionado com o não selamento completo da fissura principal, induzida nas amostras (ver figuras 4.85, 4.86 e 4.87). A menor recuperação de  $IRT_1$ ,  $IRT_2$  e IRD pertenceu a amostra A23 que possui a maior abertura de fissura e um comportamento de amolecimento na tração direta.

Tabela 4.12: Índices calculados para as amostras de molhagem e secagem [A1,28]

M2 [A1,28]			
CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD
C27	1,22	1,19	0,76
B27	1,29	1,28	0,70
A23	1,18	1,11	0,36

A figura 4.84 apresenta as curvas tensão x deslocamento obtidas a partir dos ensaios realizados nos corpos de prova controle e nos corpos de prova com fissura induzida, ambos após o condicionamento. É possível observar que as amostras controle apresentaram uma tensão média de  $8,41 \pm 1,58$  MPa, sendo que C28 e A28 apresentaram tensões máximas de 9,53 MPa e 7,29 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras de controle pós-condicionamento foi de  $53 \pm 1$  GPa, sendo que C28 e A28 apresentaram respectivas rigidez de 54 GPa e 52 GPa.

A relação entre a média das tensões máximas pós-fissuração das amostras pré-fissuradas e das amostras de controle indica que ocorre um aumento de 5% nessa propriedade.

A rigidez média das amostras fissuradas ( $24 \pm 5$  GPa) é cerca de 49% menor do que das amostras de controle ( $53 \pm 1$  GPa).

As figuras 4.85, 4.86 e 4.87 apresentam as fissuras após 6 meses de condicionamento. A fissura principal da amostra C27 se apresenta quase completamente selada, enquanto na amostra B27 ocorreu o selamento apenas na parte esquerda e em fissuras secundárias e A23 apresentou carbonato de cálcio somente no contorno da fissura. Apesar disso e de A23 apresentar uma maior fissura, essa foi capaz de recuperar 110% da sua tensão máxima ante à pré-fissuração.



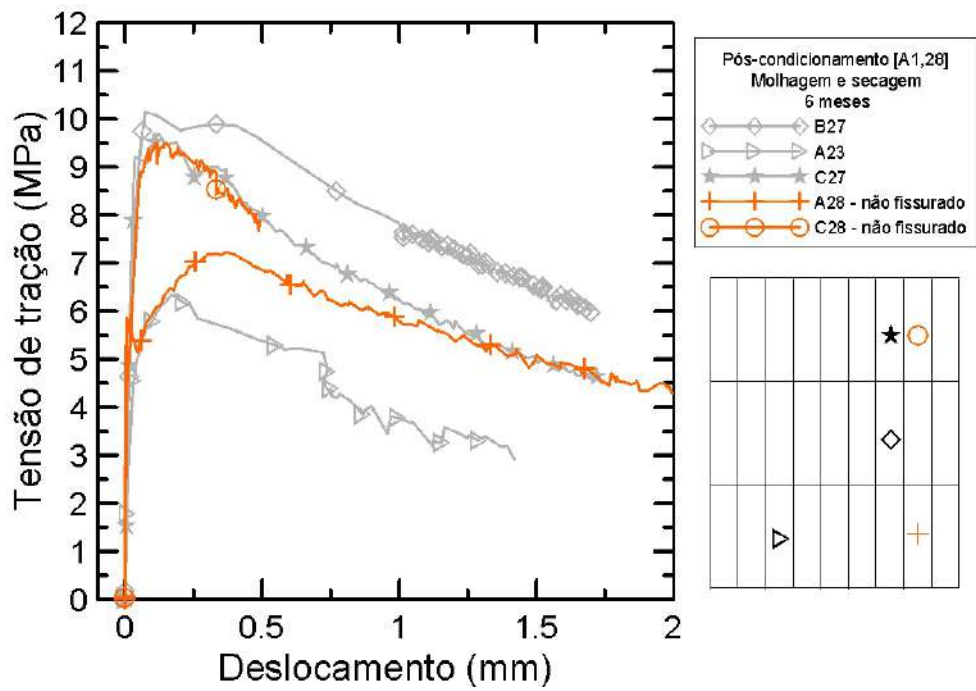


Figura 4.84: Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses [A1,28]

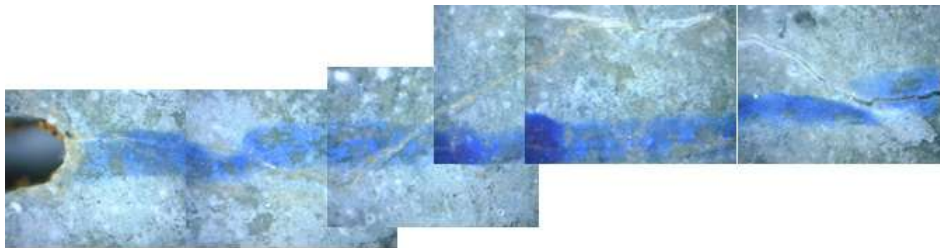


Figura 4.85: Selamento da fissura do C27



Figura 4.86: Incompleto selamento da fissura do B27



Figura 4.87: Incompleto selamento da fissura do A23

#### 4.4.2.2 Amostras condicionadas em água

##### 3 meses

A figura 4.88 apresenta os resultados obtidos para ensaios de tração direta realizados nos corpos de prova C25, B25 e A25 submetidos a condicionamento em água durante 3 meses. As curvas em cinza foram obtidas na etapa de indução da fissura, apresentada anteriormente, enquanto as curvas em preto apresentam o comportamento tensão x deslocamento após o condicionamento das amostras pré-fissuradas.

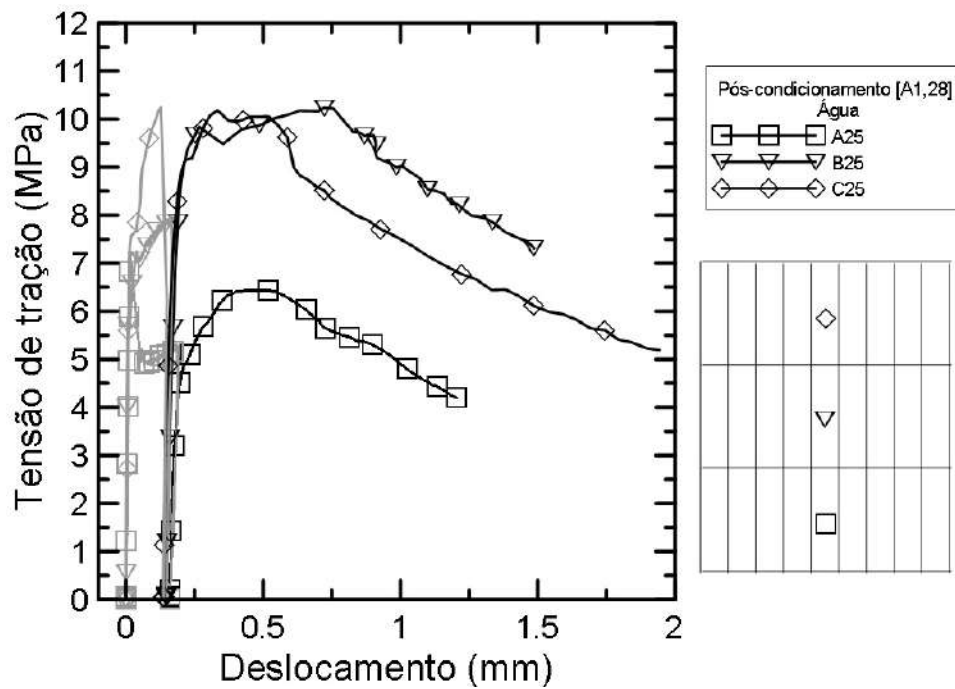


Figura 4.88: Curvas de tensão x deslocamento para as amostras condicionadas em água durante 3 meses [A1,28]

Observando-se as curvas da figura 4.88, nota-se que todos os corpos de prova, apresentaram ganho ou mantiveram a tensão máxima obtida na fase de indução de fissura. A tensão máxima média observada no ensaio de tração direta após o condicionamento foi de  $8,98 \pm 2,19$  MPa, sendo que C25, B25 e A25 apresentaram tensões máximas de 10,24 MPa, 10,25 MPa e 6,45 MPa, respectivamente. A rigidez

média das amostras pós-condicionamento foi de  $27 \pm 10$  GPa, sendo que C25, B25 e A25 apresentaram respectivas rigidez de 32 GPa, 34 GPa e 15 GPa.

A tabela 4.13 apresenta os índices,  $IRT_1$ ,  $IRT_2$  e IRD, calculados conforme explicitado no item 3.3. Os resultados obtidos para os índices  $IRT_2$  mostram que a tensão máxima pós-condicionamento, obtida para os deslocamentos de  $163 \mu\text{m}$  e  $186 \mu\text{m}$  nas amostras B25 e A25 foram 27% e 15% maiores do que os valores máximos medidos na indução das fissuras. A tensão máxima pós-condicionamento obtida para a amostra C25, no deslocamento de  $132 \mu\text{m}$  foi 1% menor do que o valor máximo medido na indução da fissura correspondente ao mesmo deslocamento.

A partir dos resultados obtidos para o índice  $IRT_1$  observou-se um aumento de tensão em 28% e 22% para as amostras B25 e A25, bem como uma manutenção de tensão para a amostra C25.

O índice IRD variou de 0,30 a 0,68, indicando que não houve uma recuperação completa da rigidez das amostras. Esse comportamento pode estar relacionado com o não selamento completo da fissura principal, induzida nas amostras (ver figuras 4.90, 4.91 e 4.92). A menor recuperação de IRD pertence à amostra A25 que possui a maior abertura de fissura e um comportamento de amolecimento na tração direta.

Tabela 4.13: Índices amostras de submersão em água [A1,28]

M2 [A1,28]			
CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD
C25	1,00	0,99	0,68
B25	1,28	1,27	0,66
A25	1,22	1,15	0,30

A figura 4.89 apresenta as curvas tensão x deslocamento obtidas a partir dos ensaios realizados nos corpos de prova controle e nos corpos de prova com fissura induzida, ambos após o condicionamento. É possível observar que as amostras controle apresentaram uma tensão média de  $9,16 \pm 0,27$  MPa, sendo que B21 e C21 apresentaram tensões máximas de 9,35 MPa e 8,37 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras de controle pós-condicionamento foi de  $49 \pm 3$  GPa, sendo que B21 e C21 apresentaram respectivas rigidez de 46 GPa e 51 GPa.

A relação entre a média das tensões máximas pós-fissuração das amostras pré-fissuradas e das amostras de controle indica que ocorre uma redução de apenas 2% nessa propriedade.

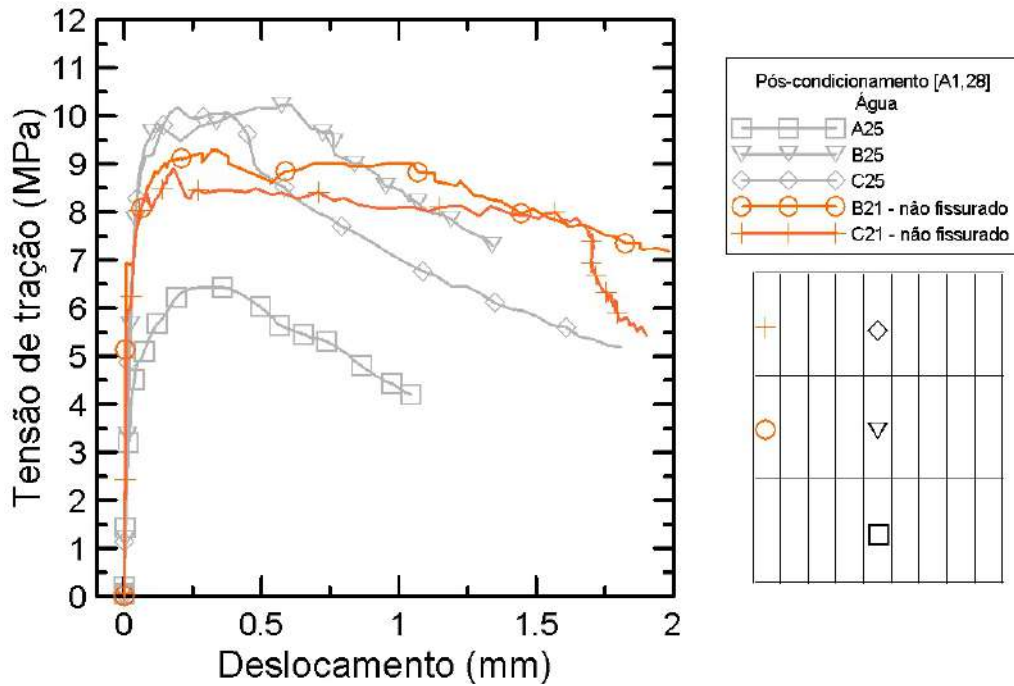


Figura 4.89: Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em água durante 3 meses [A1,28]

A rigidez média das amostras fissuradas ( $29 \pm 10$  GPa) é cerca de 40% menor do que das amostras de controle ( $49 \pm 3$  GPa).

Uma vez mais, constatou-se que a recuperação mecânica de B25 não se associou ao completo selamento da fissura principal. Por outro lado, C25 apresentou um selamento completo e não foi capaz de superar o valor de tensão máxima obtido na indução da fissura. As figuras 4.90, 4.91 e 4.92 apresentam as fissuras após 3 meses de tratamento. São observados cristais de carbonato de cálcio, bem como o selamento de fissuras menores.

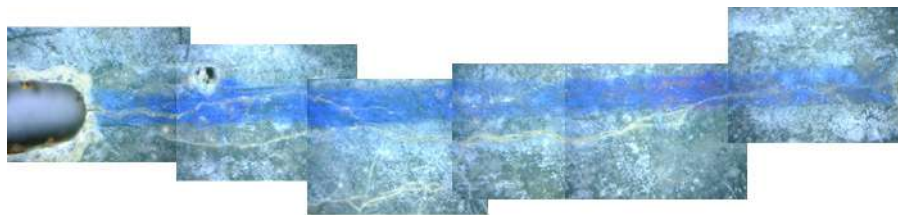


Figura 4.90: Selamento da fissura do C25

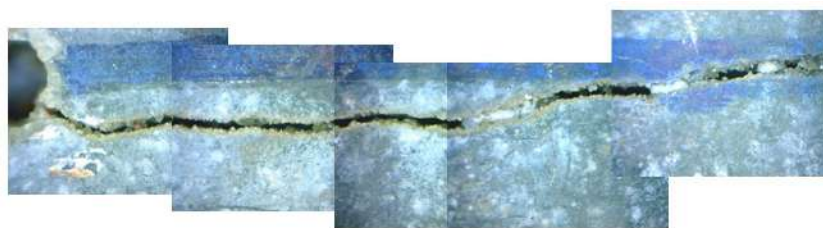


Figura 4.91: Incompleto selamento da fissura do B25



Figura 4.92: Incompleto selamento da fissura do A25

## 6 meses

A figura 4.93 apresenta os resultados obtidos para ensaios de tração direta realizados nos corpos de prova C24, B24 e A24 submetidos a ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses. As curvas em cinza foram obtidas na etapa de indução da fissura, apresentada anteriormente, enquanto as curvas em preto apresentam o comportamento tensão x deslocamento após o condicionamento das amostras pré-fissuradas.

Observando-se as curvas da figura 4.93, nota-se que todos os corpos de prova apresentaram ganho da tensão máxima obtida na fase de indução de fissura. A tensão máxima média observada no ensaio de tração direta após o condicionamento foi de  $9,25 \pm 2,70$  MPa, sendo que C24, B24 e A24 apresentaram tensões máximas de 11,16 MPa, 10,43 MPa e 6,17 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras pós-condicionamento foi de  $29 \pm 11$  GPa, sendo que C24, B24 e A24 apresentaram respectivas rigidez de 39 GPa, 36 GPa e 31 GPa.

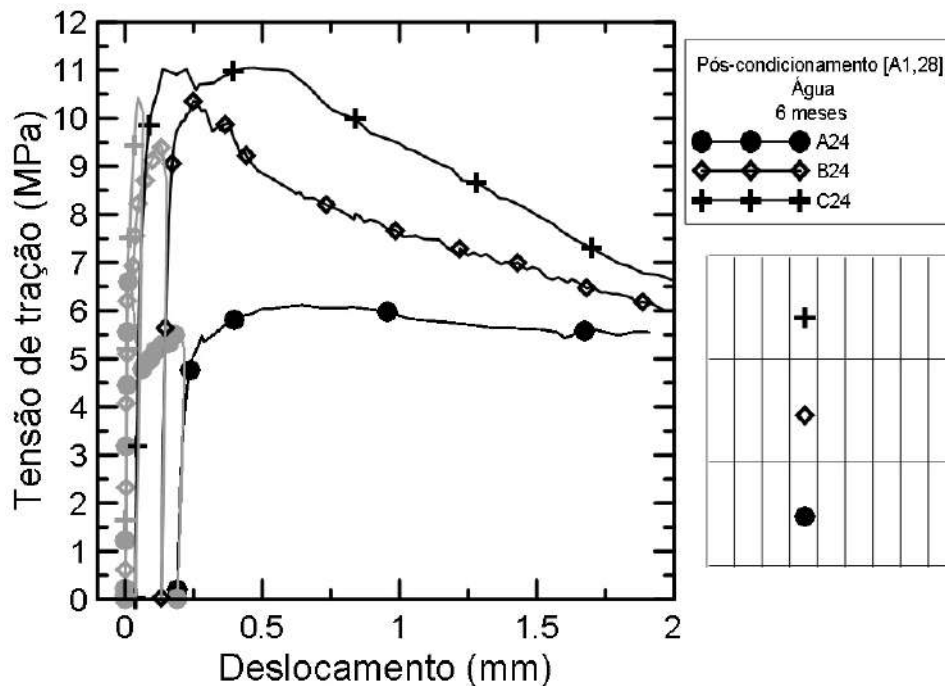


Figura 4.93: Curvas de tensão x deslocamento para as amostras condicionadas em água durante 6 meses [A1,28]

A tabela 4.14 apresenta os índices,  $IRT_1$ ,  $IRT_2$  e IRD, calculados conforme explicitado no item 3.3. Os resultados obtidos para os índices  $IRT_2$  mostram que as tensões máximas pós-condicionamento obtidas as amostras C24, B24 e A24, nos deslocamentos de  $98 \mu\text{m}$ ,  $203 \mu\text{m}$  e  $135 \mu\text{m}$  foram 6%, 6% e 4% maiores do que o valores máximos medidos na indução da fissura correspondente aos mesmos deslocamentos.

A partir dos resultados obtidos para o índice  $IRT_1$  observa-se um aumento de tensão em 6%, 10% e 11% para as amostras C24, B24 e A24.

O índice IRD variou de 0,33 a 0,83, indicando que não houve uma recuperação completa da rigidez das amostras. Esse comportamento pode estar relacionado com o não selamento completo da fissura principal induzida nas amostras (ver figuras 4.96 e 4.97). A menor recuperação de IRD pertenceu a amostra A24 que possui a maior abertura de fissura e um comportamento de amolecimento na tração direta. Nota-se que C24 (ver figura 4.95) obteve um total selamento das fissuras, tendo sua rigidez quase alcançado a original.

Tabela 4.14: Índices amostras de submersão em água durante 6 meses [A1,28]

M2 [A1,28]			
CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD
C24	1,06	1,06	0,83
B24	1,10	1,06	0,60
A24	1,11	1,04	0,33

A figura 4.94 apresenta as curvas tensão x deslocamento obtidas a partir dos ensaios realizados nos corpos de prova controle e nos corpos de prova com fissura induzida, ambos após o condicionamento. É possível observar que as amostras controle apresentaram uma tensão média de  $9,05 \pm 0,13$  MPa, sendo que C22 e A22 apresentaram tensões máximas de 8,96 MPa e 9,14 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras de controle pós-condicionamento foi de  $52 \pm 1$  GPa, sendo que C22 e A22 apresentaram respectivas rigidez de 53 GPa e 52 GPa.

A relação entre a média das tensões máximas pós-fissuração das amostras pré-fissuradas e das amostras de controle indica 2% de aumento de tensão máxima pós-fissuração dos corpos de prova fissurados em relação às amostras controle.

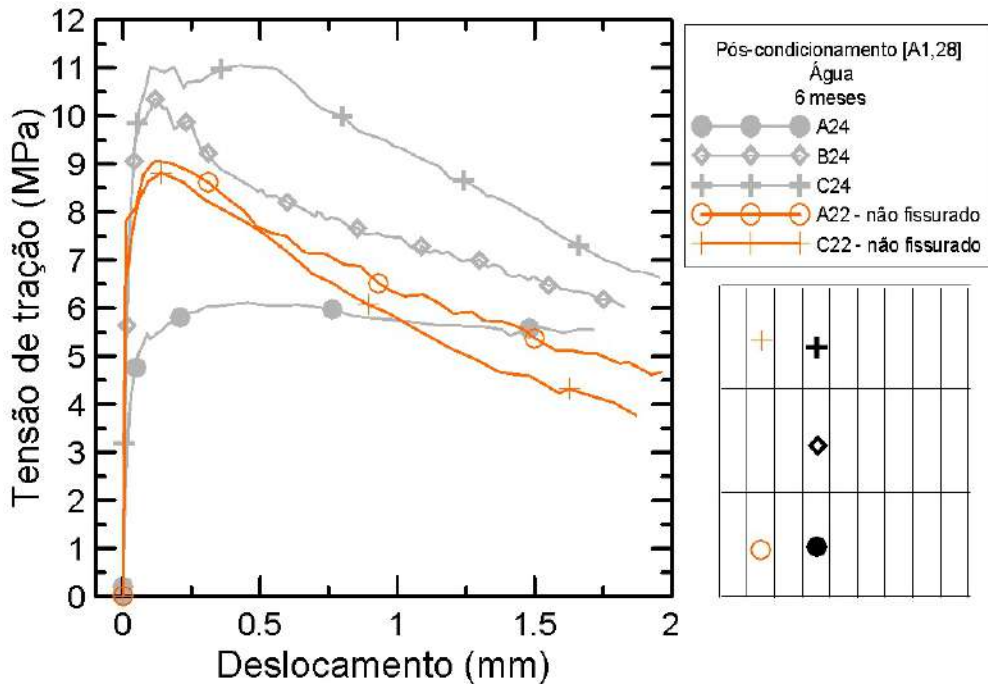


Figura 4.94: Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em água durante 6 meses [A1,28]

A rigidez média das amostras fissuradas ( $29 \pm 11$  GPa) é cerca de 45% menor do que das amostras de controle ( $52 \pm 1$  GPa).

As figuras 4.95, 4.96 e 4.97 apresentam as fissuras após 6 meses de condicionamento. São observados cristais de carbonato de cálcio no interior da fissura principal na amostra A24, contudo a mesma não se encontra selada. Ocorreu o selamento de fissuras secundárias e na parte esquerda da fissura da amostra B24; enquanto as fissuras da amostra C24 foi totalmente selada. Uma vez mais, se separa a ideia de recuperação de capacidade de carga e selamento total da fissura. Contudo, há de ser observado que em fissuras menores, a auto-cicatrização é mais acelerada.

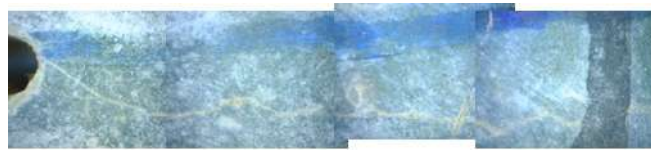


Figura 4.95: Selamento da fissura do C24



Figura 4.96: Incompleto selamento da fissura do B24

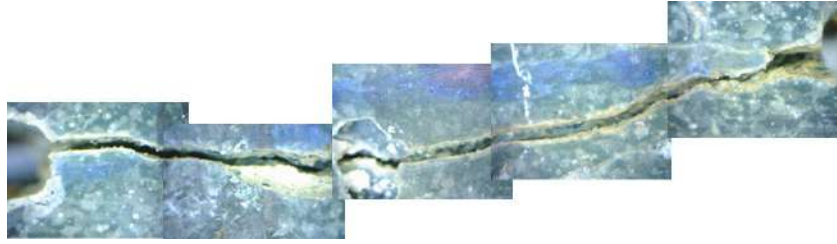


Figura 4.97: Incompleto selamento da fissura do A24

A tabela 4.15 apresenta um resumo dos índices e médias dos módulos elásticos dos 2 tratamentos aplicados nas idades de 3 e 6 meses.

Tabela 4.15: Tabela resumo de índices M2[A1,28]

3 meses						
Tratamento	CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD	Rigidez	
Água	C25	1,00	0,99	0,68		
	B25	1,28	1,27	0,66		27±10
	A25	1,22	1,15	0,30		
Molhagem e secagem	C26	0,97	0,96	0,59		
	B26	1,31	1,20	0,52		24±5
	A26	1,23	1,06	0,42		
6 meses						
Tratamento	CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD	Rigidez	
Água	C24	1,06	1,05	0,83		
	B24	1,10	1,05	0,60		29±11
	A24	1,11	1,04	0,33		
Molhagem e secagem	C27	1,22	1,19	0,76		
	B27	1,29	1,28	0,70		29±9
	A23	1,18	1,11	0,36		

O índice de recuperação de  $IRT_2$  apresentou um aumento quando comparados 3 e 6 meses de condicionamento em ciclos de molhagem e secagem. Já o condicionamento em água apresentou um pequena diminuição nesse índice entre essas idades. E ainda, em 3 meses, o condicionamento em água obteve maiores valores de índices comparados aos de molhagem e secagem, sendo que em 6 meses os valores dos ciclos de molhagem e secagem foram superiores. Em uma visão geral é possível reconhecer que o tratamento em ciclos de molhagem e secagem apresentou uma maior recuperação de capacidade de carga do que o tratamento de submersão em água apenas



em 6 meses de tratamento.

O índice de recuperação de dano (IRD) foi superior para 6 meses de condicionamento, variando para água entre 0,30-0,68 e 0,33-0,83 e para ciclos de molhagem e secagem entre 0,42-0,59 e 0,36-0,76, para 3 e 6 meses, respectivamente. Dessa forma, observa-se uma tendência a aumento da rigidez com o aumento do tempo de exposição à água e ciclos de molhagem e secagem.

Ao tempo do comparativo das tensões da mistura 1 e mistura 2, após os condicionamentos durante 3 meses, é possível observar um pior comportamento, em termos absolutos, das amostras apenas com fibras de aço do que as que apresentaram 0,28% de fibras de sisal, tanto na pré-fissuração, quanto na auto-cicatrização. As tensões para indução de fissura foram de  $9,20 \pm 0,74$  MPa e  $6,91 \pm 0,90$  MPa, para M1 e M2, respectivamente, enquanto as tensões das amostras controle pós-condicionamento foram de  $10,81 \pm 0,09$  MPa e  $8,49 \pm 0,16$  MPa. Explica-se esse comportamento através do papel de difusor de humidade da fibra de sisal. Destaca-se que este fenômeno ocorreu nas duas formas de condicionamento.

No tocante às amostras com fissura induzida, o condicionamento em ciclos de molhagem e secagem foi mais eficaz, em termos absolutos, na mistura com a presença da fibra de sisal do que na mistura M2, com tensões médias de  $9,84 \pm 0,88$  MPa para a primeira e  $7,89 \pm 2,16$  MPa para a segunda mistura, o que também pode ser associado com a difusão de humidade, vez que em ciclos de molhagem e secagem ocorre a possibilidade de saturação da fibra e seguinte liberação para matriz através de uma diferença de humidade no meio.

### **4.4.3 Resultados de auto-cicatrização obtidos para a mistura M3**

#### **4.4.3.1 Amostras submetidas a ciclos de molhagem e secagem**

##### **3 meses**

A figura 4.98 apresenta os resultados obtidos para ensaios de tração direta realizados nos corpos de prova C36, B36 e A36 submetidos a ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses. As curvas em cinza foram obtidas na etapa de indução da fissura, apresentada anteriormente, enquanto as curvas em preto apresentam o comportamento tensão x deslocamento após o condicionamento das amostras pré-fissuradas.

Observando-se as curvas da figura 4.98, nota-se que apenas a amostra C36 apresentou ganho da tensão máxima obtida na fase de indução de fissura. A tensão máxima média observada no ensaio de tração direta após o condicionamento foi de  $5,33 \pm 0,35$  MPa, sendo que C36, B36 e A36 apresentaram tensões máximas de

5,47 MPa, 4,93 MPa e 5,59 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras pós-condicionamento foi de  $19 \pm 3$  GPa, sendo que C36, B36 e A36 apresentaram respectivas rigidez de 21 GPa, 20 GPa e 16 GPa.

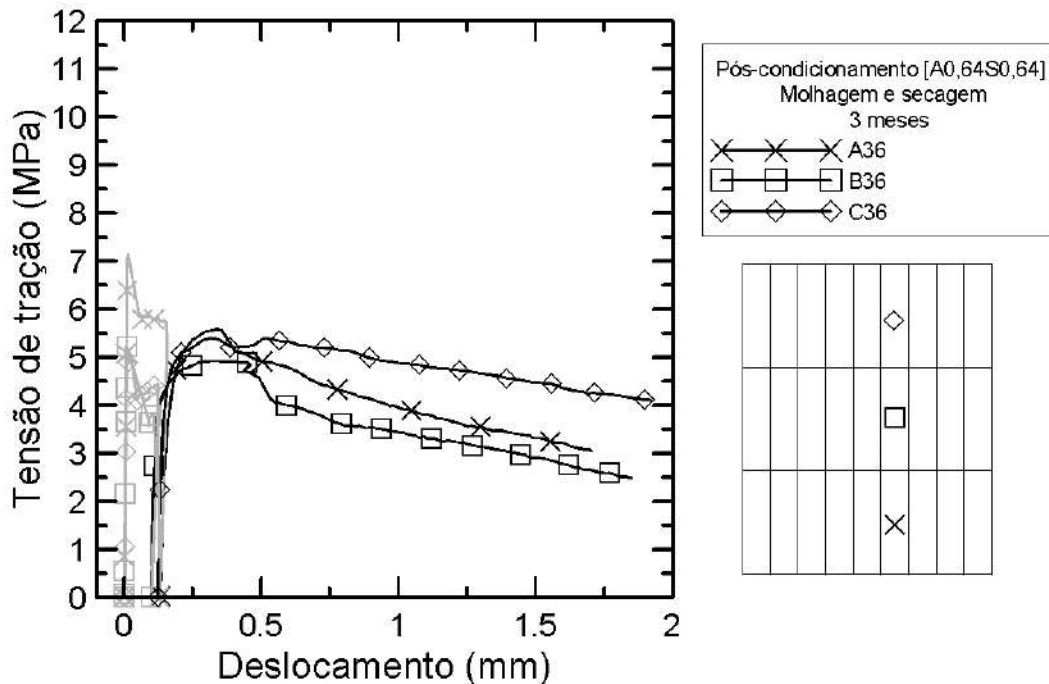


Figura 4.98: Curvas de tensão x deslocamento para as amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A0,64S0,64]

A tabela 4.16 apresenta os índices,  $IRT_1$ ,  $IRT_2$  e IRD, calculados conforme explicitado no item 3.3. Os resultados obtidos para os índices  $IRT_2$  mostram que as tensões máximas pós-condicionamento obtidas para as amostras C36 e B36, nos deslocamentos de  $125 \mu\text{m}$ ,  $106 \mu\text{m}$  foram 18%, 25% maiores do que os valores máximos medidos na indução da fissura correspondente aos mesmos deslocamentos. A tensão máxima pós-condicionamento obtida para a amostra A36, no deslocamento de  $54 \mu\text{m}$  foi 24% menor do que o valor máximo medido na indução da fissura correspondente ao mesmo deslocamento.

A partir dos resultados obtidos para o índice  $IRT_1$  observa-se um aumento de tensão em 23%, 29% para as amostras C36 e B36, bem como uma redução de tensão no valor de 5% para a amostra A36.

O índice IRD variou de 0,38 a 0,50, indicando que não houve uma recuperação completa da rigidez das amostras. Esse comportamento pode estar relacionado com o não selamento completo da fissura principal induzida nas amostras (ver figuras 4.100, 4.101 e 4.102). A amostra A36 apresentou a menor recuperação de rigidez com valor de 16 GPa, contudo há de se destacar que nas amostras fissuradas, por vezes, o desvio de linearidade ocorre anteriormente os 40% da tensão máxima.

Tabela 4.16: Índices amostras de ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A0,64S0,64]

M3 [A0,64S0,64]			
CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD
C36	1,23	1,18	0,50
B36	1,29	1,25	0,47
A36	0,95	0,76	0,38

A figura 4.99 apresenta as curvas tensão x deslocamento obtidas a partir dos ensaios realizados nos corpos de prova controle e nos corpos de prova com fissura induzida, ambos após o condicionamento. É possível observar que as amostras controle apresentaram uma tensão média de  $6,61 \pm 1,57$  MPa, sendo que A39, B39 e C39 apresentaram tensões máximas de 5,50 MPa, 5,93 MPa e 8,40 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras de controle pós-condicionamento foi de  $39 \pm 1$  GPa, sendo que A39, B39 e C39 apresentaram respectivas rigidez de 40 GPa, 39 GPa e 38 GPa.

A relação entre a média das tensões máximas pós-fissuração das amostras pré-fissuradas e das amostras de controle indica que ocorre uma redução de 19% nessa propriedade.

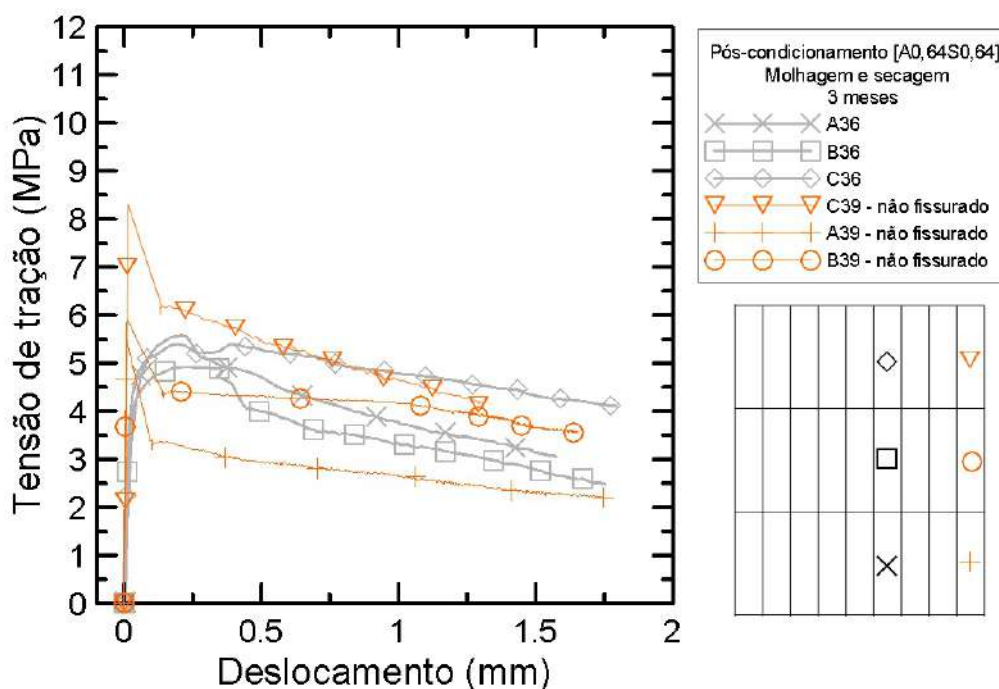


Figura 4.99: Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A0,64S0,64]

A rigidez média das amostras fissuradas ( $19\pm 4$  GPa) é cerca de 52% menor do que das amostras de controle ( $39\pm 1$  GPa).

As figuras 4.100, 4.101 e 4.102 apresentam as fissuras após 3 meses de condicionamento. Observa-se nas amostras C36 e B36 uma nucleação da reação de deposição de carbonato de cálcio nas regiões que apresentam fibra de sisal. A figura 4.103 mostra com maiores detalhes a nucleação citada na amostra C36. Não obstante, houve um maior selamento das fissuras da amostra A36 apesar da mesma não ter conseguido recuperar totalmente sua tensão máxima. Observa-se o selamento de fissuras secundárias.



Figura 4.100: Incompleto selamento da fissura do C36

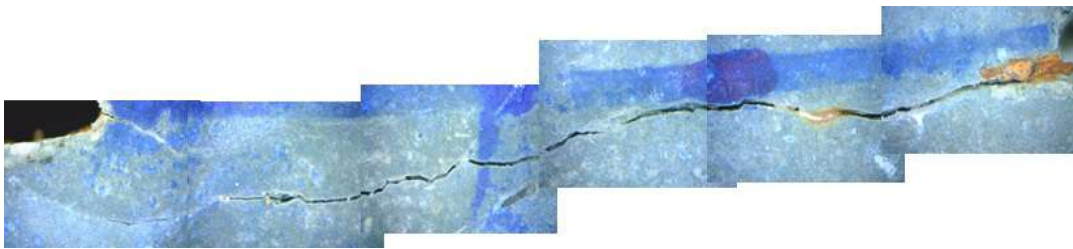
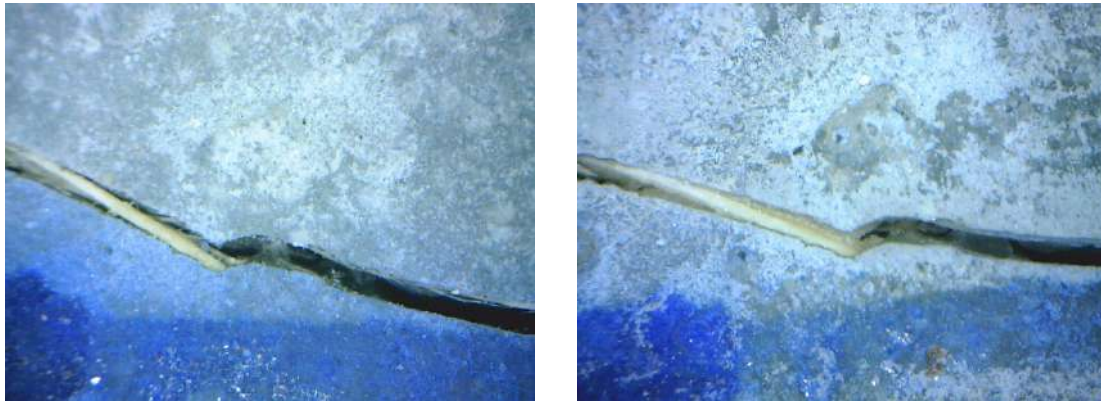


Figura 4.101: Incompleto selamento da fissura do B36



Figura 4.102: Incompleto selamento da fissura do A36



(a) Fissura da amostra C36 antes do condicionamento

(b) Pós-condicionamento C36

Figura 4.103: Nucleação de carbonato de cálcio na fibra de sisal da amostra C36: (a) Antes do condicionamento em ciclos de molhagem e secagem; (b) após o condicionamento em ciclos de molhagem e secagem

## 6 meses

A figura 4.104 apresenta os resultados obtidos para ensaios de tração direta realizados nos corpos de prova C37 e B37 submetidos a ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses. As curvas em cinza foram obtidas na etapa de indução da fissura, apresentada anteriormente, enquanto as curvas em preto apresentam o comportamento tensão x deslocamento após o condicionamento das amostras pré-fissuradas.

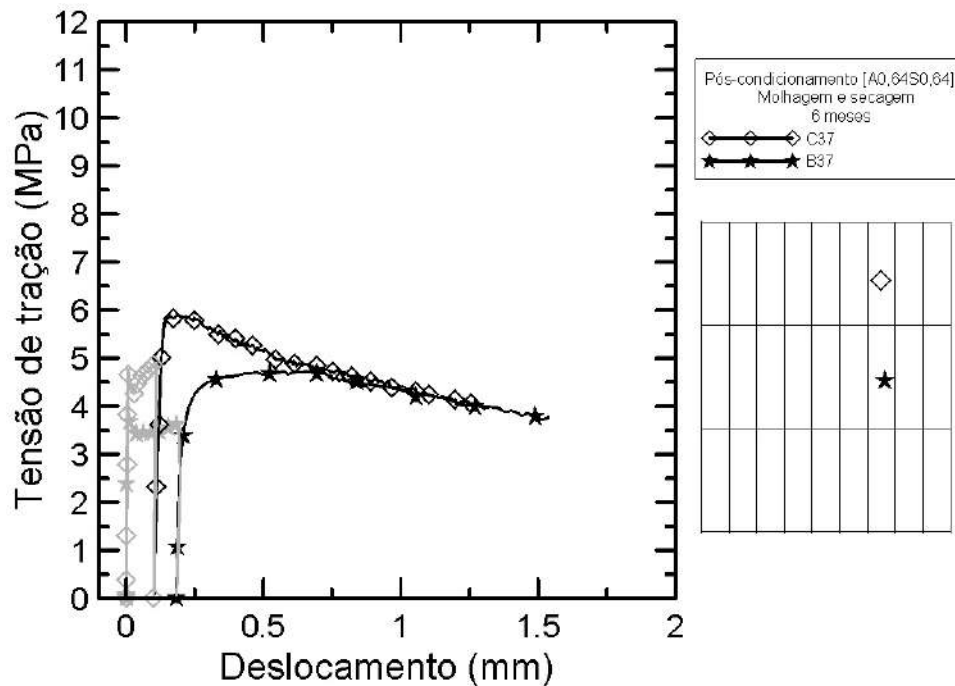


Figura 4.104: Curvas de tensão x deslocamento para as amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses [A0,64S0,64]

Observando-se as curvas da figura 4.104, nota-se que todos os corpos de prova apresentaram ganho de tensão máxima obtida na fase de indução de fissura. A tensão máxima média observada no ensaio de tração direta após o condicionamento foi de  $5,35 \pm 0,86$  MPa, sendo que C37 e B37 apresentaram tensões máximas de 5,95 MPa e 4,74 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras pós-condicionamento foi de  $19 \pm 4$  GPa, sendo que C37 e B37 apresentaram respectivas rigidez de 17 GPa e 22 GPa.

A tabela 4.17 apresenta os índices,  $IRT_1$ ,  $IRT_2$  e IRD, calculados conforme explicitado no item 3.3. Os resultados obtidos para os índices  $IRT_2$  mostram que as tensões máximas pós-condicionamento obtidas para os deslocamentos de  $191 \mu\text{m}$  e  $111 \mu\text{m}$  nas amostras B37 e C37 foram 19% e 28% maiores do que os valores máximos medidos na indução da fissura.

A partir dos resultados obtidos para o índice  $IRT_1$  observa-se um aumento de tensão pós-fissuração em 31% e 21% para as amostras B37 e C37, respectivamente.

O índice IRD variou de 0,43 a 0,55, indicando que não houve uma recuperação completa da rigidez das amostras. Esse comportamento pode estar relacionado com o não selamento completo da fissura principal induzida nas amostras (ver figuras 4.106 e 4.107).

Tabela 4.17: Índices amostras de ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses [A0,64S0,64]

M3 [A0,64S0,64]			
CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD
C37	1,21	1,19	0,43
B37	1,31	1,28	0,55

A figura 4.105 apresenta as curvas tensão x deslocamento obtidas a partir dos ensaios realizados nos corpos de prova controle e nos corpos de prova com fissura induzida, ambos após o condicionamento. É possível observar que as amostras controle apresentaram uma tensão média de  $6,74 \pm 0,93$  MPa, sendo que A32 e B38 apresentaram tensões máximas de 6,08 MPa e 7,39 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras de controle pós-condicionamento foi de  $44 \pm 2$  GPa, sendo que A32 e B38 apresentaram respectivas rigidez de 45 GPa e 42 GPa.

A relação entre a média das tensões máximas pós-fissuração das amostras pré-fissuradas e das amostras de controle indica que ocorre uma redução de 21% nessa propriedade.

A rigidez média das amostras fissuradas ( $19 \pm 4$ ) é cerca de 49% menor do que das amostras de controle ( $44 \pm 2$  GPa).

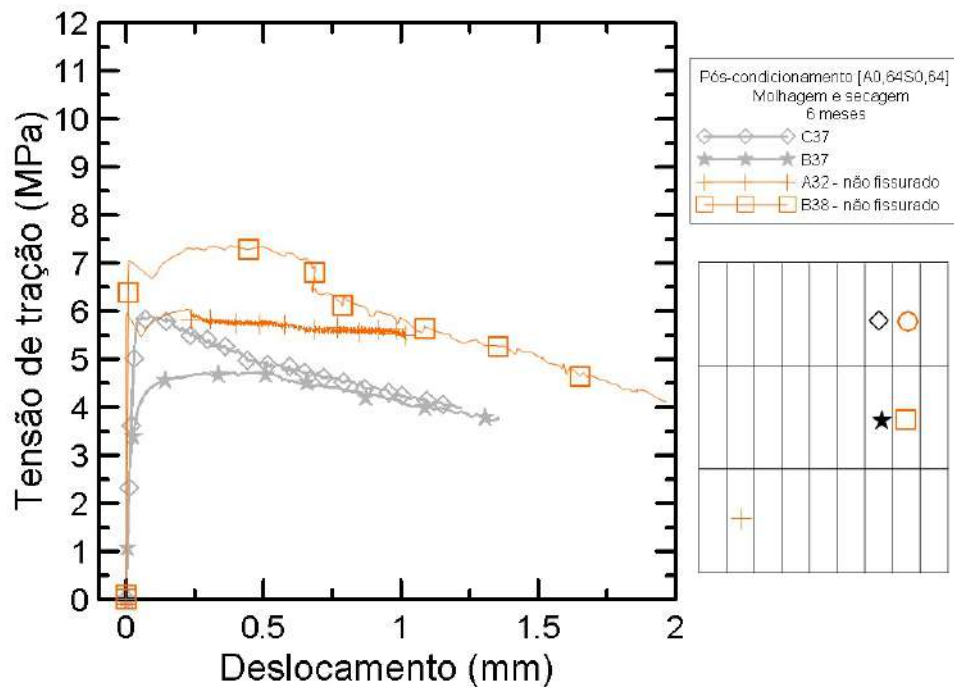


Figura 4.105: Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses [A0,64S0,64]

As figuras 4.106 e 4.107 apresentam as fissuras após 6 meses de tratamento. Observa-se que do mesmo modo que em 3 meses de tratamento, as amostras C37 e B37 apresentaram uma nucleação da reação de deposição de carbonato de cálcio nas regiões contendo fibra de sisal. Não obstante, nenhuma das duas fissuras principais foi completamente selada e ocorreu um aumento da tensão máxima em ambas as amostras. Não obstante, ocorreu o selamento de fissuras secundárias.



Figura 4.106: Incompleto selamento da fissura do C37



Figura 4.107: Incompleto selamento da fissura do B37

#### 4.4.3.2 Amostras condicionadas em água

##### 3 meses

A figura 4.108 apresenta os resultados obtidos para ensaios de tração direta realizados nos corpos de prova C35, B35 e A35 condicionados em água durante 3 meses. As curvas em cinza foram obtidas na etapa de indução da fissura, apresentada anteriormente, enquanto as curvas em preto apresentam o comportamento tensão x deslocamento após o condicionamento das amostras pré-fissuradas.

Observando-se as curvas da figura 4.108, nota-se que todos os corpos de prova, com exceção da amostra A35, apresentaram ganho ou mantiveram a tensão máxima obtida na fase de indução de fissura. A tensão máxima média observada no ensaio de tração direta após o condicionamento foi de  $5,33 \pm 0,45$  MPa, sendo que C35, B35 e A35 apresentaram tensões máximas de 5,85 MPa, 5,08 MPa e 5,50 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras pós-condicionamento foi de  $19 \pm 2$  GPa, sendo que C35, B35 e A35 apresentaram respectivas rigidez de 21 GPa, 19 GPa e 18 GPa.

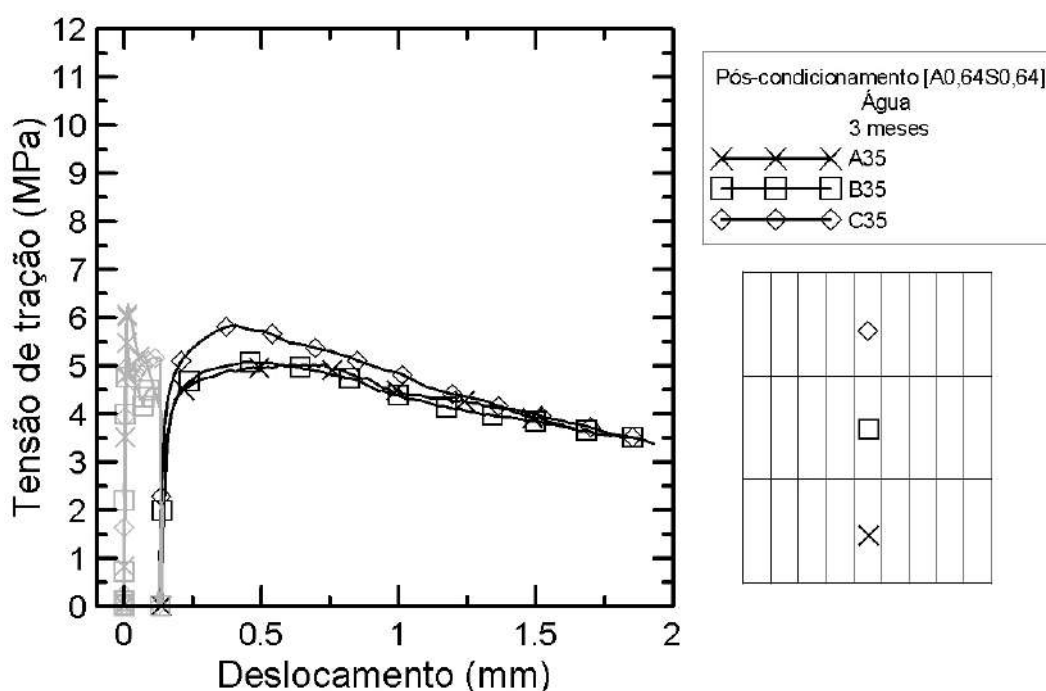


Figura 4.108: Curvas de tensão x deslocamento para as amostras condicionadas em água durante 3 meses [A0,64S0,64]

A tabela 4.18 apresenta os índices,  $IRT_1$ ,  $IRT_2$  e IRD, calculados conforme explicitado no item 3.3. Os resultados obtidos para os índices  $IRT_2$  mostram que as tensões máximas pós-condicionamento obtidas para as amostras C35 e B35, nos deslocamentos de  $131 \mu\text{m}$  e  $102 \mu\text{m}$  foram, respectivamente, 5% e 2% maiores do que os valores máximos medidos na indução da fissura correspondente ao mesmo



deslocamento. A tensão máxima pós-condicionamento obtida para a amostra A35, no deslocamento de  $74 \mu\text{m}$  foi 15% menor do que o valor máximo medido na indução da fissura correspondente aos mesmos deslocamentos.

A partir dos resultados obtidos para o índice  $IRT_1$  observa-se um aumento de tensão em 13% e 12% para as amostras C35 e B35, bem como uma redução de tensão no valor de 4% para a amostra A35.

O índice IRD variou de 0,41 a 0,43, indicando que não houve uma recuperação completa da rigidez das amostras. Esse comportamento pode estar relacionado com o não selamento completo da fissura principal induzida nas amostras (ver figuras 4.110, 4.111 e 4.112).

Tabela 4.18: Índices amostras de submersão em água durante 3 meses [A0,64S0,64]

M3 [A0,64S0,64]			
CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD
C35	1,13	1,05	0,41
B35	1,12	1,02	0,44
A35	0,96	0,85	0,43

A figura 4.109 apresenta as curvas tensão x deslocamento obtidas a partir dos ensaios realizados nos corpos de prova controle e nos corpos de prova com fissura induzida, ambos após o condicionamento. É possível observar que as amostras controle apresentaram uma tensão média de  $7,86 \pm 0,57$  MPa, sendo que B31 e C31 apresentaram tensões máximas de 7,45 MPa e 8,26 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras de controle pós-condicionamento foi de  $42 \pm 2$  GPa, sendo que B31 e C31 apresentaram respectivas rigidez de 41 GPa e 44 GPa.

A relação entre a média das tensões máximas pós-fissuração das amostras pré-fissuradas e das amostras de controle indica que ocorre uma redução de 32% nessa propriedade.

A rigidez média das amostras fissuradas ( $19 \pm 2$ ) é cerca de 55% menor do que das amostras de controle ( $42 \pm 2$  GPa).

As figuras 4.110, 4.111 e 4.112 apresentam as fissuras após 3 meses de condicionamento. Dessas, é possível visualizar o selamento parcial das fissuras secundárias. A amostra B35 foi a que apresentou um melhor selamento de fissura principal. Constatou-se, novamente, a nucleação na deposição de carbonato de cálcio na fibra de sisal. De forma a corroborar este argumento a figura 4.113 demonstra a deposição do carbonato de cálcio na região em que se encontra a fibra de sisal.

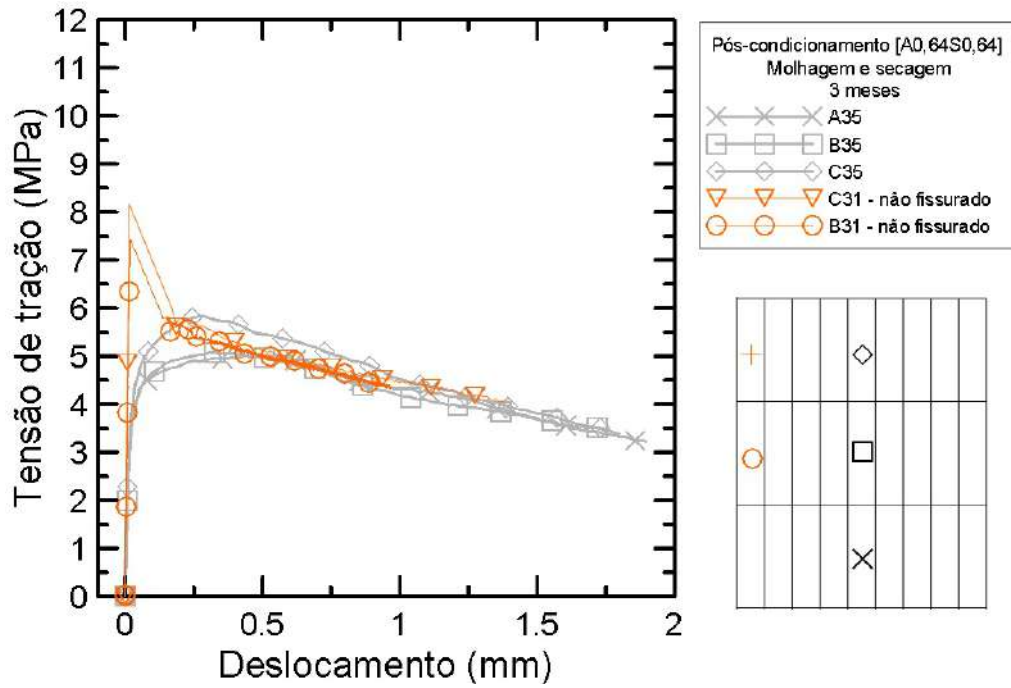


Figura 4.109: Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em água durante 3 meses [A0,64S0,64]

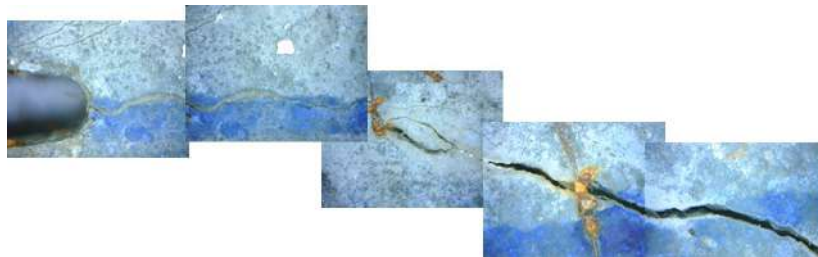


Figura 4.110: Incompleto selamento da fissura do C35

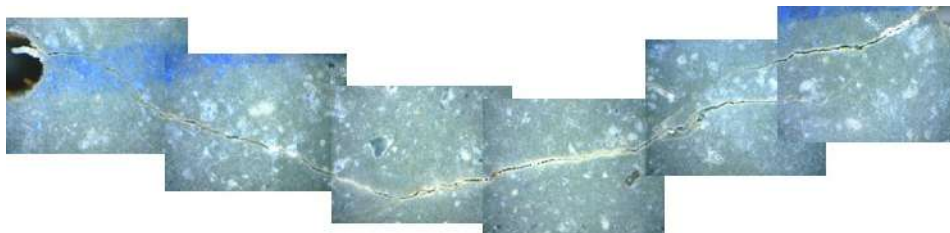


Figura 4.111: Incompleto selamento da fissura do B35



Figura 4.112: Incompleto selamento da fissura do A35



(a) Antes do condicionamento da amostra C35



(b) Pós-condicionamento C35

Figura 4.113: Nucleação de carbonato de cálcio na fibra de sisal

### 6 meses

A figura 4.114 apresenta os resultados obtidos para ensaios de tração direta realizados nos corpos de prova C34, B34 e A34 submetidos a condicionamento em água durante 6 meses. As curvas em cinza foram obtidas na etapa de indução da fissura, apresentada anteriormente, enquanto as curvas em preto apresentam o comportamento tensão x deslocamento após o condicionamento das amostras pré-fissuradas.

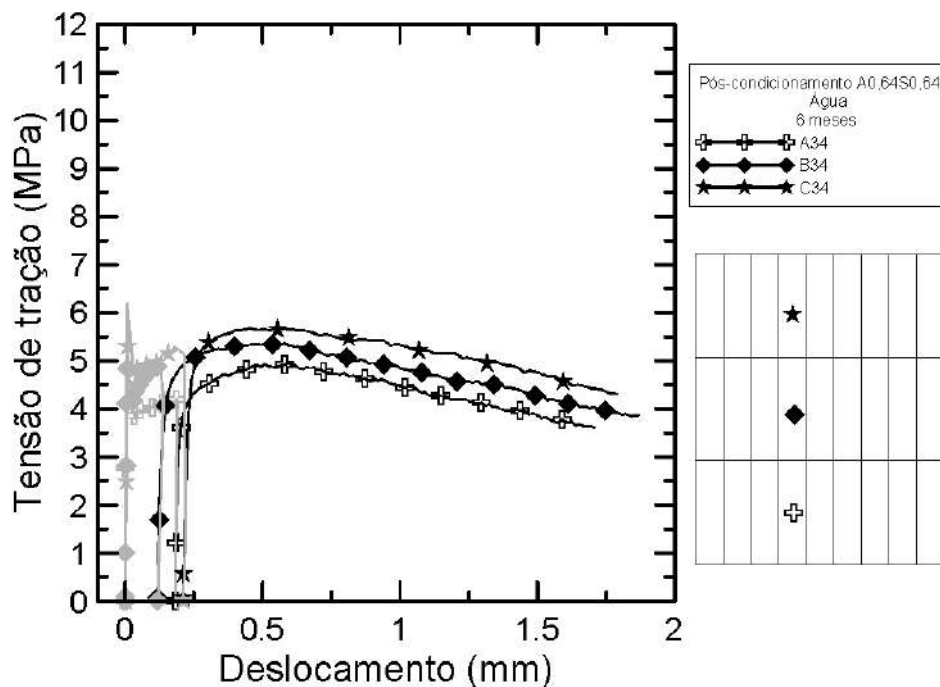


Figura 4.114: Curvas de tensão x deslocamento para as amostras condicionadas em água durante 6 meses [A0,64S0,64]

Observando-se as curvas da figura 4.114, nota-se que todos os corpos de prova,

com exceção da amostra C34, apresentaram ganho ou mantiveram a tensão máxima obtida na fase de indução de fissura. A tensão máxima média observada no ensaio de tração direta após o condicionamento foi de  $5,36 \pm 0,37$  MPa, sendo que C34, B34 e A34 apresentaram tensões máximas de 5,71 MPa, 5,39 MPa e 4,97 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras pós-condicionamento foi de  $22 \pm 1$  GPa, sendo que C34, B34 e A34 apresentaram respectivas rigidez de 21 GPa, 22 GPa e 21 GPa.

A tabela 4.11 apresenta os índices,  $IRT_1$ ,  $IRT_2$  e IRD, calculados conforme explicitado no item 3.3. Os resultados obtidos para os índices  $IRT_2$  mostram que as tensões máximas pós-condicionamento, obtidas para os deslocamentos de 169  $\mu\text{m}$ , 128  $\mu\text{m}$  e 191  $\mu\text{m}$  para as amostras C34, B34 e A34 foram, respectivamente, 5%, 1% e 13% maiores do que os valores máximos medidos na indução da fissura correspondente ao mesmo deslocamento

A partir dos resultados obtidos para o índice  $IRT_1$  observa-se um aumento de tensão em 9%, 8% e 19% para as amostras C34, B34 e A34.

O índice IRD variou de 0,32 a 0,37, indicando que não houve uma recuperação completa da rigidez das amostras. Esse comportamento pode estar relacionado com o não selamento completo da fissura principal induzida nas amostras (ver figuras 4.116, 4.117 e 4.118).

Tabela 4.19: Índices amostras de submersão em água durante 6 meses [A0,64S0,64]

M3 [A0,64S0,64]			
CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD
C34	1,09	1,05	0,37
B34	1,08	1,01	0,32
A34	1,19	1,13	0,34

A figura 4.115 apresenta as curvas tensão x deslocamento obtidas a partir dos ensaios realizados nos corpos de prova controle e nos corpos de prova com fissura induzida, ambos após o condicionamento. É possível observar que as amostras controle apresentaram uma tensão média de  $6,69 \pm 0,78$  MPa, sendo que A37 e C32 apresentaram tensões máximas de 6,14 MPa e 7,24 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras de controle pós-condicionamento foi de  $43 \pm 5$  GPa, sendo que A37 e C32 apresentaram respectivas rigidez de 42 GPa e 47 GPa.

A relação entre a média das tensões máximas pós-fissuração das amostras pré-fissuradas e das amostras de controle indica que ocorre uma redução de 20% nessa propriedade.

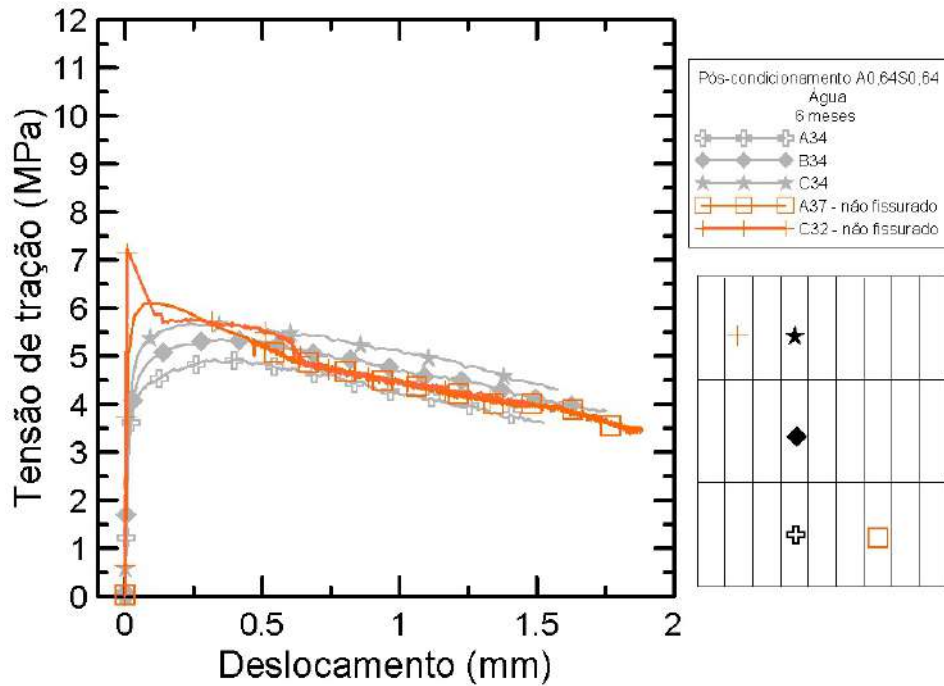


Figura 4.115: Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em água durante 6 meses [A0,64S0,64]

A rigidez média das amostras fissuradas ( $22 \pm 1$  GPa) é cerca de 49% menor do que das amostras de controle ( $43 \pm 5$  GPa).

As figuras 4.116, 4.117 e 4.118 apresentam as fissuras após 6 meses de condicionamento. Dessas, é possível visualizar, uma vez mais, a nucleação em regiões adjacentes a fibras de sisal, bem como o incompleto selamento da fissura, fato que não influenciou na recuperação de tensão máxima. Observa-se o não selamento completo das fissuras principais e o selamento de fissuras secundárias.



Figura 4.116: Incompleto selamento da fissura do C34

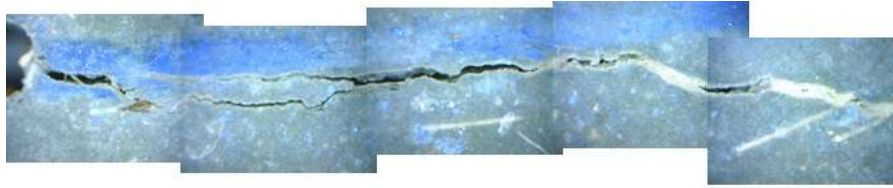


Figura 4.117: Incompleto selamento da fissura do B34



Figura 4.118: Incompleto selamento da fissura do A34

A tabela 4.20 apresenta um resumo dos índices de recuperação mecânica ( $IRT_1$ ,  $IRT_2$  e IDR) e as médias dos módulos elásticos nos 2 tratamentos aplicados nas idades de 3 e 6 meses.

Conclui-se que a média da rigidez dos corpos de prova dessa mistura, para diferentes idades e condicionamentos, foi similar, variando entre  $19 \pm 4$  GPa a  $22 \pm 1$  GPa.

O índice de recuperação de rigidez (IRD) variou entre 0,41-0,54 para as amostras condicionadas em água e entre 0,38-0,55 para as amostras submetidas a ciclos de molhagem e secagem. Destaca-se que os valores estão similares, ocorrendo um pequeno aumento para o condicionamento em água na idade de 6 meses.

O condicionamento de 6 meses em ciclos de secagem e molhagem apresentou uma melhor performance na recuperação de capacidade de carga, tanto através da análise do índice  $IRT_1$  quanto  $IRT_2$ .

Dessa maneira, conclui-se que o condicionamento em água foi superior no tocante à recuperação da rigidez, enquanto os ciclos de molhagem e secagem obtiveram maior sucesso na recuperação da tensão máxima, ambos após seis meses de condicionamento.

A fibra de sisal não desempenhou papel tão expressivo no controle de abertura de fissura quanto as fibras de aço, apresentando a maioria dos corpos de prova dessa mistura um comportamento de amolecimento na idade de indução das fissuras. Não obstante, a maioria deles apresentou uma mudança de comportamento na curva, não mais de amolecimento característico mas com um leve aumento de tensão após a primeira fissura.

Atinente à fibra de sisal como agente cicatrizador, ocorreu expressivo aumento da tensão máxima obtida após o condicionamento em ciclos de molhagem e secagem. Uma hipótese seria a maior quantidade de água disponível para reagir com o dióxido

de carbono do ambiente ou mesmo para formação de etringita e C-S-H. Esta fibra, também, funcionou com agente nucleador da reação de carbonato de cálcio na fissura.

Tabela 4.20: Tabela resumo de índices M3[A0,64S0,64]

3 meses						
Tratamento	CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD	Rigidez	
Água	C35	1,13	1,05	0,41		
	B35	1,12	1,02	0,44		19±2
	A35	0,96	0,85	0,43		
Molhagem e secagem	C36	1,23	1,18	0,50		
	B36	1,29	1,25	0,47		19±3
	A36	0,95	0,76	0,38		
6 meses						
Tratamento	CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD	Rigidez	
Água	C34	1,09	1,05	0,54		
	B34	1,08	1,01	0,46		22±1
	A34	1,19	1,13	0,51		
Molhagem e secagem	C37	1,21	1,19	0,43		
	B37	1,31	1,28	0,55		19±4

#### 4.4.4 Resultados de auto-cicatrização obtidos para a mistura M4

##### 4.4.4.1 Amostras submetidas a ciclos de molhagem e secagem

###### 3 meses

A figura 4.119 apresenta os resultados obtidos para ensaios de tração direta realizados nos corpos de prova C46, B46 e A44 submetidos a ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses. As curvas em cinza foram obtidas na etapa de indução da fissura, apresentada anteriormente, enquanto as curvas em preto apresentam o comportamento tensão x deslocamento após o condicionamento das amostras pré-fissuradas.

Observando-se as curvas da figura 4.119, nota-se que todos os corpos de prova, com exceção da amostra A44, apresentaram ganho ou mantiveram a tensão máxima obtida na fase de indução de fissura. A tensão máxima média observada no ensaio de tração direta após o condicionamento foi de  $9,66 \pm 2,36$  MPa, sendo que C46,

B46 e A44 apresentaram tensões máximas de 11,35 MPa, 6,97 MPa e 10,67 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras pós-condicionamento foi de  $26 \pm 10$  GPa, sendo que C46, B46 e A44 apresentaram respectivas rigidez de 35 GPa, 28 GPa e 16 GPa.

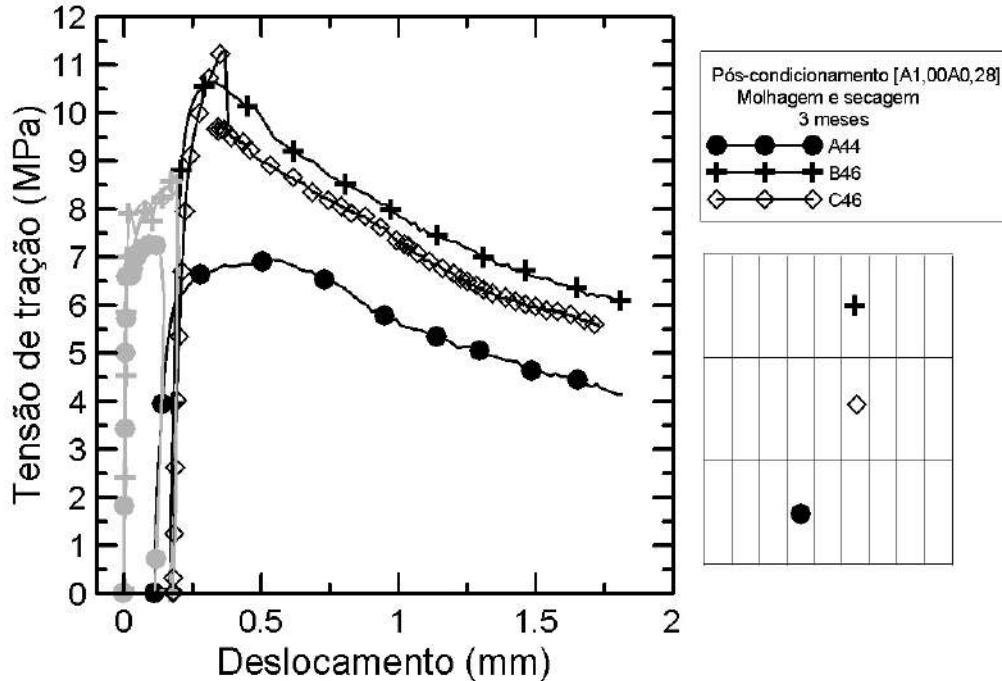


Figura 4.119: Curvas de tensão x deslocamento para as amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A1,00S0,28]

A tabela 4.21 apresenta os índices,  $IRT_1$ ,  $IRT_2$  e IRD, calculados conforme explicitado no item 3.3. Os resultados obtidos para os índices  $IRT_2$  mostram que a tensão máxima pós-condicionamento obtida para o deslocamento de  $82 \mu\text{m}$  na amostra A44 foi 16% menor do que o valor máximo medido na indução da fissura. As tensões máxima pós-condicionamento obtidas para as amostras C46 e B46, nos deslocamento de  $196 \mu\text{m}$  e  $194 \mu\text{m}$  foram 14% e 20% maiores do que o valores máximos medidos na indução da fissura correspondente aos mesmos deslocamentos.

A partir dos resultados obtidos para o índice  $IRT_1$  observa-se um aumento de tensão em 33% e 22% para as amostras C46 e B46, bem como uma redução de tensão pós-fissuração no valor de 5% para a amostra A44.

O índice IRD variou de 0,29 a 0,63, indicando que não houve uma recuperação completa da rigidez das amostras. Esse comportamento pode estar relacionado com o não selamento completo da fissura principal induzida nas amostras (ver figuras 4.121, 4.122 e 4.123). A amostra A44 apresentou uma pequena recuperação de rigidez com valor de 16 GPa, contudo há de se pontuar, novamente, que nas amostras pré-fissuradas, por vezes, o desvio de linearidade ocorre anteriormente os 40% da tensão máxima.



Tabela 4.21: Índices amostras de ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A1,00S0,28]

M4 [A1,00S0,28]			
CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD
C46	1,33	1,14	0,63
B46	1,22	1,20	0,52
A44	0,95	0,84	0,29

A figura 4.120 apresenta as curvas tensão x deslocamento obtidas a partir dos ensaios realizados nos corpos de prova controle e nos corpos de prova com fissura induzida, ambos após o condicionamento. É possível observar que a amostra controle apresentou uma tensão máxima de 7,10 MPa. A rigidez da amostra de controle pós-condicionamento foi de 41 GPa.

A relação entre a média das tensões máximas pós-fissuração das amostras pré-fissuradas e das amostras de controle indica que ocorre aumento de 36% nessa propriedade.

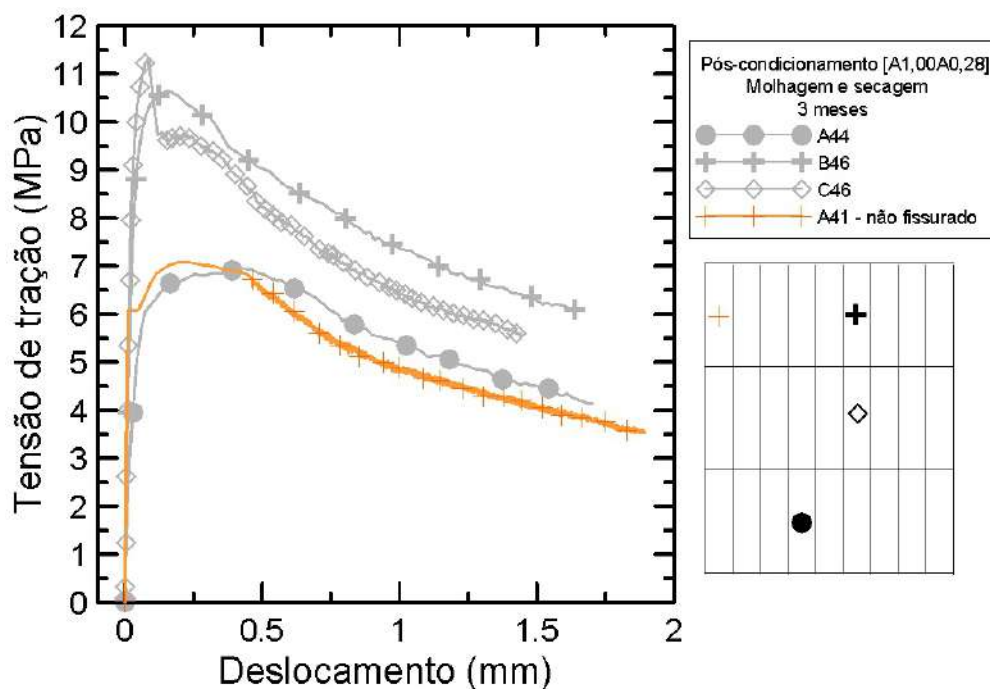


Figura 4.120: Curvas de tensão x deformação de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A1,00S0,28]

A rigidez média das amostras fissuradas ( $26 \pm 10$  GPa) é cerca de 45% menor do que das amostras de controle (47 GPa).

As figuras 4.121, 4.122 e 4.123 apresentam as fissuras após 3 meses de tratamento. Dessas, é possível visualizar que nenhuma apresentou total selamento da fissura principal. A amostra A44 apresentou o maior selamento e o pior comportamento mecânico. Do mesmo modo ocorrido com a mistura A0,64S0,64, houve uma nucleação da deposição do carbonato de cálcio pelas fibras de sisal. A figura 4.124 demonstra a citada deposição do carbonato de cálcio em região que se encontra a fibra de sisal na amostra C46.

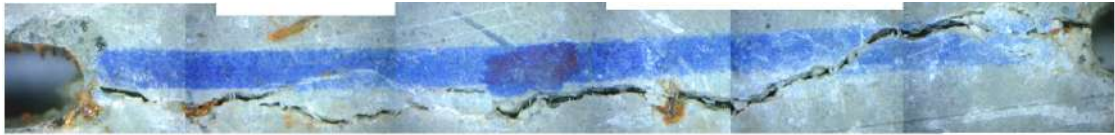


Figura 4.121: Incompleto selamento da fissura do C46

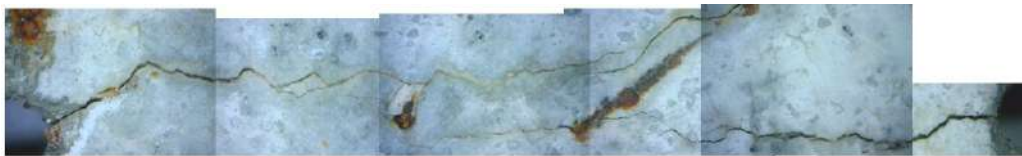


Figura 4.122: Incompleto selamento da fissura do B46

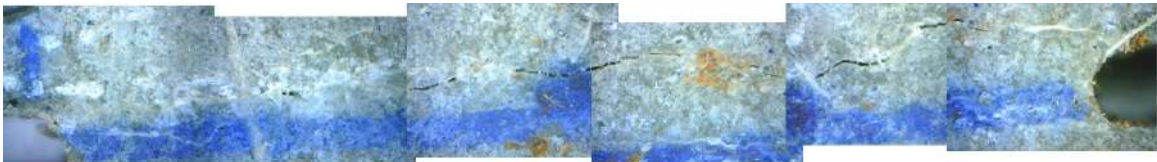
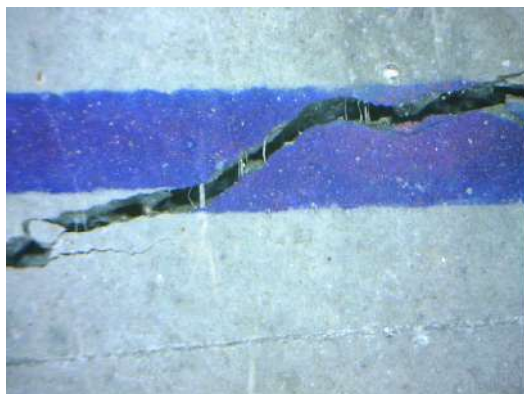
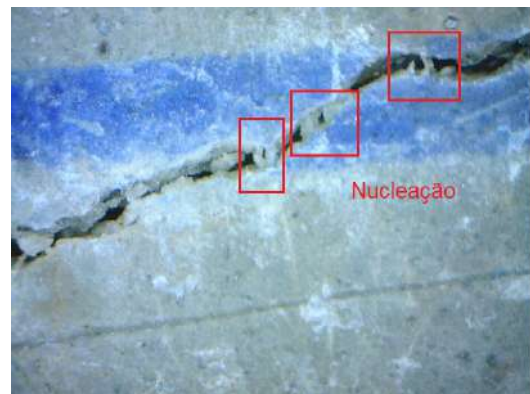


Figura 4.123: Incompleto selamento da fissura do A44



(a) Pré-fissuração C46



(b) Pós-condicionamento C46

Figura 4.124: Nucleação de carbonato de cálcio na fibra de sisal na amostra C46

## 6 meses

A figura 4.125 apresenta os resultados obtidos para ensaios de tração direta realizados nos corpos de prova C47, B43 e C43 submetidos a ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses. As curvas em cinza foram obtidas na etapa de indução da fissura, apresentada anteriormente, enquanto as curvas em preto apresentam o comportamento tensão x deslocamento após o condicionamento das amostras pré-fissuradas.

Observando-se as curvas da figura 4.125, nota-se que todos os corpos de prova apresentaram ganho da tensão máxima obtida na fase de indução de fissura. A tensão máxima média observada no ensaio de tração direta após o condicionamento foi de  $9,44 \pm 1,57$  MPa, sendo que C47, B43 e C43 apresentaram tensões máximas de 9,14 MPa, 8,04 MPa e 11,14 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras pós-condicionamento foi de  $37 \pm 4$  GPa, sendo que C47, B43 e C43 apresentaram respectivas rigidez de 41 GPa, 33 GPa e 36 GPa.

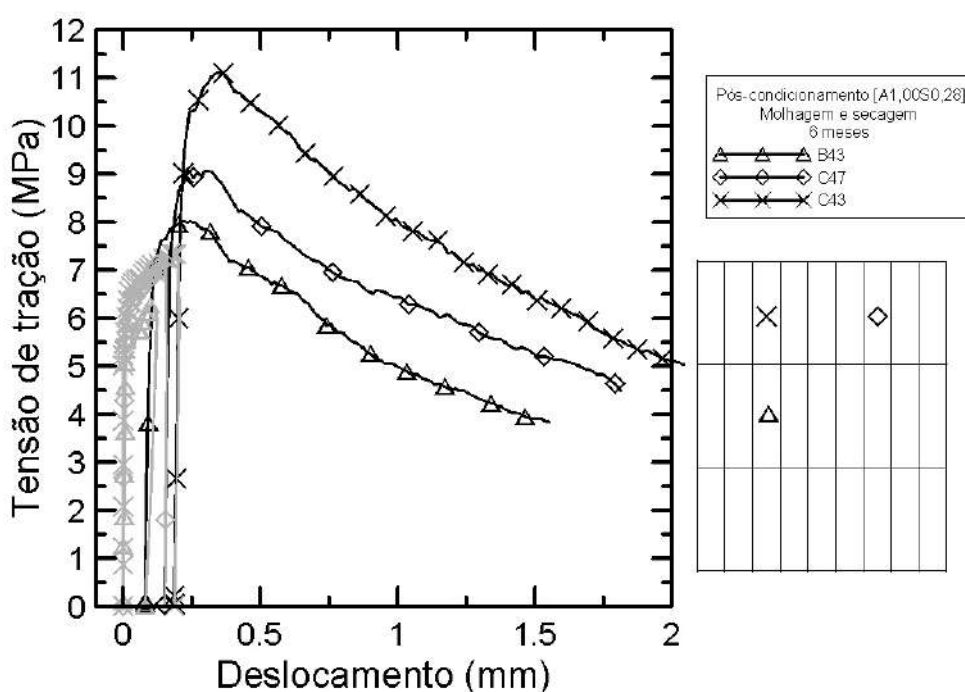


Figura 4.125: Curvas de tensão x deslocamento para as amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses [A1,00S0,28]

A tabela 4.22 apresenta os índices,  $IRT_1$ ,  $IRT_2$  e IRD, calculados conforme explicitado no item 3.3. Os resultados obtidos para os índices  $IRT_2$  mostram que as tensões máximas pós-condicionamento obtidas para as amostras C47, B43 e C43, nos deslocamentos de  $155 \mu\text{m}$ ,  $109 \mu\text{m}$  e  $195 \mu\text{m}$  foram 24%, 25% e 49% maiores do que o valores máximos medidos na indução da fissura correspondente aos mesmos deslocamentos.

A partir dos resultados obtidos para o índice  $IRT_1$  observa-se um aumento de tensão em 25%, 27% e 50% para as amostras C47, B43 e C43.

O índice IRD variou de 0,62 a 0,70, indicando que não houve uma recuperação completa da rigidez das amostras. Esse comportamento pode estar relacionado com o não selamento completo da fissura principal, induzida nas amostras (ver figuras 4.127, 4.128 e 4.129).

Tabela 4.22: Índices amostras de ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses [A1,00S0,28]

M4 [A1,00S0,28]			
CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD
C47	1,25	1,24	0,70
B43	1,27	1,25	0,65
C43	1,50	1,49	0,62

A figura 4.126 apresenta as curvas tensão x deslocamento obtidas a partir dos ensaios realizados nos corpos de prova controle e nos corpos de prova com fissura induzida, ambos após o condicionamento. É possível observar que a amostra controle apresentou uma tensão de 6,13 MPa e rigidez de 59 GPa.

A relação entre a média das tensões máximas pós-fissuração das amostras pré-fissuradas e da amostra de controle indica que ocorre um aumento de 54% nessa propriedade.

A rigidez média das amostras fissuradas ( $37 \pm 4$  GPa) é cerca de 37% menor do que da amostra de controle (59 GPa).

As figuras 4.127, 4.128 e 4.129 apresentam as fissuras após 6 meses de condicionamento. Dessas, é possível visualizar que nenhuma apresentou total selamento da fissura principal, sendo que B43 quase alcançou este feito. Essa amostra apresentou o maior selamento dentre todas as analisadas nessa mistura e nesse condicionamento, mas não apresentou a maior rigidez ou IRD. Ocorreu, também, uma nucleação na deposição do carbonato de cálcio nas fissuras pelas fibras de sisal. Observa-se a ocorrência do selamento de fissuras secundárias nas amostras. A figura 4.130 demonstra a citada deposição do carbonato de cálcio na região que se encontra a fibra de sisal na amostra C43.

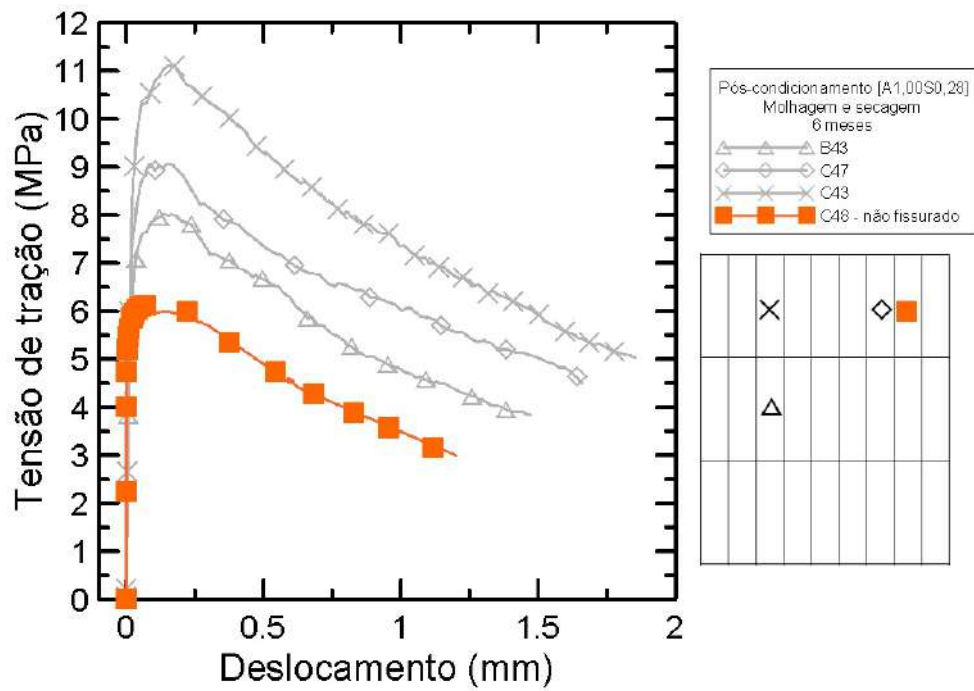


Figura 4.126: Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses [A1,00S0,28]

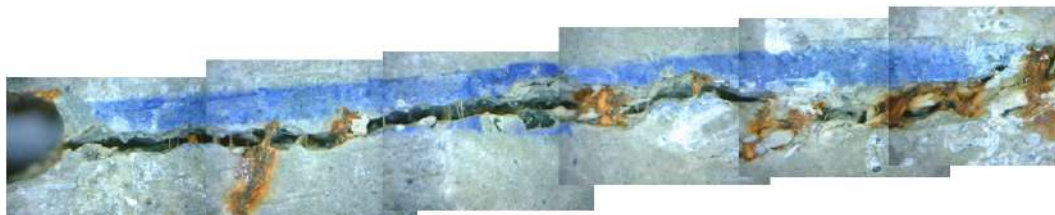


Figura 4.127: Incompleto selamento da fissura do C47

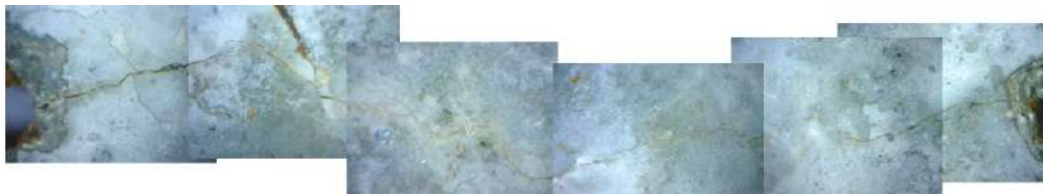


Figura 4.128: Incompleto selamento da fissura do B43

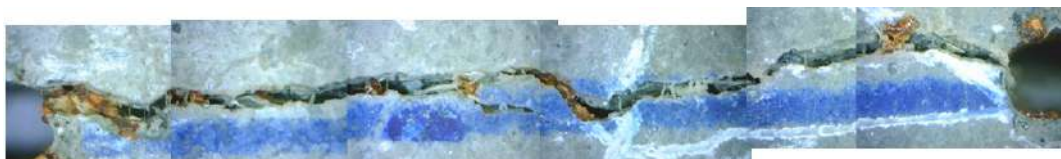
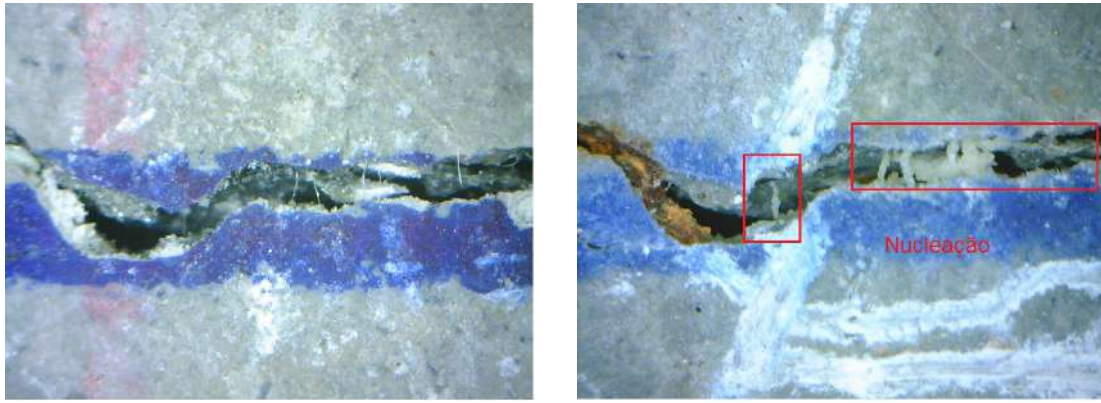


Figura 4.129: Incompleto selamento da fissura do C43



(a) Pré-fissuração C46

(b) Pós-condicionamento C43

Figura 4.130: Nucleação de carbonato de cálcio na fibra de sisal na amostra C43

#### 4.4.4.2 Amostras condicionadas em água

##### 3 meses

A figura 4.131 apresenta os resultados obtidos para ensaios de tração direta realizados nos corpos de prova C45 e A45 submetidos ao condicionamento em água durante 3 meses. As curvas em cinza foram obtidas na etapa de indução da fissura, apresentada anteriormente, enquanto as curvas em preto apresentam o comportamento tensão x deslocamento após o condicionamento das amostras pré-fissuradas.

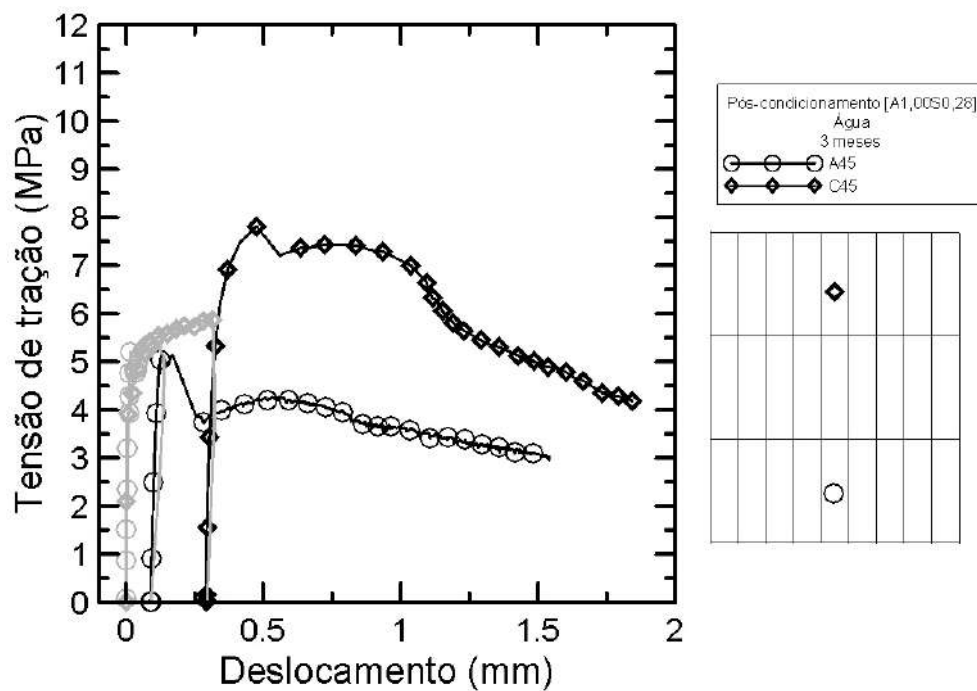


Figura 4.131: Curvas de tensão x deslocamento para as amostras condicionadas em água durante 3 meses [A1,00S0,28]

Observando-se as curvas da figura 4.131, nota-se que apenas o corpo de prova C45 apresentou ganho da tensão máxima obtida na fase de indução de fissura. A tensão máxima média observada no ensaio de tração direta após o condicionamento foi de  $6,60 \pm 2,05$  MPa, sendo que C45 e A45 apresentaram tensões máximas de 8,05 MPa e 5,15 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras pós-condicionamento foi de  $27 \pm 11$  GPa, sendo que C45 e A45 apresentaram respectivas rigidez de 35 GPa e 19 GPa.

A tabela 4.23 apresenta os índices,  $IRT_1$ ,  $IRT_2$  e IRD, calculados conforme explicitado no item 3.3. Os resultados obtidos mostram que a tensão máxima pós-condicionamento obtidas para as amostras C45, no deslocamento de  $198 \mu\text{m}$  foi 24% maior do que o valor máximo medido na indução da fissura correspondente ao mesmo deslocamento. A amostra A45 apresentou tensão máxima 13% no deslocamento de  $100 \mu\text{m}$  quando comparada ao valor máximo medido na indução da fissura correspondente ao mesmo deslocamento.

A partir dos resultados obtidos para o índice  $IRT_1$  observa-se um aumento de tensão em 34% para a amostra C45, bem como uma redução de tensão no valor de 5% para a amostra A45.

O índice IRD variou de 0,38 a 0,58, indicando que não houve uma recuperação completa da rigidez das amostras. Esse comportamento pode estar relacionado com o não selamento completo da fissura principal induzida nas amostras (ver figuras 4.133 e 4.134).

Tabela 4.23: Índices amostras de ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses [A1,00S0,28]

M4 [A1,00S0,28]			
CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD
C45	1,34	1,24	0,58
A45	0,95	0,87	0,38

A figura 4.132 apresenta as curvas tensão x deslocamento obtidas a partir dos ensaios realizados nos corpos de prova controle e nos corpos de prova com fissura induzida, ambos após o condicionamento. É possível observar que as amostras controle apresentaram uma tensão média de  $7,52 \pm 0,45$  MPa, sendo que C41 e A49 apresentaram tensões máximas de 7,20 MPa e 7,84 MPa, respectivamente. A rigidez média das amostras de controle pós-condicionamento foi de  $52 \pm 3$  GPa, sendo que C41 e A49 apresentaram respectivas rigidez de 50 GPa e 54 GPa.

A relação entre a média das tensões máximas pós-fissuração das amostras pré-fissuradas e das amostras de controle indica que ocorre uma redução de 22% nessa

propriedade.

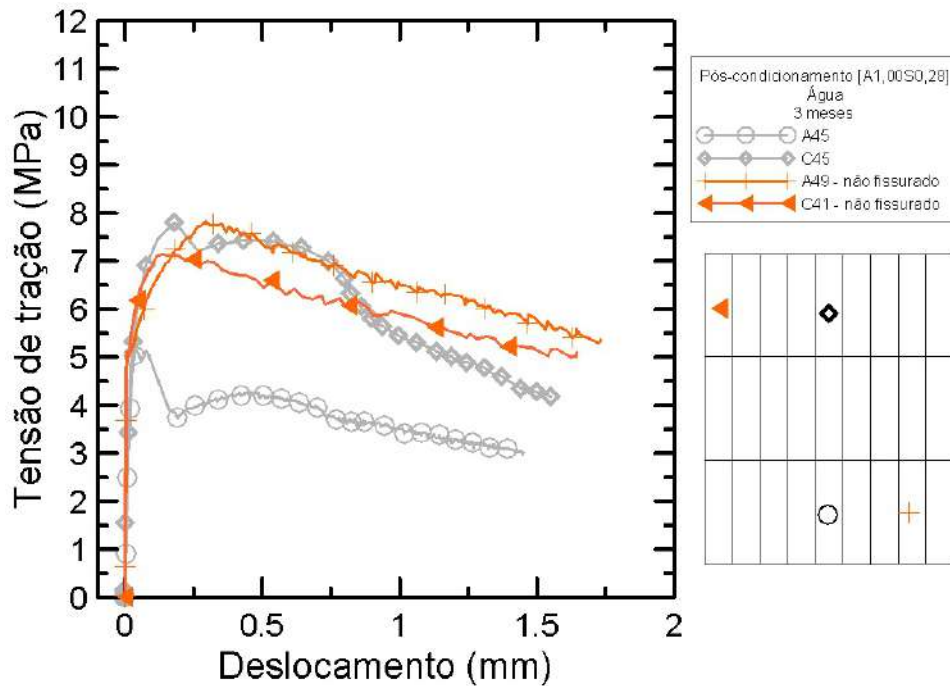


Figura 4.132: Curvas de tensão x deslocamento de corpos de prova pré-fissurados e controle após condicionamento em água durante 3 meses [A1,00S0,28]

A rigidez média das amostras fissuradas ( $27 \pm 11$  GPa) é cerca de 48% menor do que das amostras de controle ( $52 \pm 3$  GPa).

As figuras 4.133 e 4.134 apresentam as fissuras após 3 meses de condicionamento. Dessas, é possível visualizar que nenhuma amostra apresentou total selamento da fissura principal, contudo A45 chegou próximo a isso. A amostra A45 apresentou o maior selamento e o pior comportamento mecânico, uma possível explicação para isso seria a ocorrência de selamento apenas superficial da fissura. Houve uma nucleação da deposição do carbonato de cálcio pelas fibras de sisal, conforme figura 4.135. Observou-se o selamento de fissuras secundárias.

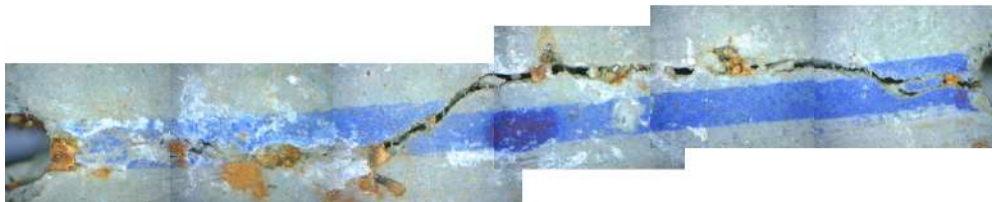


Figura 4.133: Incompleto selamento da fissura do C45



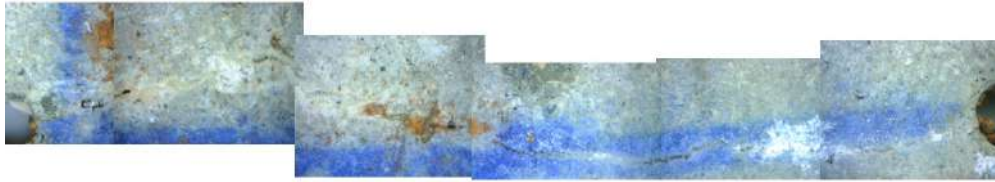
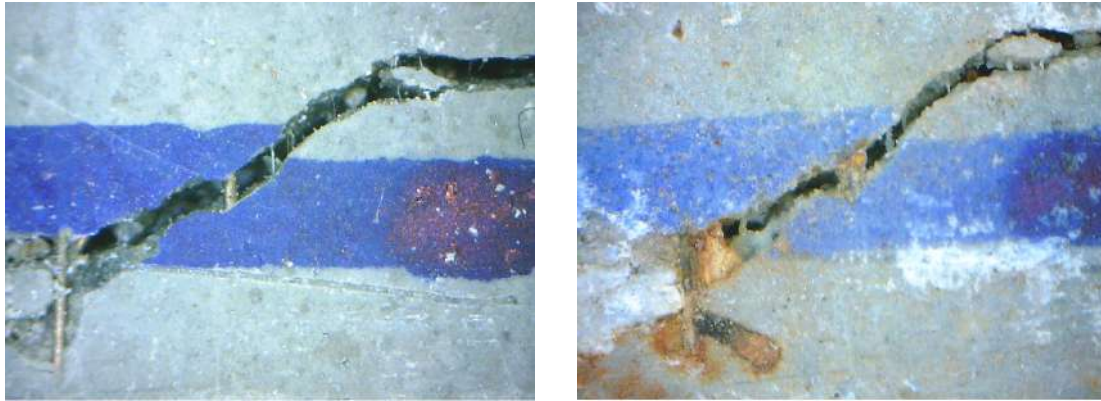


Figura 4.134: Incompleto selamento da fissura do A45



(a) Pré-fissuração C45

(b) Pós-condicionamento C45

Figura 4.135: Nucleação de carbonato de cálcio na fibra de sisal na amostra C45

A tabela 4.24 apresenta um resumo dos resultados obtidos com a mistura 4.

Tabela 4.24: Tabela resumo da mistura M4[A1,00S0,28]

3 meses					
Tratamento	CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD	Rigidez
Água	C45	1,34	1,24	0,58	27±11
	A45	0,95	0,87	0,38	
Molhagem e secagem	C46	1,33	1,14	0,63	26±10
	B46	1,22	1,20	0,52	
	A44	0,95	0,84	0,29	
6 meses					
Tratamento	CP	$IRT_1$	$IRT_2$	IRD	Rigidez
Molhagem e secagem	C47	1,25	1,24	0,70	37±4
	B43	1,27	1,25	0,65	
	C43	1,50	1,49	0,62	

A recuperação da rigidez dos corpos de prova se destacou para o tratamento de seis meses em ciclos de molhagem e secagem, apresentando valores entre 0,62-0,70,

comparado com uma valores entre 0,29-0,63 desse mesmo condicionamento em 3 meses de idade. As amostras na localização A da placa apresentaram os menores índices de recuperação de rigidez.

O condicionamento em ciclos de molhagem e secagem por 6 meses obteve maior média de recuperação de tensão máxima em determinados deslocamentos (1,24-1,49); enquanto a 3 meses obteve valores entre 0,84-1,20.

A fibra de sisal funcionou com agente nucleador da deposição do carbonato de cálcio, sendo visível sua forma ao redor dessas.

Não obstante o não selamento completo das fissuras principais, na maioria dos casos, os corpos de prova foram capazes de recuperar sua tensão máxima e parte da rigidez original.

Após apresentados todos os resultados referente a auto-cicatrização das quatro misturas propostas há de se traçar um paralelo entre as mesmas.

Observou-se que os maiores índices de recuperação de capacidade de carga ( $IRT_1$  e  $IRT_2$ ) pertenceram a mistura M4 [A1,00S0,28] no condicionamento de ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses. Tais valores variaram entre 1,24-1,50. Fato similar ocorreu com a recuperação de rigidez, através do índice IRD, essa mesma mistura apresentou valores entre 0,62-0,70 nessa mesma idade. Valores similares para as amostras nas localizações B e C foram observados na mistura 2 com ambos os condicionamentos aos 6 meses, bem como na mistura 1 em 3 meses condicionados em água. A recuperação da rigidez não ocorreu por completo pois o corpo de prova não obtém completo selamento da fissura (interno e externo), sendo reensaiado no estado fissurado.

Destaca-se que, as amostras na localização A, apresentaram majoritariamente resultados aquém das posições C e B no tocante a recuperação de rigidez e recuperação de tensão máxima absoluta. Acredita-se que o alinhamento e orientação das fibras, conforme explicitado no item de indução da fissura, esteja relacionado a este comportamento.

No tocante à comparação com corpos de prova controle, pode-se constatar que em todas as misturas e condicionamentos, pelo menos uma amostra pré-fissurada conseguiu tensões similares às amostras de controle, a divergência ficou configurada na rigidez, tendo as amostras pré-fissuradas alcançado na média praticamente metade da rigidez das amostras controle. A mistura que apresentou melhor recuperação de capacidade de carga comparada às amostras de controle foi a mistura 4 com o condicionamento em ciclos de molhagem e secagem durante 6 meses, com valor 54% maior em relação a tensão apresentada pelas amostras de controle.

A fibra de sisal foi adicionada de forma a distribuir a umidade no interior do corpo de prova, constatado através das melhores performance obtidas pela matriz com adição de fibras de sisal (M1) em comparação à M2, conforme já discutido.

Fato observado nas amostras fissuradas foi a nucleação da reação de carbonatação nos arredores da fibra.

Apesar de melhor performance em termos de tensões absolutas, a mistura M1 [A1,28S0,28] contendo 0,28% de fibras curtas de sisal, não se destacou em termos de índices de recuperação frente a mistura que não continha essas fibras (M2 [A1,28]).

Tangendo à auto-cicatrização, fator central da dissertação, conclui-se que a mesma foi alcançada na maioria das amostras sendo que a menor recuperação de tensão máxima foi de 78% da amostra A36 e a maior de 150% da amostra C43.

Por fim, o tratamento mais eficiente em termos de aumento de resistência foi 6 meses em ciclos de molhagem e secagem e o menos eficiente 6 meses condicionados em água. Para aumento da rigidez, o tratamento de 6 meses em água se destacou dos demais, ressaltando que a mistura M4 apresentou um excelente valor de rigidez em 6 meses de ciclos de molhagem e secagem.

## 4.5 Produtos de hidratação formados nas matrizes e materiais de preenchimento

### 4.5.1 Pastas de cimento *portland*

Foram moldadas pastas de cimento *portland* com fator água/cimento de 0,33 para determinação dos produtos de hidratação por análise térmica aos 28 dias, 60 dias e 120 dias.

A figura 4.136 mostra os resultados da análise térmica. A linha cheia refere-se a amostra submetida a 3 meses de ciclos de molhagem e secagem após 28 dias de cura em câmara úmida (amostra com 120 dias), enquanto que a linha pontilhada refere-se ao resultado obtido após 1 mês de ciclos de molhagem e secagem (amostra de 60 dias). A linha cheia grossa mostra os resultados da análise térmica realizada nas amostras curadas por 28 dias em câmara úmida.

Observa-se que todas as amostras possuem os mesmos picos de decomposição. De acordo com DWECK *et al.* e DWECK *et al.* (1999), no primeiro pico (80-180°C) ocorre a decomposição da etringita e do C-S-H, seguido pelo pico da desidroxilação da portlandita entre 400-450°C e, por fim, ocorre a perda de  $CO_2$  do carbonato de cálcio entre 500-750°C. Destaca-se, ainda, o pico alargado em aproximadamente 850°C que de acordo com SCRIVENER *et al.* (2015) decorre da interrupção da hidratação com isopropanol, técnica usada no presente estudo e descrita no item 3.2.5.1.

Os produtos de hidratação calculados pelos resultados de TG/DTG são apresentados na tabela 4.25. Dos resultados obtidos pode-se depreender que a quantidade de etringita foi igual até o primeiro mês de condicionamento, ocorrendo um aumento

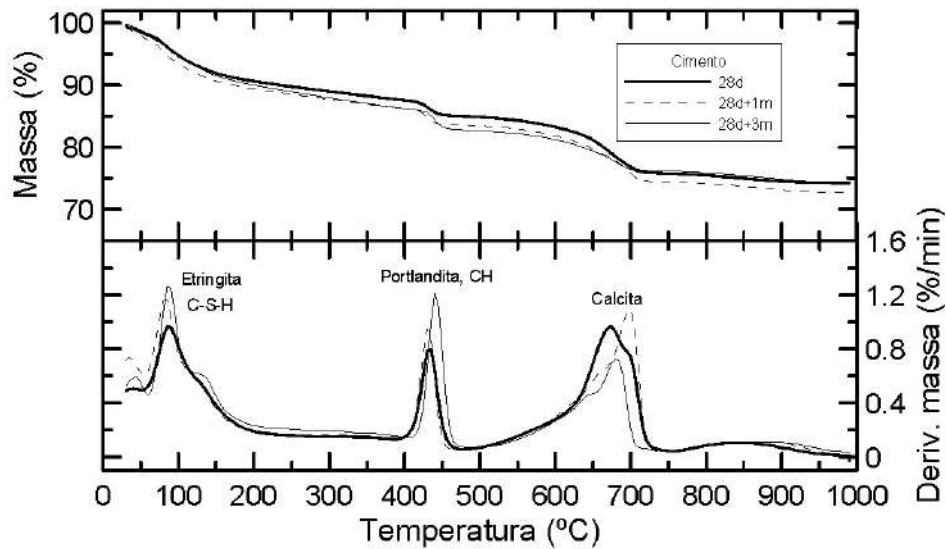


Figura 4.136: Curvas obtidas para a TG/DTG de pasta de cimento *portland*

de cerca de 26% para 3 meses de condicionamento. No tocante à fase de portlandita, nota-se um aumento gradativo até o final do condicionamento, quando um total de 2,58% é obtido. O teor de carbonato de cálcio manteve-se praticamente constante até um mês de condicionamento tendo, então apresentado uma redução de 36% após 3 meses de condicionamento.

Tabela 4.25: Porcentagens de produtos da pasta de cimento obtidos por análise térmica

Produtos	28 dias [%]	28d+1m [%]	28d+3m
Etringita e C-S-H	3,40	3,39	4,29
Portlandita	1,89	1,98	2,58
Carbonato de cálcio	7,79	7,84	5,01

## 4.5.2 Pasta de cimento + escória

Foram moldados quatro corpos de prova de pasta de cimento e escória com fator água/cimento de 0,33 e com teor de cimento e escória similares ao usado na matriz do concreto estudado. Nesta pasta realizou-se análises térmicas aos 28 dias, 28d + 1 mês e 28d + 3 meses de condicionamento.

A figura 4.137 mostra os resultados da análise térmica. A linha cheia refere-se a amostra submetida a 3 meses de ciclos de molhagem e secagem após 28 dias de cura em câmara úmida (amostra com 120 dias), enquanto que a linha pontilhada refere-se ao resultado obtido após 1 mês de ciclos de molhagem e secagem (amostra de 60 dias). A linha cheia grossa mostra os resultados da análise térmica realizada nas amostras curadas por 28 dias em câmara úmida.

Observa-se que todas as amostras possuem os mesmos picos de decomposição. De acordo com DWECK *et al.* e DWECK *et al.* (1999), no primeiro pico (80-180°C) ocorre a decomposição da etringita e do C-S-H, seguido pelo pico do sílico aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H) e aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) entre 180-280°C, pelo pico da desidroxilação da portlandita entre 400-450°C e, por fim, ocorre a perda de  $CO_2$  do carbonato de cálcio entre 500-750°C. Destaca-se, ainda, o pico alargado em aproximadamente 850°C que de acordo com SCRIVENER *et al.* (2015) decorre da interrupção da hidratação com isopropanol.

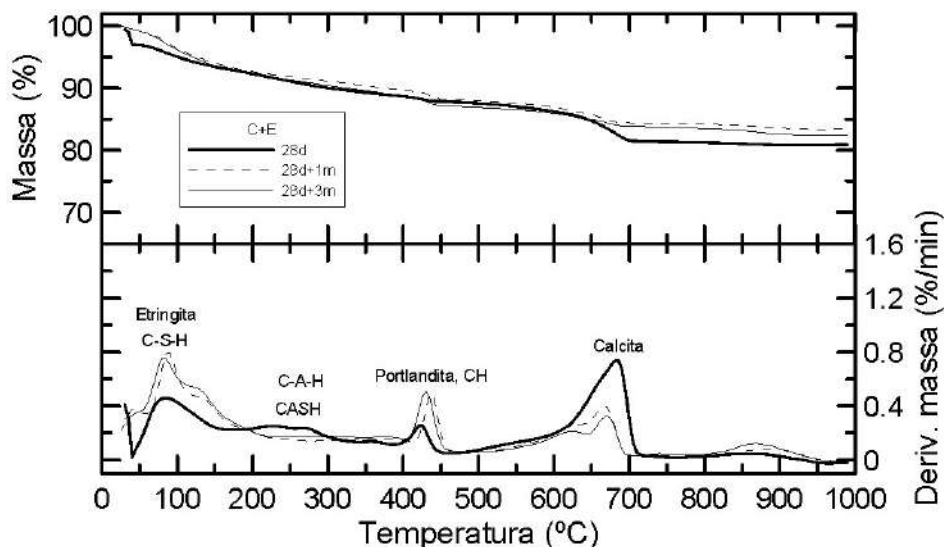


Figura 4.137: TG/DTG de pasta de cimento + escória

Os produtos de hidratação calculados pelos resultados de TG/DTG são apresentados na tabela 4.26. Dos resultados obtidos pode-se depreender que a quantidade de etringita aumentou em cerca de 37% entre o primeiro e terceiro mês de condicionamento. No tocante a fase de portlandita, nota-se um aumento gradativo até o final do condicionamento, quando um total de 0,98% é obtido. O teor de carbonato de cálcio apresentou uma redução de 62% após 3 meses de condicionamento.

Tabela 4.26: Porcentagens de produtos da TG/DTG da pasta de cimento + escória

Produtos	28d [%]	28d+1m [%]	28d+3m [%]
Etringita e C-S-H	2,22	3,03	3,23
Portlandita	0,55	0,75	0,98
Carbonato de cálcio	5,43	2,86	2,07

Os resultados dos ensaios termogravimétricos na pasta pura e na pasta com escória indicam que a substituição parcial do cimento *portland* pela escória de alto

forno resultaram na redução de etringita + C-S-H, portlandita e carbonato de cálcio após 28 dias.

Observa-se a presença de uma fase de aluminato (C-A-S-H e C-A-H) na pasta de escória para o resultado obtido aos 28 dias. Esse montante diminui com o passar do condicionamento. Essa fase não é observada na pasta de cimento.

A pasta de cimento + escória apresentou menor valor absoluto no pico de etringita/C-S-H (3,23), quando comparado a pasta com apenas cimento (4,29). Acredita-se tratar da característica pozolânica da escória com hidratação lenta e tardia. Fato é que a escória retira água que seria da hidratação do cimento, e, por ter sua hidratação mais lenta a quantidade dos produtos etringita/C-S-H é menor que em amostras apenas com pasta de cimento.

### 4.5.3 Material de preenchimento da fissura

A figura 4.138 apresenta o resultado da análise termogravimétrica realizada no material de preenchimento da fissura. Observa-se que a curva apresenta pequeno pico associado à perda de massa de produtos hidratados típicos, como etringita e C-S-H entre 80-160°C. O segundo e terceiro picos correspondem às perdas de massa das fases aluminatos C-A-S-H e C-A-H (153-290°C). Nota-se uma pequena quantidade de CH (460-465°C) e um último pico com grande quantidade de produto resultante da decomposição do carbonato de cálcio (620-745°C).

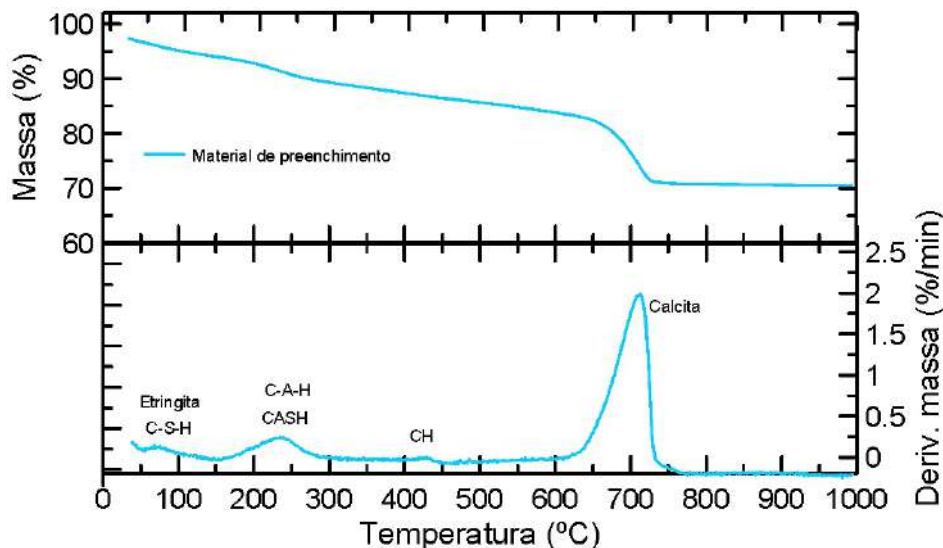


Figura 4.138: Análise térmica do produto de preenchimento da fissura.

## 4.6 Cicatrização de fissuras na interface fibra-matriz

### 4.6.1 Indução da fissura no ensaio de pré-arrancamento

A figura 4.139 apresenta os resultados do ensaio de indução de fissura de  $200\ \mu\text{m}$  na interface fibra-matriz através do pré-arrancamento, até um deslocamento de  $200\ \mu\text{m}$ , da fibra de aço. Os corpos de prova apresentaram carga máxima média de pré-arrancamento de  $33,82 \pm 9,25\ \text{N}$ , sendo as cargas máximas de  $20,72\ \text{N}$ ,  $46,48\ \text{N}$ ,  $36,33\ \text{N}$  e  $31,74\ \text{N}$  para as amostras P2, P5, P6 e P7.

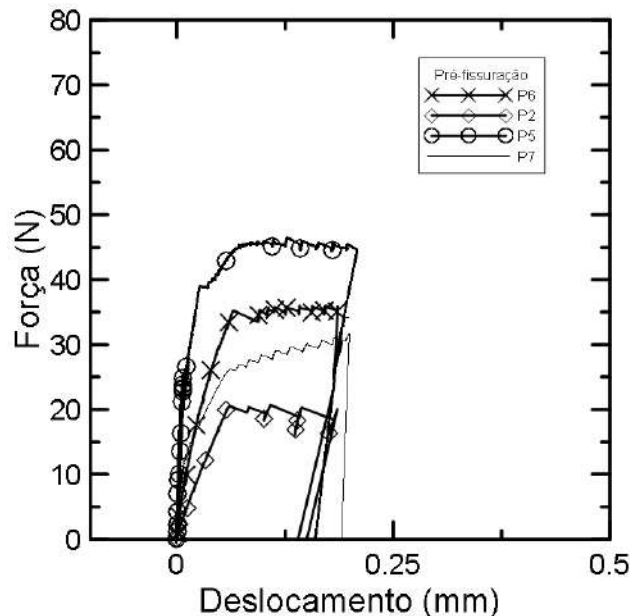


Figura 4.139: Ensaio de arrancamento para pré-indução de fissuras

A figura 4.140 apresenta os resultados dos ensaios de arrancamento realizados até o completo arrancamento das fibras de aço da matriz. Esses ensaios foram conduzidos em amostras curadas por 28 dias em câmara úmida. Observa-se que a carga máxima média de arrancamento foi de  $31,85 \pm 15,59\ \text{N}$  e que as cargas individuais foram  $18,44\ \text{N}$ ,  $28,15\ \text{N}$  e  $48,95\ \text{N}$  para as amostras P3, P17 e P19, respectivamente. Observou-se que os valores de carga máxima nos ensaios de pré-arrancamento (ver figura 4.139) e de arrancamento (ver figura 4.140) foram similares em ambos os ensaios apresentando elevada dispersão. É sabido, conforme preconiza BENTUR e MINDESS (2006), que o comportamento das curvas de arrancamento pode ser caracterizado como progressivo ou catastrófico. O primeiro baseia-se na adição de força superior ao final do regime elástico, enquanto o último representa um comportamento de perda de força após a força máxima ao final do regime elástico. Observa-se que todas as curvas apresentadas, seja para indução de fissura seja após

o completo arrancamento, apresentaram comportamento progressivo, haja vista um aumento na força após o regime elástico.

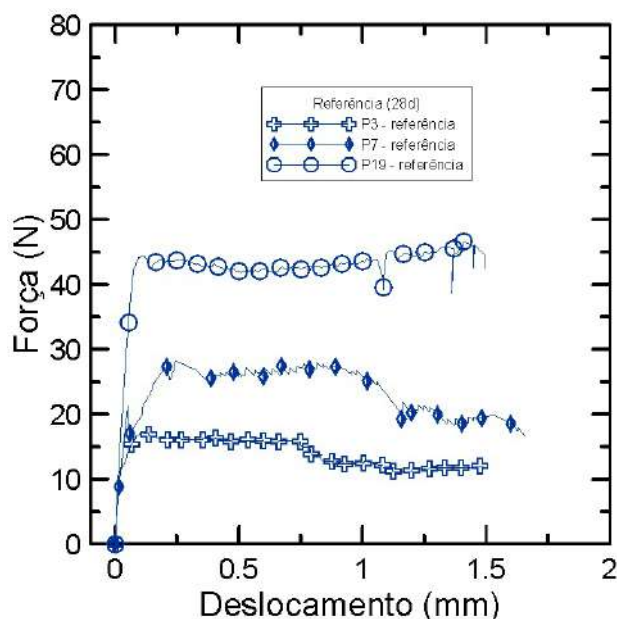


Figura 4.140: Ensaio de arrancamento após 28 dias de cura

As amostras com fissuras induzidas apresentaram força máxima média estatisticamente iguais às amostras referências, contando com  $33,82 \pm 9,25$  N e  $31,85 \pm 15,59$  N, respectivamente. Conforme já versado, o desvio padrão nesse ensaio é deveras elevado, fato que é natural para esse tipo de ensaio.

Após a indução das fissuras, os corpos de prova foram submetidos a 2 meses de ciclos de secagem e molhagem [24h/24h] de forma idêntica aos corpos de prova ensaiados em tração direta.

A figura 4.141 apresenta os resultados dos ensaios realizados nas amostras de arrancamento condicionadas por 60 dias.

Observa-se que a amostra P6 apresentou a melhor performance após o condicionamento, com carga máxima de 63,82 N. A menor carga foi obtida pela amostra P2: 32,99 N. A amostra P7 apresentou uma carga de 45,15 N no pós-condicionamento, enquanto a amostra P5 apresentou uma carga de 34,97 N.

Dividindo-se a carga máxima pós-condicionamento pela carga máxima de arrancamento no ensaio de pré-arrancamento observa-se valores de 1,75; 1,61; 0,65 e 1,47 para as amostras P6, P2, P5 e P7, respectivamente. Acréscimos variando de 47% a 75% são observados para as amostras P2, P6 e P7. A amostra P5 apresentou um valor de 65% em relação à tensão obtida aos 28 dias, com o pior desempenho dentre as amostras ensaiadas.

Amostras de arrancamento não fissuradas, submetidas ao mesmo condicionamento de ciclos de molhagem e secagem durante 2 meses, foram ensaiadas como



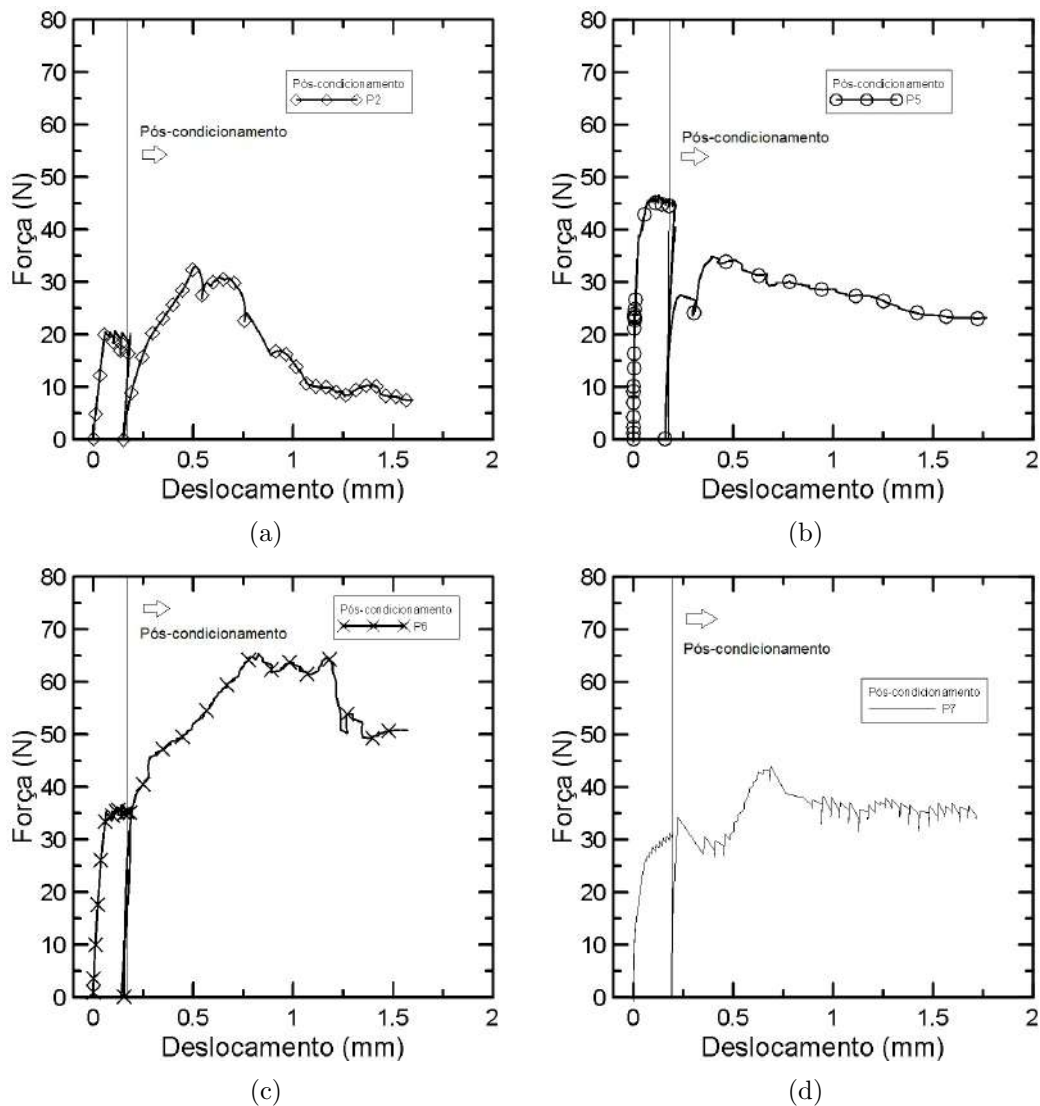


Figura 4.141: Resultados dos ensaios de arrancamento após condicionamento em ciclos de molhagem e secagem durante 2 meses: (a) P2; (b) P5; (c) P6; (d) P7

amostras controle. Os resultados obtidos estão esposados na figura 4.142. A carga de arrancamento das amostras de controle é similar as das amostras de referência com 28 dias, eis que a média de carga máxima das primeiras foi de  $30,48 \pm 11,51$  N e a segunda de  $31,85 \pm 15,59$  N. Já as amostras que foram submetidas ao pré-arrancamento obtiveram média de força de  $44,23 \pm 14,10$  N, apresentando um desempenho aproximadamente 38% superior as das amostras controle. Tais resultados permitem especular sobre a ocorrência de uma possível densificação na interface fibra-matriz com fechamento de micro-fissuras surgidas nessa região devido ao carregamento.

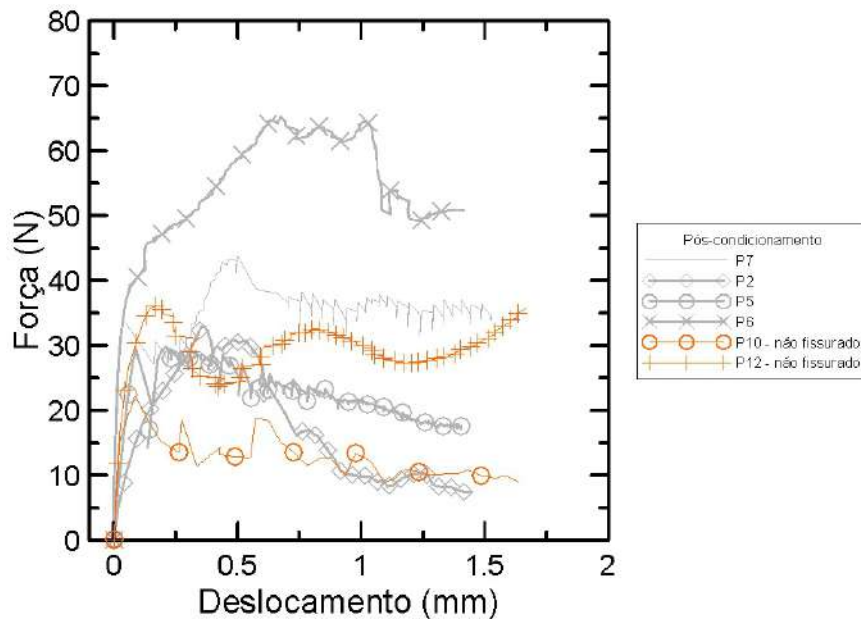


Figura 4.142: Comparativo entre amostras controle e amostras fissuradas após 2 meses de condicionamento

Para uma melhor compreensão desse fenômeno, foi estudado a densificação da interface com o fechamento de fissuras e resultados são apresentados a seguir.

#### 4.6.2 Estudo microestrutural da interface fibra-matriz

Estudos realizados na colaboração COPPE-POLIMI no âmbito do projeto EN-CORE, resultaram em um artigo submetido a revista *Cement and Concrete Composites* (L. FERRARA e TOLEDO, 2016) e esta seção é baseada nos resultados apresentados no referido artigo.

Para análise microestrutural da zona de transição fibra-matriz retirou-se uma pequena amostra da interface de fibras das amostras ensaiadas sob tração direta e observou-se que a fibra apresentava um deslizamento da matriz durante a indução de fissura (ver figura 4.143). A mesma observação foi feita com amostra condicionada a 3 meses de ciclos de secagem e molhagem, e a zona interfacial fibra matriz mostra (ver figura 4.144) a presença de produtos hidratados na região arrancada da fibra, bem como a formação de várias fissuras com aberturas variando entre 5-15  $\mu\text{m}$  indicando a boa aderência fibra-matriz após o condicionamento realizado.



Figura 4.143: Interface fibra-matriz mostrando o deslizamento da fibra de aço na matriz aos 28 dias



Figura 4.144: Densificação da interface fibra-matriz após 3 meses de ciclos de molhagem e secagem resultando na formação de várias fissuras

Utilizando-se as amostras do ensaio de arrancamento, buscou-se visualizar o fechamento de micro-fissuras formadas na interface fibra-matriz através de técnicas de tomografia computadorizada de amostras.

A figura 4.145 apresenta vista interna do corpos de prova após indução de fissura. O tamanho do voxel auferido no ensaio foi de  $5,7 \mu\text{m}$ . Através de tratamento de imagem no software Avizo 9.1, a matriz foi colocada como transparente deixando visível em azul a fibra e os vazios. Após análise, constatou-se que não foi possível a visualização de nenhuma fissura, fato que leva a conclusão de que todas as fissu-

ras possuem aberturas menores que o valor do voxel relatado ( $5,7 \mu\text{m}$ ). Contudo existem algumas elevações próxima a fibra que podem ser considerados possíveis descolamento entre a fibra e a matriz.

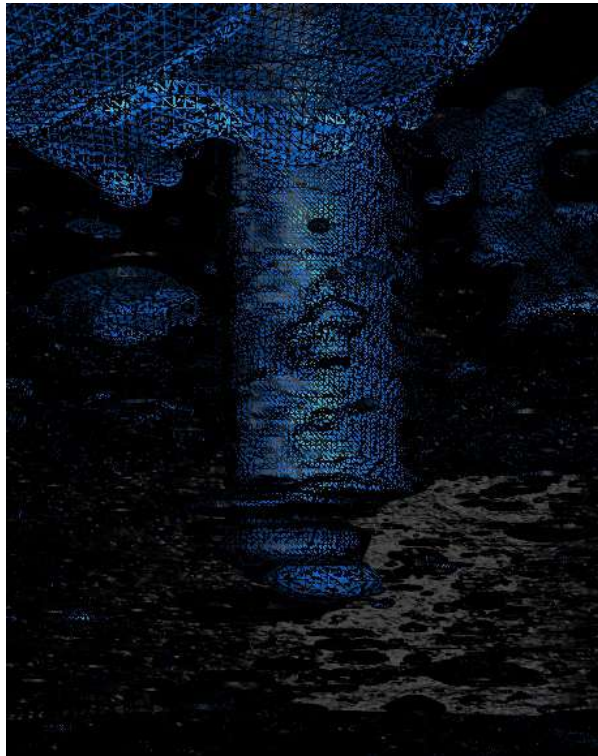


Figura 4.145: Tomografia computadorizada da amostra de pullout após indução de fissura: visão da fibra no interior da amostra de arrancamento

# Capítulo 5

## Conclusão

Os resultados obtidos no presente estudo permitem concluir que:

Foi possível a auto-cicatrização de fissuras em microconcretos de alto-desempenho reforçados com fibras de aço e sisal após 3 e 6 meses de condicionamento em água ou submetida a ciclos de molhagem e secagem, principalmente a cicatrização de fissuras de menor abertura ( $\approx 1-80 \mu\text{m}$ ). As misturas reforçadas com frações volumétricas de 1,00% e 1,28% de fibras de aço (misturas M1, M2 e M4) apresentaram resistência a compressão de cerca de 110 MPa enquanto que a mistura M3 apresentou uma resistência de 86 MPa, o que as caracterizam como concretos fibrosos de alto desempenho.

Os índices desenvolvidos para avaliação de recuperação de tensão foram satisfatórios e não apresentaram diferenças significativas entre os valores, sendo os valores de  $IRT_2$  ligeiramente inferiores ao  $IRT_1$ . O índice utilizado para rigidez não foi considerado satisfatório, visto que compara um corpo de prova fissurado com um corpo de prova são, apresentando valores de recuperação de aproximadamente metade em relação ao corpo de prova são. Será desenvolvido um novo índice para tornar essa comparação mais equilibrada.

A indução das fissuras sob cargas de tração direta foi bastante apropriado para investigação do fenômeno, uma vez que proporcionou uma única fissura principal, possibilitando concentração do fenômeno de auto-cicatrização. No entanto, a distribuição e orientação das fibras na placa, com o acúmulo de fibras de aço no fundo das mesmas, afetou a indução de uma fissura de mesma abertura em ambas faces das amostras.

As imagens de microscópio e tomografia computadorizadas permitiram quantificar o volume de fibras de aço e orientação das mesmas tanto ao longo do comprimento da placa quanto da espessura, nas amostras ensaiadas à tração direta. Os resultados obtidos indicaram frações volumétricas de reforço maiores no fundo da amostra seguido pelo terço médio e terço superior (topo da amostra). Também se observou que a fração volumétrica medida nas amostras da localização A, mais distante do ponto

de lançamento da mistura no molde, apresentou resultados ligeiramente inferiores aos da localização C, principalmente para as misturas M1, M2 e M3. No topo das amostras da localização A também observou-se uma maior inclinação das fibras de aço quando comparadas com a orientação das fibras nas outras localizações, bem como com a região do fundo das três localizações (normalmente alinhadas e com inclinação muito baixa em relação ao fundo do molde).

Os fenômenos que resultaram na auto-cicatrização das fissuras estão relacionados com a hidratação tardia de produtos de hidratação da matriz cimento-escória de alto forno, sendo os principais produtos observados o carbonato de cálcio, o C-A-S-H e o C-A-H. Essas fases foram identificadas tanto na matriz quanto no material de preenchimento da fissura.

As micro-fissuras decorrentes tanto da ramificação da fissura principal induzida nas amostras de tração direta quanto do ensaio de pré-arrancamento, por apresentarem pequenas aberturas ( $w \leq 80 \mu\text{m}$ ) foram seladas pelos produtos de hidratação formados. Frisa-se que as fissuras apresentadas na interface fibra-matriz não puderam ser visualizadas na tomografia computadorizada já que a resolução do equipamento para a geometria da amostra utilizada era de  $5,7 \mu\text{m}$ . É possível que as fissuras nessa região tenham sido no limiar da resolução do equipamento ou menores.

A adição de 0,28% de fibras de sisal na mistura com 1,00% de aço funcionou como agente nucleador, acelerando a deposição de carbonato de cálcio na fissura. A cinética de cicatrização foi mais rápida nas misturas com essas fibras celulares uma vez que após, principalmente 6 meses de condicionamento em ciclos de molhagem e secagem, as mesmas mostraram indicadores de cicatrização ( $IRT_1$ ,  $IRT_2$  e IRD) superiores aos da mistura contendo apenas fibras de aço (ver resultados para a misturas 2 e 4 reforçadas com 1,28% de fibras de aço e 1,00% de fibras de aço e 0,28% de fibras de sisal. Não foi registrado diferença significativa entre os índices das misturas 1,28% de aço e 1,28% de aço e 0,28% de fibras de sisal, contudo quando as misturas são comparadas em termos de tensão absoluta, o comportamento da mistura com fibra de sisal é superior ao da mistura sem essas fibras.

As misturas com frações volumétricas de 1,28% e 1,00% de fibras de aço apresentaram um comportamento de endurecimento na tração direta enquanto que a mistura com taxa de reforço de 0,64% apresentou amolecimento no pós-pico. Apesar disso, essa mistura mostrou auto-cicatrização em algumas amostras.

O condicionamento realizado molhando e secando as amostras promoveu um aumento nos índices de  $IRT_1$  e  $IRT_2$  na maioria das amostras das misturas estudadas, especialmente na idade de 6 meses, em comparação as amostras condicionadas por 6 meses em água. Não obstante, as outras idades também apresentaram valores de índices satisfatórios. A mistura A1,00S0,28 foi a que obteve melhor performance em termos de recuperação de capacidade de carga e recuperação de rigidez.

## Trabalhos futuros

Os estudos atinentes à auto-cicatrização em concretos são recentes e, de certa maneira, ainda embrionários, necessitando de maior aprofundamento. Propõe-se como continuidade dos ensaios de tomografia a serem realizados durante o ensaio de arrancamento para visualização das fissuras na interface pelo método de *Digital Image Correlation*; bem como a tentativa da alteração do valor do voxel no ensaio realizado no microtomógrafo, utilizando amostra reduzida ou um microtomógrafo com melhor resolução.

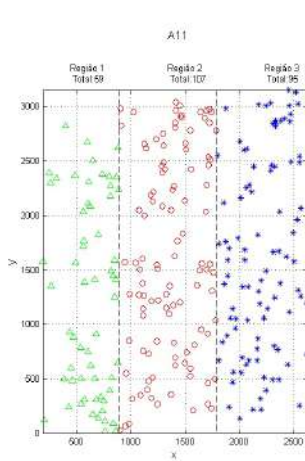
Outro avanço será o estudo da auto-cicatrização de fissuras sob carga constante, vez que assim são as mesmas encontradas nas estruturas. Propõe-se também a combinação de agentes de cicatrização através do uso de fibras e micro-fibras celulósicas e polímeros superabsorventes. O estudo do fenômeno de cicatrização em concretos de menor resistência bem como o estudo da influencia da abertura de fissuras no fenômeno de cicatrização também merecem atenção dos pesquisadores no futuro.

# Apêndice A

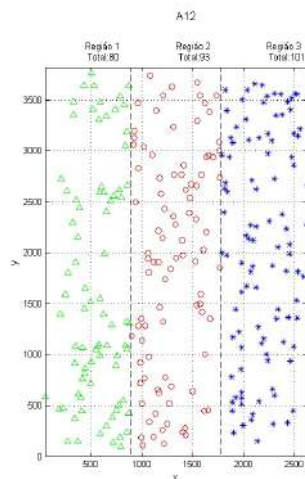
## Contagem de fibras

A.0.1 [A1,28S0,28]

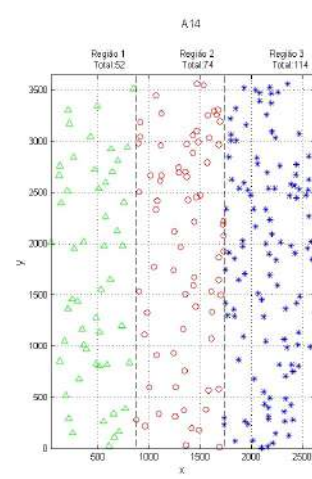
Localização A



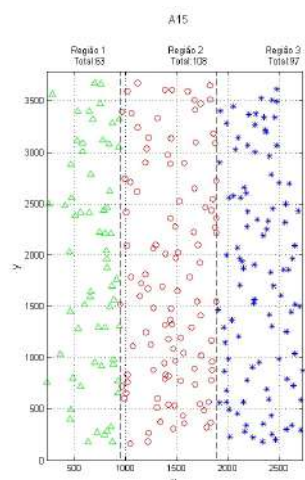
(a) A11



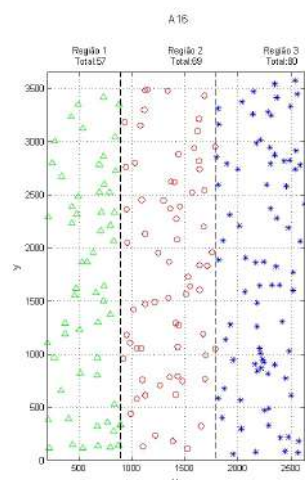
(b) A12



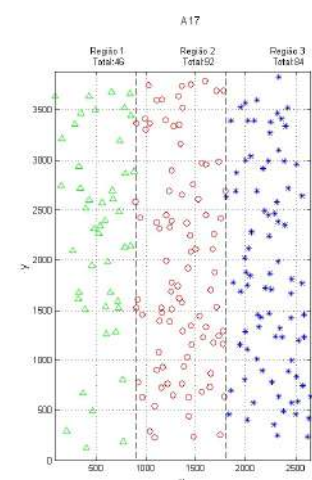
(c) A14



(d) A15



(e) A16



(f) A17



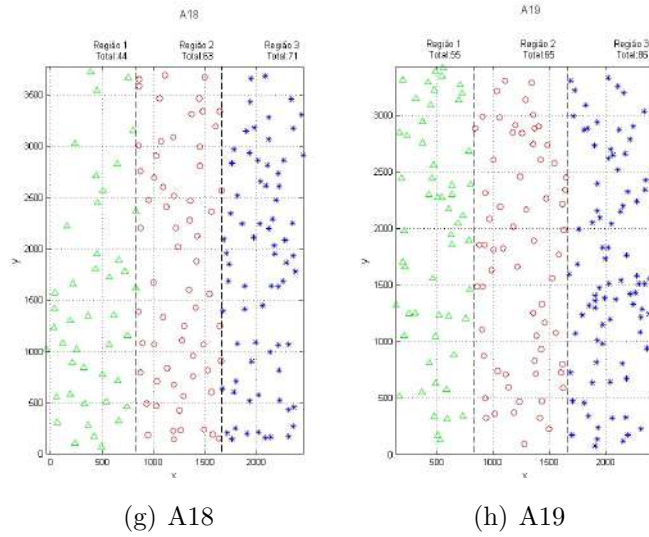
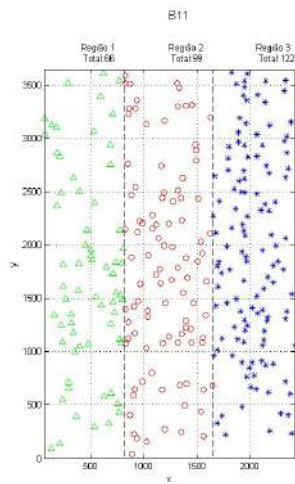
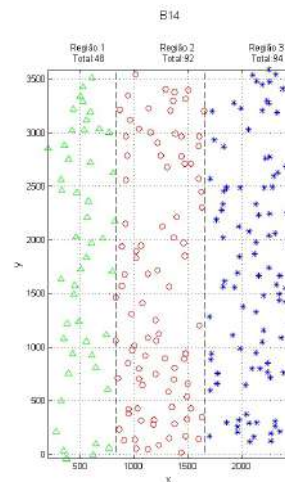


Figura A.1: Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização A da placa da mistura A1,28S0,28

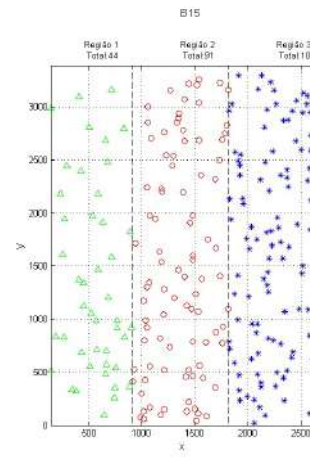
## Localização B



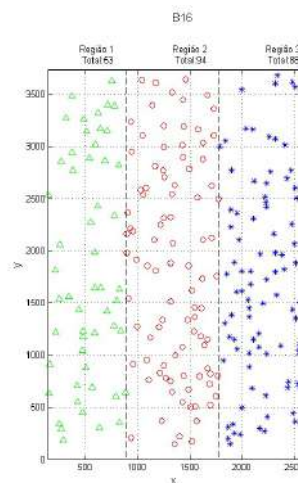
(a) B11



(b) B14



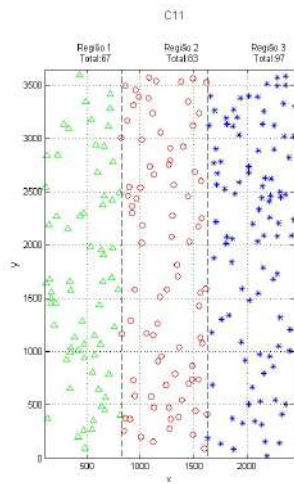
(c) B15



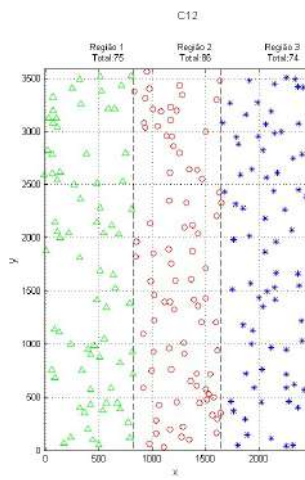
(d) B16

Figura A.2: Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização B da placa da mistura A1,28S0,28

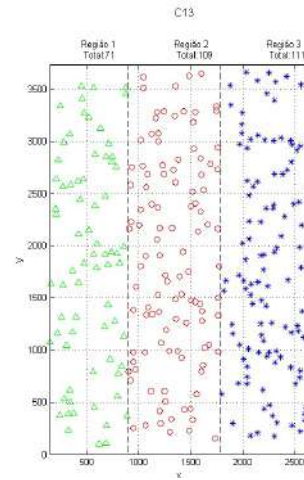
## Localização C



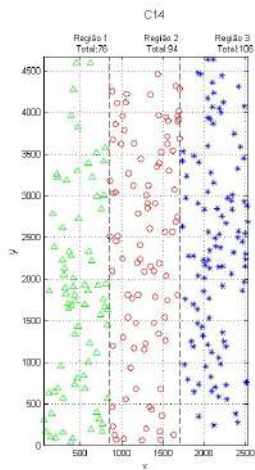
(a) C11



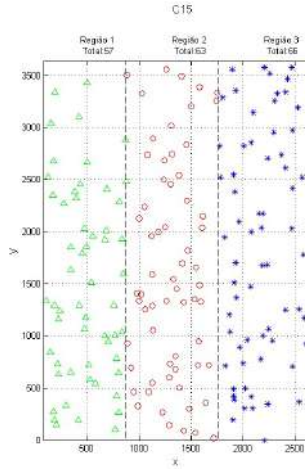
(b) C12



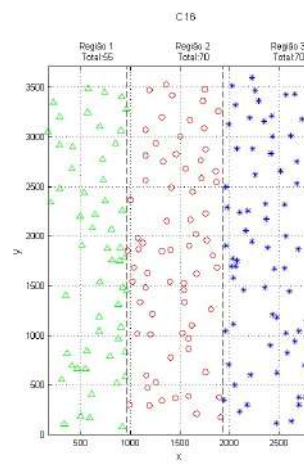
(c) C13



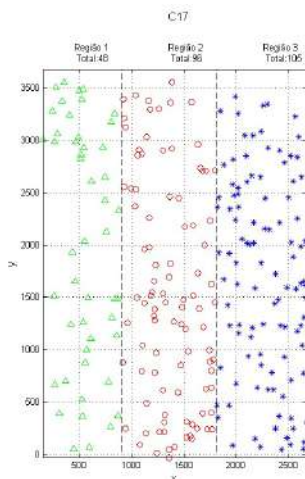
(d) C14



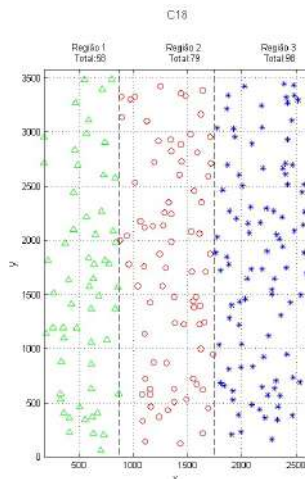
(e) C15



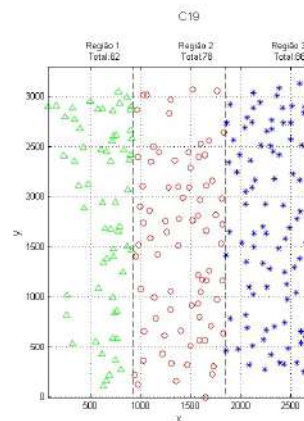
(f) C16



(g) C17



(h) C18



(i) C19

Figura A.3: Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização C da placa da mistura A1,28S0,28

Tabela A.1: Quantidade e concentração de fibras que cortam a seção transversal das amostras por região da placa da mistura 1 [A1,28S0,28]

CP	n° de fibras/concentração(%)			
	Região 1	Região 2	Região 3	Total
A11	59/23	107/41	95/36	261/100
A12	80/29	93/34	101/37	274/100
A14	52/22	74/30	114/38	240/100
A15	63/24	108/40	97/36	268/100
A17	46/21	92/41	84/38	222/100
A19	55/27	65/31	86/42	206/100
B11	66/23	99/34	122/43	287/100
B15	44/18	91/38	107/44	242/100
B16	53/23	94/40	88/37	235/100
C11	67/27	83/34	97/39	247/100
C12	75/32	86/37	74/31	235/100
C13	71/24	109/38	111/38	291/100
C15	57/31	63/34	66/35	186/100
C16	55/28	70/36	70/36	195/100
C19	62/27	78/34	88/39	228/100
C14	76/28	94/34	106/38	276/100
B14	48/21	92/39	94/40	234/100
A16	57/28	69/33	80/39	206/100
C17	48/19	96/39	105/42	249/100
A18	44/25	63/35	71/40	178/100
C18	58/24	79/34	98/42	235/100

## A.0.2 [A1,28]

### Localização A

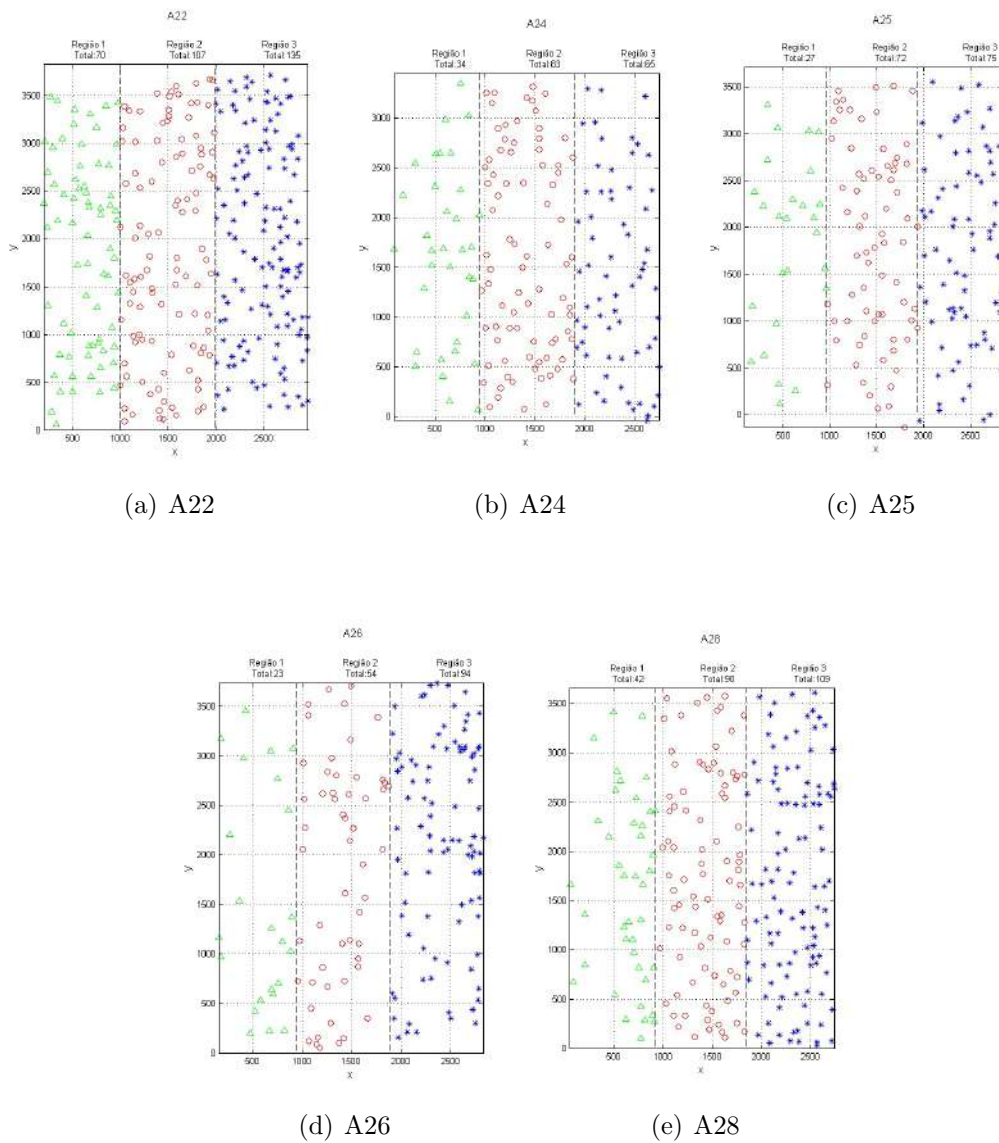
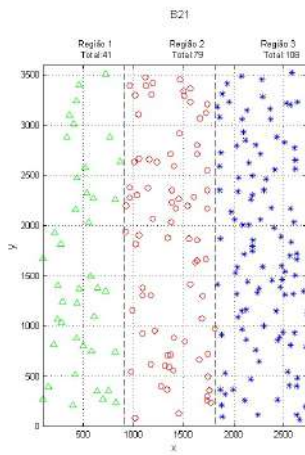
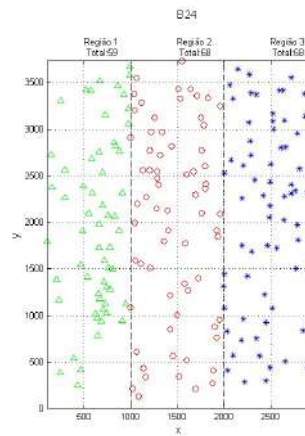


Figura A.4: Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização A da placa da mistura A1,28

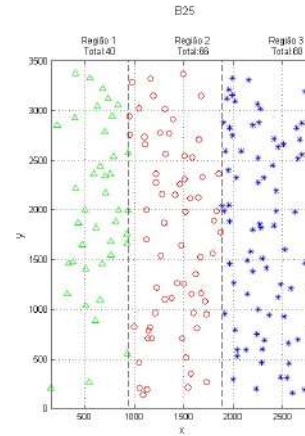
## Localização B



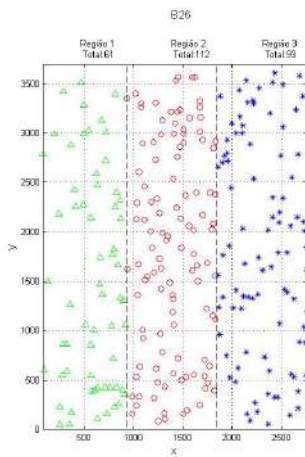
(a) B21



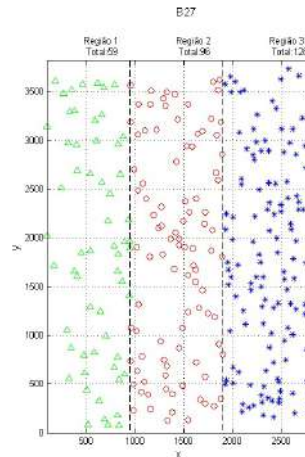
(b) B24



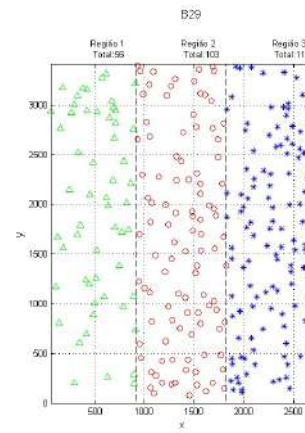
(c) B25



(d) B26



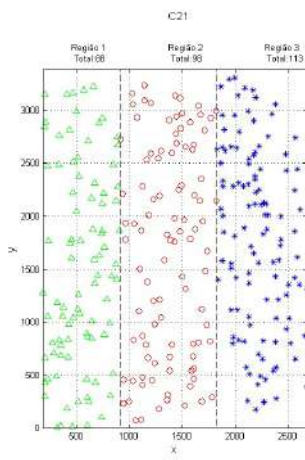
(e) B27



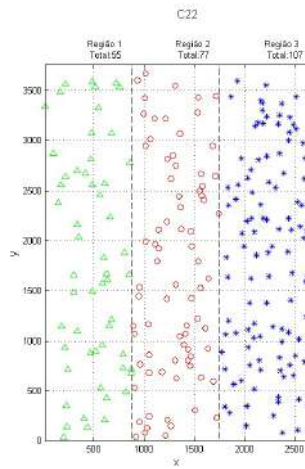
(f) B29

Figura A.5: Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização B da placa A1,28

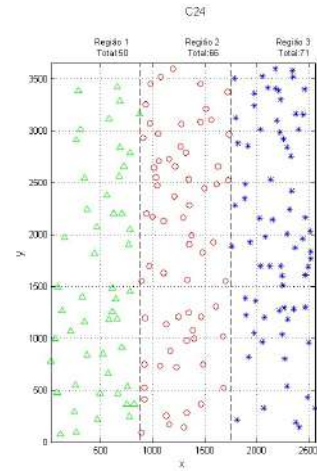
## Localização C



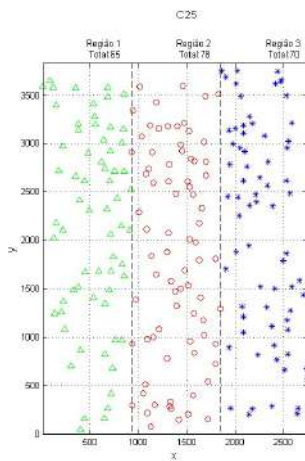
(a) C21



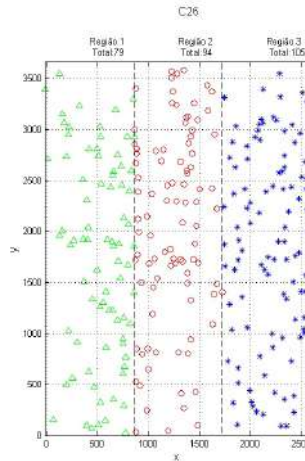
(b) C22



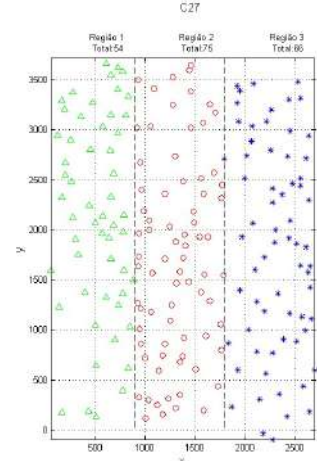
(c) C24



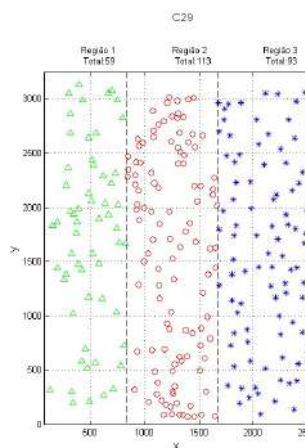
(d) C25



(e) C26



(f) C27



(g) C29

Figura A.6: Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização C da placa da mistura A1,28

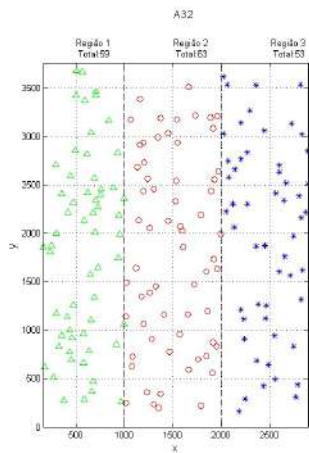
Tabela A.2: Quantidade e concentração de fibras que cortam a seção transversal das amostras por região da placa da mistura 2 [A1,28]

	n° de fibras/concentração(%)			
CP	Região 1	Região 2	Região 3	Total
C25	65/30	78/37	70/33	213/100
B25	40/22	66/35	80/43	186/100
A25	27/16	72/41	75/43	174/100
C26	79/28	94/34	105/38	278/100
B26	61/23	112/42	93/35	266/100
A26	23/13	54/32	94/55	171/100
C24	50/27	66/35	71/38	187/100
B24	59/30	68/35	68/35	195/100
A24	34/19	83/45	65/36	182/100
C27	54/28	75/38	66/34	195/100
B27	59/21	96/34	128/45	283/100
A23	30/16	69/37	89/47	188/100
C22	55/23	77/32	107/45	239/100
A22	70/22	107/35	135/43	312/100
A28	42/18	90/37	109/45	241/100
C21	88/29	98/33	113/38	299/100
B21	41/18	79/35	108/47	228/100
C29	59/22	113/43	93/35	265/100
B29	56/20	103/37	119/43	278/100

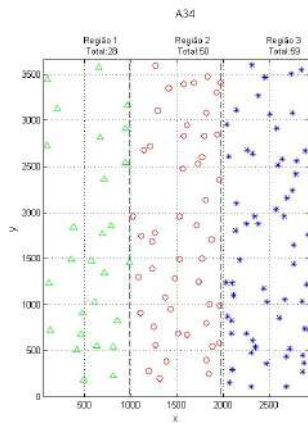


### A.0.3 [A0,64S0,64]

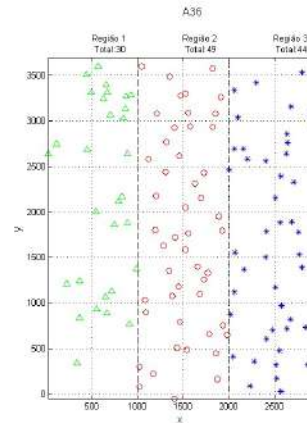
#### Localização A



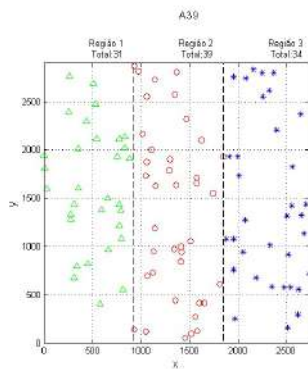
(a) A32



(b) A34



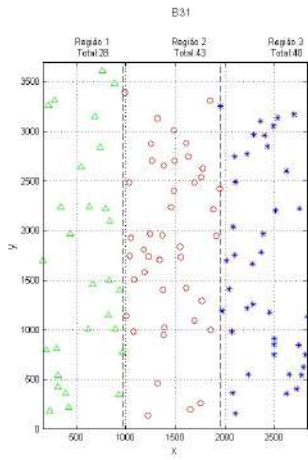
(c) A36



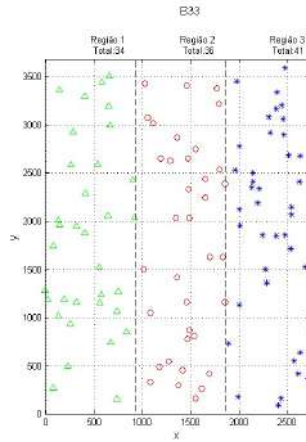
(d) A39

Figura A.7: Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização A da placa da mistura A0,64S0,64

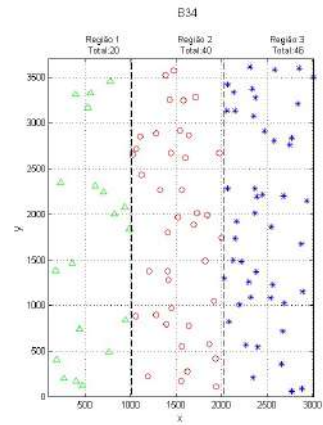
## Localização B



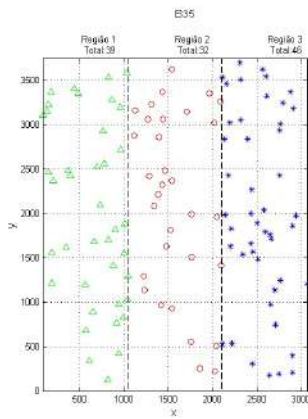
(a) B31



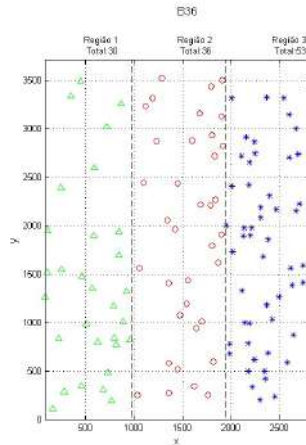
(b) B33



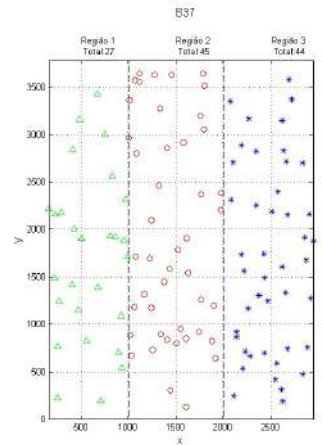
(c) B34



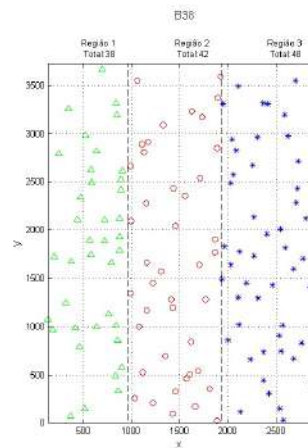
(d) B35



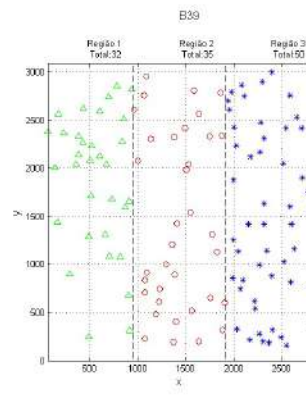
(e) B36



(f) B37



(g) B38



(h) B39

Figura A.8: Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização B da placa da mistura A0,64S,64

## Localização C

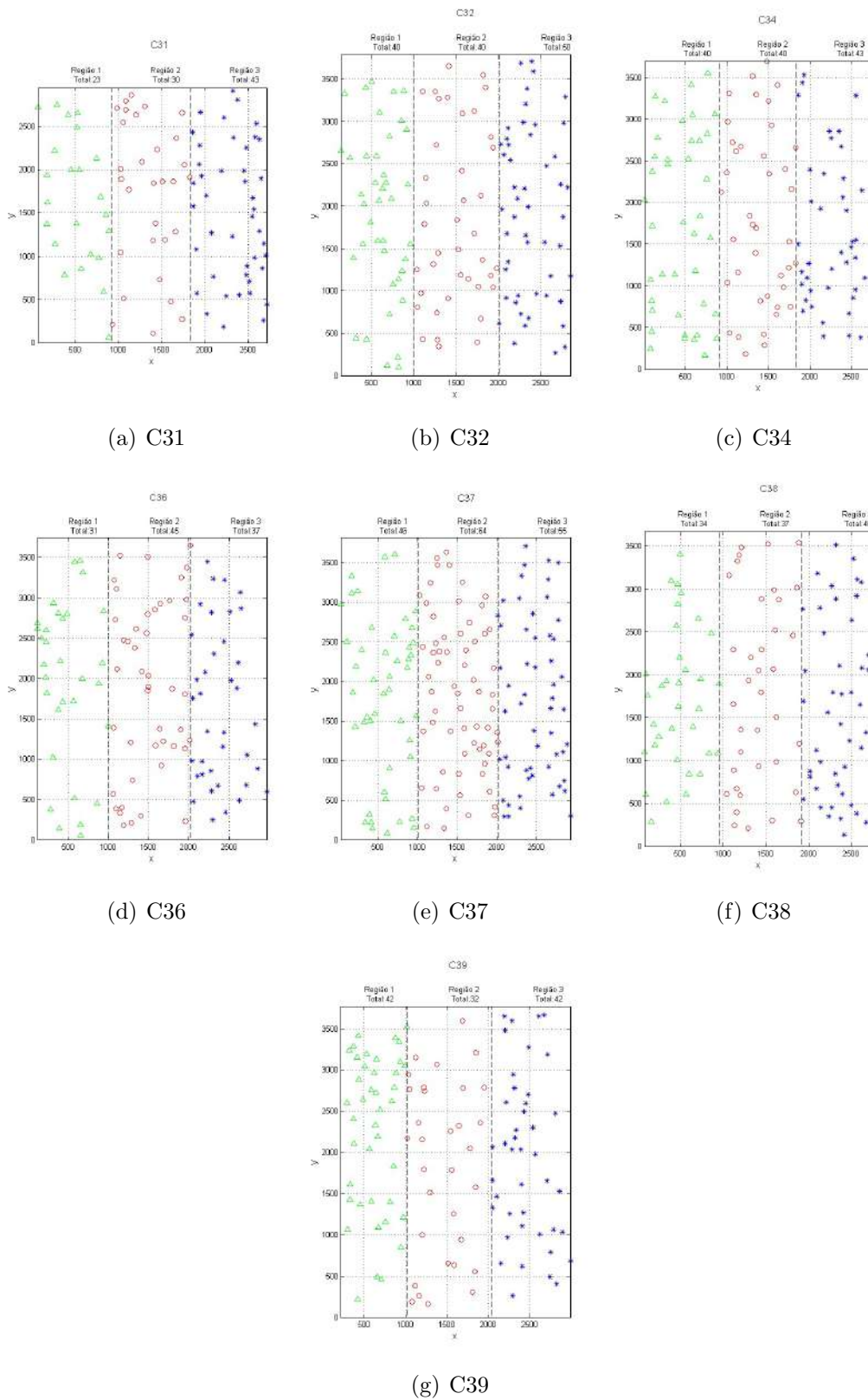


Figura A.9: Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização C da placa da mistura A0,64S0,64

Tabela A.3: Quantidade e concentração de fibras que cortam a seção transversal por região da placa da mistura 3 [A0,64S0,64]

n° de fibras/concentração(%)				
CP	Região 1	Região 2	Região 3	Total
A31	42/29	55/37	50/34	147/100
A32	59/34	63/36	53/30	175/100
A37	32/27	47/39	41/34	120/100
A39	31/30	39/38	34/32	104/100
B31	28/25	43/39	40/36	111/100
B33	34/31	36/32	41/37	111/100
B38	38/30	42/32	48/38	128/100
B39	32/27	35/30	50/43	117/100
C31	23/24	30/31	43/45	96/100
C32	40/31	40/31	50/38	130/100
C38	34/29	37/32	46/39	117/100
C39	42/36	32/28	42/36	116/100
B35	39/33	32/28	46/39	117/100
A35	46/37	39/31	40/32	125/100
C36	31/27	45/40	37/33	113/100
B36	30/28	36/33	43/39	109/100
A36	30/24	49/40	44/36	123/100
C34	40/33	40/32	43/35	123/100
B34	20/19	40/38	46/43	106/100
A34	28/20	50/37	59/43	137/100
C37	46/28	64/39	55/33	165/100
B37	27/23	45/39	44/38	116/100

## A.0.4 [A1,00S0,28]

### Localização A

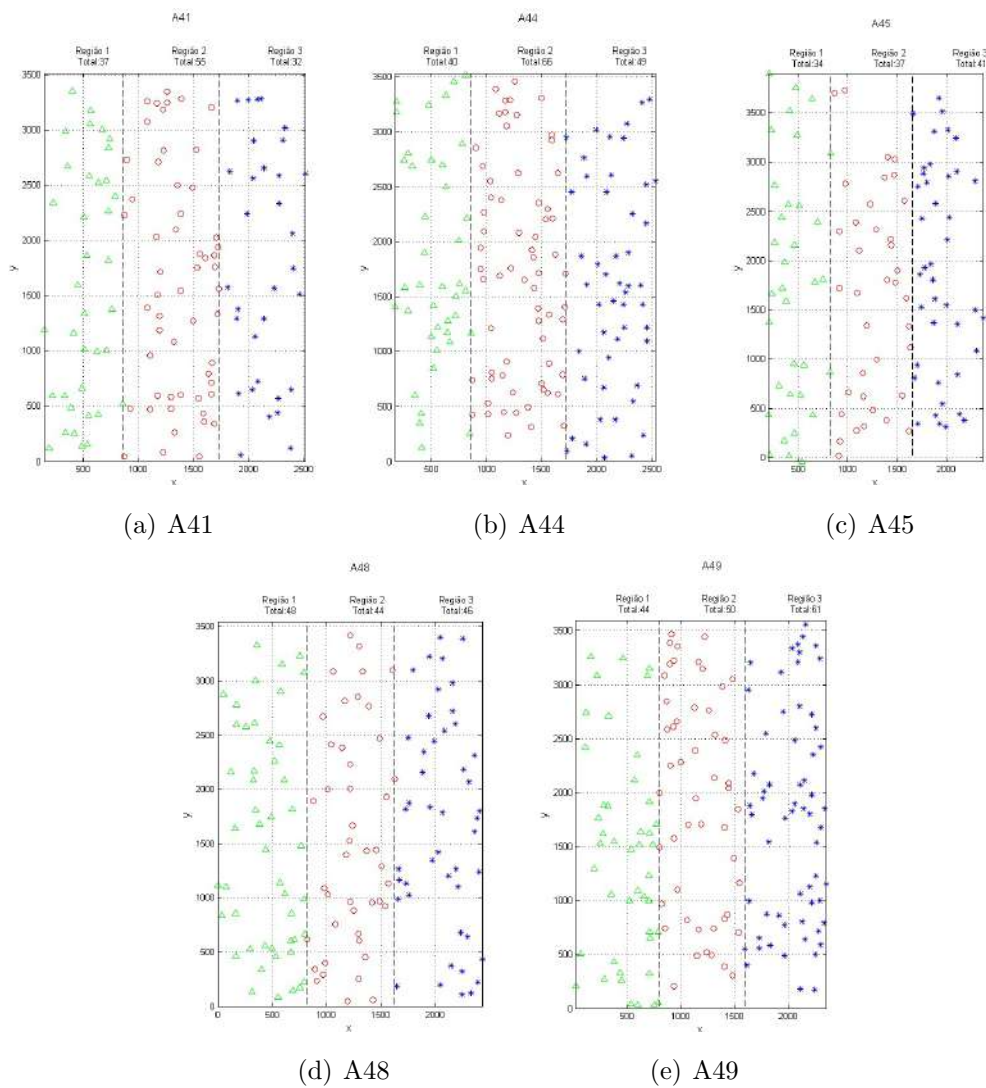


Figura A.10: Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização A da placa da mistura A1,00S0,28

## Localização B

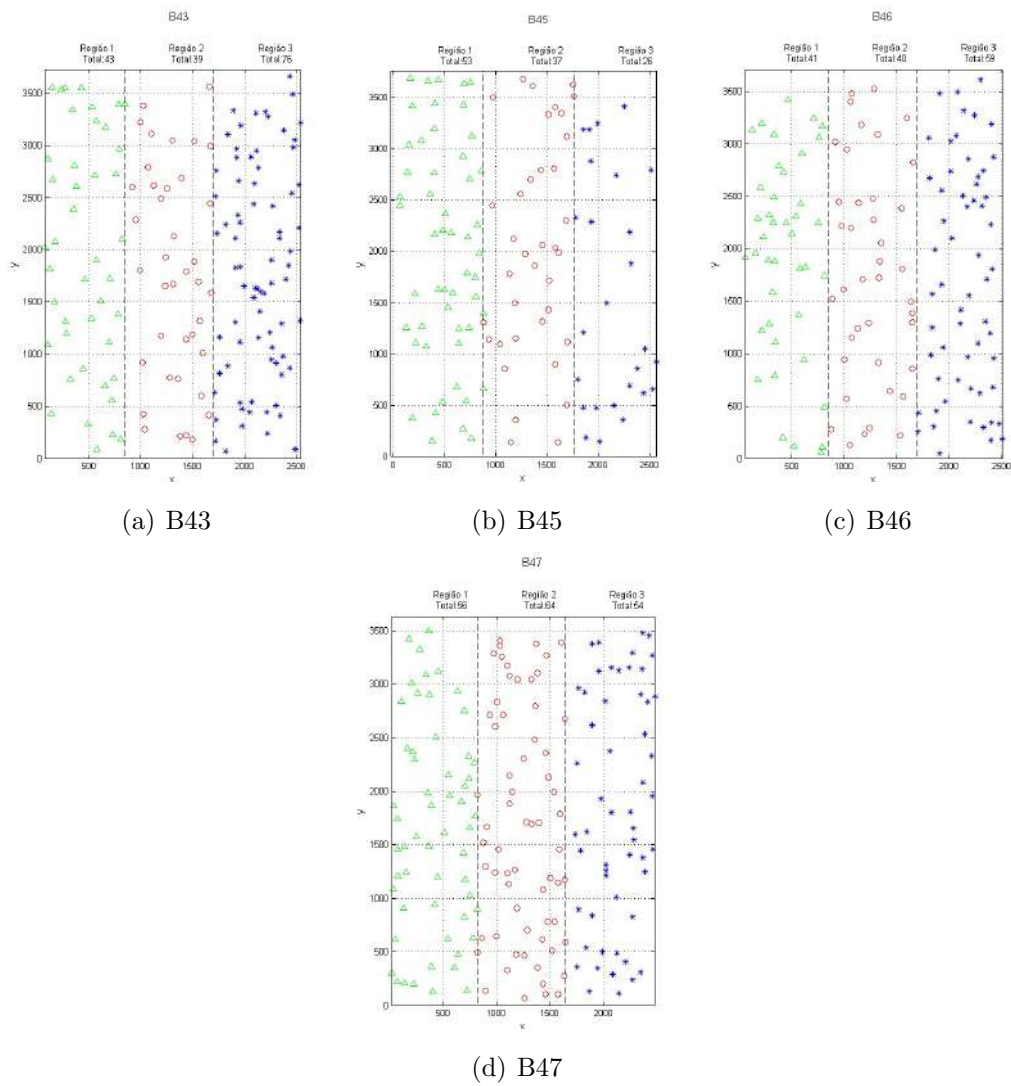


Figura A.11: Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização B da placa da mistura A1,00S0,28

## Localização C

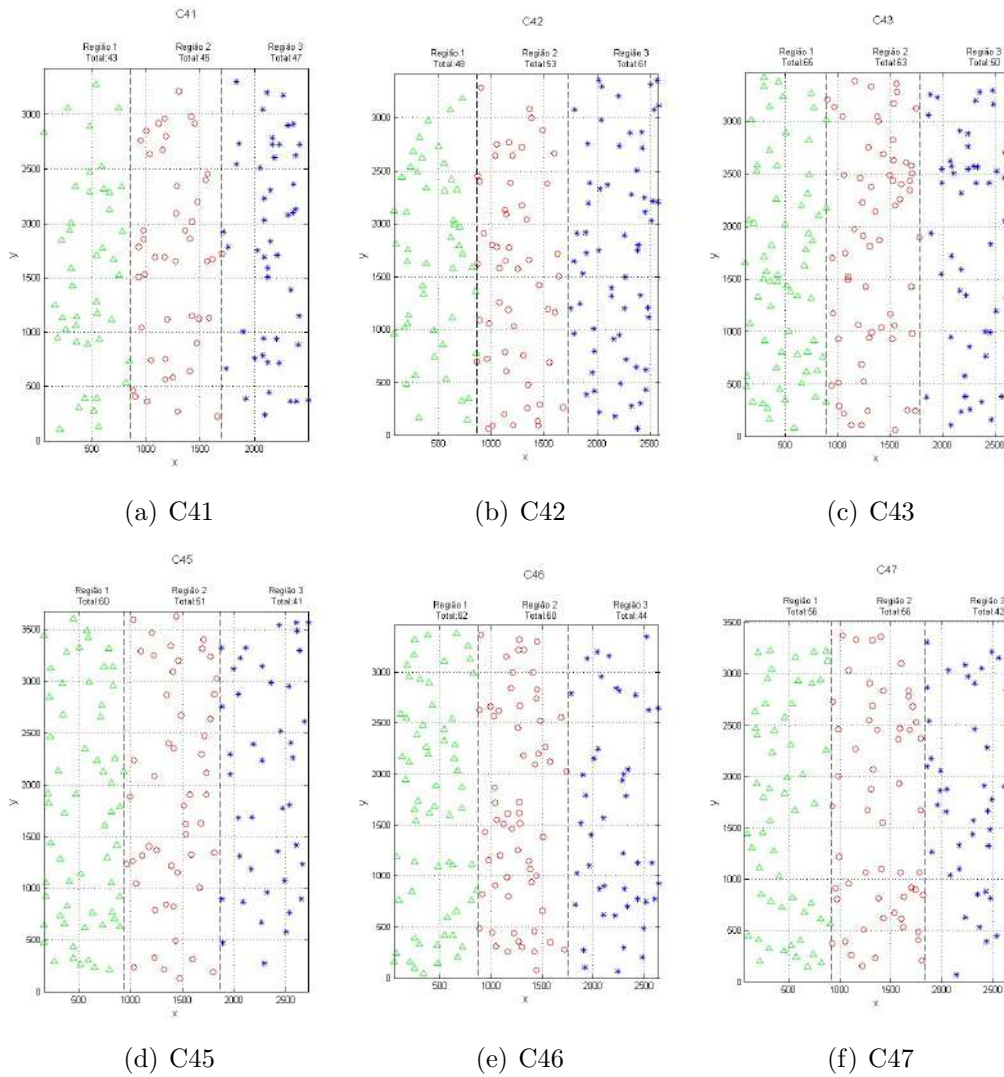


Figura A.12: Quantidade de fibras nas seções transversais das amostras na localização C da placa da mistura A1,00S0,28

Tabela A.4: Quantidade e concentração de fibras que cortam a seção transversal por região da placa da mistura 4 [A1,00S0,28]

n° de fibras/concentração(%)				
CP	Região 1	Região 2	Região 3	Total
A41	37/30	55/44	32/26	124/100
A43	32/24	51/37	52/39	135/100
A44	40/25	66/45	49/32	155/100
A48	48/35	44/32	46/33	138/100
A49	44/29	50/32	61/39	155/100
B45	26/22	37/32	53/46	116/100
C41	43/32	45/33	47/35	135/100
C42	48/30	53/32	61/38	162/100
C43	65/37	63/35	50/28	178/100
C45	60/39	51/34	41/27	152/100
A45	34/30	37/33	41/37	112/100
C46	62/37	60/36	44/27	166/100
B46	41/29	40/29	59/42	140/100
C47	56/37	56/36	42/27	154/100
B47	56/32	64/37	54/31	174/100
B43	43/27	39/25	76/48	158/100



# Referências Bibliográficas

- (2012). *Self-Healing State of Art*. TC 221 RILEM.
- Amario, M. (2015). Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado de resíduo de concreto (arc). Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Arévalo, G. S. (2013/2014). Self-healing in high performance fiber reinforced cementitious composites. Master's thesis, POLITECNICO MILANO.
- Bentur, A. and Mindess, S. (2006). *Fibre reinforced cementitious composites*. CRC Press.
- Blaiszik, B., Kramer, S., Olugebefola, S., Moore, J. S., Sottos, N. R., and White, S. R. (2010). Self-healing polymers and composites. *Annual Review of Materials Research*, 40:179–211.
- de Andrade Silva, F., Toledo Filho, R. D., de Almeida Melo Filho, J., and Fairbairn, E. d. M. R. (2010). Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites. *Construction and building materials*, 24(5):777–785.
- De Belie, N. and De Muynck, W. (2008). Crack repair in concrete using biodeposition. In *Proceedings of the International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR)*, Cape Town, South Africa, pages 291–292.
- Dweck, J., Buchler, P. M., Coelho, A. C. V., and Cartledge, F. K. (1999). Controle de qualidade de cimento portland composto por termogravimetria. In *Anais do 43 Congresso Brasileiro de Cerâmica, SC*, pages 37–901.
- Dweck, J., Ferreira da Silva<sup>1</sup>, P., Silva Aderne, R., Büchler, P., and Cartledge, F. (2003). Evaluating cement hydration by non-conventional dta; an application to waste solidification. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 71(3):821–827.

- Dweck, J., Melchert, M. B. M., Cartledge, F. K., Leonardo, R. S., and Toledo Filho, R. D. A comparative study of hydration kinetics of different cements by thermogravimetry on calcined mass basis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, pages 1–8.
- Edvardsen, C. (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal-American Concrete Institute*, 96(4):448–454.
- Ferrara, L., Ferreira, S. R., Krelani, V., Silva, F., and Toledo Filho, R. D. (2014a). Effect of natural fibres on the self healing capacity of high performance fibre reinforced cementitious composites. In *Proceedings SHCC3, 3rd international RILEM conference on strain hardening cementitious composites*, pages 9–16.
- Ferrara, L., Krelani, V., and Carsana, M. (2014b). A "fracture testing" based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures. *Construction and Building Materials*, 68:535–551.
- Ferrara, L., Ozyurt, N., and Di Prisco, M. (2011). High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: the role of "casting-flow induced" fibre orientation. *Materials and Structures*, 44(1):109–128.
- Frazão, C., Barros, J., Camões, A., Alves, A. C., and Rocha, L. (2016). Corrosion effects on pullout behavior of hooked steel fibers in self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 79:112–122.
- Gardner, D., Jefferson, A., Hoffman, A., and Lark, R. (2014). Simulation of the capillary flow of an autonomic healing agent in discrete cracks in cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 58:35–44.
- Gray, R. (1984). Autogenous healing of fibre/matrix interfacial bond in fibre-reinforced mortar. *Cement and Concrete Research*, 14(3):315–317.
- Isla, F., Ruano, G., and Luccioni, B. (2015). Analysis of steel fibers pull-out. experimental study. *Construction and Building Materials*, 100:183–193.
- Kasper, L. N. T. O. S. M. S. T. (2013). Guideline for execution of steel fibre reinforced scc. Guideline 1st, Danish Technological Institute, Danish Technological Institute, Concrete Centre.
- Kim, J. and Schlangen, E. (2010). Super absorbent polymers to simulate self healing in ecc. In *2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructures*, pages 849–858. RILEM Publications SARL.

- Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., and Kerkhoff, B. (2002). *Design and control of concrete mixtures*, volume 5420. Portland Cement Association Skokie, IL.
- Krelani, V. (2015). *SELF-HEALING CAPACITY OF CEMENTITIOUS COMPOSITES*. PhD thesis, POLITECNICO DI MILANO.
- L. Ferrara, e. a. (Submitted in 2016). Self-healing capacity of hybrid sisal-steel fiber reinforced cementitious composites part i: effect of crack healing on the recovery of mechanical performance. *Cement and Concrete Composites*.
- Li, V. C. and Herbert, E. (2012). Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(6):207–218.
- Li, V. C., Wu, H.-C., Maalej, M., Mishra, D. K., and Hashida, T. (1996). Tensile behavior of cement-based composites with random discontinuous steel fibers. *Journal of the American Ceramic Society*, 79(1):74–78.
- Liberato Ferrara, Visar Krelani, M. G. and Gorlezza, R. (2014). Self-healing of high performance fibre reinforced cementitious composites. in: Improving performance of concrete structures. In *Proc. 4th International fiber Congress*.
- Lubelli, B., Nijland, T., and Van Hees, R. (2011). Self-healing of lime based mortars: microscopy observations on case studies. *Heron*, 56 (1/2).
- Luo, M., Qian, C.-x., and Li, R.-y. (2015). Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 87:1–7.
- Mihashi, H. and Nishiwaki, T. (2012). Development of engineered self-healing and self-repairing concrete-state-of-the-art report. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(5):170–184.
- Naaman, A. and Reinhardt, H. (2006). Proposed classification of hpfrc composites based on their tensile response. *Materials and structures*, 39(5):547–555.
- Nancollas, G. and Reddy, M. (1971). The crystallization of calcium carbonate. ii. calcite growth mechanism. *Journal of colloid and interface science*, 37(4):824–830.
- Neville, A. (2002). Autogenous healing - a concrete miracle? *Concrete International*, 24(11):76–82.

- Ozyurt, N., Woo, L. Y., Mason, T. O., and Shah, S. P. (2006). Monitoring fiber dispersion in fiber-reinforced cementitious materials: comparison of ac-impedance spectroscopy and image analysis. *ACI materials journal*, 103(5):340.
- Plummer, L. N. and Busenberg, E. (1982). The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in co<sub>2</sub>-h<sub>2</sub>o solutions between 0 and 90 c, and an evaluation of the aqueous model for the system caco<sub>3</sub>-co<sub>2</sub>-h<sub>2</sub>o. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(6):1011–1040.
- Rocha, C. A. A. (2015). *Influencia Da Pressao e temperatura de cura e da adicao de Nacl e Kcl eo comportamento de pastas para cimentacao de pocos de petroleo*. PhD thesis, UFRJ.
- Rocha, C. A. A., Cordeiro, G. C., and Toledo Filho, R. D. (2015). Use of thermal analysis to determine the hydration products of oil well cement pastes containing nacl and kcl. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 122(3):1279–1288.
- Scrivener, K., Snellings, R., and Lothenbach, B. (2015). *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. Crc Press, .
- Seifan, M., Samani, A. K., and Berenjian, A. (2016). Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. *Applied microbiology and biotechnology*, 100(6):2591–2602.
- Snoeck, D., Dubruel, P., and De Belie, N. (2012). Superabsorbent polymers to prevent water movement in cementitious materials. *INTERNATIONAL JOURNAL OF 3 R'S*, 3(3):432–440.
- Snoeck, D., Van Tittelboom, K., Steuperaert, S., Dubruel, P., and De Belie, N. (2014). Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 25(1):13–24.
- Toledo, R. D. (1997). *Materiais compostos reforçados com fibras naturais: caracterizacao experimental*. PhD thesis, PUCRio.
- Van Breugel, K. (2007). Is there a market for self-healing cement-based materials. In *Proceedings of the first international conference on self-healing materials*.

- van Breugel, K. (2012). Self-healing material concepts as solution for aging infrastructure. In *37th conference on our world in concrete & structures, Singapore*.
- Van Tittelboom, K. and De Belie, N. (2013). Self-healing in cementitious materials: A review. *Materials*, 6(6):2182–2217.
- Van Tittelboom, K., De Belie, N., Van Loo, D., and Jacobs, P. (2011). Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent. *Cement and Concrete Composites*, 33(4):493–505.
- Wiktor, V. and Jonkers, H. M. (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(7):763–770.
- Wu, M., Johannesson, B., and Geiker, M. (2012). A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials*, 28(1):571–583.
- Yang, Y., Lepech, M. D., Yang, E.-H., and Li, V. C. (2009). Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet–dry cycles. *Cement and Concrete Research*, 39(5):382–390.
- Yang, Y., Yang, E.-H., and Li, V. C. (2011). Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age. *Cement and concrete research*, 41(2):176–183.
- Zhang, J. and Scherer, G. W. (2011). Comparison of methods for arresting hydration of cement. *Cement and Concrete Research*, 41(10):1024–1036.
- Zwaag, S. (2008). *Self healing materials: an alternative approach to 20 centuries of materials science*. Springer Science+ Business Media BV.