

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
NÍVEL MESTRADO

SILVIO JOSÉ BRESOVIT

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE PAINÉIS DE CONCRETOS TÊXTEIS  
COM UTILIZAÇÃO DE TELAS DE FIBRAS DE VIDRO RESISTENTE AOS  
ÁLCALIS DO CIMENTO**

São Leopoldo

2021

SILVIO JOSÉ BRESCOVIT

AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE PAINÉIS DE CONCRETOS TÊXTEIS COM  
UTILIZAÇÃO DE TELAS DE FIBRA DE VIDRO RESISTENTE AOS ALCALIS DO  
CIMENTO

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -  
UNISINOS para a obtenção do Grau de  
mestre em Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

Coorientador Prof. Dr Roberto Christ

São Leopoldo

2021

B842aBrescovit,Silvio José

Avaliação da durabilidade de painéis de concretos têxteis com utilização de telas de fibras de vidro resistente aos álcalis do cimento/ Silvio José Brescovit. – 2021.

134 f. : il. ; color. ; 30cm.

Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) -- Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian; Coorientador Prof. Dr. Roberto Christ.

1. Engenharia civil. 2. Concreto têxtil. 3. Fibra de vidro álcali resistente. 4. Envelhecimento acelerado. 5. Durabilidade I. Título. II. Tutikian, Bernardo Fonseca. III. Christ, Roberto.

CDU 624

SILVIO JOSÉ BRESCOVIT

AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE PAINÉIS DE CONCRETOS TÊXTEIS COM  
UTILIZAÇÃO DE TELAS DE FIBRA DE VIDRO RESISTENTE AOS ALCALIS DO  
CIMENTO

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -  
UNISINOS para a obtenção do Grau de  
mestre em Construção Civil.

Aprovado em (dia) (mês) (ano)

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr Andrea Kern– Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

---

Prof. Dr Vinicius Ortolan– Universidade Feevale

À minha família pela compreensão e incentivo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus colegas de trabalho Názaro Amorim, Edson Rubbler e Josué Lourenço que me ajudaram com a fabricação de moldes, preparação de corpos de prova, entre outros.

Também quero deixar um agradecimento ao Prof. Dr Bernardo Tutikian por incentivar a retomar meus estudos, particularmente em realizar o mestrado acadêmico.

Ainda, agradeço aos colegas Vinicius Ortolan e Roberto Christ pela contribuição dada durante a realização dos trabalhos.

À Simone que rompeu os meus testemunhos e sempre esteve disposta a ajudar e contribuir no andamento das atividades durante os ensaios.

## RESUMO

O concreto têxtil é um material que está em destaque no cenário atual da construção, é composto por uma matriz cimentícia e tecidos de fibras orientados, a primeira tem a função de resistir aos esforços de compressão, e o segundo aos esforços de tração. Os tecidos mais utilizados atualmente são os compostos por fibras de vidro álcali resistentes (AR), uma vez que são mais acessíveis no mercado, possui relativamente um baixo custo quando comparados aos outros têxteis e ainda possui boa resistência, contudo sofrem degradação em meio alcalino. Em razão do citado acima se realizou o estudo da durabilidade do concreto têxtil com fibras de vidro AR utilizando o método de envelhecimento acelerado proposto por ASTM C 1560 (2013) em diferentes períodos: 0, 7, 28, 56, 84 e 90 dias de envelhecimento acelerado. Para isso, foi utilizada uma matriz cimentícia padrão com presença ou não de fibra curta no teor de 1%. Foram encontradas perdas consideráveis de resistências a flexão e tração, juntamente com a redução da capacidade de deslocamento e deformação dos concretos têxteis quando envelhecidos pelo método acelerado. Também, se verificou que a adição da fibra curta parece não ter contribuído para o aumento das cargas críticas e cargas de ruptura dos concretos têxteis, assim como no aumento da capacidade de deformação do compósito.

Palavras chave: concreto têxtil, fibra de vidro AR, compósito, envelhecimento acelerado, durabilidade.

## **ABSTRACT**

Textile concrete is a material that stands out in the current construction scenario, it is composed of a cementitious matrix and oriented fiber fabrics, the first one having the function of resisting compression efforts, and the second one against traction efforts. The most used fabrics today are composed of alkali resistant glass fibers (AR), since they are more accessible in the market, have a relatively low cost when compared to other textiles and still have good resistance, however they suffer degradation in an alkaline environment. Due to the above, the study of the durability of textile concrete with AR glass fibers was carried out using the accelerated aging method proposed by ASTM C 1560 (2013) in different periods: 0 , 7, 28, 56, 84 and 90 days of accelerated aging. For this, a standard cementitious matrix with the presence or not of short fiber at 1% content was used. Considerable losses in bending and tensile strength were found, along with a reduction in the displacement and deformation capacity of textile concretes when aged by the accelerated method. Also, it was found that the addition of short fiber does not seem to have contributed to the increase in critical loads and breaking loads of textile concretes, as well as to the increase in the deformation capacity of the composite.

Keywords: textile concrete, fiberglass AR, composite, accelerated aging, durability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparação da resistência à flexão de vigas de concreto têxtil a/c 0,40 com 0, 3, 4 e 5 telas de fibra de vidro AR .....	25
Figura 2: Passagem de pedestres em Albstadt, Alemanha.....	26
Figura 3: Corpos de prova com concreto têxtil expostos a altas temperaturas .....	28
Figura 4: Fachada ventilada com espessura de 20 mm.....	30
Figura 5: Fachada ventilada pigmentada com espessura de 40 mm .....	30
Figura 6: Fibra curta de vidro Ar 18 mm.....	35
Figura 7: Efeitos da adição de fibras curtas de vidro AR dispersas e integras no comportamento de tensão-deformação de placas CT submetidas a cargas de tração .....	35
Figura 8: Matriz cimentícia com uma camada de tela de fibra armada em duas direções.....	37
Figura 9: Tipos de telas fabricadas para uso em CT, tela armada em duas direções (a), tela armada em 3 dimensões (b), cantoneiras de reforço em tela de fibra de vidro(c) .....	39
Figura 10: Comportamento à ruptura de filamentos de fibra de vidro impregnados com epóxi.....	40
Figura 11: Esquema do corpo de prova de fibra envolvido na matriz cimentícia e protegida pela resina epóxi .....	47
Figura 12: Dimensões dos corpos de provas para testes te tração direta.....	50
Figura 13: Modelo do dispositivo para a ensaio de tração direta .....	50
Figura 14: Macrofluxo de variáveis de controle .....	52
Figura 15: Fibra curta Cem Fil 60.3, 18 mm.....	53
Figura 16: Nomenclatura da tela de fibra de vidro.....	54
Figura 17: Rolo de tela de fibra de vidro AR (tecido).....	54
Figura 18: Areia utilizada na pesquisa .....	55
Figura 19: Curva granulométrica acumulada da areia.....	56
Figura 20: Fôrma de concreto para moldagem das placas de concreto têxtil .....	58
Figura 21: Disposição das camadas de têxteis durante a concretagem .....	61
Figura 22: Corte esquemático posição da tela de fibra de vidro AR (medidas em mm) .....	62
Figura 23: Direcionamento das fibras no tecido textil.....	63
Figura 24: Placa de concreto têxtil com cura de 14 dias .....	64

Figura 25: Corpo de prova sendo cortado nas dimensões para ensaio .....	64
Figura 26: Normas utilizadas no trabalho experimental .....	65
Figura 27: Caixa com corpos de prova em processo de cura após o corte.....	66
Figura 28: Esquema de ligação e acondicionamento dos corpos de prova durante o envelhecimento acelerado .....	67
Figura 29: Significado da identificação utilizada.....	68
Figura 30: Dispositivo para ensaio à flexão em 4 pontos.....	69
Figura 31: Distribuição das tensões nos testemunhos.....	70
Figura 32: Montagem do corpo de prova para ensaio de tração direta .....	71
Figura 33: Espalhamento da matriz cimentícia utilizada .....	72
Figura 34: Lançamento dos primeiros 3 mm de concreto .....	73
Figura 35: Moldagem da tela de fibra de vidro AR .....	73
Figura 36: micro fissuras evidenciadas após rompimento do corpo de prova.....	75
Figura 37: Diagrama de Carga versus Deslocamento no ensaio de flexão em 4 pontos (traço com fibras de vidro curtas) .....	79
Figura 38: Resultados da variação da carga e deslocamento envelhecidos.....	82
Figura 39: Acompanhamento da perda de resistência à flexão (A) e deslocamento (B) médios de CTs ao longo do tempo imersos em água quente (60°C).....	83
Figura 40: Resistência a flexão de corpos de prova (sem fibra de vidro curtas).....	87
Figura 41: Variação das médias das cargas e deslocamentos ao longo do tempo (traço sem fibra curta) .....	89
Figura 42: Acompanhamento da perdas médias de resistência a flexão (A) e deslocamento (B) de cps ao longo do tempo (sem fibra curta).....	90
Figura 43: Diagrama comparativo da Força versus Deslocamento Potenciais(TCF e TSF).....	93
Figura 44: diagrama de carga crítica versus tempo .....	96
Figura 45: Comportamento das resistências médias à flexão ao longo do tempo ....	98
Figura 46: Características dos rompimentos dos concretos têxteis (sem envelhecimento (A) e com 84 dias de envelhecimento (B) ) .....	99
Figura 47: Padrão de fissuração de corpos de prova com fibra curta com e sem envelhecimento acelerado .....	100
Figura 48: Padrão de fissuração de corpos de prova sem fibra curta com e sem envelhecimento acelerado .....	101

Figura 49: Diagramas de Tensão versus de Deformação de testemunhos com fibra curta em ensaio de tração direta .....	104
Figura 50: Diagrama de tensão e deformação médias ao longo do tempo .....	105
Figura 51: Diagrama de tensões potenciais e deformações correspondentes no rompimento ao longo do tempo .....	107
Figura 52: Diagramas de tensão versus deformação de testemunhos sem fibra curta .....	109
Figura 53: Diagramas de tensão e deformação média ao longo do tempo .....	111
Figura 54: diagrama de tensão e deformação potencial correspondente ao longo do tempo .....	111
Figura 55: Corpo de prova com 84 dias de envelhecimento .....	113
Figura 56: Imagens do rompimento do CTs à tração direta com fibra curta.....	114
Figura 57: Imagens do rompimento do CTs à tração direta sem fibra curta.....	115
Figura 58: Perda de resistência à flexão de CTs com e sem presença de fibra curta nos períodos de 40 e 50 anos de vida útil .....	120
Figura 59: Diagrama do deslocamento de CTs com e sem fibra curta ensaiados a flexão em 4 pontos .....	122
Figura 60: Estimativa de perda de resistência a tração direta de CTs com e sem presença de fibra curta nos períodos de 40 e 50 anos de vida útil .....	124
Figura 61: Diagrama de deformação de CTs com e sem fibra curta .....	125

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade de concretos têxteis expostos a altas temperaturas.....	28
Tabela 2: Propriedades de matrizes cimentícias aos 28 dias de idade.....	30
Tabela 3: Teores de fibras curtas utilizados na bibliografia.....	36
Tabela 4: Características técnicas das telas fabricadas por Texiglass .....	54
Tabela 5: Análise granulométrica da areia .....	56
Tabela 6: Propriedades físicas da areia .....	56
Tabela 7: características técnicas da sílica ativa.....	57
Tabela 8: Propriedades do aditivo superplastificante .....	58
Tabela 9: Número de corpos de provas ensaiados .....	59
Tabela 10: Traço unitário da matriz cimentícia.....	60
Tabela 11: Identificação dos corpos de prova enviados ao laboratório.....	67
Tabela 12: Resultados da resistência à compressão da matriz cimentícia .....	74
Tabela 13: Resultados do comportamento à flexão dos compósitos reforçados com o têxtil AR192 com fibra curta .....	77
Tabela 14: Valores em % das diferenças da resistência à flexão dos CTs envelhecidos comparados ao referência.....	80
Tabela 15: Valores em % das diferenças do deslocamento dos CTs envelhecidos comparados ao referência.....	81
Tabela 16: Análise de significancia da influência do tempo na perda de resistencia a flexão dos CTs(com fibra curta) .....	84
Tabela 17: Análise de significância da influência do tempo na perda da capacidade de deslocamento dosCTs (com fibra curta).....	85
Tabela 18: Resultados do comportamento à flexão dos compósitos reforçados com o têxtil AR192 sem fibra curta .....	86
Tabela 19: Valores em % das diferenças da resistência à flexão dos CTs nas idades em envelhecimento acelerado em relação aos testemunhos em cura normal .....	88
Tabela 20: Valores em % das diferenças dos deslocamentos dos CTs nas idades em envelhecimento acelerado em relação aos testemunhos em cura normal.....	88
Tabela 21: Análise de significancia da influência do tempo na perda de resistencia a flexão dos CTs (sem fibra curta) .....	91
Tabela 22: Análise de significância da influência do tempo na perda da capacidade de deformação (sem fibra curta) .....	91

Tabela 23: Análise da carga de rompimento aos 28 dias de cura normal com e sem fibra curta .....	94
Tabela 24: Análise capacidade de deslocamento aos 28 dias de cura normal com e sem fibra curta.....	95
Tabela 25: Valores de resistência média crítica dos CTs com e sem fibra curta .....	96
Tabela 26: Resultados dos ensaios de tração direta encontrados para CT com fibra curta 18 mm .....	103
Tabela 27: Percentual de perdas médias das tensões e deformações máximas...	105
Tabela 28: Diferenças das tensões potenciais e deformações ao longo do tempo em % .....	106
Tabela 29: Resultados dos ensaios de tração direta encontrados para CT sem fibra curta 18 mm .....	108
Tabela 30: Percentual de perda média de resistência e deformações máximas....	110
Tabela 31: Diferenças das tensões potenciais e deformações correspondentes ao longo do tempo em % .....	112
Tabela 32: Análise estatística da interferência do tempo na perda da tensão de CTs com adição de fibra curta .....	116
Tabela 33: Análise estatística da interferência do tempo na perda da tensão de CTs sem adição de fibra curta .....	116
Tabela 34: Análise estatística da interferência do tempo na perda da capacidade de deformação de CTs com adição de fibra curta.....	118
Tabela 35: Análise estatística da interferência do tempo na perda da capacidade de deformação de CTs sem adição de fibra curta.....	118
Tabela 36: Vida útil de projeto (VUP).....	119
Tabela 37: Equivalência do tempo de exposição em 60°C .....	119
Tabela 38: Valores de resistência a flexão para VUP .....	120
Tabela 39: Análise de significância dos resultados à flexão nas idades de 0, 56, 84 e 90 dias envelhecidos em concretos com e sem fibras curtas.....	121
Tabela 40: Valores de deslocamento na flexão para VUP .....	122
Tabela 41: Valores de resistência a tração direta para VUP.....	123
Tabela 42: Análise de significância dos resultados à tração nas idades de 56, 84 e 90 dias envelhecidos em concretos com e sem fibras curtas.....	124
Tabela 43: Valores de resistência a tração direta para VUP.....	125

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AR	Álcali resistente
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA (OH) <sub>2</sub>	Hidróxidos de cálcio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio; Calcário
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CPV-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
CT	Concreto reforçado com tecido têxtil
DIN	Instituto Alemão para Normatização
Fibra de PVA	Fibra sintética de álcool polivinílico
F <sub>u</sub>	Resistência a flexão no rompimento do corpo de prova (MPa);
F <sub>y</sub>	Resistência a flexão no momento da primeira fissura (MPa);
GRC	Concreto reforçado com fibra de vidro
GRCA	The International Glass fibre Reinforced Concrete Association
ISO	Organização padrão internacional
KN	Kilo Newton
mm	Milímetros
MPa	Mega pascal
NaOH	Hidróxido de sódio
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
nm	Nanômetro
NR	Norma regulatória
°C	Graus Celsius
P <sub>u</sub>	Carga necessária para o rompimento do corpo de prova (N);
P <sub>y</sub>	Carga necessária para abertura da primeira fissura (N)
RILEM	União Internacional de Laboratórios e Especialistas em materiais, Sistemas e Estruturas de Construção
SiO <sub>2</sub>	Sílica (dióxido de silício)
TEX	Gramas por quilômetro (g/km)
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de titânio
UK	Reino Unido
ZrO <sub>2</sub>	Zircônio
ZrSiO <sub>4</sub>	Silicato de zircônio (zircão)
δ <sub>u</sub>	Deslocamento último (mm)
μm	Micrômetro

## Sumário

<b>1.INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1 Tema	18
1.2 Delimitações do Tema	18
1.3 Problema	19
1.4 Objetivos	19
1.4.1 Objetivo Geral	19
1.4.2 Objetivos Específicos	19
1.5. Justificativa	19
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>22</b>
2.1. Concreto têxtil	22
2.1.1 Propriedades mecânicas	24
2.1.2 Resistência ao fogo	26
2.1.3 Matriz cimentícia	29
2.1.4 Fibras de vidro AR	31
2.1.4.1 Reações dos álcalis com a fibra de vidro	32
2.1.4.2 Zircônios como proteção da fibra	33
2.1.4.3 Fibras de vidro AR curtas	34
2.1.4.4 Tela de fibra de vidro	36
2.1.4.5 Resinas sintéticas como proteção às fibras	39
2.2 Envelhecimento acelerado das fibras	41
2.2.1. Método proposto por Litherland, Oakley e Proctor (1981	47
2.2.2 ASTM C 1560- método de teste padrão para envelhecimento acelerado	
decompósitos com fibras de vidro	48
2.3 Recomendações de RILEM TC 232-TDT	49
<b>3. MATERIAIS E MÉTODO</b>	<b>51</b>
3.1 Materiais	52
3.1.1 Fibra picada	52
3.1.2 Tela de fibra de vidro AR	53
3.1.3 Cimento	55
3.1.4 Agregado miúdo	55
3.1.5 Sílica ativa	57
3.1.6 Aditivo superplastificante	57

<b>3.1.7 Fôrmas de moldagem</b>	<b>58</b>
<b>3.2 Método</b>	<b>59</b>
<b>3.2.1 Programa experimental</b>	<b>59</b>
<b>3.2.2 Dosagem da matriz cimentícia</b>	<b>60</b>
3.2.2.1 Preparação da matriz cimentícia	60
3.2.3.2 Característica dos corpos de prova	61
<b>3.2.4 Moldagem do concreto têxtil</b>	<b>62</b>
<b>3.2.5 Preparação dos corpos de prova após cura</b>	<b>63</b>
<b>3.2.6 Temperatura para envelhecimento acelerado</b>	<b>65</b>
<b>3.2.7 Preparação dos corpos de prova para envelhecimento acelerado</b>	<b>65</b>
3.2.7.1 Preparação do tanque	66
3.2.7.2 Água de imersão	67
3.2.7.3 Identificação e preparação para rompimento	67
<b>3.2.8 Ensaio de compressão da matriz</b>	<b>68</b>
<b>3.2.9 Ensaio de tração na flexão</b>	<b>68</b>
<b>3.2.10 Ensaio de tração direta</b>	<b>70</b>
<b>4 ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>72</b>
<b>4.1 Características da matriz cimentícia</b>	<b>72</b>
4.1.1 Resultados no estado fresco	72
4.1.2 Resultados à compressão	74
<b>4.2 Resultados do ensaio de flexão em quatro pontos dos CT com e sem uso de fibra curta na mistura</b>	<b>76</b>
4.2.1 Concreto têxtil com uso de fibra curta 18 mm	76
4.2.2 Concreto têxtil sem o uso de fibra curta 18 mm	85
4.2.3. comparativo da Força versus deslocamento últimos de CTs com e sem fibra curta	92
4.2.4 Comparativos da Tensão crítica dos CTs com e sem fibra curta	96
4.2.5 Comparativo da resistência à flexão de CTs com e sem fibra curta	97
4.2.6 Característica do rompimento do fio da tela de fibra de vidro submetidos à flexão em 4 pontos	98
4.2.7 Comportamento da fissuração de CTs com adição de fibras curtas após rompimento à tração na flexão	99

4.2.8 Comportamento da fissuração dos CTs sem adição de fibras curtas após rompimento à tração na flexão	101
4.3 Resultados dos ensaios de tração direta do CT	102
4.3.1 Concreto têxtil com uso de fibra curta	102
4.3.2 Concreto têxtil sem uso de fibra curta 18 mm	107
4.3.3 Característica do rompimento do fio da tela de fibra de vidro AR submetidas ao ensaio de tração direta	112
4.3.4 Característica da fissuração dos CTs com adição de fibras curtas após rompimento à tração direta	113
4.3.5 Característica da fissuração dos CTs sem adição de fibras curtas após rompimento à tração direta	114
4.3.6 Análise estatística	115
4.3.6.1 Análise de significância da influência do tempo de envelhecimento na perda de tensão do CT com e sem fibra curta	116
4.3.6.2 Análise de significância da influência do tempo de envelhecimento na perda da capacidade de deformação de CTs com e sem fibra curta	117
4.4. Estimativa vida útil	119
4.4.1 Resistência à flexão	119
4.4.1 Resistência à tração direta	123
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	126
5.1 Conclusões	126
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	127
REFERÊNCIAS	128

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais consumido no mundo, sendo superado apenas pela água. Segundo Mehta e Monteiro (2014), existem três razões principais para isto: facilidade com que o concreto pode ser formado e produzido; disponibilidade em todos os locais; e boa resistência à deterioração pelo efeito da água, tornando-o um material muito utilizado em contenções, aquedutos, estruturas expostas à água, entre outros.

Também, o concreto apresenta propriedades importantes, como proteger a armadura, resistir ao impacto e ter boa resistência à compressão, contudo, possui baixa resistência à tração. Já o aço possui excelente resistência à tração e, uma vez combinados, possuem propriedades complementares, por isso estão presentes em grande parte das construções atuais (Mehta e Monteiro, 2014).

O concreto armado é uma tecnologia da construção com mais de 100 anos de uso. Carvalho (2008) cita o ano de 1849 como o marco inicial para o aparecimento deste material, e muitos estudos já foram realizados a fim de caracterizar e prever seu comportamento com o passar do tempo.

Ainda, o concreto pode normalmente ser considerado um material de baixo custo e mais facilmente disponível Mehta e Monteiro (2014), o que motiva seu uso. No entanto, a velocidade das construções, prazos cada vez menores e exigências de projeto estão instigando o surgimento de novas tecnologias construtivas (light steel frame, construções metálicas, Wood frame, etc.) modificando o modo de construção, trazendo uma quebra de paradigmas para o setor e, ao mesmo tempo, motivando novas pesquisas sobre o tema.

Busca-se alternativas com maior durabilidade, com maior resistência à corrosão, que é o maior problema patológico das estruturas de concreto Armado. Segundo Helene et al (2019) o concreto armado muito tempo atrás foi visto como um material eterno, no entanto esse conceito mudou com o tempo, e o concreto armado sofre com manifestações patológicas em seus componentes, dependendo principalmente do ambiente onde está inserido, e essas manifestações patológicas promovem a redução parcial ou total da funcionalidade das estruturas, gerando assim custos de manutenções simples

Por isso, segundo Brockmann (2005), foi desenvolvido um novo compósito com têxteis reforçando o concreto, permitindo elaboração de projetos com estruturas mais esbeltas e com alta resistência à compressão e à tração.

Os concretos têxteis são uma evolução dos sistemas mistos de concreto, aço e fibras estruturais. Neste tipo de concreto, o aço deixa de ser o componente responsável por resistir aos esforços de tração, a qual fica a cargo de telas de fibras especiais e fibras distribuídas na matriz, caracterizando um compósito com características únicas, com ganho de resistência, leveza e esbelteza nas estruturas. Segundo Haussler, Jesse e Curbach (2004), concretos têxteis oferecem uma nova tecnologia para as estruturas de concreto, pois permitem o uso de pequenas espessuras e utilizam tecidos de fibra de alta resistência inertes à oxidação comum nos concretos convencionais.

Conforme Brameshuber (2006), o concreto têxtil tem um potencial inovador e pode ser considerado como o material das construções futuras. A aplicação do concreto têxtil faz sentido se as telas forem utilizadas em conjunto com fibras picadas, para garantir o reforço de toda a matriz que, sem isso, estaria suscetível a fissuras ou micro fissuração excessiva.

O surgimento dos concretos têxteis está relacionado com o desenvolvimento de reforços para estruturas já existentes e novos projetos, como: telas de fibra de vidro AR (álcali resistente), telas de fibra de carbono, telas de fibras PVA, fibras curtas ou em rolo. Ainda, estes materiais estão sendo produzidos com custos mais atrativos, devido ao avanço tecnológico no setor, tornando o seu uso mais viável (Kulas, 2015).

Conforme Kulas (2015), concretos têxteis são reforçados com telas de fibras de vidro álcali resistentes, telas de fibra de carbono, Aramida e basalto. E, segundo Quinino (2015), devido ao grande número de fibras disponíveis no mercado, muitos podem ser os resultados obtidos no seu uso, por isso é importante atentar para as diferenças na forma de atuação de cada tipo de fibra, que vai depender de sua natureza, propriedades físicas, químicas, dimensões e qual o desempenho que o compósito deverá atender.

Os primeiros experimentos com concretos reforçados com fibras de vidro AR foram executados há mais de quatro décadas e muitas evoluções ocorreram até os tempos atuais (MARTYNOVA E CEBULLA, 2018). A partir do desenvolvimento das fibras de vidro AR, o compósito formado vem sendo empregado em painéis

arquitetônicos, peças ornamentais, obras de arte, restauração de edifícios históricos, dentre outras diversas aplicações (GRCA, 2018).

Já é sabido que a fibra de vidro sem tratamento com zircônio (fibra E) sofre grande deterioração em meio alcalino. Diferentes destas, as fibras de vidro AR recebem um tratamento durante a fabricação que garante uma estabilidade ao longo do tempo, porém, a alcalinidade do meio influencia na perda resistência da fibra, numa velocidade muito menor do que as fibras E (Moceikis et al., 2018).

Por isto, se justifica o estudo do comportamento destas fibras presentes em forma de tela e picadas dentro de uma matriz cimentícia, denominada de concreto têxtil.

## **1.1 Tema**

Durabilidade de painéis de concretos têxteis com utilização de fibras de vidro AR sofrendo a ação do tempo.

## **1.2 Delimitações do Tema**

A matriz cimentícia utilizada no trabalho experimental não foi desenvolvida, pois foi utilizada a dosagem referência de Ortolan (2021). Foi acrescentado na matriz referência o uso ou não de fibra curta de 18 mm, no teor de 1% sobre o volume dos materiais.

Porém, por limitações de tempo e recursos, foi utilizado um modelo de tela de fibra de vidro AR, proveniente de um único fornecedor. A matriz cimentícia utilizada no trabalho experimental não foi desenvolvida, pois foi utilizada a dosagem referência de Ortolan (2021). Foi acrescentado na matriz referência o uso ou não de fibra curta de 18 mm, no teor de 1% sobre o volume dos materiais.

As espessuras dos testemunhos foram de 10 mm, sem variações nos cobrimentos das telas de fibra de vidro. O tempo de ensaio seguiu o recomendado pela ASTM C 1560 (2013), e os períodos avaliados foram 28 dias de cura normal, 7, 28, 56, 84 e 90 dias de envelhecimento acelerado.

### **1.3 Problema**

Qual o comportamento de painéis produzidos com concreto têxtil reforçado com telas fibras de vidro resistente aos álcalis (AR) em meio alcalino ao longo do tempo quanto à durabilidade do compósito?

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a durabilidade de painéis fabricados com telas de fibras de vidro AR quanto à degradação das fibras em meio alcalino, expostas à agressividade do meio ambiente.

#### **1.4.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- analisar a resistência dos compósitos cimentícios após envelhecimento acelerado, comparando com o referência;
- verificar através dos rompimentos a tração direta e flexão em 4 pontos a influência da presença da fibra picada AR, com adição de 1% de em relação ao volume de matriz quanto à durabilidade do compósito;
- comparar o desempenho dos concretos têxteis ao longo do tempo de envelhecimento acelerado;
- caracterizar os padrões de fissuração de forma visual dos concretos têxteis após rompimento em cada idade;
- Simular a vida útil das estruturas aplicando curvas perda de desempenho ao longo do tempo dos CT's.

### **1.5. Justificativa**

É sabido que a construção civil desempenha um papel fundamental na geração de riqueza e qualidade de vida, porém, ainda permanece menos inovadora que os outros setores da economia. A inovação é conhecida como a chave de vantagens competitivas em qualquer atividade econômica. Novas tecnologias são

fontes de estudos nas últimas décadas, segundo Manseau e Shields (2005), como o concreto têxtil (CT), que pode ser uma tecnologia viável, e traz benefícios em relação aos concretos convencionais, tais como sustentabilidade, resistências à compressão e à flexão, leveza, resistente à corrosão, entre outros (PORTAL et al. 2015).

Os CT são uma solução moderna e eficaz para novas construções e também servem como material de restauro ou reforços de estruturas existentes, devido ao seu desempenho frente às solicitações de uso (MACHOVEC E REITERMAN, 2018).

O desenvolvimento do CT é uma forma de minimizar o impacto da corrosão das armaduras. Por muitos anos se utiliza o concreto armado para construções, devido à sua resistência e custo, porém, estes possuem limitações quanto à variação de formas complexas e peso próprio elevado. Ao contrário dos concretos convencionais, os CT permitem variação de formas e maior leveza nas construções (GRIES et al., 2016).

O uso do concreto com tela e fibras picadas tem o intuito de produzir estruturas mais duráveis, leves e sem a necessidade de cobrimentos, como exigido no concreto reforçado com armadura de aço. Ainda, o CT é um material que combina a resistência à compressão de um concreto com a resistência à tração das fibras picadas e telas entrelaçadas de vidro AR, carbono, basalto ou aramida.

O CT possui uma matriz cimentícia de baixa relação a/c, elevada resistência à compressão e protege as fibras, que são responsáveis por distribuir uniformemente as tensões durante o uso. Também, o CT pode trabalhar com uma proporção de fibra picada, em menor porcentagem, somada ao reforço estrutural com telas planas ou em três dimensões de fibra de vidro AR, basalto, aramida ou carbono. As fibras curtas contribuem positivamente para o CT, distribuindo os esforços e agindo para aumentar a quantidade de fissuras com diminuição dos seus tamanhos, apesar de a adição de fibras serem propensas a aumentar a porosidade do compósito e diminuir a resistência, quando comparados aos concretos sem fibra.

O CT tem um potencial muito grande quando se analisa a capacidade de combinar e criar projetos com formas diferentes e com apelos arquitetônicos, além das exigências estruturais (KULAS, 2015). Portanto, a análise da durabilidade deste material é de extrema importância para o desenvolvimento deste tipo de concreto.

As características do CT permitem seu uso em ambientes com condições de agressividade extremas, o que justifica a avaliação da durabilidade ao longo do

tempo (KAPSALIS et al.,2019). Ainda, a avaliação da durabilidade das argamassas é um tema bastante conhecido, porém, a análise das fibras ao longo do tempo deve ser mais bem entendida, uma vez que a fibra tem um papel fundamental na resistência do compósito.

*Rilem Technical Committee 232* (2016) considera o CT como um compósito cimentício de alto desempenho, que possui fibras orientadas em um plano numa linha reta, o que melhora o desempenho quanto à propagação de fissuras.

Portanto, o CT é uma oportunidade de quebrar paradigmas dentro do mercado da construção civil, e para isto é necessário estudar suas características e o desempenho frente aos concretos convencionais. Por isso, este trabalho abordou painéis de fachadas arquitetônicas em concreto têxtil com fibra de vidro AR

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Concreto têxtil

O uso de concretos de alto desempenho, com características diferentes dos concretos convencionais, não é uma novidade. Neville e Aïtcin (1998) mencionaram, já em 1998, que os concretos de alto desempenho evoluíram muito desde o ano 1983, ou seja, neste período os concretos com características diferentes dos convencionais já eram motivos de estudos e tinham aplicações dentro do mercado da construção.

O termo concreto têxtil (CT) foi introduzido no final dos anos 1990 e, desde então, trabalhos têm sido referenciados utilizando este termo, porém o estado da arte reportado ao CT foi publicado na *Rilem Technical Committee 201-CT*, em 2006 (NAAMAN, 2010).

Pode-se considerar um dos principais tipos de CT os aplicados em estruturas novas, com telas de vidro AR, carbono, aramida ou basalto. Estes concretos possuem características superiores aos concretos convencionais e podem ser utilizados sozinhos ou como substituição parcial ao aço no concreto. Outro tipo de têxtil é o utilizado como reforço de estruturas já existentes, com o intuito de aumentar a capacidade de carga de elementos com deficiências ou para mudanças de uso. Ambos os têxteis são a mescla de telas de fibras e matriz cimentícia (Kulas, 2015). Colombo et al (2013) citam como principais aplicações dos CT o reforço de estruturas, fachadas, painéis pré-moldados para telhado de várias camadas e revestimentos de túneis.

Segundo Hegger, Will e Rüberg (2007), o concreto têxtil é investigado desde o ano 2000 na Alemanha em dois centros de pesquisa colaborativa, na Universidade de Dresden e na Universidade RWTH Aachen. As pesquisas tiveram como foco principal o desenvolvimento desta tecnologia, e visavam compreender o comportamento básico de carga do CT, sua aplicabilidade e viabilidade econômica.

Para Hegger, Zell e Horstmann (2008), o CT traz as características do concreto reforçado com fibra de vidro (GRC), adicionando uma capacidade estrutural de suporte de carga em direções arbitrárias. E os reforços em forma de tela podem ser orientados em duas ou em três dimensões, dependendo do método de produção e da carga a ser suportada. Com isto, o CT amplia a atuação do GRC para além dos

painéis arquitetônicos e agrega a capacidade estrutural com variação de formas e estilos.

Muitas são as tecnologias desenvolvidas e utilizadas na construção civil moderna. Mehta e Monteiro (2014) citam uma enorme variedade de concretos modificados, e trazem como exemplos: concreto reforçado com fibras, concretos modificados com látex, entre outros.

O CT é uma tecnologia que pode ser empregada como reforço de concretos existentes, sem necessidade de grandes cobrimentos para proteção das armaduras de reforço. Häussler; Jesse e Curbach (2004) citam o uso de tecidos de fibra de vidro utilizado como reforço por Curbach e Brückner (2003).

Ainda, o CT contribui para a sustentabilidade da construção, uma vez que trabalha com materiais mais duráveis e em menores espessuras. E também por ter propriedades comparáveis em resistência e durabilidade aos concretos armados (PORTAL et al., 2015).

Kulas (2015) reafirma a importância do concreto armado como um material de extrema versatilidade e resistência, porém, o autor ressalta a necessidade dos cobrimentos necessários ao aço para garantir sua durabilidade, ainda mais para as estruturas expostas às regiões de agressividade elevada, pois os agentes agressivos podem afetar a alcalinidade do concreto e despassar a armadura, iniciando o processo de corrosão. Ainda, Kulas (2015) menciona que o CT já se apresenta em novas construções e como elementos de reforço de estruturas existentes, e que o fato de utilizar fibras de vidro AR e carbono, que possuem até seis vezes mais resistência à tração em relação ao aço, produzem estruturas mais esbeltas, resistentes e não suscetíveis à corrosão.

Assim, o CT se inclui nos concretos com características bem distintas quando se refere à resistência à tração, uso de telas, fibras, esbeltez e cobrimentos requeridos. De acordo com *Rilem Technical Committee 232 (2016)*:

O concreto armado têxtil (CT) é um compósito cimentício de alto desempenho que utiliza fibras alinhadas paralelamente de materiais adequados: vidro AR e carbono, como reforço contínuo na forma de têxteis. O concreto reforçado com têxteis é geralmente usado para elementos finos de concreto ou como camadas de reforço para estrutura de concreto.

O uso do têxtil como reforço ainda pode ser considerado uma área nova para pesquisas. O uso de telas a base de fibras de vidro AR é o reforço principal dos CT, mesmo sabendo que podem ser utilizadas outras fibras com resistência igual ou até

superior, como as fibras de basalto, aramida e carbono. O uso do vidro ainda possui um custo-benefício maior quando comparado às outras disponíveis no mercado. Kulas (2015) salienta a importância do uso de fibras com impregnação com resinas, a fim de aumentar a ligação entre os filamentos.

Para a produção do CT, é necessário que o reforço têxtil seja resistente aos álcalis do cimento, e uma matriz com grandes quantidades de finos. As fibras devem possuir alta resistência e durabilidade. A fibra de vidro AR, utilizada desde os anos 1990s e início dos anos 2000s, e a fibra de carbono, desde meados dos anos 2000s, são os materiais mais utilizados como reforços do CT (SCHEERER et al., 2017).

A fibra ideal para concretos reforçados deve ser econômica, fácil de ser utilizada e atender às especificações técnicas (OWENS CORNING, 2015).

Requisitos exigidos para as fibras de reforço em concretos são:

- a) facilidade de mistura e dispersão sem segregação;
- b) não aparecer na face do concreto acabado, prejudicando acabamento;
- c) possuir alta resistência à tração, com capacidade de distribuir as tensões de retração sem perda de resistência ou rompimento;
- d) possuir alto módulo de elasticidade para resistir aos esforços após fissuração do concreto;
- e) ter uma boa aderência com a matriz cimentícia;
- f) ser resistente à alcalinidade do concreto;
- g) não prejudicar a saúde do usuário durante o tempo de uso do concreto ou durante o período de fabricação.

Lesovik; Kiyuev e Klyuev (2015) afirmam que nem todas as fibras podem ser utilizadas como reforços nos concretos.

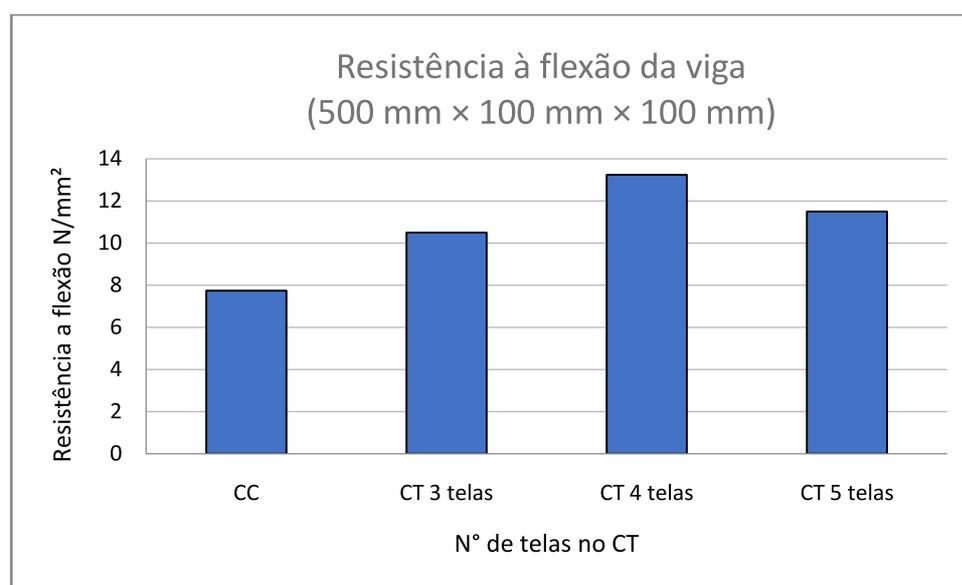
### **2.1.1 Propriedades mecânicas**

O CT, por sua origem, já pode ser considerado um concreto com propriedades específicas e diferentes, porém ainda sofre com a falta de normatização. Também, o CT é foco de pesquisas que buscam avaliar seu comportamento estrutural, resistência ao fogo, durabilidade, composição da matriz, entre outros.

Gayathri, Singh e Dhanalakshmi (2018) concluíram que a adição das fibras em forma de tela e a variação no número de camadas contribuem para a resistência à tração do concreto, e aumentam significativamente sua tenacidade, deixando o

material mais dúctil. A Figura 1 mostra os resultados encontrados da resistência à flexão do concreto convencional sem reforço têxtil (CC) e de CTs com uso de 3, 4 e 5 camadas de tela de fibra de vidro AR. Observou-se que os valores do CT foram, aproximadamente, 70% maiores do que os do concreto convencional e que o CT com 4 camadas teve o melhor desempenho.

Figura 1: Comparação da resistência à flexão de vigas de concreto têxtil a/c 0,40 com 0, 3, 4 e 5 telas de fibra de vidro AR



Fonte: Adaptada de (GAYATHRI; SINGH; DHANALAKSHMI, 2018)

Contribuindo para o estudo citado, Du et al.(2018) encontraram resultados que indicam um aumento da resistência à flexão dos concretos reforçados com telas de fibra de basalto, e isto está diretamente ligado ao número de camadas de telas utilizadas. O aumento do número de camadas de fibras contribuiu para o direcionamento das fissuras na zona de flexão pura dos testemunhos estudados, criando um padrão de fissuras direcionadas, em maior número e menor tamanho de abertura, devido à redistribuição das tensões ao longo da matriz que envolve as telas de fibra.

Kulas (2015) ressalta a capacidade do concreto têxtil em permitir a redução da massa das estruturas. Com o uso do CT, obteve-se uma redução de 40% da massa de uma estrutura executada para passagem de pedestres, Figura 2, construída na cidade de Albstadt, Alemanha, em comparação com uma construção de estrutura convencional, com uso de aço e concreto pré-tensionado. Ainda, o autor reforça a capacidade de a estrutura resistir à corrosão, tornando-a mais

resistente às intempéries do meio ambiente e do próprio uso, considerando-se que se usa em algumas regiões o cloreto de sódio nas vias públicas e nos locais de passagem de pedestres para evitar acidentes por falta de atrito com a presença de gelo.

Figura 2: Passagem de pedestres em Albstadt, Alemanha



Fonte: (KULAS, 2015)

No mesmo caminho que Kulas (2015), Papanicolaou; Papantoniou (2010) concluíram que o uso de CT com telas em fibras de vidro são uma excelente solução para reforço de estruturas existentes e para a redução da massa final da estrutura.

### 2.1.2 Resistência ao fogo

O comportamento ao fogo dos CT é um tema de estudo e avaliação constante, pois se sabe que as estruturas com CT são mais suscetíveis às mudanças de temperatura, quando comparados às estruturas convencionais. Para Nguyen et al., (2016), o comportamento termomecânico do CT é bastante desconhecido.

Kapsalis et al. (2019) afirmam que, dos poucos trabalhos existentes, grande parte não contemplou as temperaturas reais de um incêndio. Assim, esta é uma área bastante desconhecida e possuem muitas lacunas a serem preenchidas.

Em contrapartida, o comportamento dos concretos convencionais com relação ao atendimento às normas de segurança já é bastante estudado, e suas características conhecidas. Bolina *et al.*(2015) comprovaram que o uso de paredes em concreto armado com resistência de  $f_{ck}$  25 MPa atendeu aos requisitos da norma NBR 10636 (ABNT, 1989). Para isso, os concretos testados tiveram de 10 a 14 cm de espessura, sendo os melhores resultados encontrados para maiores espessuras.

Em trabalho realizado por Antons *et al.*(2012), constatou-se que vigas fabricadas em CT até uma temperatura de 300 °C, parece não haver sofrido impacto sobre a deformação do nível de carga, sendo que, em temperaturas acima dos 300°C, ocorreram variações no desempenho das vigas. Em temperaturas próximas de 620°C ocorreu o maior impacto na variação da deformação do material e das grandes perdas de resistência do compósito. Acima de 620°C se desencadeou a fusão da fibra, levando ao colapso da estrutura. Os testemunhos testados tiveram 40x40x200 mm e cobrimentos dos fios de fibra de vidro AR com 5 mm. Apesar das perdas ocorridas, os autores afirmam que, utilizando fibras impregnadas com resinas, ocorre uma melhora na ligação entre os filamentos e isto pode minimizar os efeitos da temperatura sobre o compósito.

A análise do comportamento ao fogo do CT também foi assunto de estudo de Kapsalis *et al.* (2018), que citam como uma possível desvantagem da construção com CT o fato de que os elementos mais esbeltos são menos capazes de suportar às mesmas cargas de serviço quando combinados com carga de incêndio. Os baixos cobrimentos das fibras, principalmente as de vidro, podem apresentar falhas no sistema, e levar a uma baixa resistência ao fogo. A resistência do CT ao fogo está ligada a vários fatores, como: tipo de matriz, tipo de fibra, tratamento superficial da fibra, tempo de exposição ao fogo, entre outros.

Mas Kapsalis *et al.*(2019) afirmam que o CT tem um potencial grande para uso nas construções, sendo que os tratamentos superficiais das fibras devem sofrer maior evolução a fim de se garantir a proteção do material e ligação entre fibra e matriz cimentícia em altas temperaturas. Esse foi o parâmetro mais crítico encontrado pelos autores em seu trabalho, no qual ocorreram falhas de ligação entre a matriz e as telas de fibra, e estas falhas foram provocadas pela queima do revestimento que protege e dá forma às telas. Os autores trabalharam com diferentes fibras e cobrimentos, e os testemunhos foram expostos ao fogo e testados à flexão em 4 pontos. A Tabela 1 mostra os resultados encontrados.

Tabela 1: Redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade de concretos têxteis expostos a altas temperaturas

Temperatura (°C)	Redução da resistência à compressão	Redução do Modulo de elasticidade
20	-	-
200	5%	23%
400	36%	72%
500	63%	82%
700	71%	85%

Fonte: Kapsalis et al. (2019)

Para Kapsalis *et al.*(2019), ficou claro que a falta de cobrimentos das fibras provocou a perda significativa das propriedades mecânicas do CT, sendo que, em algumas situações, os concretos não apresentaram resistência após exposição às altas temperaturas de, aproximadamente, 520°C, vide Figura 3

Figura 3: Corpos de prova com concreto têxtil expostos a altas temperaturas



Fonte: Kapsalis *et al* (2018)

Legenda: (a) Curvatura dos corpos de prova com carregamento de fogo unilateral e colocação assimétrica do reforço; (b) espécime submetido ao teste de incêndio. As fibras foram facilmente arrancadas com a mão após o teste de flexão do corpo de prova.

Assim, os cobrimentos dos reforços e a impregnação das fibras são importantes para se obter estruturas de maior resistência às altas temperaturas, seja o reforço em fibra ou em aço.

O material básico dos têxteis são filamentos feitos de vidro resistente a álcalis (vidro AR). Os filamentos são agrupados em mechas que, por sua vez, são tecidas em um tecido. E o espaçamento da malha do tecido deve se adequar ao tamanho do grão do concreto para permitir uma penetração total sem peneirar os grãos. A impregnação das mechas é feita por resinas (acrílicas, epóxis, etc.) para dar maior proteção às fibras, melhorar a ancoragem matriz com a fibra e dar forma a malha tecida (HEGGER, KULAS E HORSTMANN; 2011).

### 2.1.3 Matriz cimentícia

A matriz cimentícia possui um papel fundamental na composição do CT, e, normalmente, apresenta alta fluidez, contribuindo para a impregnação dos filamentos, e, quanto mais fluida for a matriz, maior será a capacidade de penetração entre fios. A alta fluidez é obtida com o uso de aditivos, adições pozolânicas e alto conteúdo de pasta na mistura (BROCKMANN, 2005). Altos teores de pastas são mencionados por (Lesovik; Kiyuev; Klyuev, 2015), com a limitação do diâmetro dos agregados, menor do que 5 mm; já Brockmann (2005) adotou diâmetros máximos de agregado de 6 mm.

Para Kulas (2015) a matriz cimentícia possui um papel fundamental na composição do CT:

- sua fluidez penetra nos fios aumentando a resistência do compósito;
- protege a fibra de ataques de agentes agressivos e até de danos causados por batidas, corte, entre outros;
- a matriz dá a aparência externa do compósito, podendo ser cinza, branca, pintada ou pigmentada;
- tem o papel de propiciar um meio adequado para a fibra, aumentando sua durabilidade ao longo do tempo;
- responsável pela resistência dos esforços à compressão do compósito fibra-matriz.

Para Ondrej (2015), os CT, devido ao fato de comporem elementos de baixas espessuras, necessitam de agregados com granulometrias menores do que os concretos convencionais, e resistências à compressão entre 70 a 120 MPa. Para Mechtcherine, Schneider e Brameshuber (2016), o tamanho máximo dos agregados depende da variação do espaçamento entre os fios dos reforços têxteis, espaçamento entre camadas de reforço e geometria do componente.

Na Tabela 2 são apresentadas as características da matriz cimentícia utilizadas por Hegger, Kulas e Horstmann (2011).

Tabela 2: Propriedades de matrizes cimentícias aos 28 dias de idade

Aplicação	Elementos de fachada de tamanho grande	Painéis sanduíches
Tamanho máximo do grão (mm)	5	2
Resistência à compressão (MPa)	70,9	81,9
Resistência à flexão (MPa)	8,3	11

Fonte: (HEGGER; KULAS; HORSTMANN, 2011)

Diversas composições das matrizes cimentícias foram desenvolvidas para produção do CT, tendo em vista os requisitos de trabalhabilidade, ligação adequada ao reforço têxtil, durabilidade, etc. As relações água/aglomerantes mais utilizadas ficam entre 0,3 e 0,4. Os cimentos utilizados podem ser os encontrados no mercado, contudo, pelo fato de o CT ser muito usado na indústria de pré-fabricados, torna-se mais comum o uso de cimentos com resistências iniciais maiores. Também, o cimento branco é uma alternativa bastante utilizada para as matrizes cimentícias, uma vez que melhora o uso de pigmentação e aumenta a riqueza arquitetônica dos projetos. A Figura 4 e Figura 5 exemplificam obras realizadas com variações de cor e formas de painéis executados com CT.

Figura 4: Fachada ventilada com espessura de 20 mm



Figura 5: Fachada ventilada pigmentada com espessura de 40 mm



Fonte: Solidian (2020)

Também, a escolha de cimentos mais puros e com maiores resistências nas primeiras idades justifica-se pela possibilidade do uso de maiores volumes de adições de superpozolanas, uma vez que estas são mais eficientes em cimentos com maior capacidade de gerar  $\text{Ca(OH)}_2$  livre para reagir e podem retardar um pouco o ganho de resistência, dependendo do volume adicionado.

O cimento Portland é formado, essencialmente, por aluminatos e silicatos de cálcio hidráulicos cristalinos, e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio, e até 5% de calcário como uma adição intermediária. A formação do clínquer se dá em altas temperaturas. Por isso, pela sua origem, o concreto é um material extremamente alcalino, o que o caracteriza como uma boa camada de proteção para o aço, pois em ambientes alcalinos não oxida (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A cal livre adicionada no cimento Portland e as reações de hidratação dos silicatos de cálcio são responsáveis pela presença de  $\text{Ca(OH)}_2$  na mistura, e estes são responsáveis pela formação do ambiente alcalino da matriz cimentícia.

#### **2.1.4 Fibras de vidro AR**

No entanto, ao contrário do aço, as fibras não sofrem com oxidação, porém, a de vidro é atacada pela alcalinidade presente na matriz cimentícia. A alcalinidade da mistura é influenciada pela presença de adições pozolânicas, que reagem com os hidróxidos de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), oriundo da hidratação do cimento, modificando o pH da matriz cimentícia e proporcionando um meio menos alcalino e agressivo às fibras de vidro. Lameiras (2007) verificou melhora significativa nas propriedades dos concretos reforçados com fibra de vidro na presença de adições pozolânicas.

Os compósitos reforçados com fibras de vidro foram desenvolvidos, principalmente, para a produção de elementos de pequena espessura. Em fios contínuos, é utilizada impregnada na formação de vergalhões de fibra e resina, e quando picadas são utilizadas dispersas em misturas de argamassa ou concretos (BENTUR; MINDES, 2007). Ainda, a fibra de vidro tem um amplo uso na execução de projetos de engenharia, porém, é sabido que perde sua capacidade resistente quando exposta ao meio na presença de álcalis. A agressão recebida pela fibra comum inviabiliza sua utilização dentro de matrizes cimentícias sem um tratamento adequado. Por isto, se justifica todos os esforços realizados na produção de uma fibra com resistência aos álcalis do cimento, a fim de aumentar a vida útil dos compósitos cimentícios.

O surgimento das fibras AR é resultado de estudos desde a década de 60. Bartos (2017) cita o ano de 1967 como o início dos estudos, pelo Dr. Majumdar, sobre a influência da adição de zircônio na fibra de vidro com a intenção de estender

a durabilidade em meio alcalino da fibra de vidro. Este estudo possibilitou a produção de fibras AR com fins comerciais para uso em matrizes cimentícias.

Conforme Martynova e Cebulla (2018), a necessidade de atender ao mercado promissor do uso de fibras fez com que a empresa britânica Pilkington Brothers, no início dos anos 70, começasse a estudar e desenvolver a fibra de vidro com alto teor de zircônio para reforço de compósitos cimentícios.

Visando entender o comportamento das argamassas reforçadas com fibras de vidro, Majumdar e Nurse (1974) estudaram a influência das fibras de vidro AR na trabalhabilidade dos concretos. Majumdar, West e Larner (1977) estudaram a influência da adição do zircônio na fabricação das fibras de vidro com a finalidade de protegê-la da ação dos álcalis do cimento.

#### 2.1.4.1 Reações dos álcalis com a fibra de vidro

True (1986) ressalta que os concretos com fibras de vidro devem ser vistos como um material diferente e com características específicas, e sua comparação com os concretos convencionais deve ser realizada de com bastante atenção.

A corrosão da fibra de vidro em meio alcalino já é objeto de estudo há um longo período. Ohigashi (1986) propôs um método para estimar a degradação da fibra ao longo do tempo, através de ciclos de aquecimento sobre corpos de prova com fibras inseridas em argamassas. Neste sentido, Orłowsky et al (2005) citam três formas de degradação da fibra de vidro:

##### a) ataque químico

Para a fabricação do vidro AR, é adicionado entre 15 e 18% de zircônio na massa líquida de vidro, e, neste processo, na superfície do vidro AR existe uma concentração mais alta de sódio e uma menor concentração de zircônio; até uma profundidade que pode variar de 10 a 100 nm, e durante o processo de corrosão da fibra a camada sem proteção é atacada, o que leva a uma superfície fraca. Esse processo torna a fibra menos resistente e conforme vai se aproximando da camada na qual o zircônio está mais presente a corrosão do vidro tende a diminuir e estabilizar.

##### b) ataque físico

Acontece devido ao crescimento dos cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$  dentro dos filamentos da fibra de vidro, deixando a fibra com um efeito quebradiço, causando perda de resistência.

### c) fraturas tardias

Falhas no processo de fabricação do vidro causam pequenas falhas nos fios. As fibras, quando solicitadas ao longo do tempo, acabam causando aumento destas pequenas falhas até o corte do elemento.

#### 2.1.4.2 Zircônios como proteção da fibra

O zircônio é um importante material natural, o qual pode ser aplicado em diversos campos, incluindo materiais para estruturas, processos de filtração, suporte de catalisadores, células solares e baterias, eletrônicos, equipamentos nucleares, entre outros (CHENG et al., 2014).

O zircônio possui boas propriedades mecânicas e de grande resistência à corrosão em altas temperaturas, possui estabilidade e pode ser utilizado em diversas áreas, principalmente onde se necessita confiabilidade e reduções de riscos (LOBO; ANDRADE, 2010).

O zircônio tem sua origem no metal zircão ( $ZrSiO_4$ ), no meio ambiente não se encontra na forma pura e precisa passar por um processo de extração, um desses processos é chamado de Kroll, que é um processo desenvolvido para purificação do  $TiO_2$  e foi modificado para a purificação do zircônio.

Para a obtenção do zircônio é utilizado o  $ZrSiO_4$ , que contém Si e outras impurezas, o silício é eliminado através de um banho salino, mantendo apenas o zircônio puro (LAMOTTE; MOURA; NISHIKAWA, 2011).

O uso do zircônio como proteção às fibras de vidro contra o ataque de álcalis já é uma atividade conhecida, desde os anos 70, como retratada por Majumdar e Nurse (1974). O zircônio tem a função de proteger a fibra na presença dos álcalis da matriz cimentícia, uma vez que este é estável neste meio de alta alcalinidade.

O uso de zircônio como adição em fibras é definido pela *DIN EM 15422*, e deve estar entre 15% a 23%, em relação ao peso da fibra. O derretimento do  $ZrO_2$  necessita de uma alta temperatura de fusão, em torno de 2500 °C, o que acaba forçando a fabricação das fibras AR em altas temperaturas, tornando o processo de fabricação complexo, com gastos elevados de energia e custo.

O zircônio impede a formação do hidróxido de cálcio entre os filamentos das fibras de vidro, permitindo que, durante a sua vida útil, o compósito continue sendo dúctil, não passando para a fase quebradiça pelo enrijecimento das fibras

### 2.1.4.3 Fibras de vidro AR curtas

A qualidade do reforço com fibras depende do tipo, dosagens, meio onde serão utilizadas e da matriz cimentícia que interfere na ancoragem da matriz-fibra. As fibras picadas são comumente utilizadas como reforços em concretos estruturais, mesmo com o uso de armaduras de aço convencional (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Com o uso das fibras picadas, algumas propriedades do concreto podem ser melhoradas, dentre elas:

- a) resistência ao impacto;
- b) redução de microfissuras nas primeiras idades do compósito;
- c) redução do aparecimento das fissuras e aumento do tamanho das que existirem;
- d) propriedades de resistência à flexão, ruptura, entre outros.

As fibras curtas são bastante utilizadas em painéis de GRC e são dosadas de 3 a 5% em relação à massa do material. O GRC tem sua origem ligada ao desenvolvimento das fibras de vidro AR, nos anos 1970, desde então é utilizado na fabricação de painéis arquitetônicos sem função estrutural. Este compósito tem como característica boa resistência à flexão e baixa permeabilidade, com variações de formas, sendo uma escolha perfeita para projetos que necessitem leveza e formas diferenciadas (GRCA, 2018).

Diferente do GRC, na qual a fibra curta é responsável por suportar os esforços de uso, nos concretos têxteis as fibras picadas possuem a função de preencher os espaços nos quais as telas não conseguem estar. As fibras picadas, após as solicitações dos esforços, redistribuem e direcionam as cargas recebidas para as telas, que possuem maior resistência. Para Ortlepp (2015), o uso de fibras curtas na matriz cimentícia aumenta o potencial de resistência do CT, unindo as camadas de concreto e tecido. Assim, as fibras curtas exercem a função de interligar as camadas de têxteis, preenchendo os espaços entre as malhas das telas.

Além de melhorar a capacidade resistente da matriz reduzindo o número de fissuras e restringindo sua abertura, as fibras curtas podem aumentar a porosidade do concreto. Yao (2016) traz a importância da fibra curta em matrizes cimentícias para melhorar absorção de forças e energia, contrastando com o aumento na porosidade da matriz cimentícia com perda de resistência. Ainda, o autor atribui às fibras curtas, Figura 6, a redução de trincas e tamanho médio das mesmas.

Figura 6: Fibra curta de vidro Ar 18 mm

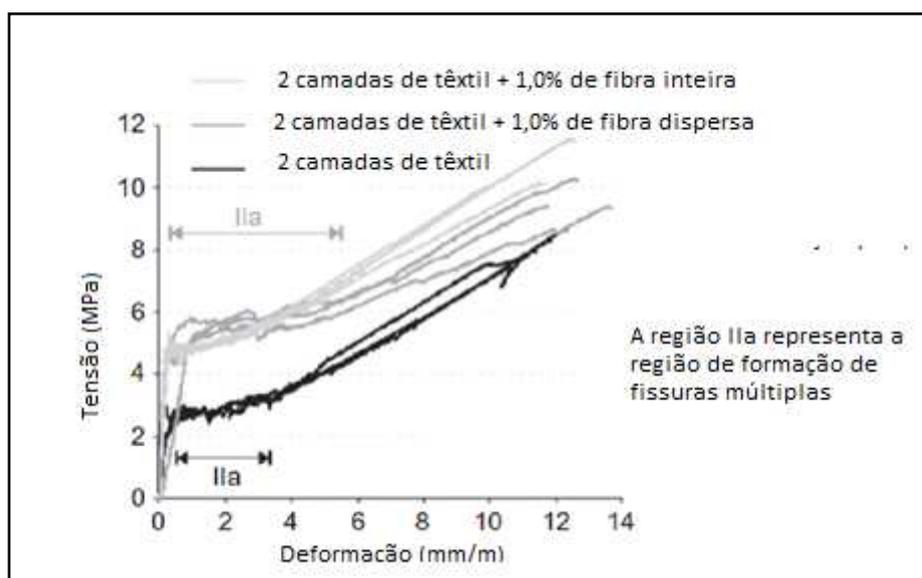


Fonte: Owens Corning (2015)

A dosagem das fibras curtas em CTs foi sugerida em 0,6% por volume nas fibras de carbono ou PVA com 12 mm de comprimento por Ortlepp (2015).

O uso de fibras curtas nas matrizes do CT modifica o comportamento da relação entre a tensão versus deformação. Barhum e Mechtcherine (2013) utilizaram fibras curtas dispersas, adicionadas aleatoriamente com dispersão dos filamentos, e fibras curtas íntegras, cujos filamentos permaneceram unidos durante a mistura, em diferentes matrizes cimentícias, com 1 % de fibra em relação à massa total do material (Figura 7).

Figura 7: Efeitos da adição de fibras curtas de vidro AR dispersas e íntegras no comportamento de tensão-deformação de placas CT submetidas a cargas de tração



Fonte: Barhum e Mechtcherine (2013)

O uso de 0,5 a 1,5% de fibra curta em CT, utilizando telas de basalto, proporcionou aumento no número de fissuras, porém com tamanhos e distâncias

entre elas reduzidas. Ainda, o formato das fissuras mudou de linear para curvo, melhorando a resistência final dos compósitos (ZHU et al., 2019).

Na Tabela 3 são citadas as quantidades de fibras curtas frequentemente utilizadas como adição no concreto.

Tabela 3: Teores de fibras curtas utilizados na bibliografia

Autor	Título	Teor de fibra picada
Zhu et al.(2019)	Efeito de fibras curtas e pré-tensão no comportamento de concreto têxtil com basalto reforçando concreto	Teores de 0,5%,1,0%, e 1,5% para as fibras de aço e carbono; 0,5% para fibra de vidro, em função do volume
Ortlepp (2015)	Maior eficiência do reforço de colunas com concreto têxtil pela adição de fibras curtas na matriz de concreto	Mistura de concretos contendo fibra de PVA ou fibra de carbono na proporção de 0,6% em volume
Barhum R, Mechtcherine V (2013)	Influência das fibras de vidro curtas íntegras e curtas dispersas sobre o comportamento mecânico do concreto têxtil	Conteúdo de fibra 1,0% por volume de concreto
Funke, H., Gelbrich, S., Ehrlich, A.(2013)	Desenvolvimento de um novo material híbrido de têxtil reforçando concreto e fibra de vidro reforçando o plástico	Conteúdo de fibra 0,14% por volume de concreto

Fonte: Autor

#### 2.1.4.4 Tela de fibra de vidro

As telas de fibra, ao contrário das fibras curtas, podem ser fabricadas e posicionadas conforme a orientação dos esforços durante a vida útil da estrutura. O uso de tecidos em forma de telas resinadas melhora o comportamento do compósito, uma vez que, com fibras curtas, a orientação do reforço não pode ser garantida, seja no sistema de pré-mistura da fibra com argamassa e ou no método de projeção.

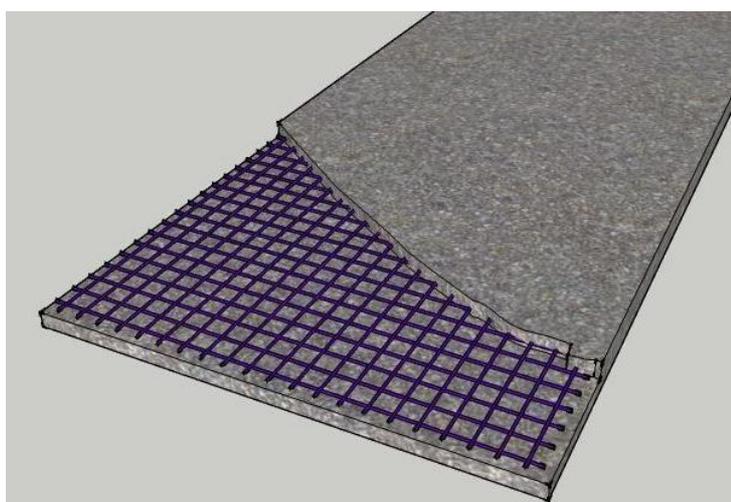
O processo de fabricação das telas passa pela impregnação dos fios de fibra com resinas, que garantem a união e aumento de resistência dos filamentos e a

ancoragem dos fios no perímetro externo dos fios com a matriz cimentícia (SCHEERER et al., 2017). Também, a fabricação da tela é:

Um fio consiste em centenas ou milhares de fibras contínuas até 50.000 em cabos pesados de fibra de carbono (CFHT). Os fios são posteriormente processados, com a ajuda de máquinas têxteis, e fixados como tecidos... com geometrias diferentes, dependendo do uso pretendido... as propriedades mecânicas dos fios têxteis ou grades feitas a partir deles dependem de vários fatores, como o material da fibra e o número de fibras em um fio, revestimento (tipo e quantidade), método de fabricação têxtil e geometria da grade (isso significa, por exemplo, direção dos fios e distância do fio) (SCHEERER et al., 2017).

A orientação das fibras tem um papel fundamental na distribuição das tensões dentro da matriz cimentícia. Com o uso das telas podem ser controladas as direções de maior e menor esforço, e até mesmo o posicionamento das camadas de fibra dentro da matriz, como se observa na Figura 8. Com o direcionamento proposital das fibras se tem um ganho substancial com os concretos com fibras distribuídas de forma aleatória (MEHTA; MONTEIRO, 2014). As fibras distribuídas sem direcionamento tendem a possuir parte do seu conteúdo em direções nas quais os esforços são mínimos, assim perde-se capacidade de reforço, uma vez que parte das fibras não contribui para redistribuição dos esforços recebidos durante o uso.

Figura 8: Matriz cimentícia com uma camada de tela de fibra armada em duas direções



Fonte: autor

Também, Mehta e Monteiro (2014) reiteram que, em algumas situações, a distribuição das fibras em toda a matriz, de forma aleatória, é necessária e em

outras a formação de camadas de fibras direcionadas é de maior relevância para suportar os esforços. Ainda, a perda de trabalhabilidade das matrizes deve ser observada quando os consumos de fibras são elevados.

O CT trabalha com camadas de tecidos espaçadas entre si, substituindo o uso de aço, e os tecidos podem ser pré-tensionados ou tensionados quimicamente. Os têxteis de maior qualidade são os feitos de carbono, porém são os mais caros e com menores capacidades de se aderir à matriz cimentícia.

A pré-tensão dos fios é realizada com a aplicação de uma carga antes da concretagem do compósito, e após um período de cura esta carga é liberada, mantendo o têxtil tensionado dentro da matriz cimentícia.

O uso da pré-tensão dos tecidos tem além da finalizada de ganho de resistência, garantir alinhamento e a correta posição do reforço no compósito. Para REINHARDT et al.(2003) o maior efeito do uso da pré-tensão em CT's está na antecipação da deformação inicial dos tecidos, o número e tamanho das fissuras é reduzido drasticamente, com conseqüente aumento da resistência do compósito.

Os concretos auto-tensionantes são produzidos com cimentos expansivos, esta expansão é restringida pelos fios do têxtil, tornando os tensionados. Para Wang et al.(2016) os concretos têxteis com cimentos expansivos tiveram resultados de tração superiores aos encontrados em matrizes cimentícias convencionais, as principais mudanças apontadas pelos autores foram:

- ✓ aumento de aderência entre o têxtil e a matriz cimentícia;
- ✓ melhora no comportamento a fissuração

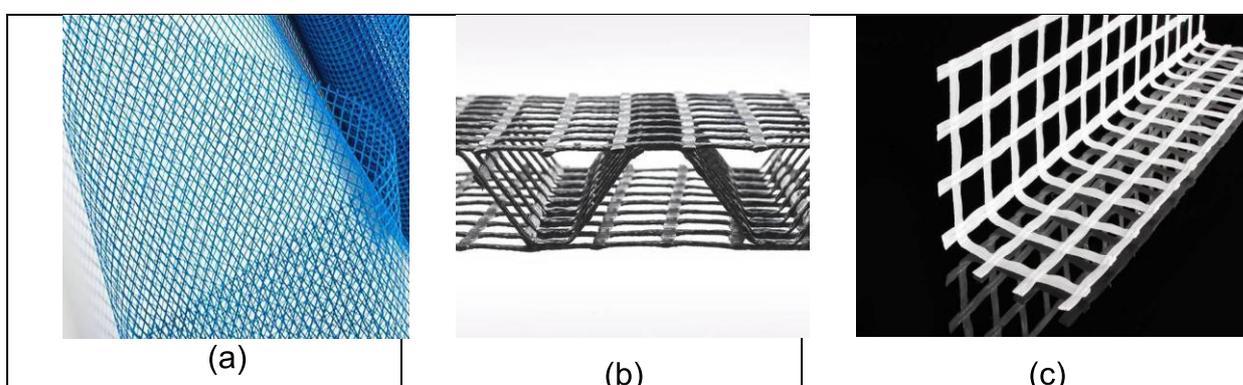
O têxtil é fabricado a partir dos fios de fibra, e os fios são compostos por milhares de filamentos. As fibras ou mechas de vidro consistem em até 2000 filamentos de vidro com um diâmetro de aproximadamente 10 a 25  $\mu\text{m}$  (HÄUSSLER-COMBE; JESSE; CURBACH, 2004).

As características finais das telas estão diretamente ligadas ao método de fabricação, ou seja, as telas podem ter variações devido à origem de produção. A abertura da tela é variável e tem grande importância na resistência do compósito. Para Raupach (2006), a capacidade de resistência de têxteis é determinada pela interação entre os filamentos, entre os filamentos e a matriz cimentícia.

O fornecimento das telas armadas em duas direções é realizado através de rolos com medidas que dependem da abertura do equipamento de tear dos fios. As telas podem ter variação na espessura do fio, espaçamento entre os fios e com ou

sem impregnação com resinas de alto desempenho. Soma-se a isto a possibilidade do fornecimento de telas em três dimensões, na qual o formato da armadura de tela de fibra é garantido pela conformação durante o processo de tear e assegurado a sua forma pós-resfriamento, através das resinas impregnadas durante o processo de fabricação dos tecidos. Além das formas bi ou tridimensionais, as telas podem ser fornecidas como cantoneiras para reforço. A Figura 9 mostra as principais formas de fornecimento das telas de fibra produzidas por empresa localizada na Alemanha.

Figura 9: Tipos de telas fabricadas para uso em CT, tela armada em duas direções (a), tela armada em 3 dimensões (b), cantoneiras de reforço em tela de fibra de vidro(c)



Fonte: Solidian (2020)

A tela é composta por uma malha de fibra de vidro entrelaçada entre si, sendo que os fios que correm em paralelo na maior dimensão do rolo são conhecidos como urdidura, já os que são transversais ao rolo são denominados de trama.

#### 2.1.4.5 Resinas sintéticas como proteção às fibras

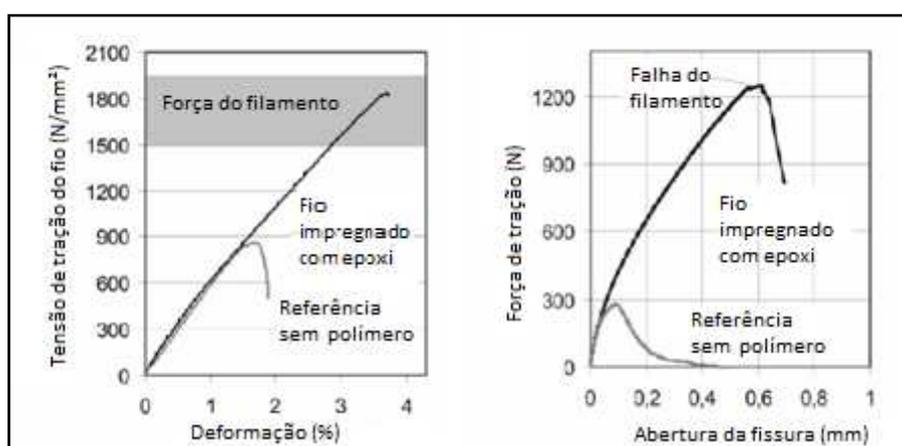
O uso de reforços em fibras e resina é uma solução conhecida e difundida quando da necessidade de interferências para reforços das estruturas existentes. Cauich et al (2019) fizeram uma revisão bibliográfica sobre o uso de fibras e resinas sintéticas como reforços de estruturas, e concluíram que o comportamento destes compósitos sofre influência direta das resinas e suas formulações.

O uso de resinas sintéticas, como as resinas à base de epóxis para envolvimento dos filamentos, é considerado de extrema importância para o desenvolvimento dos CTs. Porque, além de garantir a forma dos fios ou das telas, a impregnação dos filamentos garante um ganho de resistência ao compósito. Raupach (2006) estudou

CT com e sem impregnação dos tecidos e comprovou que os fios envolvidos com epóxi tiveram uma resistência superior quando comparados aos filamentos sem tratamento. A seguir seguem considerações do autor quanto aos resultados encontrados:

- o uso de epóxi impregnando a fibra de vidro aumentou a durabilidade da fibra, uma vez que o contato da fibra com os álcalis foi restringido;
- camadas espessas de impregnação podem prejudicar a ancoragem da fibra e matriz;
- a ruptura dos filamentos sem tratamento com resinas proporcionou uma ruptura mais rápida, ao contrário do modelo de rompimento seguido pelos filamentos com impregnação por resina (vide Figura 10).

Figura 10: Comportamento à ruptura de filamentos de fibra de vidro impregnados com epóxi



Fonte: RAUPACH (2006)

Pode-se concluir que o uso de resinas na impregnação das fibras interfere no módulo de elasticidade do reforço, no ganho de resistência e na ancoragem da fibra (RAUPACH, 2006).

O uso de epóxi como revestimento das fibras é um dos principais métodos utilizados para garantir ganho de resistência dos têxteis envolvidos no concreto. Uma explicação para o fato é que as mechas de fibra são formadas por milhares ou até dezenas de milhares de micro filamentos e nem todos estes filamentos conseguem ser envolvidos pelas argamassas, e as resinas envolvem os filamentos, fazendo com que trabalhem unificados aumentando as resistências finais dos CTs (GAYATHRI; SINGH; DHANALAKSHMI, 2018).

A produção dos CT pode ser realizada por laminação, com o uso de telas têxteis e argamassas projetadas ou lançadas manualmente. O número de camadas de telas depende do projeto e considera as cargas de uso, e a espessura de cada camada depende da resistência necessária para garantir a transmissão da força entre o fio e o concreto, espessura da tela e a resistência à tração necessária do conjunto (SCHEERER et al., 2017).

O CT normalmente é produzido com o uso de uma matriz cimentícia com grande trabalhabilidade, consumos grandes de aditivos superplastificantes e altos teores de finos para diminuir a segregação dos concretos. O método de fabricação deve considerar o tipo de projeto a executar:

- a) peças planas e pequenas: laminação direta com uso de spray de argamassa cimentícia ou liberação direta da matriz cimentícia sobre as telas de fibra. Esse método pode ser considerado o mais simples de ser executado, sem grandes exigências de espaço, equipamento e de mão de obra. Contudo, para obras de estruturas mais complexas se torna um método bastante lento e artesanal;
- b) peças em grandes dimensões com armaduras mais complexas: matriz com alta trabalhabilidade e grandes concentrações de aditivos superplastificantes. Para obras mais complexas se exige uma estrutura de produção maior, espaço maiores e melhores, e uso de equipamentos para dosagens e maior capacidade de produção.

## **2.2 Envelhecimento acelerado das fibras**

Para o entendimento do comportamento dos concretos reforçados com fibra de vidro AR faz-se necessário o conhecimento de desempenho da fibra de vidro AR ao longo do tempo, a fim de garantir a vida útil das estruturas. Xiaochun; Xiaomin e Xiaope (2017) realizaram experimentos com corrosão acelerada para verificar o comportamento da fibra de vidro resistente aos álcalis em argamassa de cimento. Os experimentos foram realizados em amostras de argamassas com adição de fibra de vidro e o envelhecimento acelerado utilizando ciclos de água quente a 80 °C. Ainda, foram utilizadas adições pozolânicas na composição da matriz cimentícia como alternativa para diminuir a alcalinidade da argamassa, criando um ambiente mais favorável e menos agressivo para as fibras de vidro. As conclusões do trabalho foram que as fibras sofreram degradações com o envelhecimento desde o primeiro

dia até o terceiro, e ganhos de resistências posteriores dependeram das reações de hidratação na matriz cimentícia.

Para Litherland, Oakley e Proctor (1981), as predições de resistência dos compósitos reforçados com fibras ao longo do tempo são baseadas em três fatores principais:

- a) resistência à tração direta dos fios de fibra de vidro AR em ambientes cimentícios após exposição a condições quentes e úmidas;
- b) resistência do compósito formado por matriz cimentícia e fibra de vidro AR em condições similares de agressividade;
- c) resistência direta dos fios de fibra de vidro AR em condições reais de clima.

Ainda, Hegger et al (2010) fizeram avaliações da durabilidade das fibras de vidro AR com e sem impregnação com resina epóxi, e os resultados encontrados com a utilização de banhos em água quente das amostras, a uma temperatura de 50°C, simulando temperaturas de verão na cidade de Balingen, apresentaram perda de 30% da resistência inicial para vida útil de 50 anos, sendo que as fibras impregnadas com epóxi tiveram uma perda de resistência ao envelhecimento acelerado aproximadamente 50 % menores quando comparadas às sem impregnação. Ainda, segundo os autores a previsão da durabilidade das fibras é de fundamental importância durante a avaliação do projeto.

No mesmo caminho, Butler, Mechtcherine e Hempel (2009) analisaram a durabilidade das fibras de vidro AR nos períodos de 28, 56, 90, 180 e 360 dias na temperatura de 40°C, e encontraram perdas próximas de 40% para força de trabalho em alguns concretos têxteis avaliados, o que são justificadas com a alcalinidade dos poros do concreto. Também observaram, a precipitação de cristais  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  entre os filamentos das fibras, o que provocou um rompimento prematuro dos filamentos pelo encunhamento desses cristais.

Nobili (2016) trabalhou com dois tipos de matrizes cimentícias com diferentes composições, e os corpos de prova foram curados por 28 dias em temperatura de 20 graus e posteriormente emergidos em água com presença de alcalinidade e acidez por um período de 100 horas, sobre a temperatura de controle de 23 °C. Constatou-se uma pequena variação estatística entre as variações propostas, dois tipos de matriz cimentícia e variação da alcalinidade do meio.

A ASTM C 1560 (2013) propõe um método para análise do comportamento das fibras de vidro através do ensaio de envelhecimento acelerado através de ciclos de água quente. A ASTM C 1560 (2013) descreve o método como:

“Este método de teste fornece uma maneira de acelerar o envelhecimento de compósitos cimentícios reforçados com fibra de vidro a fim de desenvolver dados que simulem o intemperismo natural ”...

A base do método proposto pela ASTM (2013) consiste em que o aumento da temperatura e a presença de umidade aceleram a formação dos produtos resultantes da hidratação do cimento, particularmente hidróxidos de cálcio que são prejudiciais à fibra de vidro. Ainda, a norma restringe o uso do método acelerado para matrizes com presença de aditivos especiais, tais como polímeros acrílicos, que podem mascarar os resultados quando comparados aos testemunhos em exposição natural de tempo.

O uso de métodos de análise de predição do comportamento dos materiais quanto ao tempo é uma alternativa bastante utilizada para entender o desempenho dos materiais, tornando possível a interferência visando melhorar a qualidade e as características dos materiais analisados. O uso de métodos de envelhecimento acelerados muitas vezes é a maneira mais econômica e viável, quando se precisa previsões de comportamento das estruturas de concretos com fibras (PURNELL, 2004).

A utilização do método de envelhecimento acelerado contribui para a geração de hidróxido de cálcio em maiores velocidades, e o principal mecanismo que ocorre é que o hidróxido de cálcio se forma entre os filamentos de fibras, unindo-os de tal forma que reduz sua capacidade de deformação do compósito, reduzindo a resistência do compósito e alterando suas características de ductilidade para material quebradiço. Acelerar a hidratação do cimento aumenta a interação com a fibra, o que acaba envelhecendo o compósito (ASTM C 1560 2013).

Majumdar e Nurse (1974) estudaram as características de fibras de vidro através do envelhecimento acelerado, sendo que as amostras de concreto com fibras foram colocadas em solução saturada de NaOH e  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  com temperatura da água em  $100^\circ\text{C}$  e tempo de exposição de 90 min. e 240 min., respectivamente. No estudo referido, as fibras de vidro AR tiveram um bom comportamento após ensaio de envelhecimento acelerado, mantendo as propriedades dos compósitos bem superiores quando comparadas a fibra de vidro E.

Proctor, Oakley e Litherland (1982) trabalharam com envelhecimento acelerado, utilizando fatores de conversão de tempo acelerado em laboratório com a passagem do tempo na escala real, ou seja, nas condições de uso do dia a dia. Na Tabela 4 estão os valores adotados e utilizados no estudo realizado.

Tabela 4: Fatores de envelhecimento acelerado para o ambiente de uso em Reino Unido

Temperatura de exposição	Tempo equivalente exposto ao meio ambiente	
	Dias	Anos
1 dia à 80 °C	1672	4,6 anos
1 dia à 70 °C	693	1,9 anos
1 dia à 60 °C	272	9 meses
1 dia à 50 °C	101	3,5 meses

Fonte: Adaptado de Proctor, Oakley e Litherland (1982)

O prévio conhecimento do desempenho dos concretos com fibras foi objetivo de estudo de Orlowsky et al. (2005), que trabalharam com a simulação do comportamento das fibras ao longo do tempo. Para tanto, se utilizaram de equações fundamentadas em análises de envelhecimento acelerado com base no ataque sofrido pelos de filamentos de fibra de vidro mergulhadas em soluções alcalinas e temperatura da água em 50°C. Ainda, corpos de prova foram imersos em água destilada a fim de comparar os resultados obtidos. Com isso, os dados encontrados foram compilados e uma equação foi gerada, e essa equação se mostrou válida para conhecimento do desempenho das fibras ao longo do tempo.

Jamshaid et al.(2017) trabalharam no envelhecimento acelerado de concretos com variação no tipo de fibra, tempo de exposição, pH e tipo de solução alcalina. Para tanto, se utilizou soluções de NaOH e Ca(OH)<sub>2</sub> em temperatura ambiente. As fibras utilizadas foram basalto, polipropileno, poliéster e juta. Os resultados encontrados mostraram que os ensaios foram eficientes e puderam comprovar que a fibra de basalto pode ser uma boa alternativa para a fabricação de concretos têxteis em meio alcalino.

O concreto têxtil pode ser considerado um material com três fases, matriz cimentícia, fibras e interface matriz com fibra. Este material hidrogênio pode ser exposto a vários modos de degradação durante sua vida útil, que pode ocorrer individualmente ou simultaneamente em todos os componentes (PORTAL et al., 2016). Os mesmos autores realizaram análises de durabilidade dos compósitos de

CT utilizando método de envelhecimento acelerado. O método adotado pelos autores foi a simulação do meio alcalino do concreto com variação de temperatura de acordo com a ISO 10406-1.

O método descrito pela ISO 10406-1 é destinado para a avaliação do comportamento dos polímeros reforçados com fibras como reforços em concretos ou pré-tensionados (ISO 10406-1, 2015).

Envelhecimento acelerado de matrizes contendo fibras de vidro AR mergulhadas em solução alcalina com uso de ciclos de temperatura foram estudados por Purnell (1998), buscando analisar a redução da formação de  $\text{Ca(OH)}_2$  com modificação da composição das matrizes cimentícias.

A Tabela 5 mostra um resumo de métodos de envelhecimentos acelerados de concreto reforçados com fibras encontrados na literatura.

Tabela 5: Métodos de envelhecimento acelerado utilizados na literatura

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Método referência</b>
LITHERLAND <i>et al.</i> (1981)	O uso de procedimentos de envelhecimento acelerados para prever a resistência ao longo tempo de compósitos de GRC	
PURNELL (1998)	A durabilidade do concreto reforçado com fibra de vidro feito com novas matrizes cimentícias	LITHERLAND; OAKLEY; PROCTOR (1981)
PURNELL (2004)	Interpretação das variações de temperatura climática para modelos de envelhecimento acelerado	BRITISH STANDARDS INSTITUTE, DD EN 1170-8:1997
ORLOWSKY <i>et al.</i> (2005)	Modelo da durabilidade de reforço de fibra de vidro em ambiente cimentício	-
RAUPACH (2006)	Têxteis impregnados com epóxi em concreto - capacidade de carregamento de carga e durabilidade	-
ENFEDAQUE <i>et al.</i> (2010)	Análise de fraturas nas superfícies de concreto reforçado com fibra de vidro (grc)	LITHERLAND; OAKLEY; PROCTOR (1981)
NOBILI (2016)	Avaliação da durabilidade de compósitos de matriz cimentícia reforçada de tecido de vidro impregnado (GFRCM) em ambientes alcalinos e salinos	
PORTAL <i>et al.</i> (2016)	Comportamento à tração de reforço têxtil sob condições de envelhecimento acelerado	ISO 10406-1
MOCEIKIS <i>et al.</i> (2018)	Modelos de envelhecimento e testes de envelhecimento acelerados de concreto reforçado com fibra de vidro	
ASTM C 1560	Método de teste padrão para envelhecimento acelerado por água quente em concreto reforçado com fibras de vidro	ASTM C 947/ ASTM C 6128

Fonte: Autor (2021)

Conforme verificado, a análise da durabilidade dos concretos com fibras é tema de pesquisa de diversos autores além dos referenciados acima (KAPSALIS *et al.*, 2019); (MACHOVEC; REITERMAN, 2018); (MARTYNOVA; CEBULLA, 2018);

(XIAOCHUN; XIAOMING; XIAOPEI, 2017); (CAUICH et al., 2019); (BUTLER; MECHTCHERINE; HEMPEL, 2009);(HEGGER et al., 2010); (NOBILI, 2016).

Nos itens abaixo se apresenta um resumo dos principais métodos de envelhecimentos de fibras envolvidas em matrizes cimentícias utilizados na literatura.

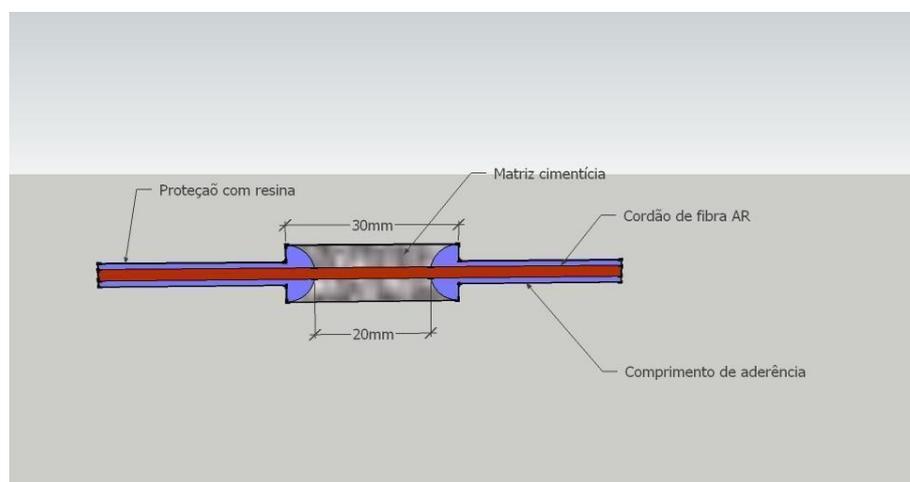
### 2.2.1. Método proposto por Litherland, Oakley e Proctor (1981)

Durante os anos 1980, o uso de fibras álcali resistentes era uma realidade recente e necessitava de análises quanto à durabilidade em meio alcalino. Litherland, Oakley e Proctor (1981) desenvolveram um método para medir a resistência à tração dos fios de fibra em ambiente alcalino. O envelhecimento dos fios de fibra foi acelerado através do uso de ciclos de água quente, e os resultados encontrados foram comparados com o envelhecimento em ambiente natural e uma predição da vida útil da fibra foi realizada.

O método propõe o envolvimento do fio de fibra de vidro com matriz cimentícia, sendo que a parte em que a fibra fica desprotegida é tratada com resina, para garantir que não sofra alteração durante a aplicação dos ciclos de água quente e prejudique a análise dos resultados.

A Figura 11 mostra o esquema do corpo de prova de fibra envolvido na matriz cimentícia e protegida pela resina epóxi.

Figura 11: Esquema do corpo de prova de fibra envolvido na matriz cimentícia e protegida pela resina epóxi



Fonte: Adaptado de (LITHERLAND; OAKLEY; PROCTOR, 1981)

Os corpos de prova são curados em temperatura e umidade controladas até a data do rompimento. As extremidades dos fios são presas em um equipamento com garras pneumáticas, e a resistência à tração do fio é calculada a partir da carga de ruptura e também a perda de massa da fibra é medida durante o ensaio (tex).

Para análise da perda de resistência da fibra, os autores propuseram a imersão de vários grupos de testemunhos em água a várias temperaturas (25-80 °C e períodos de 1 -12 meses de imersão).

Os autores propõem uma relação do tipo Arrhenius entre o tempo necessário para que a resistência do fio e argamassa caia para um determinado valor em um tempo de teste acelerado específico e a temperatura desse teste é dada pela equação abaixo:

*i.e. Log10 (tempo para alcançar  $\sigma_{SIC}$ )  $\propto 1/T$  onde:*

T é a temperatura absoluta do teste de envelhecimento acelerado;

$\sigma_{SIC}$  é a resistência esperada;

Com a equação acima se propõe uma predição dos valores de resistência da fibra ao longo do tempo sem perdas significativas em relação ao encontrado nos testes realizados para uma mesma família.

Purnell (1998) afirma que, apesar de o método citado conseguir prever apenas perdas de resistência na tração, a utilização do envelhecimento acelerado através de ciclos de água quente continua sendo o método que melhor consegue prever o comportamento das fibras de vidro AR em meio alcalino.

### **2.2.2 ASTM C 1560- método de teste padrão para envelhecimento acelerado de compósitos com fibras de vidro**

Este método é utilizado para acelerar o envelhecimento de compósitos cimentícios reforçados com fibra de vidro, a fim de desenvolver dados que representem o desempenho do concreto ao longo da sua vida útil. Para tanto, a norma se vale da ASTM C 1228 para preparação dos corpos de prova e da ASTM C 947 para rompimento à flexão em seção fina dos concretos reforçados com fibra de vidro. A seguir, o resumo do método:

- a) a base deste ensaio está em utilizar a temperatura e umidade controlada para acelerar a liberação de produtos oriundos das reações de hidratação do cimento, principalmente hidróxidos de cálcio;

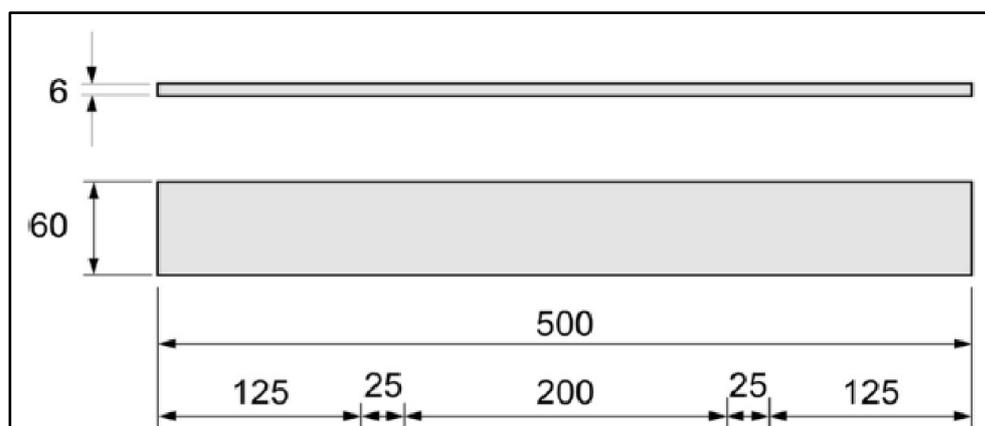
- b) os principais equipamentos utilizados são fonte de calor com controle de temperatura e recipientes para imersão dos corpos de prova;
- c) os intervalos de imersão podem ser: 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 ou mais dias, e o teste pode ser considerado completo quando o dobro do período mostrar menos de 5% de perda na resistência à flexão, ou o decréscimo de tração apresentar menos de 10 % de diferença;
- d) os corpos de prova devem ser preparados conforme ASTM C 1228 - Prática para preparar corpos de prova para testes de flexão e lavagem em concreto reforçado com fibra de vidro;
- e) os corpos de prova podem ser produzidos em moldes padrão ou cortados de painéis já existentes, e todos os corpos de prova devem ser submetidos aos mesmos processos de cura até a idade padrão de 28 dias;
- f) os testes de resistência dos testemunhos envelhecidos em ciclos de água quente ou em cura normal seguem o especificado na ASTM C 947;

### **2.3 Recomendações de RILEM TC 232-TDT**

Este método proposto por RILEM descreve um modelo de tração uniaxial padronizado para determinar o comportamento de suporte de carga de amostras de concreto têxtil. Mede o comportamento de deformação da carga de concreto armado com têxteis sob carga elástica uniaxial com fibras alinhadas paralelamente à direção da carga. A resistência do tecido, a primeira tensão de ruptura do concreto, bem como a curva de tensão deformação da amostra, podem ser determinadas a partir dos dados de teste.

Também, este método pode ser utilizado para rompimento de testemunho em cura normal ou em envelhecimento acelerado. Os corpos de prova devem ser preparados conforme Figura 12.

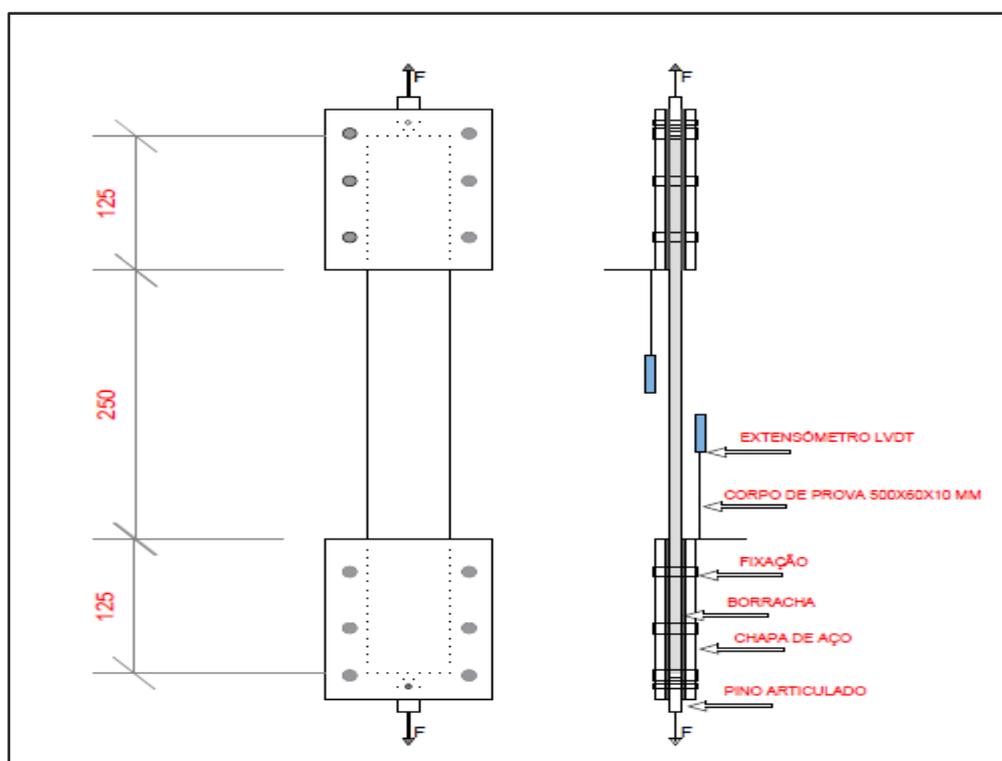
Figura 12: Dimensões dos corpos de provas para testes de tração direta



Fonte: Rilem (2016)

O rompimento e preparação dos corpos de prova no equipamento devem ser realizados conforme Figura 13. Resultados alcançados por este método apresentam os valores de tensão e deformação do concreto têxtil, indicando a rigidez do material de reforço.

Figura 13: Modelo do dispositivo para a ensaio de tração direta



Fonte: autor

### 3. MATERIAIS E MÉTODO

Este trabalho é uma pesquisa experimental, que possui o intuito de avaliar o comportamento das telas fabricadas em fibra de vidro AR utilizadas em concreto têxtil, através do envelhecimento acelerado com uso de ciclos de variação de temperatura ao longo do tempo.

Para isso, foram utilizados ensaios de envelhecimento acelerado, através de variação de temperatura, conforme ASTM C 1560 (2013), pois se mostra capaz de prever o comportamento das estruturas reforçadas com fibras de vidro AR em meio alcalino, ao longo do tempo.

Assim, baseado na literatura, o método para envelhecimento acelerado escolhido foi o sugerido pela ASTM C 1560, este padrão para envelhecimento acelerado com água quente de compósitos à base de cimento reforçado com fibra de vidro; e os ensaios para avaliar a resistência à flexão seguiram as recomendações da RILEM TC 232-TDT - Método para teste e projeto de têxtil reforçando concreto.

As variáveis de controle aplicadas no trabalho e as variáveis fixas estão descritas a seguir:

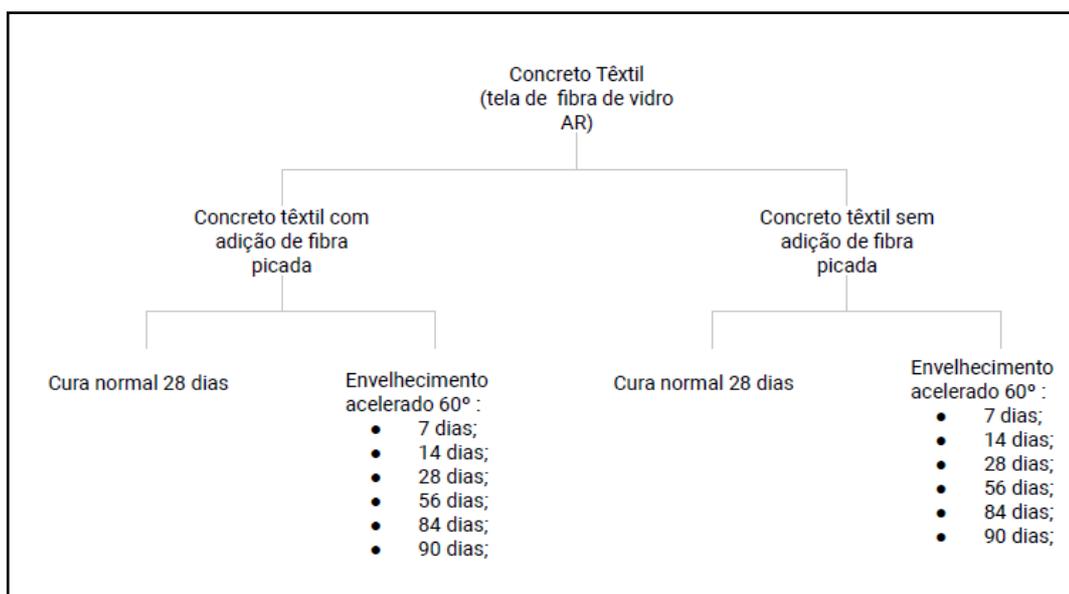
Variáveis fixas:

- a) matriz cimentícia;
- b) temperatura do forno para envelhecimento dos corpos de prova em 60°C;
- c) tipo de cura normal 28 dias;
- d) tipo e volume de fibra curta;
- e) tipo de tela de fibra de vidro (AR) como reforço têxtil;
- f) espessura dos corpos de prova 10 mm.

Variáveis de controle (Figura 14):

- a) matriz cimentícia e fibra de vidro AR picada no teor de 1.0% em volume com tela de fibra de vidro AR como reforço têxtil;
- b) matriz cimentícia e tela de fibra de vidro AR como reforço têxtil sem fibra de vidro AR picada;
- c) idades de envelhecimento acelerado de 0, 7, 28, 56, 84 e 90 .

Figura 14: Macrofluxo de variáveis de controle



Fonte: autor

### 3.1 Materiais

O trabalho experimental se desenvolveu com os materiais de uso comum na construção, exceto a fibra de vidro AR.

#### 3.1.1 Fibra picada

O volume de fibra de vidro AR picada utilizada no estudo segue a literatura, que traz como limite de consumo os valores entre 0,6 e 1% dosados em volume sobre toda a mistura. Assim, o valor de 1% adotado segue os limites normalmente utilizados.

Para o concreto têxtil, podem ser utilizados, além das fibras de vidro, outros tipos de fibras, tais como PVA, polietileno, polipropileno, aço, entre outras, porém, o intuito foi de verificar a durabilidade das fibras de vidro AR, a mais utilizada para este concreto.

A fibra escolhida foi a Cem-FIL® 60.3, 18 mm de comprimento, Figura 15, que é uma fibra preparada especificamente para misturas em matrizes cimentícias, com uso característico em situações que necessitem vibrações e/ou auto adensabilidade da matriz. Essa fibra recebe um tratamento com resinas que envolvem os fios, deixando-os unificados durante a mistura, evitando a quebra dos feixes de fios, que

acabam diminuindo a trabalhabilidade da matriz cimentícia, trazendo perdas de resistência pela má distribuição das fibras ao longo da matriz cimentícia.

Figura 15: Fibra curta Cem Fil 60.3, 18 mm



Fonte: autor

### 3.1.2 Tela de fibra de vidro AR

Para a escolha da tela, se considerou a disponibilidade no mercado brasileiro, gramatura, peso e composição química da fibra. No mercado nacional ainda existem poucas empresas que trabalham com telas de fibra de vidro, algumas importam as telas de outros países, outras pegam o fio AR e fazem a tecelagem da fibra, e também algumas trabalham com fio de fibra E revestida com resinas sintéticas. Porém, como o objetivo do trabalho é estudar a durabilidade dos têxteis em material cimentício, a fibra de vidro E não foi utilizada.

Com isso, a tela escolhida como reforço para o CT é a AR-192-RA-04, produzida pela empresa Texiglass, através da tecelagem da fibra de vidro AR, e suas características destas seguem na Tabela 6.

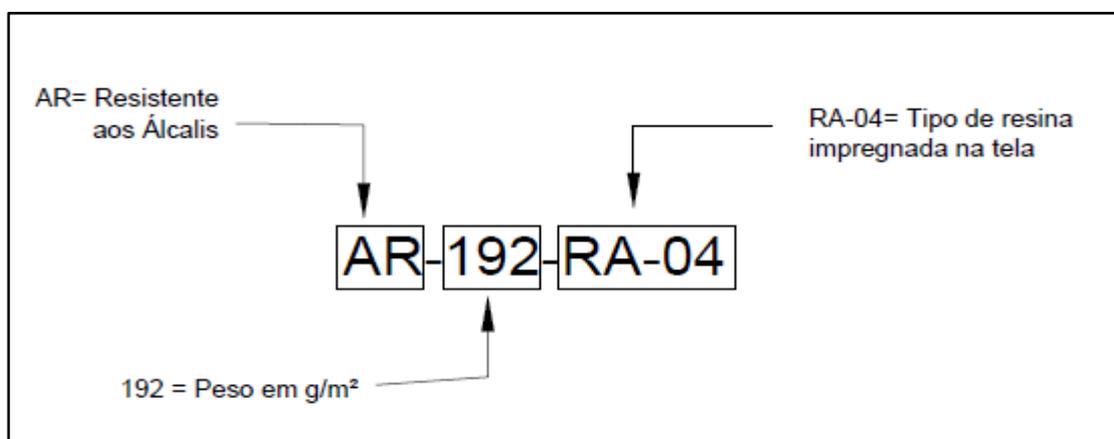
Tabela 6: Características técnicas das telas fabricadas por Texiglass

	Peso (g/cm <sup>2</sup> )	Abertura da malha(mm <sup>2</sup> )	Área do fio(mm <sup>2</sup> )	Densidade linear (TEX)
AR-192-04	192	5x5	0,23	640

Fonte: adaptado de Texiglass

A tela utilizada possui nomenclatura definida pela empresa e seus significados seguem abaixo (Figura 16).

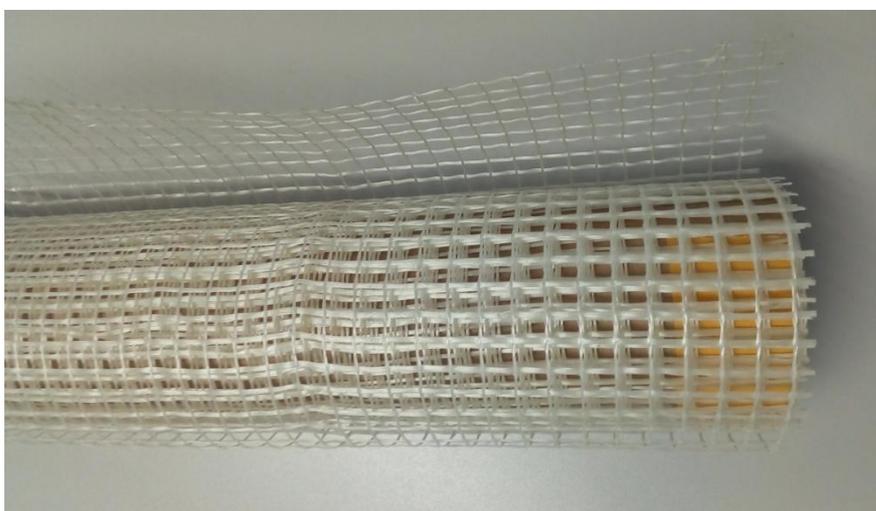
Figura 16: Nomenclatura da tela de fibra de vidro



Fonte: autor

. Na Figura 17 é apresentada a tela AR 192-RA- 04, impregnada com resina acrílica, que foi utilizada no trabalho experimental. Para a pesquisa, foi utilizada a tela apenas na direção da urdidura, sem variação no sentido no tear das fibras.

Figura 17: Rolo de tela de fibra de vidro AR (tecido)



Fonte: autor

### 3.1.3 Cimento

Foi utilizado nesta pesquisa o cimento Portland cinza de alta resistência inicial CPV-ARI. Este cimento foi escolhido porque possui maior teor de clínquer e isso significa:

- obter maiores resistências nas primeiras horas, que contribui para saques dos painéis em menor tempo de cura;
- cimentos mais puros possibilitam o uso de adições pozolânicas, que melhoram as propriedades do concreto ao longo do tempo.

A dosagem da sílica ativa na matriz cimentícia contribui para o aumento da durabilidade da fibra de vidro, através da redução da alcalinidade da matriz de cimento, ressaltando que o vidro está suscetível à ação dos álcalis provenientes da hidratação do cimento.

### 3.1.4 Agregado miúdo

A areia utilizada na pesquisa teve origem na região do Vale dos Sinos / RS, e é de origem quartzosa. É um material com uma qualidade superior ao encontrado nas lojas de materiais de construção, possui maior pureza e é isenta de matéria orgânica (Figura 18).

Figura 18: Areia utilizada na pesquisa



Fonte: autor

A caracterização do agregado miúdo segue na Tabela 7, Tabela 8 e Figura 19.

Tabela 7: Análise granulométrica da areia

Peneira # mm	Retida (%)	Retida acumulada (%)
2,36	0,1%	0%
1,18	0,5%	0,6%
0,6	0,3%	0,9%
0,3	12,0%	12,9%
0,15	66,0%	78,9%
0,075	15,6%	94,5%
Fundo	5,5%	100,0%

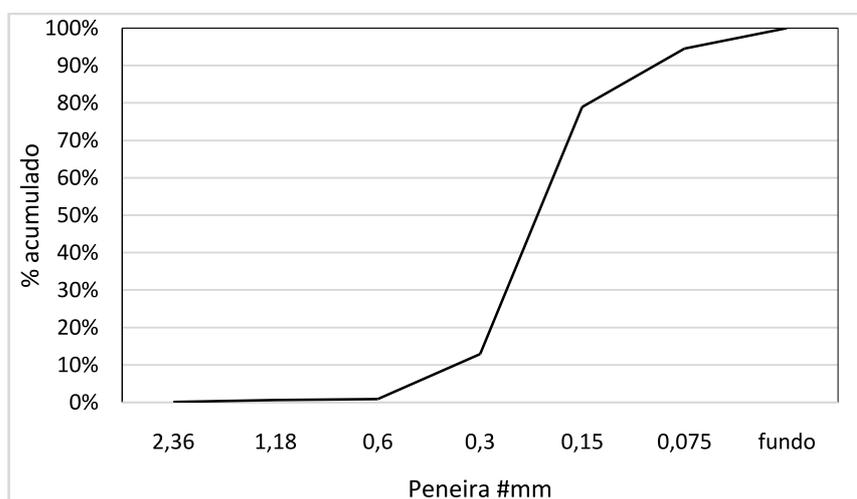
Fonte: autor

Tabela 8: Propriedades físicas da areia

Propriedade	Valor
Módulo de finura	0,93
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	1380
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2480
Diâmetro máximo (mm)	0,6

Fonte: autor

Figura 19: Curva granulométrica acumulada da areia



Fonte: autor

### 3.1.5 Sílica ativa

A sílica ativa possui propriedades benéficas ao concreto, como:

- maior reatividade;
- geometria arredondada com contribuição do aumento da trabalhabilidade do concreto;
- pode ser dosada em menor quantidade quando comparada à outras adições pozolânicas;
- aumenta durabilidade do concreto;
- redução do calor de hidratação;

Para a pesquisa desenvolvida, a sílica ativa utilizada foi a da Downsil Sílica Fume CR, que é comercializada nacionalmente e bastante utilizada nas construções que necessitem de desempenhos diferentes nos concretos. As especificações seguem na Tabela 9.

Tabela 9: características técnicas da sílica ativa

Características técnicas do produto:	
Teor de SiO <sub>2</sub> (%)	>85
Densidade aparente (g /cm <sup>3</sup> )	0,35
Diâmetro médio (µm)	0,4
Massa específica (t/m <sup>3</sup> )	2,22
Área específica (m <sup>2</sup> /kg)	20000
PH	10

Fonte: Downsil, 2020

### 3.1.6 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante *Power flow 4000* da MC Bauchemie de alto desempenho com capacidade de grande redução de água foi o utilizado nas dosagens. Seu consumo foi de aproximadamente 1,4%, sendo sua adição controlada até atingir o abatimento do tronco de cone especificado. Na Tabela 10 seguem as especificações conforme o fabricante.

Tabela 10: Propriedades do aditivo superplastificante

Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,12
Cor	Marrom
Estado	Líquido

Fonte: MC-Bauchemie, 2020

### 3.1.7 Fôrmas de moldagem

As fôrmas utilizadas na moldagem foram de concreto com pintura epóxi, que são comumente utilizadas para a fabricação de painéis arquitetônicos em GRC. Essas foram utilizadas pela disponibilidade no local e pela facilidade em se moldar tamanhos maiores de corpos de prova e, após a cura, cortá-los (Figura 20). Com isso, o número de concretagem foi menor, não sendo necessárias várias moldagens para o programa experimental, apenas duas foram suficientes para preencher os corpos de prova.

Figura 20: Fôrma de concreto para moldagem das placas de concreto têxtil



Fonte: autor

## 3.2 Método

### 3.2.1 Programa experimental

O programa experimental foi definido em função do tempo necessário para preparação dos ensaios, recursos de laboratório, uma vez que, para realizar o envelhecimento acelerado do concreto é necessário manter a água aquecida em uma temperatura constante, e o volume necessário foi de aproximadamente 200 litros de água para garantir a imersão de todos os corpos de prova

A ASTM C 1560 sugere como número de testemunhos para ensaios de envelhecimento acelerado 6 corpos de prova por idade, sendo que aos 28 dias de cura normal foram moldados 4 unidades, e assim foi montado o programa experimental. Na Tabela 11 está o resumo do programa experimental, com o número de corpos de prova para ensaios à tração direta e tração na flexão em 4 pontos nas idades sugeridas 28 dias de cura normal, com 7, 28,56,84 e 90 dias de envelhecimento acelerado à 60 °C.

Tabela 11: Número de corpos de provas ensaiados

Dosagem	Método de ensaio	Nomenclatura	Total de cps
Traço com fibra	Ensaio de flexão	TCF/ F	34
Traço com fibra	Ensaio de tração direta	TCF/ T	34
Traço sem fibra	Ensaio de flexão	TSF/ F	34
Traço sem fibra	Ensaio de tração direta	TSF/T	34

Fonte: autor

Como análises de desempenho serão avaliados os resultados:

- resistência à tração na flexão em 4 pontos;
- resistência à compressão;
- resistência de tração direta;
- limites de proporcionalidade (pontos de ruptura da primeira fibra);
- simular vida útil através da curva tensão deformação e tensão deslocamento;

### 3.2.2 Dosagem da matriz cimentícia

A matriz cimentícia foi dosada conforme traço utilizado no trabalho de Ortolan, Mancio e Tutikian (2016), e repetido no trabalho de Ortolan (2021).

A escolha deste traço se deu pelo fato de que Ortolan (2021) analisou as resistências dos concretos têxteis com variações no número de camadas de fibra de vidro AR, assim foram comparados os resultados encontrados naquele trabalho com os encontrados em corpos de prova com expostos ao envelhecimento acelerado.

A Tabela 12 apresenta o traço unitário, consumo de material por m<sup>3</sup> da matriz cimentícia utilizada:

Tabela 12: Traço unitário da matriz cimentícia

	Traço unitário	Consumo (m <sup>3</sup> )	und
Cimento CPV	0,93	550	kg
Sílica ativa	0,07	39,5	kg
Areia	2,10	1239	kg
Água	0,40	236	l
Aditivo	1,35%	7,98	kg
Fibra de vidro AR	1%	26,46	kg

Fonte: autor

A diferença do traço referência para o estudo realizado neste trabalho está no uso de fibra picada, sendo que uma dosagem teve a presença de 1% dosada em volume de fibra AR picada e outra somente argamassa com o traço citado.

O espalhamento determinado para a matriz cimentícia foi acima de 600 mm conforme Ortolan (2021). Porém neste trabalho foi utilizado o mini slump como referência, e a trabalhabilidade foi ajustada para dar auto adensabilidade à mistura, mantendo sempre a relação a/c e aumentando o consumo de aditivo superplastificante.,

#### 3.2.2.1 Preparação da matriz cimentícia

Todos os insumos foram pesados e misturados separadamente da fibra, e para a dosagem de fibra de vidro AR curta, quando necessário, se utilizou agitador mecânico, com dispersão fracionada. Durante este processo, se tomou o cuidado

para não adicionar toda a fibra de uma só vez, a fim de garantir que a fibra seja envolvida completamente pela matriz cimentícia, sem acúmulos ou ninhos. Também, o tempo de batida da fibra curta foi estipulado para não exceder 60 s, para não quebrar as fibras curtas, metodologia adotada na fabricação de misturas para GRC.

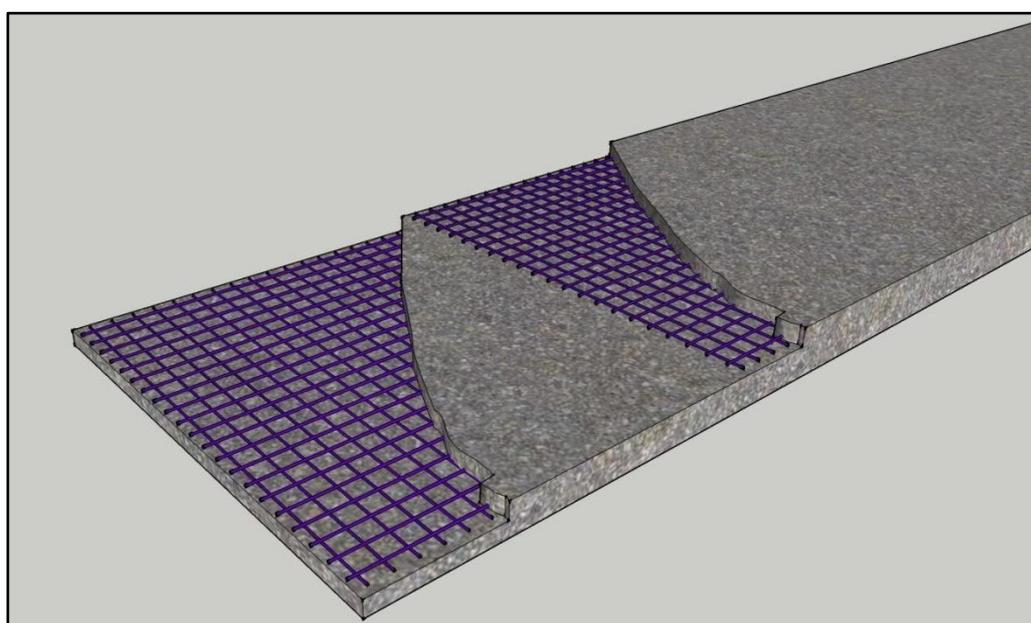
Foram executados corpos de prova conforme NBR 7215 (ABNT, 2019) para se obter a resistência à compressão em 1, 7, 28 e 94 dias.

### 3.2.3.2 Característica dos corpos de prova

As espessuras das placas de CT utilizadas foram de 10 mm, o que assegurou o cobrimento mínimo das telas de fibra de vidro. O RILEM TC 232-TDT recomenda que as espessuras não devam ser menores do que 6 mm.

O número de camadas de tela foi fixado em duas, sendo distribuídas conforme Figura 21.

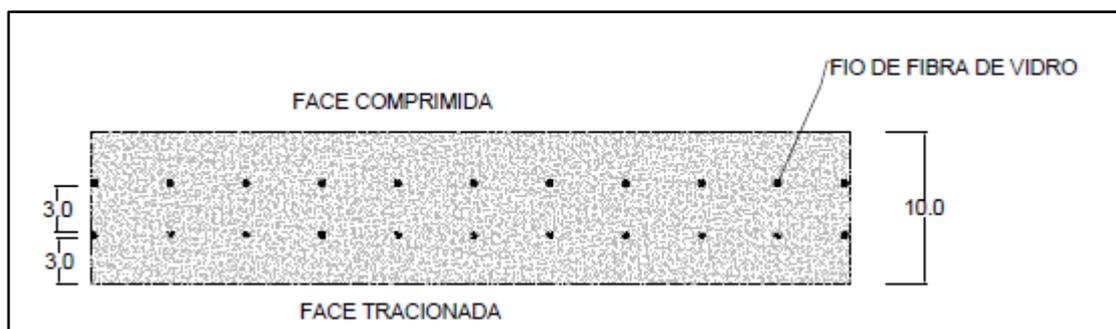
Figura 21: Disposição das camadas de têxteis durante a concretagem



Fonte: autor

A configuração da distribuição das telas, em um total de 10 mm de espessura do corpo de prova, foi de 3 mm de argamassa, tela de fibra de vidro, segunda camada de argamassa na espessura de 3 mm, segunda camada de tela de fibra de vidro e preenchimento final com argamassa até o nivelamento final do molde. A Figura 22 mostra o corte esquemático da amostra.

Figura 22: Corte esquemático posição da tela de fibra de vidro AR (medidas em mm)



Fonte: autor

No momento da moldagem, tomou-se o cuidado de garantir o posicionamento das fibras, com auxílio de uma régua de madeira e sempre medindo da parte tracionada para a parte da compressão.

- os corpos de prova para ensaio de tração direta foram confeccionados seguindo as recomendações da RILEM TC 232-TDT: *test method sand design of textile reinforced concrete* (RILEM, 2016) e possuem as dimensões de 500 mm de comprimento, largura de 60 mm e espessura de 10 mm;
- os corpos de prova para ensaio de tração na flexão em 4 pontos possuem dimensões de 100 mm de largura, 360 mm de comprimento e 10 mm, conforme utilizado por Ortolan (2021) e esses foram ensaiados seguindo especificações da norma ASTM C947-3:2016.

### 3.2.4 Moldagem do concreto têxtil

A moldagem dos corpos de prova seguiu os parâmetros da RILEM TC 232-TDT, e as fôrmas para moldagem tiveram as medidas de 1000 mm de largura por 2000 mm de comprimento com as seguintes etapas de concretagem:

- limpeza da fôrma;
- aplicação de desmoldante;
- corte dos tecidos de tela de fibra de vidro no tamanho da fôrma do corpo de prova;
- preparação da matriz cimentícia;
- mistura da fibra curta para os corpos de prova com adição em 1% de volume;
- lançamento de 3 mm de argamassa na fôrma ;

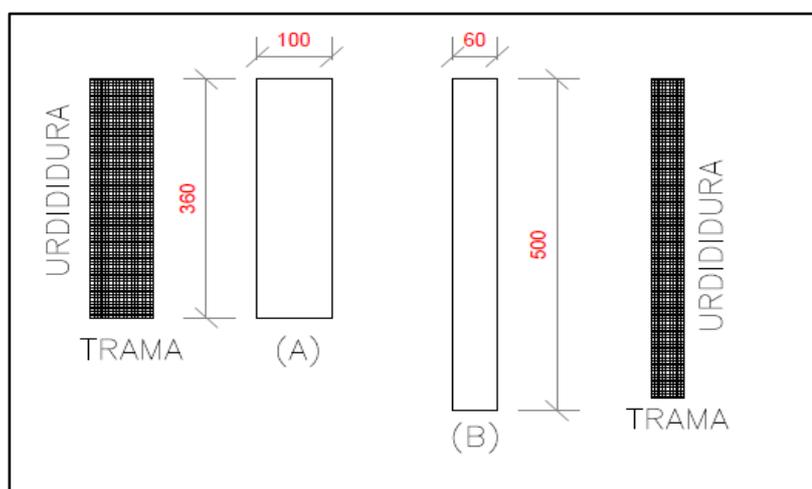
- Após o lançamento dos primeiros 3 mm de argamassa na fôrma, se adicionou a tela de fibra de vidro A;R
- lançamento de mais 3 mm de argamassa na fôrma;
- posicionamento da segunda camada de fibra de vidro AR;
- lançamento e arrasamento da última camada de argamassa;
- a desforma ocorreu 48 horas após a moldagem e as placas de concreto têxtil foram curadas conforme NBR 5738 (ABNT, 2018);
- a cura foi realizada até os primeiros 14 dias em placas e, após este período, os corpos de prova foram cortados e armazenados novamente para cura;

### 3.2.5 Preparação dos corpos de prova após cura

Os corpos de prova foram cortados após a cura de 14 dias, com uma serra de mesa com disco, conforme recomendações da RILEM TC 232-TDT (2016), com as dimensões de 500 mm de comprimento, largura de 60 mm e espessura de 10 mm. Já os corpos de prova para ensaio de tração na flexão em 4 pontos foram cortados nas dimensões de 100 mm de largura, 360 mm de comprimento e 10 mm de espessura, conforme utilizado por Ortolan (2021), e foram ensaiados seguindo especificações da norma ASTM C947-3:2016.

Os cortes dos corpos de provas foram retirados da placa moldada e os cortes realizados no sentido da urdidura da tela, como o esquema indicado nas Figura 23 ,Figura 24 e Figura 25.

Figura 23: Direcionamento das fibras no tecido têxtil



Fonte: autor

Figura 24: Placa de concreto têxtil com cura de 14 dias



Fonte: autor

Figura 25: Corpo de prova sendo cortado nas dimensões para ensaio



Fonte: autor

A escolha da direção do corte seguindo a orientação da urdidura se deu pelo fato de se manter um padrão para a moldagem e corte dos cp's. Uma vez que o intuito do trabalho era analisar apenas o comportamento das fibras ao envelhecimento acelerado.

### 3.2.6 Temperatura para envelhecimento acelerado

O envelhecimento acelerado dos corpos de prova em diferentes ciclos de água quente se deu pela exposição dos testemunhos em temperaturas de 60°C. Conforme Proctor, Oakley e Litherland (1982), 1 dia de exposição ao envelhecimento acelerado a 60 °C equivalem a 9 meses de exposição no Reino Unido.

Para a avaliação do desempenho dos CT com relação ao tempo se escolheu o método de envelhecimento acelerado proposto por ASTM C 1560, pelo fato da norma ser bastante conhecida para avaliação dos concretos reforçados com fibras de vidro (GRC). A ASTM C 1560 contempla apenas o método de envelhecimento e outras normas foram utilizadas em conjunto, como se observa na Figura 26.

Figura 26: Normas utilizadas no trabalho experimental

01	NBR 5738 (ABNT, 2018)	Cura normal 28 dias
02	NBR 7215 (ABNT, 2019)	Resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos
03	ASTM C 5160	Método para envelhecimento acelerado de concretos com fibra de vidro
04	ASTM C 1228	Preparação dos corpos de prova para ensaios de tração na flexão em 4 pontos
05	ASTM C 947	Método padrão para avaliar as propriedades de flexão de concreto reforçado com fibra de vidro
06	RILEM TC 232-TDT	Ensaio de tração uniaxial: método de ensaio para determinar o comportamento de carga de corpos de prova de tração feitos de materiais e estruturas de concreto armado com têxteis

Fonte: o autor

### 3.2.7 Preparação dos corpos de prova para envelhecimento acelerado

Para a preparação dos corpos de prova destinados ao ensaio de envelhecimento acelerado seguiu-se o determinado na norma ASTM C 1560. Para isso, foi necessário o desenvolvimento de um sistema capaz de manter a temperatura do ensaio a 60°C, com variação de +/- 2°C, conforme definido pela norma.

### 3.2.7.1 Preparação do tanque

Após cura de 14 dias, os corpos de prova foram serrados e colocados em reservatório com água para a cura final (Figura 27).

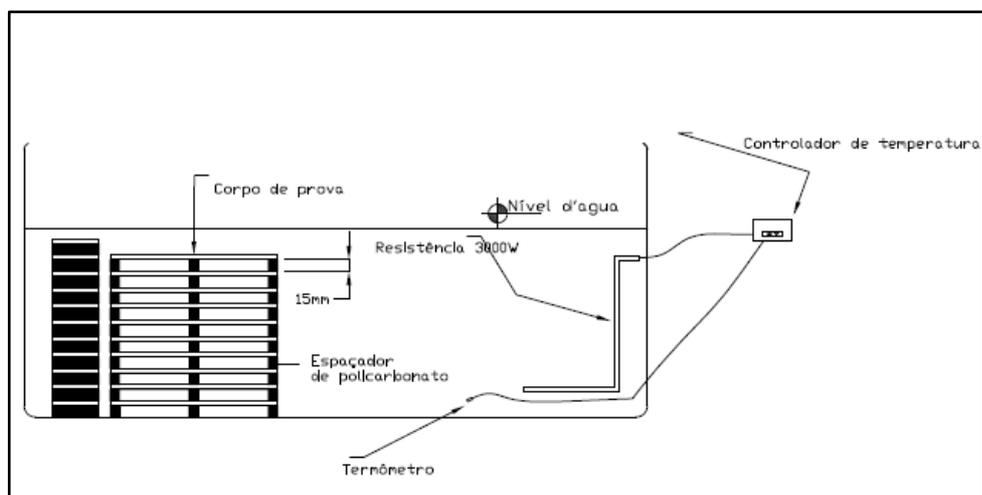
Figura 27: Caixa com corpos de prova em processo de cura após o corte



Fonte: autor

Após a cura de 28 dias, 16 corpos de prova dos TCF e TSF foram retirados e encaminhados para rompimento à flexão em 4 pontos e tração direta ( 4 unidades por ensaios). Outros foram armazenados em reservatórios com sistema de aquecimento, com resistência e controlador de temperatura. Para evitar a evaporação da água durante o processo de aquecimento, se vedou o reservatório com filme de PVC, não necessitando a adição de água durante o período de ensaio. O espaçamento recomendado entre os corpos de prova, segundo a ASTM C 1560, é de 1" (25,4 mm), no entanto, por falta de espaço no tanque de imersão, esta distância se limitou a 15 mm, e, para tanto, foi utilizado um espaçador de policarbonato, colocado nas bordas e no centro do corpo de prova (Figura 28).

Figura 28: Esquema de ligação e acondicionamento dos corpos de prova durante o envelhecimento acelerado



Fonte: autor

### 3.2.7.2 Água de imersão

A água utilizada no tanque de imersão foi potável, sem tratamento ou uso de produtos químicos e sem a presença de matéria orgânica ou patógenos.

A água foi adicionada no tanque cobrindo todos os corpos de prova.

### 3.2.7.3 Identificação e preparação para rompimento

Os corpos de prova utilizados para os ensaios foram acomodados da seguinte forma:

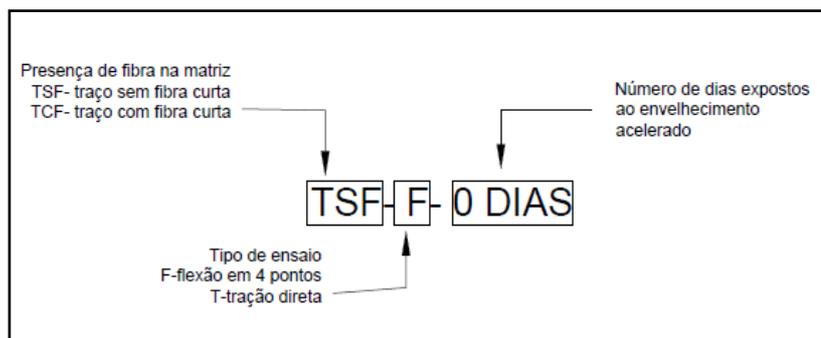
- com 28 dias, as amostras com cura padrão foram separadas (Tabela 13 e Figura 29), identificados e enviados ao laboratório para rompimento;

Tabela 13: Identificação dos corpos de prova enviados ao laboratório

	Método de ensaio	Nomenclatura dos corpos de prova
<b>Traço com fibra</b>	Ensaio de flexão	TCF/F-0 dias
<b>Traço com fibra</b>	Ensaio de tração direta	TCF/T-0 dias
<b>Traço sem fibra</b>	Ensaio de flexão	TSF/F-0 dias
<b>Traço sem fibra</b>	Ensaio de tração direta	TSF/T-0 dias

Fonte: autor

Figura 29: Significado da identificação utilizada



Fonte: autor

- os outros testemunhos foram colocados imersos dentro da caixa para envelhecimento acelerado;

Os corpos de prova ficaram imersos em água a uma temperatura de 60 °C pelo período pré-definido, após este período foram retirados aleatoriamente da água e deixados 24 horas em temperatura ambiente, somente após foram testados.

### 3.2.8 Ensaio de compressão da matriz

O ensaio de compressão da matriz cimentícia foi realizado no laboratório de segurança estrutural do Instituto ITT Performance, na Unisinos, para isso foram moldados corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm. Para o ensaio foram utilizados apenas concretos com matriz cimentícia sem presença de fibra curta, para ambos os concretos TCF e TSF.

E o equipamento de testes foi uma prensa da marca Emic/Instron com capacidade de carga de 300 kN.

Os resultados encontrados foram à carga de ruptura da matriz sobre aplicação da carga distribuída sobre a área do corpo de prova.

Os exemplares foram retirados do processo de cura com 24 horas de antecedência e colocados em temperatura ambiente até o momento do ensaio.

### 3.2.9 Ensaio de tração na flexão

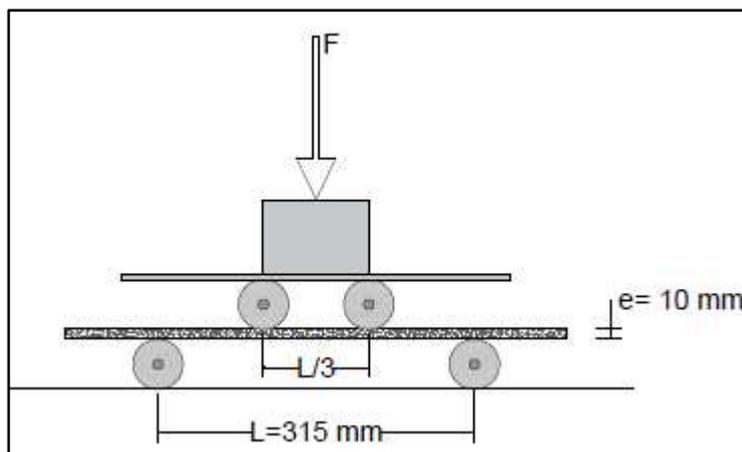
O método utilizado para ensaio de tração na flexão dos concretos têxteis tem como referência a ASTM C 947, que foi desenvolvido para análises de resistência à flexão de corpos de prova de seção fina reforçada com fibra de vidro, que é muito utilizado para análise de resistência de GRC.

Os corpos de prova utilizados no ensaio foram cortados de um painel maior, produzido especificamente para esse fim, e o tamanho dos corpos de prova foi de 360 mm de comprimento, 100 mm de largura e 10 mm de espessura.

Os exemplares foram retirados da área de cura 24 horas antes de serem ensaiados, ficaram em temperatura ambiente durante esse período. O ensaio de tração na flexão em 4 pontos foi realizado no laboratório de segurança estrutural do Instituto ITT Performance, na Unisinos.

O dispositivo apresentado na Figura 30 foi utilizado para a aplicação da carga nos CP's, e os deslocamentos dos corpos de prova foram medidos durante todo o período.

Figura 30: Dispositivo para ensaio à flexão em 4 pontos



Fonte: autor

Os resultados encontrados caracterizam o padrão de tensão versus deslocamento dos corpos de prova, e seus comportamentos serão apresentados no decorrer do trabalho.

A resistência a flexão última foi calculada através das cargas encontradas durante o ensaio com uso da fórmula abaixo segundo ASTM C947 (2016):

$$F_u = \frac{P_y L}{bd^2}$$

- ✓  $F_u$ = resistência a flexão no rompimento do corpo de prova (MPa);
- ✓  $P_u$ = força necessária para o rompimento do corpo de prova (N);
- ✓  $L$ = largura entre os suportes do dispositivo de rompimento (mm);
- ✓  $b$ = largura do corpo de prova (mm);
- ✓  $d$ = espessura do corpo de prova (mm)

Os diagramas foram plotados e analisados individualmente para cada idade de rompimento a fim de identificar os pontos nas curvas para o cálculo tanto da flexão última quanto para a resistência onde a curva de rompimento sai da linearidade.

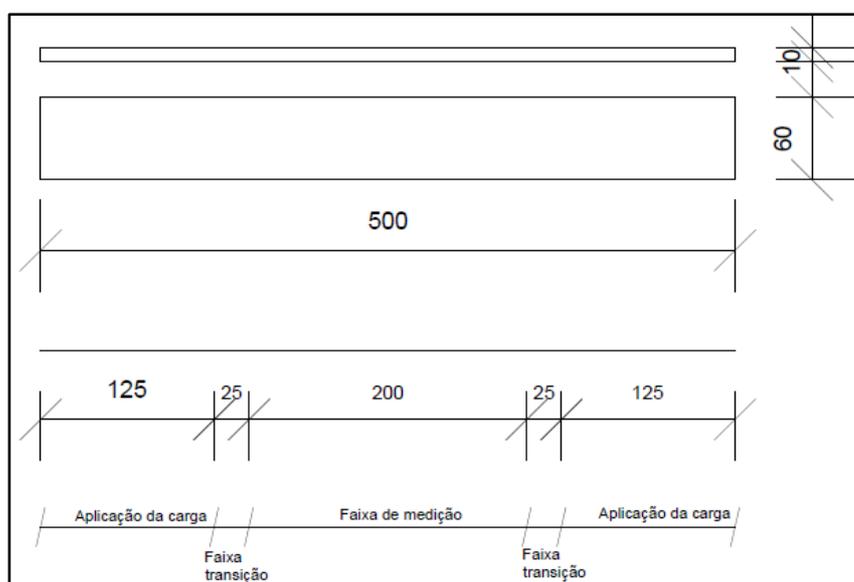
### 3.2.10 Ensaio de tração direta

Para a análise de tração direta foram seguidas as determinações de RILEM TC 232-TDT: *test method sand design of textile reinforced concrete* (RILEM, 2016).

A geometria dos corpos de prova é de 500 mm de comprimento, 60 mm de largura, e espessura de 10 mm, ainda as fibras de reforço têxtil foram alinhadas com a direção da força aplicada.

A preparação dos corpos de prova seguiu sempre o mesmo procedimento, mesmos equipamentos e mesmo operador. Os testemunhos foram fixados no dispositivo de testes sobre pressão com auxílio de pinos de fixação, e para a distribuição mais uniforme das tensões foi utilizado borracha de 3 mm nas duas faces do testemunho. A distribuição das tensões recebidas pelos testemunhos está em desenho esquemático apresentado na Figura 31.

Figura 31: Distribuição das tensões nos testemunhos



Fonte autor

Os ensaios foram realizados no laboratório de segurança estrutural do Instituto ITT Performance, na Unisinos. E o equipamento de testes foi uma prensa da marca Emic/Instron com capacidade de carga de 300 kN. Através da aplicação da carga foi possível medir a força aplicada e o deslocamento ocorrido concreto têxtil (Figura 32).

Os dados retirados da prensa de rompimento foram compilados conforme equações abaixo:

$$\sigma_{max} = f_{m\acute{a}x}/A \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 1}$$

$\sigma_{m\acute{a}x}$ : tens\~{a}o m\acute{a}xima MPa;

$f_{m\acute{a}x}$ : carga de rompimento N;

A: \c{a}rea da se\c{c}\~{a}o do corpo de prova em mm<sup>2</sup>.

$$\text{Deformação} = \frac{\text{Deslocamento medido}}{l_0} \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o 2}$$

*Deslocamento medido*: valor em mm retirado do ensaio atrav\~{e}s dos LVDTs fixados no corpo de prova;

$l_0$ : dimens\~{a}o em mm entre os apoios de fixa\c{c}\~{a}o das garras de tra\c{c}\~{a}o da prensa;

Figura 32: Montagem do corpo de prova para ensaio de tra\c{c}\~{a}o direta



Fonte:autor

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Características da matriz cimentícia

#### 4.1.1 Resultados no estado fresco

No estado fresco a matriz cimentícia atingiu a abertura de 180 mm no mini slump (Figura 33), resultado encontrado pela adição de aditivo superplastificante, uma vez que a relação a/c ficou fixada em 0,40 e com esta abertura a matriz cimentícia obteve um bom espalhamento.

Figura 33: Espalhamento da matriz cimentícia utilizada



Fonte: autor

Foi observado que a adição da fibra curta deu maior estabilidade à matriz cimentícia, contribuindo para diminuir a segregação e exsudação após concretagem.

Para o espalhamento da matriz cimentícia foi necessário utilizar régua de madeira com espaçador e desempeno de aço, uma vez que a matriz não se espalhou por toda a área da fôrma, pois a espessura de controle era de 3 mm para todas as camadas e a área de cobertura era muito grande (Figura 34 e Figura 35).

Figura 34: Lançamento dos primeiros 3 mm de concreto



Fonte: autor

Com o lançamento e nivelamento da primeira camada argamassa foi adicionado o tecido de tela de fibra de vidro, e para uma melhor distribuição da tela ela foi cortada no dia anterior à moldagem anteriormente e colocada sob placas de osb, a fim de retirar o estresse provocado pelo seu acondicionamento em rolo deixando-a plana.

Figura 35: Moldagem da tela de fibra de vidro AR



Fonte: autor

A dosagem da matriz cimentícia se deu em quatro dosagens, o que assegurou a qualidade da matriz cimentícia e diminuiu a variação devido ao baixo número de repetições do traço.

As dosagens foram realizadas em dois dias diferentes, sendo que cada dosagem tinha capacidade para o preenchimento de duas fôrmas de 2000x1200x10 mm. O equipamento para a mistura da matriz cimentícia foi uma argamassadeira de alta rotação, normalmente utilizada para a produção de matrizes cimentícias destinadas à fabricação de painéis de GRC.

#### 4.1.2 Resultados à compressão

A resistência à compressão da matriz cimentícia foi realizada sem a presença de fibra curta, e os resultados seguem na Tabela 14. Como esperado, a matriz teve um comportamento elevado à compressão, o que é característica de concretos com baixas relações a/c e adições de sílica ativa.

Tabela 14: Resultados da resistência à compressão da matriz cimentícia

1 dia	2 dias	7 dias	28 dias	94 dias
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
1	37	48	63	66

Fonte: autor

A dosagem do aditivo superplastificante utilizada para atingir a abertura mínima da matriz cimentícia, devido ao baixo consumo de água, reduziu a resistência inicial da matriz cimentícia principalmente para as primeiras 24 horas, onde o concreto não conseguiu atingir resistências acima de 1 MPa, o que veio acontecer nas primeiras 48 horas, quando o ganho de resistência foi bastante acelerado. Metha e Monteiro (2014) afirmam que o uso de aditivos em altas dosagens pode interferir na formação dos produtos decorrentes da hidratação do cimento, retardando assim a pega inicial.

Contudo, supõe-se que apesar do retardo na pega inicial, a hidratação do cimento liberou grande carga de calor, isso devido ao uso de cimento CPV ARI e seu alto consumo na dosagem (550 kg/m<sup>3</sup>), e apesar de a cura ter sido realizada

com o uso de cobertores úmidos, o concreto apresentou micro fissuras na parte regularizada (Figura 36), principalmente os concretos sem adição de fibra curta. Neville (2013) afirma a importância da dosagem da matriz cimentícia, uma vez que matrizes somente com teores de finos tendem a apresentar maiores retrações devido às diferenças de temperaturas iniciais resultantes da hidratação do cimento.

Figura 36: micro fissuras evidenciadas após rompimento do corpo de prova



Fonte: autor

As resistências encontradas para a matriz do concreto têxtil foram semelhantes às referenciadas na bibliografia. (KULAS, 2015) utilizou matrizes cimentícias com resistências entre 40 e 50 MPa, e (KAPSALIS et al., 2019) utilizou matriz cimentícia com valores próximos de 60 MPa.

Ocorreu para o concreto moldado um acréscimo de resistência após os 28 dias, resultado esse proveniente da adição de sílica ativa em substituição ao cimento, para Metha e Monteiro (2014) as adições pozolanas possuem a propriedade de melhorar a resistência do concreto aos 28 dias e ainda propiciar um ganho para idades mais tardias devido à variação existente no tamanho das partículas, as partículas menores 10  $\mu\text{m}$  agem nas primeiras idades e as partículas de 10 a 45  $\mu\text{m}$  em idades posteriores.

## **4.2 Resultados do ensaio de flexão em quatro pontos dos CT com e sem uso de fibra curta na mistura**

### **4.2.1 Concreto têxtil com uso de fibra curta 18 mm**

Os resultados encontrados nos ensaios de flexão dos testemunhos de concreto têxtil com adição de fibra curta são apresentados abaixo (Tabela 15). Nessa tabela estão os valores das cargas ( $P_y$ ) e deslocamento ( $\delta_y$ ) críticos e as cargas ( $P_u$ ) e deslocamento ( $\delta_u$ ) no momento do rompimento do corpo de prova, e ainda as médias de todos os valores de cargas e deslocamentos encontrados para cada idade, assim como a resistência a flexão última calculada ( $F_u$ ).

Tabela 15: Resultados do comportamento à flexão dos compósitos reforçados com o têxtil AR192 com fibra curta

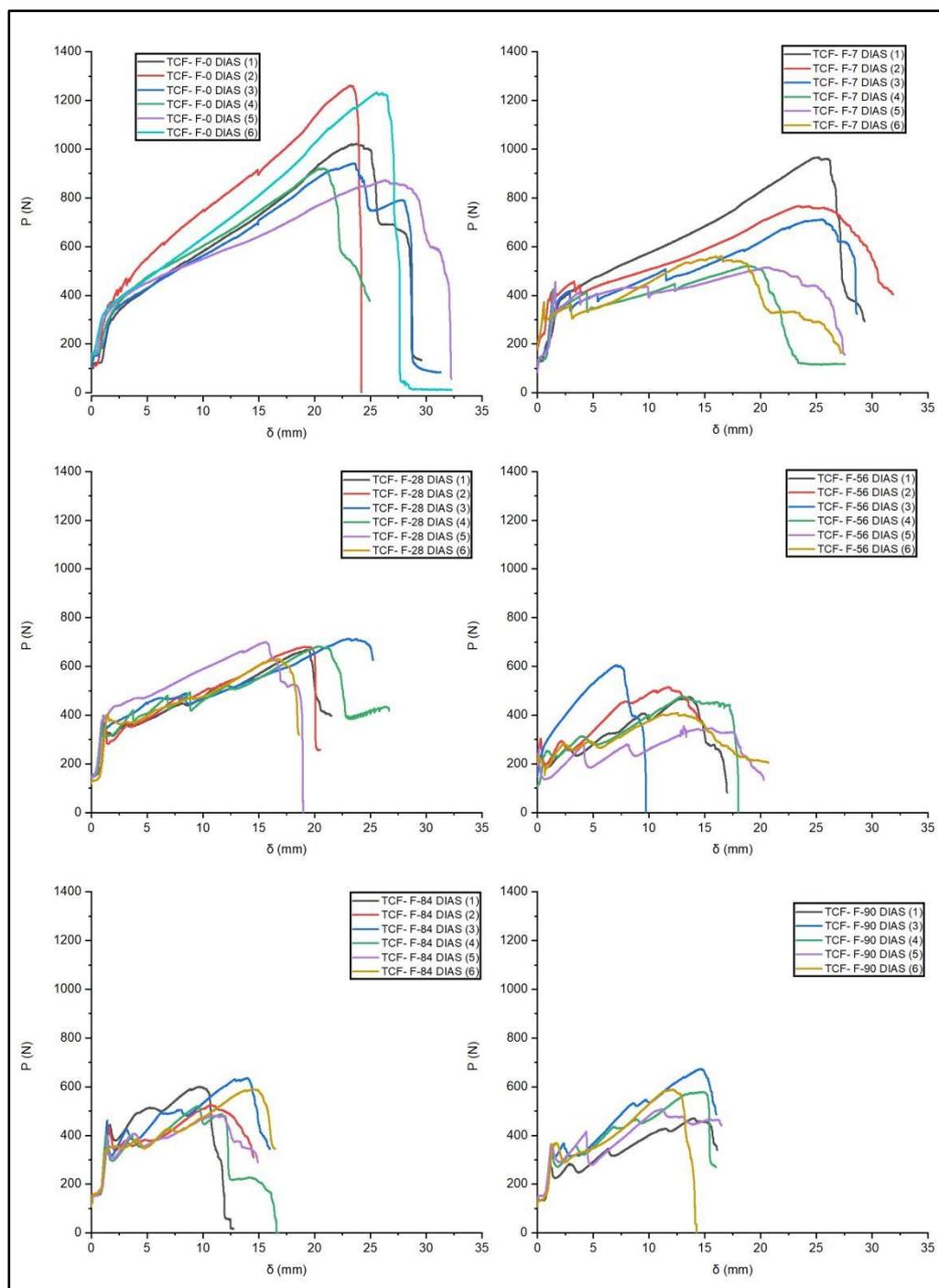
	$P_y$	$\delta_y$	$P_u$	$\delta_u$	$P_{ym}$	$\delta_{ym}$	$P_{um}$	$\delta_{um}$	$F_u$
	(N)	(mm)	(N)	(mm)	(N)	(mm)	(N)	(mm)	(Mpa)
TCF- F-0 DIAS	300,21	1,73	1020,50	23,80	334,66	1,66	1043,19	23,96	32,86
	373,84	1,67	1258,40	23,19					
	337,02	2,07	944,98	23,60					
	354,03	2,14	925,15	20,64					
	311,53	1,20	877,17	26,42					
	331,35	1,13	1232,91	26,08					
TCF- F-7 DIAS	382,20	2,21	959,40	25,34	398,65	1,38	671,32	21,82	21,15
	396,40	1,16	766,10	23,47					
	372,70	1,33	707,50	25,59					
	416,60	1,39	520,60	18,67					
	454,40	1,61	513,80	21,34					
	369,60	0,59	560,50	16,52					
TCF- F-28 DIAS	372,89	1,33	672,15	19,43	388,47	1,17	679,73	19,15	21,41
	361,56	1,26	680,65	19,63					
	401,21	0,99	714,63	23,06					
	401,21	1,00	683,65	20,24					
	389,89	1,00	700,47	15,62					
	404,05	1,47	626,84	16,90					
TCF- F-56 DIAS	214,30	0,23	477,68	13,70	248,35	0,38	473,10	12,25	14,90
	306,81	0,28	517,24	11,77					
	214,71	0,55	604,18	7,09					
	253,95	0,95	477,68	12,85					
	270,94	0,14	350,24	15,56					
	229,40	0,12	411,60	12,55					
TCF- F-84 DIAS	433,10	1,53	601,35	9,66	409,52	1,46	558,87	11,77	17,60
	427,65	1,51	523,94	10,78					
	460,69	1,53	635,33	13,97					
	399,33	1,40	520,16	9,53					
	393,66	1,40	482,40	11,95					
	342,68	1,40	590,02	14,73					
TCF- F-90 DIAS	308,70	1,20	418,23	14,08	332,93	1,20	563,91	12,76	17,76
	284,15	0,55	615,51	9,93					
	342,68	1,33	673,10	14,62					
	337,02	1,20	576,80	14,73					
	354,01	1,33	508,83	11,14					
	371,01	1,60	590,96	12,06					

Legenda:  $P_y$ (Carga crítica);  $\delta_y$ (Deslocamento crítico);  $P_u$  (Carga máxima);  $\delta_u$  (Deslocamento máximo);  $P_{ym}$  (carga média crítica);  $\delta_{ym}$  (Deslocamento médio crítico);  $P_{um}$  (Carga máxima média);  $\delta_{um}$  (Deslocamento máximo médio);  $F_{um}$  (Flexão máxima média);

Pode se notar verificando na Tabela 15 que os resultados dos concretos têxteis sofreram perdas de resistência quando comparados aos testemunhos com 28 dias de cura normal sem nenhum tipo de exposição. Isso fica mais evidente quando da graficação das curvas cargas (N) versus deslocamento (mm).

Na Figura 37 são representados os diagramas das cargas versus deslocamentos dos concretos têxteis submetidos à flexão em 4 pontos. Esses gráficos representam o comportamento integral do corpo de prova, desde o início de aplicação de carga até o rompimento. Ou seja, cada linha gerada no gráfico é comportamento de um corpo de prova na idade ensaiada quando aplicada uma carga  $P$  variável em função do tempo.

Figura 37: Diagrama de Carga versus Deslocamento no ensaio de flexão em 4 pontos (traço com fibras de vidro curtas)



Legenda: P (Carga aplicada em N);  $\delta$ (Deslocamento encontrado em mm)

A análise visual do gráfico acima permite facilmente entender que os corpos de prova tiveram perdas na capacidade de resistência e ao mesmo tempo de deslocamento quando expostos ao envelhecimento acelerado.

De acordo com Ohigashi (1986) o decréscimo de resistência com o tempo de envelhecimento é devido à degradação da resistência do fio de fibra de vidro AR pelo ataque alcalino do cimento.

ORLOWSKY et al. (2005) trabalharam o envelhecimento de micro-concretos em soluções alcalinas, e a resistência do filamento diminuiu rapidamente em condições aceleradas e isto está vinculado a vários processos, e todos podem ocorrer de forma paralela, sendo difícil de identificar precisamente a influência de cada com apenas a avaliação da evolução da resistência do compósito.

BENTUR e MINDES (2007) falam que o reforço com fibras deve fornecer resistência à tração e ductilidade para o concreto resistir às interferências do meio durante a vida útil, mas isso pode ser afetado pela perda de resistência do compósito ao longo do tempo, envelhecimento, mais especificamente perda da capacidade de absorver esforços, tornando frágil e quebradiço. Esta perda de resistência também foi diagnosticada por Muncket *al.* (2019), que afirmam que o aumento das temperaturas favorece a formação de novos produtos de hidratação, e estes produtos se formam na interface da matriz com fibra ou em vazios entre os filamentos da fibra o que resulta em fragilização do compósito e conseqüente perda de resistência.

As Tabela 16 e Tabela 17 foram montadas com os valores das diferenças das perdas de resistência, em percentual, ao longo do tempo em relação ao testemunho sem envelhecimento acelerado.

Tabela 16: Valores em % das diferenças da resistência à flexão dos CTs envelhecidos comparados ao referência

7 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)36%
28 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)35%
56 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)55%
84 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)46%
90 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)45%

Fonte: autor

Tabela 17: Valores em % das diferenças do deslocamento dos CTs envelhecidos comparados ao referência

7 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)20%
28 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)49%
56 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)51%
84 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)51%
90 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)47%

Fonte: autor

Peled, Jones e Shah (2005) observaram perdas de 40 % de resistência à flexão e 80% de perda na deformação máxima aos 84 dias de envelhecimento com imersão em água quente a 50°C. Estes valores justificam os resultados obtidos no trabalho conforme apresentados nas Tabela 16 e Tabela15, apesar de existirem diferenças na composição da matriz cimentícia e temperatura de envelhecimento acelerado utilizados por Peled, Jones e Shah (2005) em relação ao trabalho em análise.

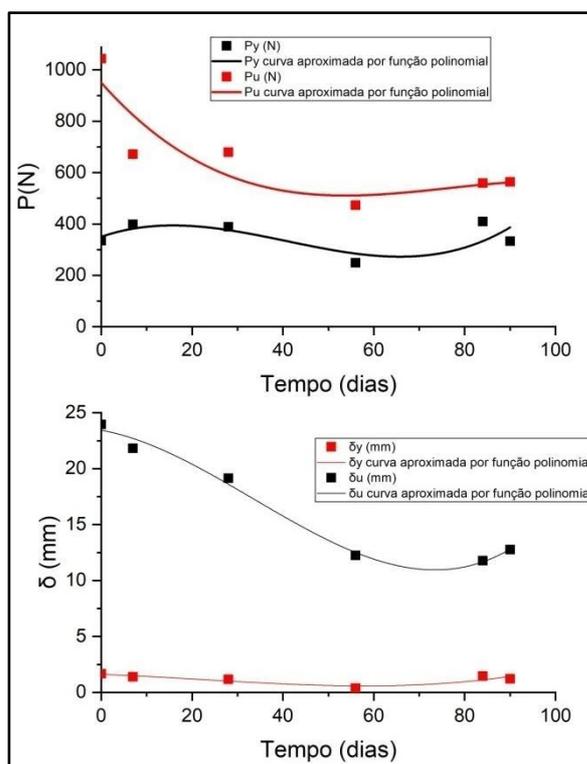
Para ORLOWSKY et al. (2005)corpos de prova produzidos com fibra AR tiveram uma perda de quase 60% de resistência quando expostos a solução em temperatura de 50 °C.Ainda, afirmam que a distribuição irregular dos elementos químicos no vidro, principalmente o sódio e o zircônio, leva à presença de pontos mais fracos, que são sensíveis à lixiviação e quebra da rede, e este processo cria novas falhas de corrosão ou aprofunda as falhas existentes com o tempo.

Ainda, os deslocamentos encontrados dos corpos de prova sofreram variações em torno de 50%, ou seja, diminuindo a tenacidade do concreto (Tabela 15).

Sobre isso, Peled, Jones e Shah (2005) concluem que a perda de ductilidade se dá pela densificação da microestrutura da interface fibra-matriz e o aumento da ancoragem da fibra com a matriz ao longo do tempo, isso ocorre devido ao depósito de produtos decorrentes da hidratação do cimento, principalmente hidróxido de cálcio, ao longo do filamento da fibra.

Na Figura 38 foram graficadas as variações das cargas e deslocamentos nos momentos da abertura da primeira fissura (carga e deslocamentos críticos), também as variações das cargas e deslocamento no momento do rompimento dos concretos têsteis.

Figura 38: Resultados da variação da carga e deslocamento envelhecidos



Legenda: P(Carga aplicada em N);  $\delta$ (Deslocamento encontrado em mm)

Através dos gráficos se evidencia visualmente o decréscimo de resistência e perda de deslocamento dos corpos de prova, uma vez que as amplitudes dos gráficos tanto no eixo da força (P) e no eixo do deslocamento ( $\delta$ ) demonstram reduções bastante evidenciadas.

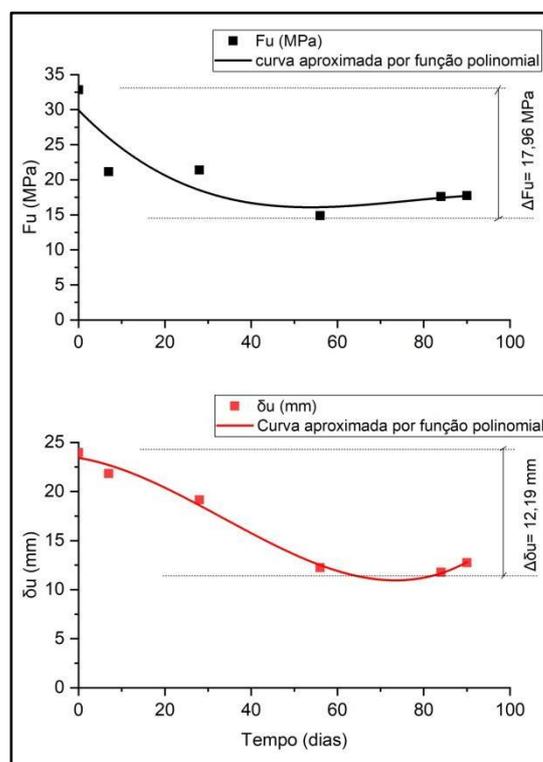
Para a carga crítica ( $P_y$ ) os resultados ao longo do tempo sofreram variações, assim como o seu deslocamento ( $\delta_y$ ), contudo em menor percentual quando comparados aos valores últimos do concreto. Também pode se notar nos gráficos que existem variações nos resultados onde os valores não seguem uma lógica em função do tempo, variações estas atreladas aos equipamentos utilizados para realizar o rompimento e pela sensibilidade do ensaio.

Pode-se concluir que o envelhecimento acelerado teve influência em todas as idades, tanto para a abertura da primeira fissura ( $P_y$ ) quanto para o rompimento do tecido têxtil e conseqüente rompimento do compósito ( $P_u$ ) em todas as idades ensaiadas ao longo do tempo. Portal *et al.* (2016) também encontraram deterioração da fibra em todas as idades que tiveram envelhecimento em altas temperaturas com diferentes fatores de alcalinidade.

A Figura 39 foi montada com o uso das médias de resistências à flexão e deslocamentos dos corpos de provas, no gráfico também foi apresentada a variação

da resistência à flexão ( $\Delta F$ ) e deslocamento ( $\Delta\delta$ ) para evidenciar as perdas ocorridas durante os 90 dias de envelhecimento.

Figura 39: Acompanhamento da perda de resistência à flexão (A) e deslocamento (B) médios de CTs ao longo do tempo imersos em água quente (60°C)



Legenda:  $P_u$ (Carga máxima/ última);  $\delta_u$ (Deslocamento máximo/ último)

A resistência a flexão caiu 54,65 % pelos valores encontrados nos ensaios realizados. Pode-se claramente observar que a flexão e o deslocamento ao longo do tempo tiveram variações, assim confirma-se que temperatura e umidade interferem diretamente na durabilidade do concreto têxtil.

Também, não dá para se observar uma tendência de estabilização das perdas de resistência e deslocamento uma vez que houve uma maior perda nas idades iniciais, depois a perda foi menor ou nula, assim sendo as agressões às fibras podem continuar, contudo em uma escala mais lenta e em menor nível de agressão.

Os valores encontrados estão em acordo com a bibliografia analisada, Arabi, Molez, e Rangeard (2018) afirmam que as fibras de vidro AR sofrem os mesmos fenômenos de degradação das fibras E, contudo a degradação é enfraquecida pela melhora nas qualidades das fibras e da matriz cimentícia pela presença de pozolanas da dosagem..

Foi realizada análise de significância dos resultados encontrados, na Tabela 18 para a influência do tempo de exposição na perda de resistência a flexão e perda de capacidade de deslocamento.

Tabela 18: Análise de significância da influência do tempo na perda de resistência a flexão dos CTs (com fibra curta)

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,637132491
R-Quadrado	0,405937812
R-quadrado ajustado	0,388465394
Erro padrão	166,9958286
Observações	36

ANOVA						
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F calculado</i>	<i>F tabelado</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	647914,6	647914,6	23,23307	4,128	2,9356E-05
Resíduo	34	948178,6	27887,61			
Total	35	1596093				

Fonte: autor

Hipóteses apuradas:

H0 = os resultados de flexão são iguais com o passar do tempo de exposição!

- $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ : rejeita-se H0 e aceita-se a hipótese de que os valores encontrados apresentam diferenças significativas;
- F de significação menor do que 0,05 apresentam alto nível de significância e de influência do tempo na resistência à flexão do CT;
- R-quadrado ajustado confirma que 38,8 das variações encontradas podem ser explicadas pela ação do tempo.

A análise dos dados confirma com 95 % de certeza a hipótese de que o envelhecimento dos concretos têxteis na presença de temperatura e umidade influencia diretamente na resistência à flexão para os concretos com matrizes cimentícias reforçadas com fibras curtas.

Também foram realizadas análises de significância para a influência do tempo na perda de capacidade de deslocamento dos CTs ensaiados a flexão em 4 pontos. Os resultados estão nas Tabela 19.

Tabela 19: Análise de significância da influência do tempo na perda da capacidade de deslocamento dosCTs (com fibra curta)

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,8505695
R-Quadrado	0,7234685
R-quadrado ajustado	0,7153352
Erro padrão	2,954589
Observações	36

ANOVA						
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F calculado</i>	<i>F tabelado</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	776,5117	776,5117	88,95162	4,128	5,1104E-11
Resíduo	34	296,8063	8,729596			
Total	35	1073,318				

Fonte: autor

Da mesma forma pode-se afirmar que os resultados são influenciados pelo tempo de exposição com nível de certeza de 95%. Abaixo segue análise resumida:

H0 = os resultados de capacidade de deslocamento aos 28 dias de cura normal não são influenciados pelo tempo!

- $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ : rejeita-se H0 e aceita-se a hipótese de que os valores encontrados apresentam diferenças significativas;
- F de significação menor do que 0,05 apresentam alto nível de significância e da influência do tempo de deformação;
- R-quadrado ajustado confirma que 71,5% das variações encontradas podem ser explicadas pela ação do tempo.

#### 4.2.2 Concreto têxtil sem o uso de fibra curta 18 mm

Os resultados encontrados nos ensaios de flexão dos testemunhos de concreto têxtil sem adição de fibra curta são apresentados abaixo (Tabela 20). Nessa tabela estão os valores das cargas ( $P_y$ ) e deslocamento ( $\delta_y$ ) na abertura da primeira fissura e as cargas ( $P_u$ ) e deslocamento ( $\delta_u$ ) no momento do rompimento do corpo de prova, e ainda as médias de todos os valores de cargas e deslocamentos encontrados para cada idade, assim como a resistência a flexão última calculada ( $F_u$ ).

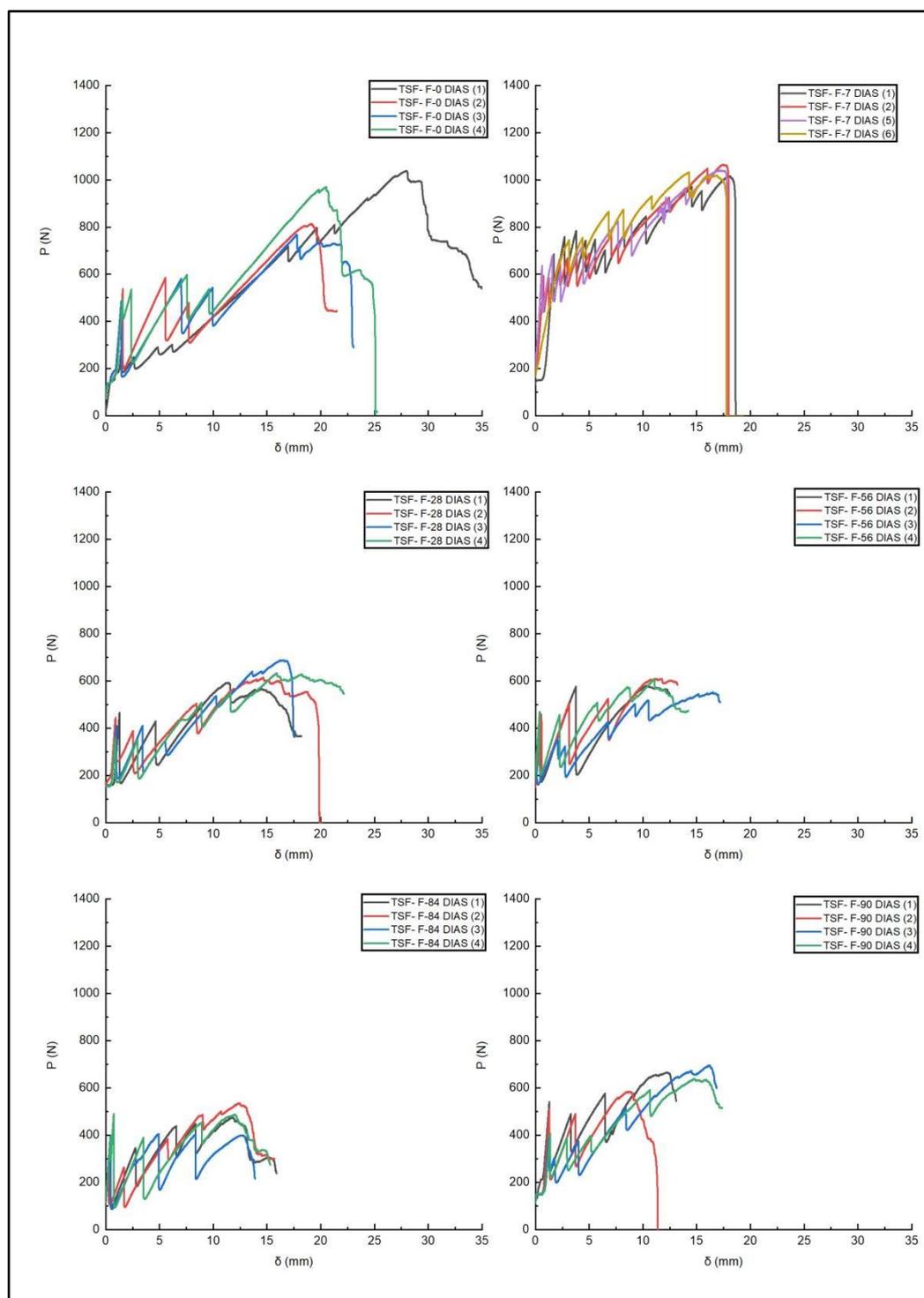
Tabela 20: Resultados do comportamento à flexão dos compósitos reforçados com o têxtil AR192 sem fibra curta

	$P_y$	$\delta_y$	$P_u$	$\delta_u$	$P_{ym}$	$\delta_{ym}$	$P_{um}$	$\delta_{um}$	$F_u$
	(N)	(mm)	(N)	(mm)	(N)	(mm)	(N)	(mm)	(Mpa)
TSF- F-0 DIAS	299,26	1,44	1035,60	27,94	455,24	1,51	895,41	21,38	28,21
	538,10	1,62	812,81	19,40					
	491,77	1,40	767,50	17,75					
	491,84	1,58	965,75	20,44					
TSF- F-7 DIAS	681,59	1,67	1016,72	18,13	601,99	1,17	1023,96	19,06	32,25
	589,08	0,77	1065,81	17,59					
	406,88	1,13	943,09	20,35					
	672,15	0,73	1045,04	26,69					
	634,39	0,59	1041,27	17,30					
	627,87	2,14	1031,83	14,28					
TSF- F-28 DIAS	464,46	1,26	596,63	11,41	420,57	1,01	634,15	15,20	19,98
	447,47	0,86	621,17	14,66					
	409,71	0,95	688,20	16,50					
	360,62	0,95	630,61	18,24					
TSF- F-56 DIAS	462,58	0,41	581,52	10,34	437,60	0,86	589,06	12,40	18,56
	464,47	0,55	611,73	11,73					
	351,18	2,07	551,32	16,47					
	472,19	0,41	611,66	11,05					
TSF- F-84 DIAS	365,34	0,46	476,74	11,82	359,68	0,42	477,21	12,23	15,03
	280,38	0,32	537,15	12,44					
	393,66	0,46	403,10	12,69					
	399,33	0,46	491,84	11,99					
TSF- F-90 DIAS	539,04	1,26	670,26	12,24	461,16	1,29	648,55	13,21	20,43
	512,61	1,31	585,30	8,77					
	386,11	1,22	696,70	16,09					
	406,88	1,35	641,94	15,74					

Fonte: autor

Na Figura 40 pode se acompanhar o modelo dos diagramas de força versus deslocamento dos corpos de prova sem adição de fibra curta na mistura.

Figura 40: Resistência a flexão de corpos de prova (sem fibra de vidro curtas)



Legenda: P(Carga aplicada em N);  $\delta$ (Deslocamento encontrado em mm)

Com os diagramas montados fica mais clara a dependência da resistência e deslocamento do compósito em relação ao tempo, umidade e temperatura, uma vez que com o aumento da exposição dos testemunhos a capacidade de carga e deslocamento tiveram reduções.

A Tabela 21 e Tabela 22 ilustram as diferenças médias encontradas para a carga e deslocamentos médios no momento do rompimento dos corpos de prova, o percentual foi calculado em função do tempo de exposição e do concreto sem envelhecimento acelerado.

Tabela 21: Valores em % das diferenças da resistência à flexão dos CTs nas idades em envelhecimento acelerado em relação aos testemunhos em cura normal

7 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)14%
28 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)29%
56 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)34%
<b>84 dias de envelhecimento acelerado à 60°C</b>	<b>(-)47%</b>
90 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)28%

Fonte: autor

Tabela 22: Valores em % das diferenças dos deslocamentos dos CTs nas idades em envelhecimento acelerado em relação aos testemunhos em cura normal

7 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)11%
28 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)29%
56 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)42%
<b>84 dias de envelhecimento acelerado à 60°C</b>	<b>(-)43%</b>
90 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)38%

Fonte: autor

Pelas tabelas acima a perda de resistência a flexão ao longo do tempo se aproximou de 50 %, repetindo o ocorrido nos concretos com adição de fibra curta, padrão este seguido quando analisados os deslocamentos, que também tiveram perdas significativas quando expostos ao envelhecimento acelerado.

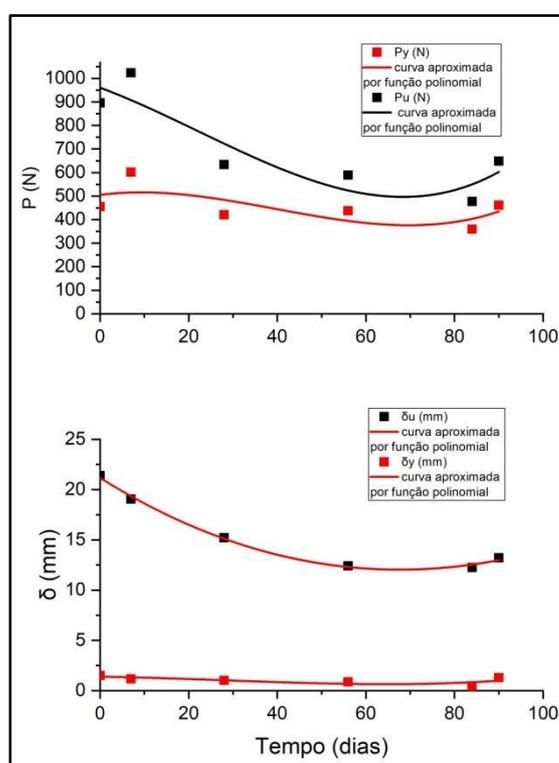
As perdas de resistência e capacidade de deslocamento baseado nos dados apresentados tendem a diminuir ao longo do tempo, tendendo a estabilizar a partir dos 56 dias de envelhecimento acelerado. Testes de envelhecimento acelerado em compósitos de GRC imersos em água em temperaturas entre 50 ° C e 80 ° C mostraram um padrão de perda de resistência inicial seguida por uma constante, ou quase constante região de resistência (PROCTOR, OAKLEY E LITHERLAND ,1982)

Vale ressaltar que para os concretos sem fibras apareceram um número elevado de retrações após o primeiro dia de cura úmida, com uso de cobertores molhados, isso levou ao descarte de alguns testemunhos durante a realização dos ensaios. A

micro-fissuração excessiva pode ser resultado do uso de grande volume de cimento de alta resistência inicial, que acabou gerando um aumento na geração de calor de hidratação nas primeiras idades com redução muito rápida do volume da massa de concreto. E, Segundo Metha e Monteiro (2014) o uso de fibras melhora as propriedades do concreto, tais como: reduz a à micro-fissuração nas primeiras idades, aumenta resistência a fadiga, impacto, melhora a tenacidade entre outros. Figueiredo ( 2011) fala que o uso de fibras contribui beneficentemente para a redução da micro-fissuração do concreto, principalmente nas primeiras idades onde está mais suscetível, com pouca resistência e exposto aos esforços de retrações provenientes da cura.

A Figura 41 abaixo representa o comportamento das cargas e deslocamentos nos pontos de abertura das primeiras fissuras e nos rompimentos dos corpos de provas.

Figura 41: Variação das médias das cargas e deslocamentos ao longo do tempo (traço sem fibra curta)

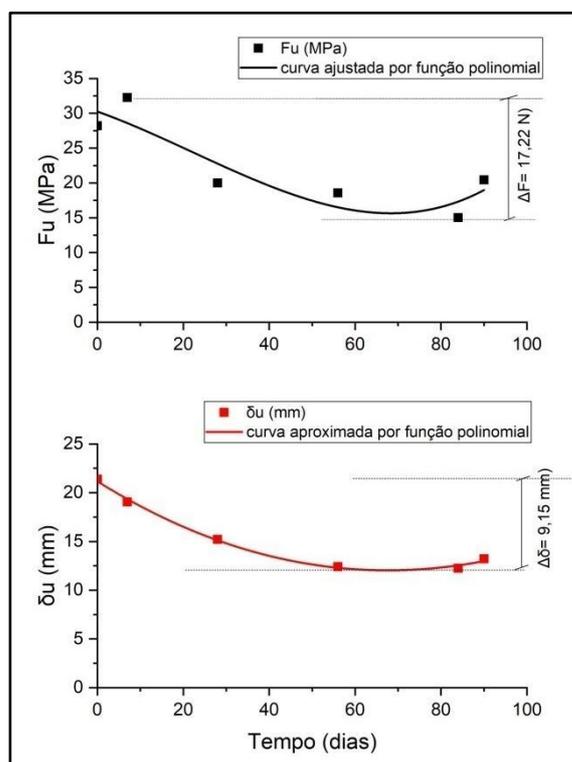


Legenda: P(Carga aplicada em N);  $\delta$ (Deslocamento encontrado em mm)

O comportamento dos corpos de prova segue o padrão dos concretos com adição de fibra curta. Também foram graficados para os CT's sem adição de fibra

curta os valores de resistência a flexão última e deslocamentos no momento do rompimento, vide Figura 42.

Figura 42: Acompanhamento da perdas médias de resistência a flexão (A) e deslocamento (B) de cps ao longo do tempo (sem fibra curta)



Fonte: autor

Pela Figura 42 acima observa se as diferenças de resistência à flexão e perda de capacidade de deslocamento dos concretos sem uso de fibra curta, este comportamento segue um padrão similar ao encontrado para os corpos de prova com uso de fibra curta. Para ambas as características analisadas as diferenças ficaram 47 % e 43% de perda ao longo do tempo em relação ao concreto sem envelhecimento acelerado, para resistência à flexão e capacidade deslocamento, respectivamente.

A análise de significância dos resultados encontrados para perda de resistência a flexão estão na Tabela 23.

Tabela 23: Análise de significância da influência do tempo na perda de resistência a flexão dos CTs (sem fibra curta)

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,79488
R-Quadrado	0,63183
R-quadrado ajustado	0,61649
Erro padrão	130,231
Observações	26

## ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F calculado</i>	<i>F tabelado</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	698554,7	698554,7	41,18805	4,26	1,23098E-06
Resíduo	24	407043,1	16960,13			
Total	25	1105598				

Fonte: autor

Hipótese analisada:

H0 = os resultados de flexão são iguais com o passar do tempo de exposição!

- $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ : rejeita-se H0 e aceita-se a hipótese de que os valores encontrados apresentam diferenças significativas;
- F de significação menor do que 0,05 apresentam alto nível de significância e da influência do tempo na resistência;
- R-quadrado ajustado confirma que 61,9% das variações encontradas podem ser explicadas pela ação do tempo.

Tabela 24: Análise de significância da influência do tempo na perda da capacidade de deformação (sem fibra curta)

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,683863
R-Quadrado	0,467669
R-quadrado ajustado	0,445488
Erro padrão	3,486984
Observações	26

## ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F calculado</i>	<i>F tabelado</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	256,370051	256,37005	21,08469	4,26	0,0001173
Resíduo	24	291,8174609	12,159061			
Total	25	548,1875118				

Fonte: autor

Os resultados de significância da influência do tempo na capacidade de deformação estão na Tabela 24.

Hipótese analisada:

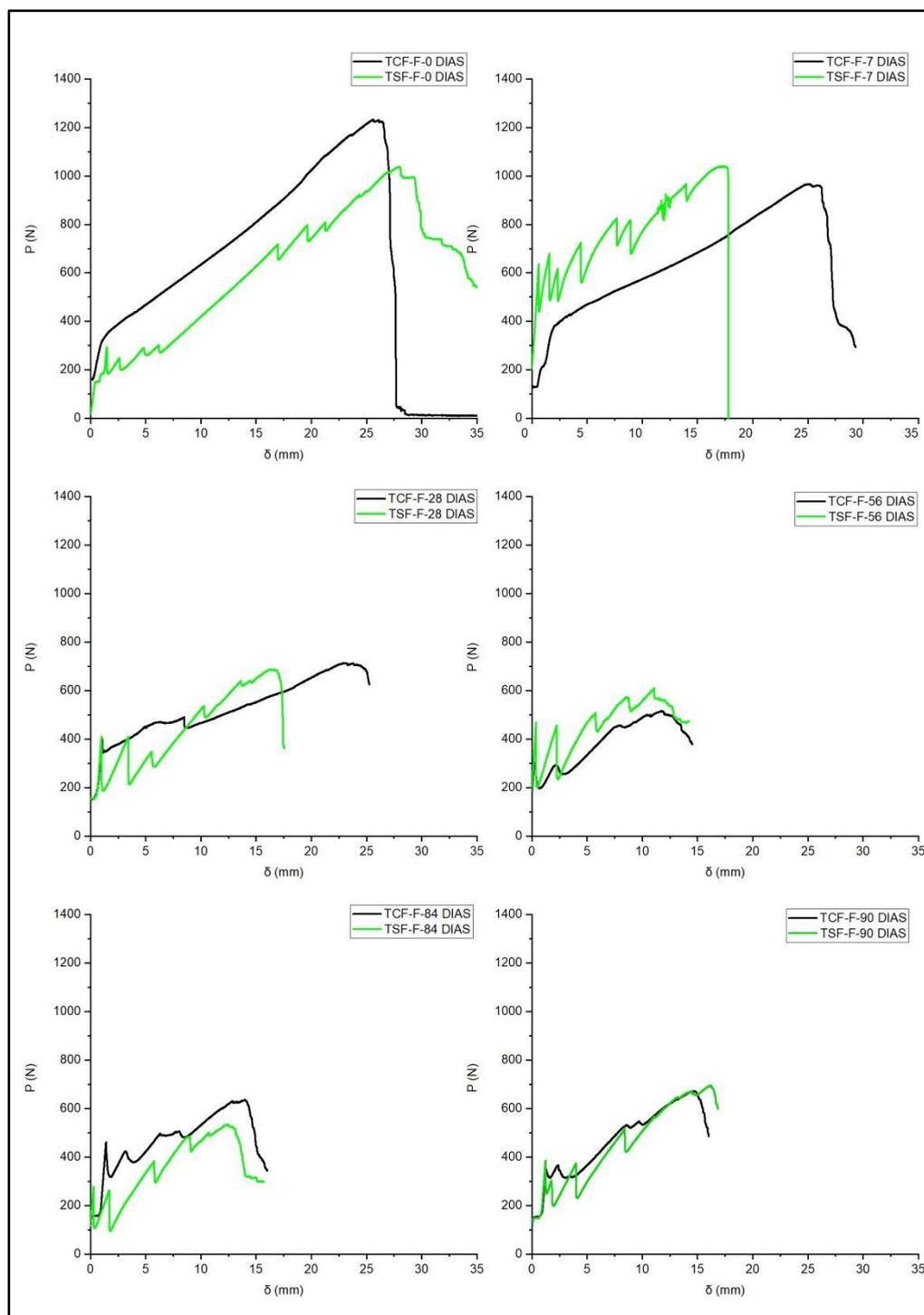
H0 = os resultados de capacidade de deformação aos 28 dias de cura normal não são influenciados pelo tempo!

- $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ : rejeita-se H0 e aceita-se a hipótese de que os valores encontrados apresentam diferenças significativas;
- F de significação menor do que 0,05 apresentam alto nível de significância e da influência do tempo na resistência;
- R-quadrado ajustado confirma que 44,5% das variações encontradas podem ser explicadas pela ação do tempo.

#### **4.2.3. Comparativo da Força versus deslocamento últimos de CTs com e sem fibra curta**

Os diagramas plotados na Figura 43 representam o comportamento dos testemunhos expostos ao tempo com e sem fibra curta. Os pontos dos gráficos adotados foram valores do  $P_u$  potencial dos testemunhos, ou seja, o corpo de prova com maior resistência entre os rompimentos de cada idade, em 0, 7, 28, 56, 84 e 90 dias expostos ao envelhecimento acelerado a  $t = 60\text{ }^\circ\text{C}$ .

Figura 43: Diagrama comparativo da Força versus Deslocamento Potenciais (TCF e TSF)



Fonte: autor

Pela Figura 43 pode se verificar que o comportamento dos testemunhos com e sem adição de fibra curta, não possuem variações significativas dentro dos mesmos períodos de análise. Assim, a fibra curta no volume dosado parece ter pouca interferência nas propriedades analisadas (resistência à flexão e deslocamento).

Vale ressaltar que os concretos com fibras curtas sem envelhecimento acelerado tiveram resultados melhores em comparação aos sem fibra curta em quase todas as idades; isso é justificado pelo fato de a fibra curta contribuir para a melhora das ligações da tela e matriz nas primeiras idades (Brameshuber, 2006).

Também, pela análise visual dos gráficos mostram-se dois padrões de rompimento dos CTs, os com fibra curta possuem um padrão de rompimento mais suave e os sem adição de fibra curta na dosagem apresentam picos em quase todas as fases dos ensaios. Amaral, Silva e Moravia (2017) encontraram melhoras no índice de tenacidade do concreto com a adição de fibras poliméricas na dosagem do concreto, os autores conseguiram um aumento próximo de 20 % em relação aos concretos sem uso de fibra.

Foi realizada a análise estatística para apenas uma idade a fim de verificar a influência da presença de fibra curta na melhora do desempenho do concreto nos primeiros 28 dias de cura normal, parte-se do princípio que o esse resultado se estende para as outras idades, os dados gerados estão na Tabela 25 e Tabela 26.

Tabela 25: Análise da carga de rompimento aos 28 dias de cura normal com e sem fibra curta

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,349965885
R-Quadrado	0,122476121
R-quadrado ajustado	0,034723733
Erro padrão	145,3682347
Observações	12

ANOVA						
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F calculad o</i>	<i>F tabelad o</i>	<i>F de significaçã o</i>
Regressão	1	29493,85	29493,853	1,39570	4,965	0,264778
Resíduo	10	211319,2	21131,923			
Total	11	240813,0				

Fonte: autor

Tabela 26: Análise capacidade de deslocamento aos 28 dias de cura normal com e sem fibra curta

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,544138
R-Quadrado	0,296086
R-quadrado ajustado	0,225694
Erro padrão	3,163163
Observações	12

#### ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F calculado</i>	<i>F tabelado</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	42,08631	42,08631	4,206274	4,965	0,0674044
Resíduo	10	100,056	10,0056			
Total	11	142,1423				

Fonte: autor

Abaixo segue análise resumida do teste de regressão:

H0 = os resultados de flexão e deslocamento aos 28 dias de cura normal são iguais com o uso ou não de fibra curta na dosagem!

- $F_{\text{calculado}} < F_{\text{tabelado}}$ : aceita-se H0
- F de significação maior do que 0,05 representa um baixo nível de significância da influência da fibra curta no aumento da resistência última e capacidade de deformação do concreto aos 28 dias;
- R-quadrado ajustado apresenta baixo valor, significa pouca dependência entre a presença de fibra curta com a resistência ao rompimento e deslocamento dos CTs.

Pode se inferir que a adição de fibra curta, no percentual de 1% em volume, teve pouca significância quando analisada somente as tensões e deformações dos CTs em cura normal de 28 dias, ou seja, a adição de fibra curta pouco contribui para o aumento da resistência à flexão e deformação máxima durante a ruptura nos CTs analisados. Barhum e Mechtcherine (2013) também não encontraram ganhos no aumento da capacidade de deformação em concretos têxteis com adição de fibra curta.

Esses resultados eram esperados uma vez que a dosagem da fibra é de apenas 1% em volume e o tamanho da fibra é 18 mm, o que contribui para a baixa ancoragem da fibra na matriz, servindo assim principalmente para o ganho de resistência a tração nas primeiras idades, para a redução de microfissuras por

retração do concreto e aumento da tenacidade, proporcionando uma fissuração mais controlada do compósito.

#### 4.2.4 Comparativos da Tensão crítica dos CTs com e sem fibra curta

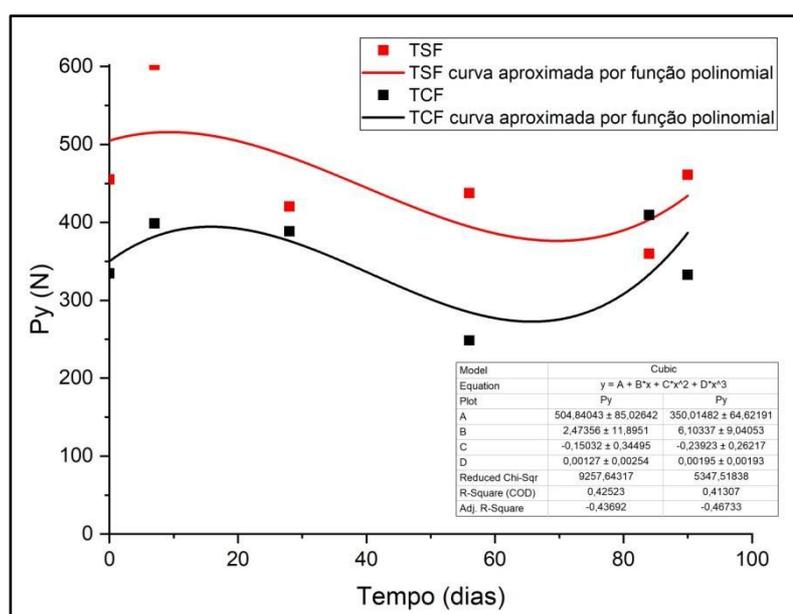
Os resultados da tensão crítica dos corpos de prova com e sem fibra curta foram analisados a fim de entender a interferência do uso de fibra curta na abertura das primeiras fissuras dos testemunhos. A Tabela 27 e Figura 44trás os valores para carga crítica ( $P_Y$ ) dos CT's com e sem uso de fibra curta.

Tabela 27: Valores de resistência médiacrítica dos CTs com e sem fibra curta

Idade de ensaio em envelhecimento acelerado 60°C (dias)	$P_Y$ TSF	$P_Y$ TCF
	(N)	(N)
0	<b>455,24</b>	<b>334,66</b>
7	601,99	398,65
28	420,57	388,47
56	437,6	248,35
84	359,68	409,52
90	461,16	332,93

Fonte: autor

Figura 44: diagrama de carga crítica versus tempo



Legenda:  $P_Y$ (Carga aplicada na abertura da primeira fissura em N);  
 $\delta_y$ (Deslocamento encontrado na abertura da primeira fissura em mm)

A adição de fibras curtas quando os dados foram compilados, visualmente, parece não ter interferência no comportamento dos CTs quanto à força necessária para a abertura da primeira fissura independente da idade analisada. Contudo, os gráficos gerados apresentaram variações e dificuldades na avaliação deste dado específico, ou seja, pela capacidade de medição do equipamento utilizado ou pela complexidade do ensaio. Vale ressaltar que durante a verificação da carga crítica ocorreram dúvidas quanto ao ponto de abertura da primeira fissura, com isso alguns resultados encontrados podem estar desalinhados com o padrão de comportamento dos CT's.

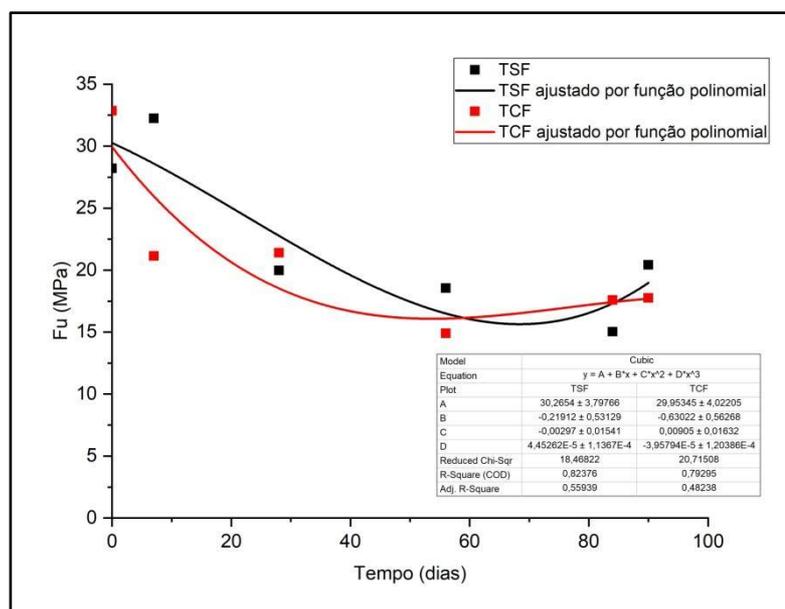
E, esses resultados parecem vir contra o que é citado por Barhum e Mechtcherine (2013) onde afirmam que a adição de fibras curtas contribui diretamente para aumento das tensões de abertura da primeira fissuração, as tensões nominais no segundo e terceiro estágios devido ao fato que melhora transferência de tensões entre a matriz e o têxtil, e aumenta o número de fissuras com tamanhos reduzidos.

Ainda, pode-se afirmar que para todos os testemunhos analisados a força crítica foi superada pela força máxima de ruptura, o que caracteriza o funcionamento do reforço têxtil, demonstrando que após a fissura inicial o reforço foi solicitado e contribuiu para o ganho de resistência do compósito. Figueiredo (2011) afirma que os reforços com fibras com módulos superiores ao do concreto funcionam como reforços e devem proporcionar um ganho de resistência após a abertura da primeira fissura.

#### **4.2.5 Comparativo da resistência à flexão de CTs com e sem fibra curta**

Os resultados das perdas de resistência última à flexão média dos concretos têxteis com e sem adição de fibras curtas envelhecidos são apresentados abaixo na Figura 45.

Figura 45: Comportamento das resistências médias à flexão ao longo do tempo



Legenda:  $F_u$ (Resistência máxima/ última no rompimento em MPa)

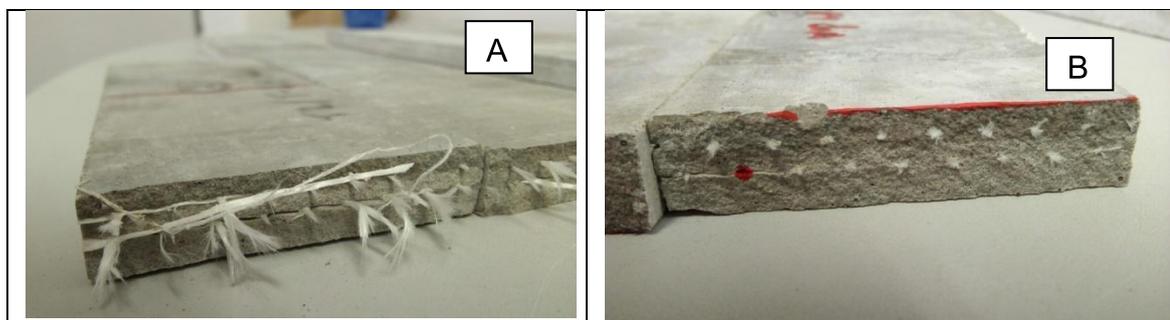
Os dados analisados foram ajustados para uma função polinomial cúbica com um grau de ajuste próximo de 80 %, e nota-se que a resistência à flexão decai com o aumento do tempo de envelhecimento. Este comportamento já foi encontrado por Proctor, Oakley e Litherland (1982) mesmo utilizando fibras de vidro AR na dosagem de corpos de prova de GRC, este mesmo comportamento também foi evidenciado por Portal et al. (2015).

Seguindo o mesmo comportamento encontrado pelas fibras de vidro AR, os tecidos mesmo com a adição de zircônio e a proteção extra de resinas acrílicas, sofreram perdas de resistência ao longo do tempo, contudo a degradação da fibra diminuiu com o tempo de envelhecimento acelerado.

#### 4.2.6 Característica do rompimento do fio da tela de fibra de vidro submetidos à flexão em 4 pontos

A análise visual dos corpos de prova após o ensaio possibilitou verificar que sem envelhecimento acelerado o padrão de rompimento dos corpos de prova ocorreu pelo arrancamento das fibras inseridas na matriz cimentícia, já para os corpos de prova com envelhecimento acelerado ocorreu o rompimento da fibra de vidro (Figura 46), o que se alinha com o citado por NOBILI (2016), esse afirma que a falha ocorre de acordo com dois mecanismos principais de colapso para o reforço de tecido de vidro: ruptura da fibra ou deslizamento na matriz cimentícia.

Figura 46: Características dos rompimentos dos concretos têxteis (sem envelhecimento (A) e com 84 dias de envelhecimento (B) )



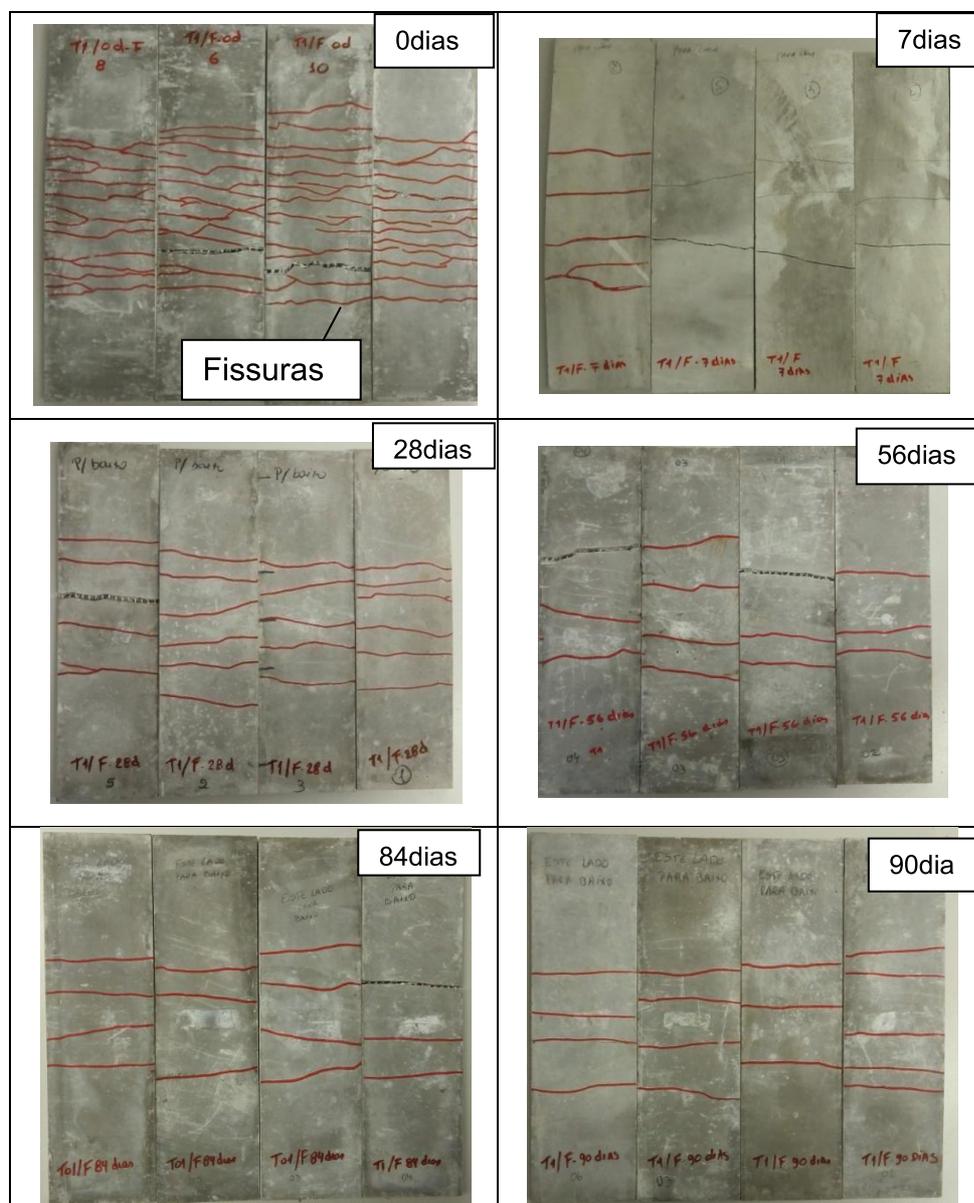
Legenda: arrancamento dos fios dos tecidos têxteis (A) e rompimento fios dos tecidos têxteis (B)

Na Figura 46, a imagem A apresenta um maior número de fibras aparentes, isso aconteceu porque a fibra foi arrancada da matriz cimentícia durante o ensaio, ao contrário da imagem B onde a quantidade de fibras arrancadas é bem menor, e grande parte rompeu antes de ser tirada da matriz cimentícia, em uma contagem média dos CP's com 90 dias de envelhecimento acelerado o rompimento das fibras aconteceu em aproximadamente 80 % dos fios da tela.

#### **4.2.7 Comportamento da fissuração de CTs com adição de fibras curtas após rompimento à tração na flexão**

Conforme os resultados encontrados, com o aumento do tempo de envelhecimento os corpos de prova perderam resistência e capacidade de deformação. Na Figura 47 é registrada a aparência dos corpos de prova após realização dos ensaios, pode se notar que existe uma diferença na tipologia de fissuras encontradas em corpos de prova com e sem envelhecimento acelerado.

Figura 47: Padrão de fissuração de corpos de prova com fibra curta com e sem envelhecimento acelerado



Fonte: autor

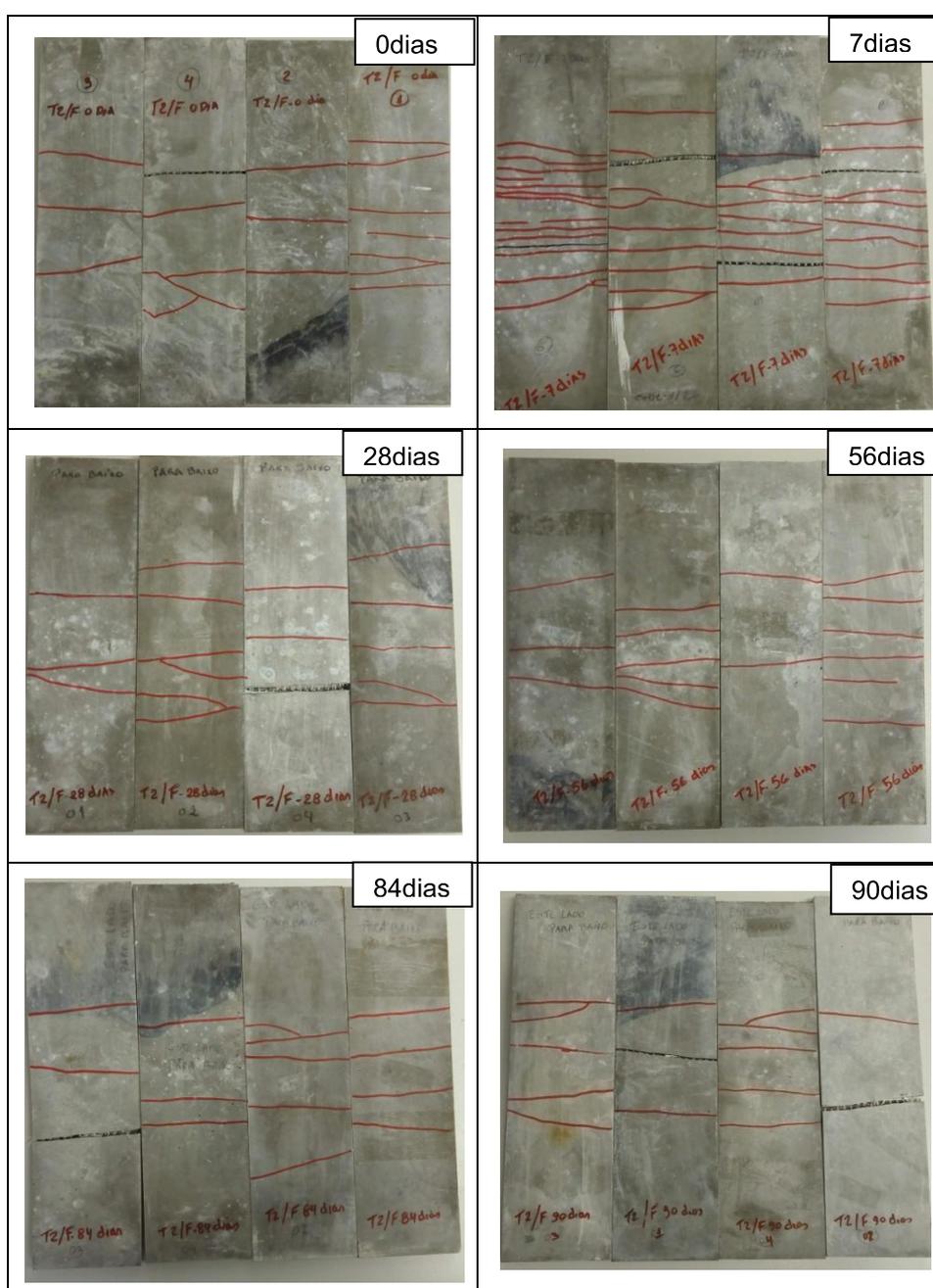
Os corpos de prova com fibra curta sem envelhecimento acelerado apresentaram uma ruptura em vários pontos, com o surgimento de fissuras menos espaçadas e mais distribuídas, isso se deve ao fato de que a fibra curta contribui para a distribuição das fissuras, agindo em pontos onde a tela têxtil não consegue agir.

Já com o aumento do tempo de envelhecimento o rompimento dos corpos de prova apresentou um padrão de fissuração diferente, com fissuras em menor quantidade, mais espaçadas e com certa linearidade.

#### 4.2.8 Comportamento da fissuração dos CTs sem adição de fibras curtas após rompimento à tração na flexão

O CT sem fibra teve um comportamento de fissuração sem variações aparentes nas idades com e sem envelhecimento acelerado. Na Figura 48 está exposto o padrão de fissuração encontrado após o rompimento dos corpos de prova.

Figura 48: Padrão de fissuração de corpos de prova sem fibra curta com e sem envelhecimento acelerado



Fonte: autor

A exceção ao padrão encontrado foi o corpo de prova com 7 dias de envelhecimento acelerado que obteve uma melhor distribuição das fissuras, porém com a mesma linearidade dos outros corpos de prova, padrão este que pode estar vinculado ao enrijecimento da fibra de vidro após ataque dos álcalis, onde ocorre a deposição de hidróxidos de cálcio nos espaços existentes entre os filamentos da fibra, aumentando assim a ancoragem da fibra matriz. Segundo Majumdar; Nurse(1974) um ganho inicial de resistência para os concretos feitos com fibra de vidro AR ocorre devido à melhora da ligação entre fibra matriz provocada pela deposição de hidróxidos nos vazios existentes na fibra, e após o período inicial essa resistência tende a baixar suavemente.

### **4.3 Resultados dos ensaios de tração direta do CT**

#### **4.3.1 Concreto têxtil com uso de fibra curta**

A Tabela 28 foi montada com os valores de tensão e deformações dos concretos têxteis com o uso de fibra curta na matriz cimentícia.

Tabela 28: Resultados dos ensaios de tração direta encontrados para CT com fibra curta 18 mm

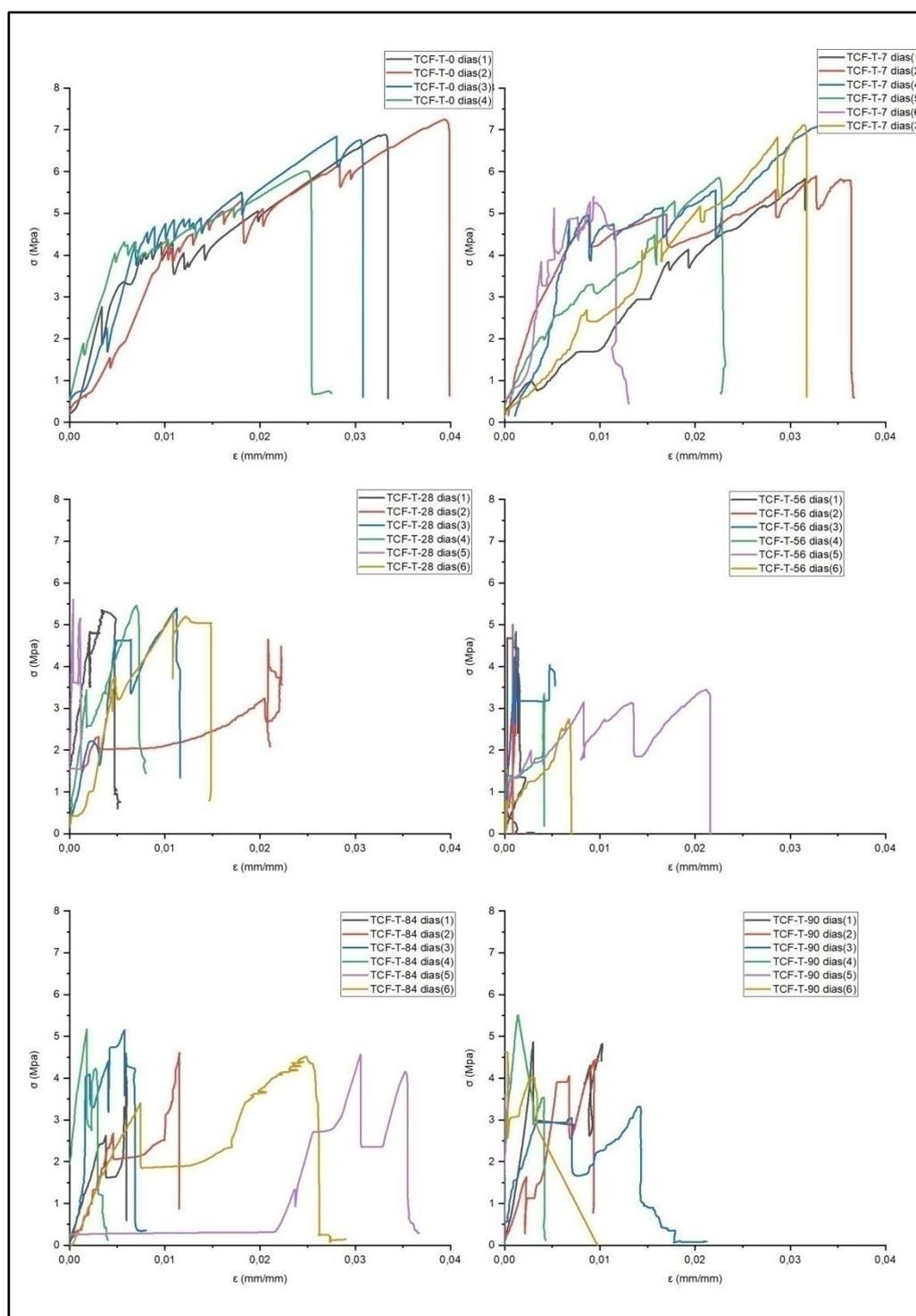
	$\sigma_{cr}$	$\epsilon_{cr}$	$\sigma_u$	$\epsilon_u$	$\sigma_{crm}$	$\epsilon_{crm}$	$\sigma_{um}$	$\epsilon_{um}$
	(MPa)	(mm/mm)	(MPa)	(mm/mm)	(MPa)	(mm/mm)	(MPa)	(mm/mm)
TCF-T-0 dias	2,763	0,003	6,880	0,033	2,116	0,003	6,745	0,031
	1,545	0,004	7,247	0,039				
	2,263	0,004	6,844	0,028				
	1,892	0,001	6,010	0,025				
TCF-T-7 dias	4,889	0,009	5,890	0,033	3,656	0,006	6,213	0,026
	4,812	0,007	7,087	0,033				
	2,045	0,004	5,583	0,023				
	3,843	0,004	5,393	0,009				
	2,691	0,009	7,111	0,031				
TCF-T-28 dias	4,714	0,002	5,354	0,003	3,285	0,003	5,226	0,011
	2,330	0,003	4,647	0,021				
	2,199	0,003	5,393	0,011				
	3,436	0,002	5,453	0,007				
	3,749	0,005	5,281	0,011				
TCF-T-56 dias	1,450	0,000	4,828	0,001	1,435	0,001	3,590	0,008
	1,542	0,000	3,351	0,004				
	1,992	0,003	3,442	0,021				
	0,755	0,001	2,738	0,007				
TCF-T-84 dias	2,631	0,004	4,367	0,006	3,518	0,007	4,728	0,013
	2,681	0,005	4,591	0,012				
	4,036	0,002	5,155	0,006				
	5,176	0,002	5,176	0,002				
	2,711	0,026	4,568	0,031				
	3,872	0,007	4,513	0,025				
TCF-T-0 dias	4,866	0,003	4,866	0,003	4,205	0,002	4,551	0,006
		0,002	4,444	0,010				
	2,936	0,003	3,318	0,014				
	5,511	0,001	5,511	0,001				
	3,508	0,000	4,613	0,003				

Legenda:  $\sigma_{cr}$  (Tensão Crítica);  $\epsilon_{cr}$  (Deformação crítica);  $\sigma_u$  (Tensão máxima);  $\epsilon_u$  (Deformação máxima);  $\sigma_{crm}$  (Tensão Crítica média);  $\epsilon_{crm}$  (Deformação crítica média);  $\sigma_{um}$  (Tensão máxima média);  $\epsilon_{um}$  (Deformação máxima média)

Fonte: autor

Além da tabela acima foram plotados os gráficos de tensão versus deformação com o uso dos valores dos rompimentos coletados durante o ensaio compilados, vide Figura 49.

Figura 49: Diagramas de Tensão versus de Deformação de testemunhos com fibra curta em ensaio de tração direta



Legenda:  $\sigma$  (Tensões aplicadas em MPA);  $\epsilon$  (Deformações encontradas em mm/mm)

Pode-se observar que o concreto têxtil teve perdas de resistência à tração e de capacidade de deformação com o tempo de exposição. Foram calculadas perdas médias acima de 40 % de tensão máxima nos concretos envelhecidos, quando

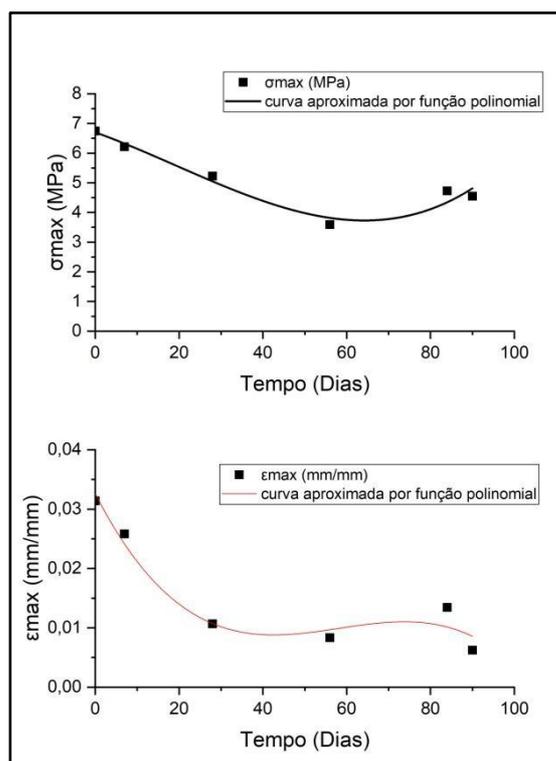
comparados aos concretos com cura normal, e o deslocamento médio tiveram perdas médias próximas a 80% em relação aos sem envelhecimento, vide Tabela 29 e Figura 50.

Tabela 29: Percentual de perdas médias das tensões e deformações máximas

	$\sigma_u$	$\epsilon_u$
0 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	-	-
7 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)8%	(-)18%
28 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)23%	(-)66%
56 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)47%	(-)73%
84 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)30%	(-)57%
90 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)33%	(-)80%

Fonte: autor

Figura 50: Diagrama de tensão e deformação médias ao longo do tempo



Legenda:  $\sigma_u$  (Tensão máxima/ última);  $\epsilon_u$  (Deformação máxima/ última)

Pode-se notar através das curvas geradas que ao longo do tempo o resultado da *tensão versus deformação* sofreu perdas consideráveis de resistência, observa-se que nas primeiras idades os gráficos possuem um padrão de rompimento, porém com o período de envelhecimento a ruptura acontece em um padrão bastante diferente, conforme será verificado nas imagens de ruptura dos corpos de prova.

Pela plotagem dos gráficos observa-se que o ângulo de inclinação e amplitude das curvas sofreu variações, o que infere em diminuição da capacidade de deformação dos testemunhos, levando a uma mudança do modelo de rompimento dos corpos de prova, que passam de uma ruptura lenta e visível para uma ruptura rápida e brusca.

Através dessa avaliação fica nítida a perda de resistência e da capacidade de deformação dos CTs envelhecidos ao longo do tempo, porém com uma tendência a partir dos 56 dias de envelhecimento de se manter uma regularidade. O que pode ser justificado pelo fato de que as reações de aceleração de liberação de produtos da hidratação estejam em seu estágio final, não interferindo mais na integridade da fibra.

Também com o intuito de avaliar os dados encontrados foi realizado o gráfico da tensão versus deformação dos resultados potenciais máximos dos corpos de prova em cada idade, Figura 51 e Tabela 30.

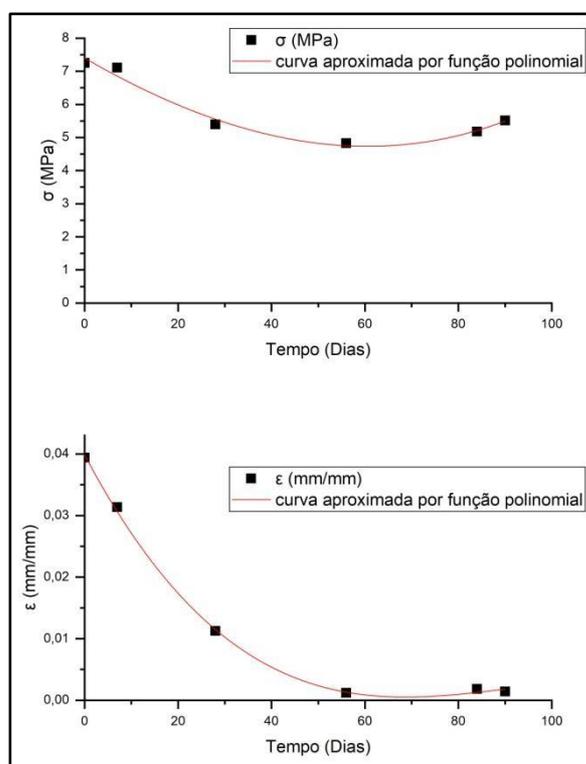
Ressalta-se que durante o trabalho foram encontradas variações nos resultados, que de alguma forma podem distorcer os valores da média, tanto de forma positiva ou como negativa. Ortolan (2021) encontrou da mesma forma variações nos resultados, o que foi justificado pela sensibilidade envolvida no uso dos equipamentos.

Tabela 30: Diferenças das tensões potenciais e deformações ao longo do tempo em %

	$\sigma_u$	$\epsilon_u$
0 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	-	-
7 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)2%	(-)20%
28 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)26%	(-)71%
56 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)33%	(-)97%
84 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)29%	(-)95%
90 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)24%	(-)96%

Fonte: autor

Figura 51: Diagrama de tensões potenciais e deformações correspondentes no rompimento ao longo do tempo



Legenda:  $\sigma_u$  (Tensão máxima);  $\epsilon_u$  (Deformação máxima)

A análise do Figura 51 e Tabela 30 demonstra que quando analisadas apenas as tensões máximas de cada idade a perda da capacidade resistente do CT foi menor com relação às comparações das médias, contudo as deformações correspondentes destes corpos de prova tiveram diferenças acima de 90 % nos 90 dias de envelhecimento acelerado.

#### 4.3.2 Concreto têxtil sem uso de fibra curta 18 mm

Os CTs sem fibra curta foram testados seguindo os mesmos procedimentos dos concretos com fibras. Os resultados encontrados estão abaixo e foram analisadas suas médias e os potenciais de cada idade (corpos de prova com maior valor), Tabela 31.

Tabela 31: Resultados dos ensaios de tração direta encontrados para CT sem fibra curta 18 mm

	$\sigma_{cr}$	$\epsilon_{cr}$	$\sigma_u$	$\epsilon_u$	$\sigma_{crm}$	$\epsilon_{crm}$	$\sigma_{um}$	$\epsilon_{um}$
	(MPa)	(mm/mm)	(MPa)	(mm/mm)	(MPa)	(mm/mm)	(MPa)	(mm/mm)
TSF-T-0 dias	3,31	0,0015	5,42	0,02	2,43	0,0013	5,37	0,023
	2,71	0,0007	5,60	0,03				
	2,34	0,0014	5,02	0,02				
	1,36	0,0017	5,44	0,03				
TSF-T-7 dias	5,85	0,0051	6,30	0,01	4,13	0,0041	6,69	0,011
	4,11	0,0051	7,04	0,02				
	3,53	0,0046	6,19	0,01				
	3,03	0,0016	7,24	0,00				
TSF-T-28 dias	2,86	0,0024	3,48	0,0030	3,0323	0,0018	3,8030	0,0077
	3,86	0,0000	3,48	0,0023				
	1,99	0,0013	3,50	0,0158				
	3,41	0,0033	4,76	0,0096				
TSF-T-56 dias	1,21	0,0005	3,68	0,01	3,05	0,0036	4,12	0,009
	4,54	0,0073	4,54	0,01				
	3,30	0,0036	4,79	0,01				
	3,16	0,0031	3,48	0,01				
TSF-T-84 dias	3,88	0,0070	4,78	0,01	3,75	0,0030	5,18	0,006
	2,99	0,0023	5,89	0,01				
	5,08	0,0027	5,08	0,00				
	3,06	0,0001	4,96	0,00				
TSF-T-90 dias	3,35	0,0005	3,45	0,00	4,54	0,0014	4,66	0,004
	6,77	0,0015	6,88	0,00				
	3,51	0,0023	3,66	0,01				

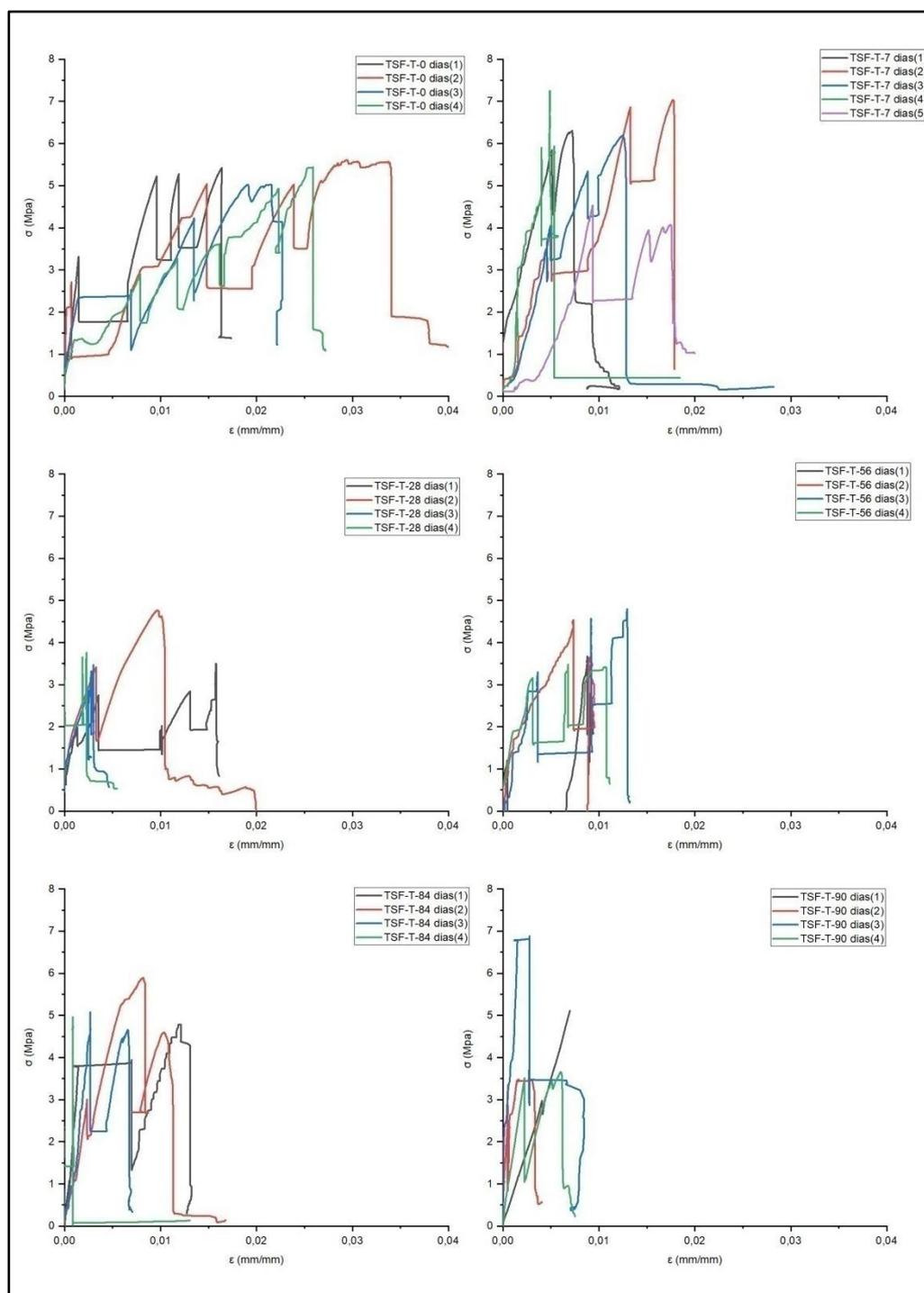
Legenda:  $\sigma_{cr}$  (Tensão Crítica);  $\epsilon_{cr}$  (Deformação crítica);  $\sigma_u$  (Tensão máxima);  $\epsilon_u$  (Deformação máxima);  $\sigma_{crm}$  (Tensão Crítica média);  $\epsilon_{crm}$  (Deformação crítica média);  $\sigma_{um}$  (Tensão máxima média);  $\epsilon_{um}$  (Deformação máxima média)

Fonte: autor

Algumas idades de rompimento tiverem seus valores desconsiderados no momento de montar a tabela, ou apresentaram resultados muito diferentes do padrão ou tiveram micro fissuras e foram descartados. Também, foram montados os

diagramas de tensão versus deformação de todos os corpos de prova ensaiados, vide Figura 52.

Figura 52: Diagramas de tensão versus deformação de testemunhos sem fibra curta



Legenda:  $\sigma$  (Tensões aplicadas em MPA);  $\epsilon$  (Deformações encontradas em mm/mm)

O envelhecimento ao longo do tempo teve uma influência menor em corpos de prova sem fibra curta adicionada à mistura, analisando os dados se pôde visualizar que as perdas de tensão ao longo do tempo foram menores, isso se deve pelo fato de que os corpos de prova com fibra curta iniciaram com uma resistência maior, que pode estar vinculada a adição da fibra curta. A Tabela 32 apresenta Taxa de variação da tensão, vale ressaltar que aos 7 dias o resultado encontrado foi maior quando comparado aos 0 dias de envelhecimento acelerado, isso pode ser devido ao aumento de rigidez da fibra quando os filamentos de hidróxidos de cálcio se instalam nos vazios dos filamentos da fibra aumentando sua rigidez e ancoragem no concreto.

Tabela 32: Percentual da variação média de resistência e deformações máximas

	$\sigma_u$	$\epsilon_u$
0 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	-	-
7 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(+)25%	(-)52%
28 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)23%	(-)45%
56 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)23%	(-)62%
84 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)4%	(-)74%
90 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)13%	(-)83%

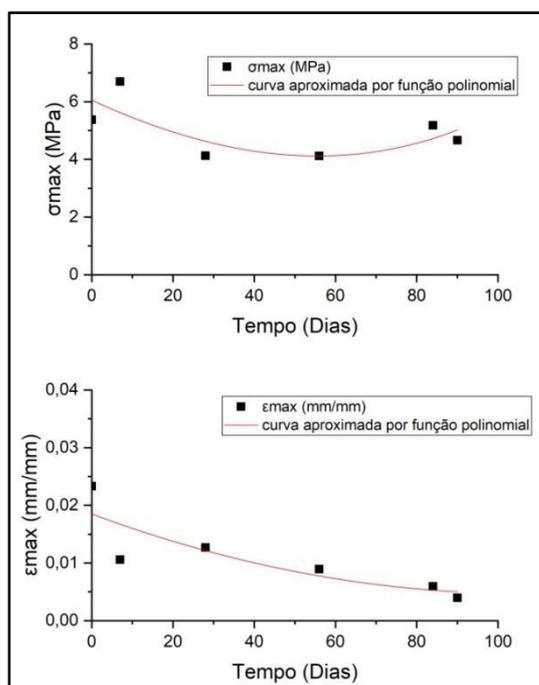
Legenda:  $\sigma_u$  (tensão última);  $\epsilon_u$  (Deformação última)

Fonte: autor

A análise visual da Figura 52 deixa claro que a perda de tensão ao longo do tempo não é tão acentuada, porém a amplitude da capacidade de deformação diminui drasticamente do 0 dias aos 90 dias de envelhecimento acelerado. Fica evidente a perda de capacidade de deformação dos CTs expostos ao tempo, fator este que deve ser considerado durante o projeto.

Abaixo segue Figura 53 o diagrama do comportamento da tensão e deformação ao longo do tempo, pela análise se confirma que os valores de tensão tiveram perdas menores em relação ao deslocamento, contudo as perdas ao longo do tempo ocorrem e devem ser consideradas.

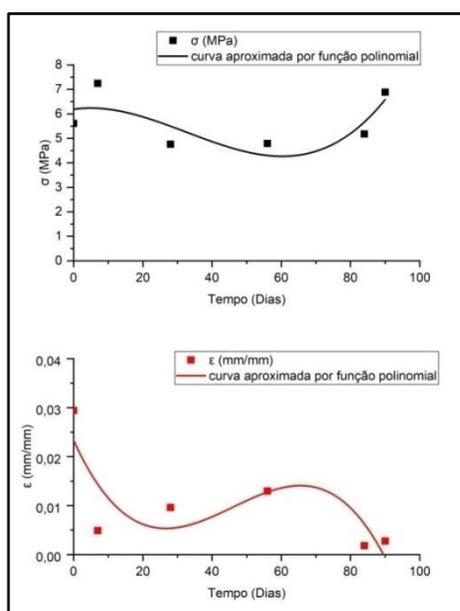
Figura 53: Diagramas de tensão e deformação média ao longo do tempo



Legenda:  $\sigma_u$ (Tensão máxima/ última);  $\epsilon_u$ (Deslocamento máximo/ último)

Os valores potenciais de tensão dos corpos de prova em cada idade foram compilados e a Figura 54 foi gerada. Pelo diagrama exposto não ocorreram grandes modificações no comportamento dos CTs quando ignoradas as médias

Figura 54: Diagrama de tensão e deformação potencial correspondente ao longo do tempo



Legenda;  $\sigma_u$ (Tensão última);  $\epsilon_u$ (Deformação última)

Na Tabela 33 os resultados potenciais da tensão são apresentados com o percentual em relação ao testemunho sem cura nota-se que aos 7 dias os valores encontrados tiveram um acréscimo pelas causas já citadas acima, no entanto o valor maior do que o referência encontrado aos 90 dias (6,882 MPa) pode ser uma discrepância da curva padrão, e ou está vinculada a um erro durante o processo ou ainda ao aumento da rigidez da fibra devido as reações dos álcalis. Contudo, a Tabela 33, reforça que os CTs tendem a perder capacidade de deformação ao longo do tempo, deixando de ser um material dúctil e se tornando um material com maior fragilidade.

Tabela 33: Diferenças das tensões potenciais e deformações correspondentes ao longo do tempo em %

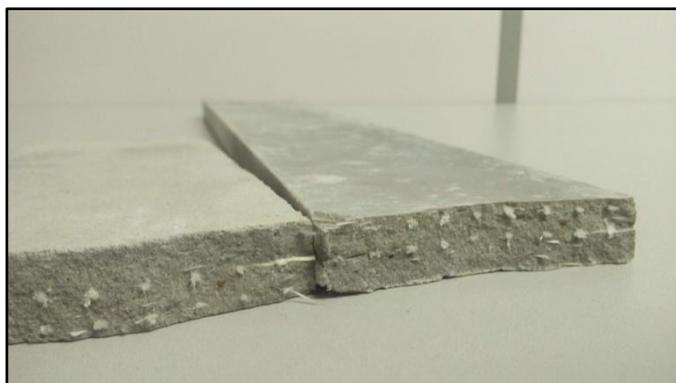
	$\sigma_u$	$\delta_u$
0 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	-	-
7 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(+)29%	(-)83%
28 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)15%	(-)67%
56 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)14%	(-)56%
84 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(-)8%	(-)94%
90 dias de envelhecimento acelerado à 60°C	(+)23%	(-)91%

Legenda:  $\sigma_u$ (Tensão última);  $\epsilon_u$ (Deformação última)

#### 4.3.3 Característica do rompimento do fio da tela de fibra de vidro AR submetidas ao ensaio de tração direta

O padrão de rompimento das telas foi o mesmo encontrado nos ensaios de tração na flexão, conforme a idade de envelhecimento vai avançando o padrão de rompimento do concreto têxtil se modifica, a Figura 55 é uma imagem de uma seção de um corpo de prova após o rompimento com 84 dias de envelhecimento.

Figura 55: Corpo de prova com 84 dias de envelhecimento



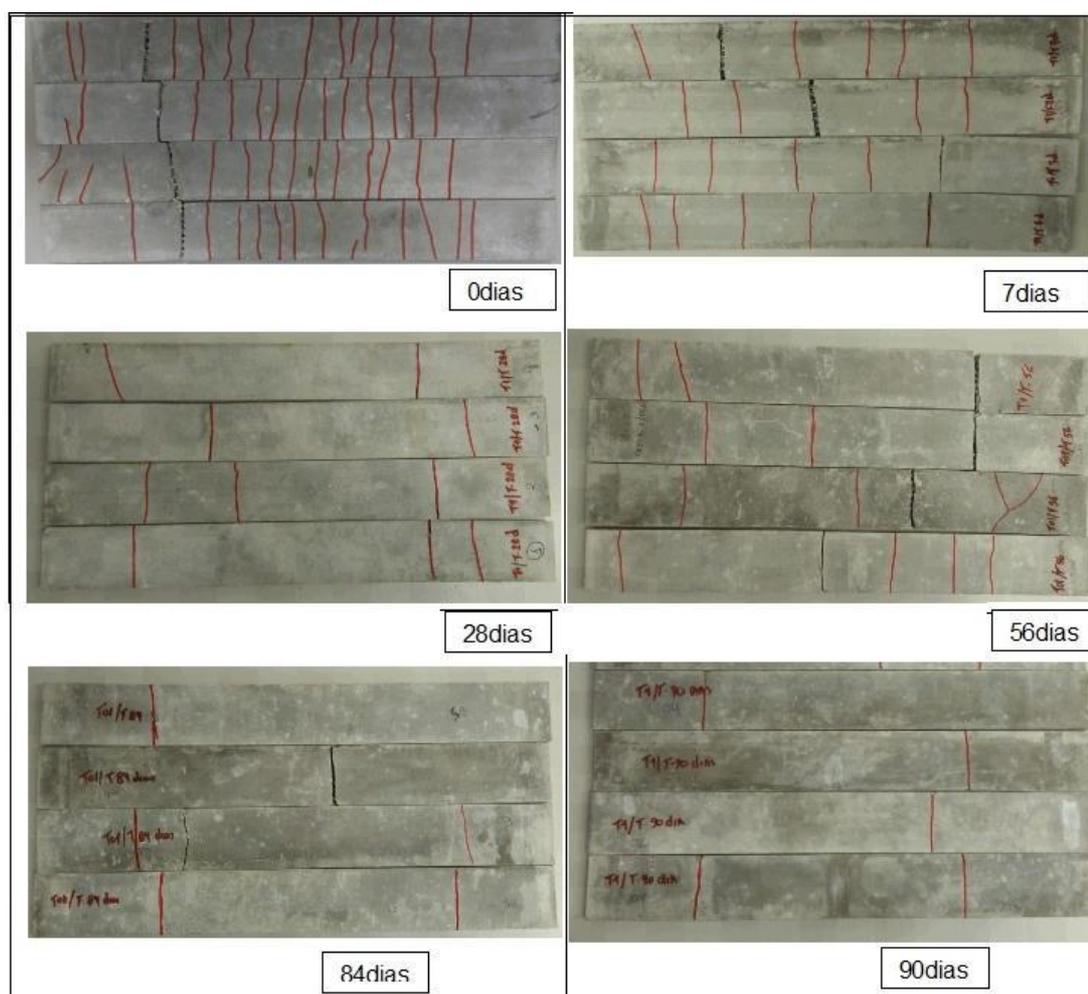
Fonte: autor

Nota-se que o corpo de prova teve um rompimento da fibra, ao contrário do que ocorre no concreto em cura normal, onde a fibra curta é arrancada da matriz cimentícia, neste caso as fibras entraram em colapso não havendo escorregamento por perda de ancoragem.

#### **4.3.4 Característica da fissuração dos CTs com adição de fibras curtas após rompimento à tração direta**

Na Figura 56 são apresentadas as imagens dos corpos de prova após os ensaios, sobre as fissuras foram ressaltados com caneta os locais de fissuração.

Figura 56: Imagens do rompimento do CTs à tração direta com fibra curta



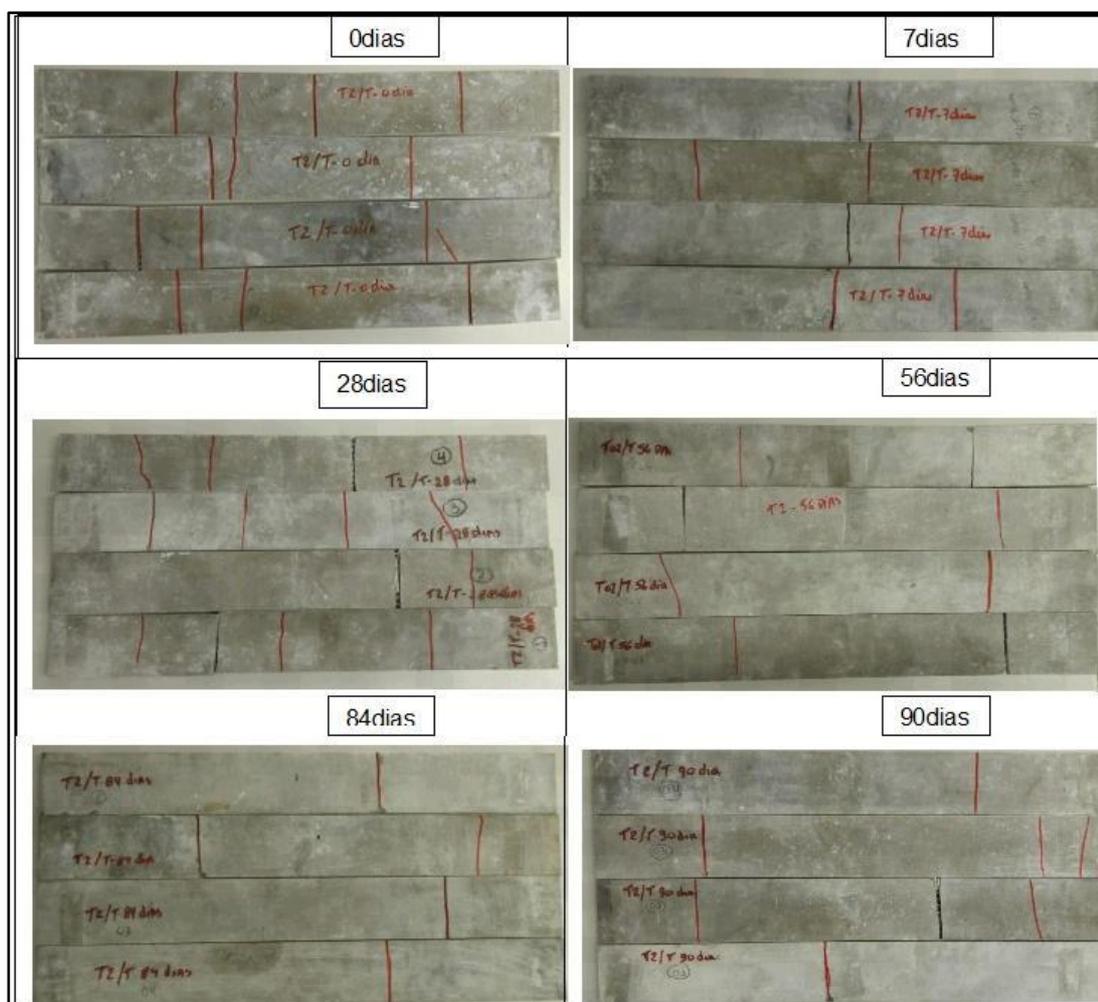
Fonte: autor

Pelas imagens apresentadas se nota que o modelo de rompimento sofreu variações durante o tempo de envelhecimento. Nas primeiras idades o número de fissuras é maior e com menor espaçamento, ao contrário dos testemunhos com idades avançadas de envelhecimento onde esse número foi reduzido e o espaçamento entre elas aumentado.

#### 4.3.5 Característica da fissuração dos CTs sem adição de fibras curtas após rompimento à tração direta

Os corpos de prova sem adição de fibras curtas tiveram fissuras paralelas à largura, com uma redução do número de fissuras nas primeiras idades quando comparados aos concretos com fibras curtas, vide imagens na Figura 57.

Figura 57: Imagens do rompimento do CTs à tração direta sem fibra curta



Fonte autor

Quando comparados aos concretos com adição de fibras curtas ocorreu uma redução no número de fissuras, ou seja, as fibras curtas apesar de estarem em baixa quantidade parecem ter contribuído para melhorar a distribuição das tensões durante a aplicação das cargas.

#### 4.3.6 Análise estatística

Com os resultados encontrados conclui-se que o tempo degrada a fibra de vidro, porém são interações complexas e muitas vezes agindo ao mesmo tempo, sendo difícil a interpretação do que está realmente acontecendo com o compósito.

Para somar ao trabalho foram realizadas análises estatísticas dos resultados, as principais interações foram confrontadas e a significâncias testadas.

#### 4.3.6.1 Análise de significância da influência do tempo de envelhecimento na perda de tensão do CT com e sem fibra curta

Conforme resultados abaixo, Tabela 34, a análise estatística confirma que o tempo tem influência direta sobre a perda de tensão dos CT com fibra curta.

$H_0$  = os resultados de tensão são iguais e não sofrem influência do tempo!

- F de significância é menor do que 0,05 que implica em afirmar que os resultados de tensão possuem influência do tempo de exposição;
- R-quadrado ajustado confirma que 44% dos resultados encontrados são explicados estatisticamente pela ação do tempo de envelhecimento;
- também o  $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$  o que significa que rejeitamos a  $H_0$ , e confirma-se que os valores são estatisticamente diferentes.

Tabela 34: Análise estatística da interferência do tempo na perda da tensão de CTs com adição de fibra curta

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,67895
R-Quadrado	0,46097
R-quadrado ajustado	0,44101
Erro padrão	0,87037
Observações	29

ANOVA						
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F Calculado</i>	<i>F Tabelado</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	17,4926	17,492 0,7575	23,09089	5,14E-05	5,13988E-05
Resíduo	27	20,4539	5			
Total	28	37,9466				

Fonte: autor

Contudo, apesar de os resultados encontrados nas tabelas acima, parece que o tempo de exposição possui pouca influência nos resultados da perda de tensão dos CTs sem fibra curta, a influência do tempo de exposição no resultado explica apenas 16% das perdas de tensões encontradas, vide Tabela 35.

Tabela 35: Análise estatística da interferência do tempo na perda da tensão de CTs sem adição de fibra curta

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,4001141
R-Quadrado	0,160091
R-quadrado ajustado	0,1158854
	1,1105877
Erro padrão	7
Observações	21

ANOVA						
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>M</i> <i>Q</i>	<i>F</i> <i>calculado</i>	<i>F</i> <i>Tabelado</i>	<i>F de</i> <i>significação</i>
Regressão	1	4,46	4,4	3,621508	4,381	0,072301027
Resíduo	19	23,4	1,2			
Total	20	27,9				

Fonte: autor

Também, foi constatado nos gráficos e tabelas acima que os resultados de tensão para os concretos com fibras curtas tiveram um melhor resultado nas primeiras idades, porém os concretos sem adição de fibra curta mantiveram as resistências com menor perda ao longo do tempo, o que leva a considerar que o ataque às fibras curtas acontece de forma mais drástica do que nos concretos com o uso somente de telas têxteis, que recebem uma proteção de resinas durante sua fabricação e possuem menor número de pontos de exposição aos filamentos, uma vez que são utilizados em tamanhos maiores.

#### 4.3.6.2 Análise de significância da influência do tempo de envelhecimento na perda da capacidade de deformação de CTs com e sem fibra curta

Pela Tabela 36 e Tabela 37 pode-se afirmar estatisticamente que os resultados da perda na deformação são influenciados pelo tempo de envelhecimento em ambos os concretos têxteis, com e sem adição de fibra curta, os valores abaixo são indícios a serem considerados:

$H_0$  = os resultados de deformação são iguais e não sofrem influência do tempo!

- $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$  rejeita-se  $H_0$  para o nível de significância de 95%;

- F de significância é menor do que 0,05 o que estatisticamente infere em afirmar que os resultados são influenciados pelo tempo de tratamento;
- R quadrado ajustado em 34% e 47%, para CTs com e sem fibra curta respectivamente, implica que estes percentuais são os valores explicados pelo tempo de exposição na perda de capacidade de deformação dos CTs.

A redução da capacidade de deformação dos CTs ficou evidenciada nas análises visuais dos corpos de prova e também nos gráficos analisados.

Tabela 36: Análise estatística da interferência do tempo na perda da capacidade de deformação de CTs com adição de fibra curta

<i>Estatística de regressão</i>						
R múltiplo		0,60134				
R-Quadrado		0,36161				
R-quadrado ajustado		0,33796				
Erro padrão		0,00979				
Observações		29				

ANOVA						
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F calculado</i>	<i>F tabelado</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	0,00146	0,00146	15,29414	4,225	0,000560
Resíduo	27	0,00258	9,59E-05			
Total	28	0,00405				

Fonte: autor

Tabela 37: Análise estatística da interferência do tempo na perda da capacidade de deformação de CTs sem adição de fibra curta

<i>Estatística de regressão</i>						
R múltiplo		0,70723				
R-Quadrado		0,50018				
R-quadrado ajustado		0,47388				
Erro padrão		0,00562				
Observações		21				

ANOVA						
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F Calculado</i>	<i>F Tabelado</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	0,00060	0,00060	19,0141	4,381	0,00033
Resíduo	19	0,00060	3,16E-05			
Total	20	0,00120				

Fonte: autor

#### 4.4. Estimativa vida útil

A vida útil das estruturas de concreto deve atender aos requisitos do usuário pelo período de tempo estipulado em projeto ou o mínimo solicitado em norma. Segundo a ABNT NBR 15575(2013):

“O período de tempo compreendido entre o início de operação ou o uso de um produto e o momento em que o seu desempenho deixa de atender as exigências do usuário pré-estabelecidas é denominado vida útil.”

Ainda, para a ABNT NBR 15575 (2013) a vida útil estimada em projeto não deve em nenhum momento ser pensada em valores menores do que é estabelecido na Tabela38.

Tabela38: Vida útil de projeto (VUP)

Sistema	VUP mínima (anos)
<b>Estrutura</b>	<b>≥50</b>
Pisos internos	≥13
<b>Vedação vertical externa</b>	<b>≥40</b>
Vedação vertical interna	≥20
Cobertura	≥20
Hidrossanitário	≥20

Fonte: ABNT NBR 15575:2013

Para a avaliação da vida útil dos concretos a simulação do tempo, equivalente aos dias de exposição a 60 °C foi utilizada uma tabela base retirada do trabalho de Proctor, Oakley e Litherland (1982). Com isso os períodos de exposição propostos foram estimados em anos conforme Tabela 39.

Tabela 39: Equivalência do tempo de exposição em 60°C para o Reino Unido

Tempo de exposição em dias (t= 60 °C)	Tempo estimado em anos
7	5,2 anos
28	20,86 anos
56	41,73 anos
84	62,6 anos
90	67,07 anos

Fonte: Adaptado de Proctor, Oakley e Litherland (1982)

##### 4.4.1 Resistência à flexão

Na Tabela 40 são apresentados os valores de resistência à flexão última dos CTs para 0, 40 e 50 anos de uso das estruturas de CT.

Tabela 40 Valores de resistência a flexão para VUP

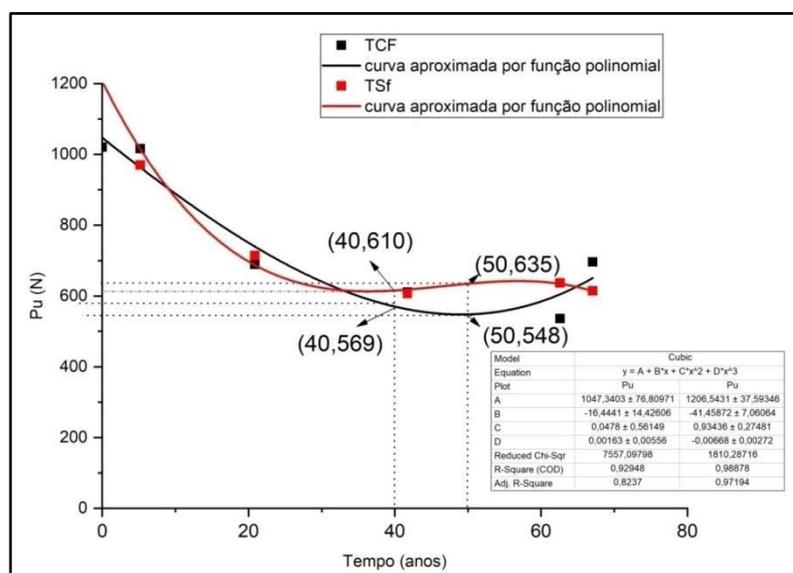
	TCF	TSF
Tempo	$F_u$	$F_u$
Anos	(N)	(N)
Referência	1043,19	895,42
40	569,00(-45,4%)	610(-31,87%)
50	548(-47,5 %)	635(-29,08%)

Legenda:  $F_u$  (Tensão última);  $\delta_u$ (Deslocamento último)

A Figura 58 foi gerada através dos dados de resistência a flexão média dos corpos de prova, e estima-se que para uma vida útil de 40 anos, para painéis de fechamento externos, deve-se prever uma perda estimada em 45 % para a resistência a flexão do compósito com tela e adição de fibra curta e 31,87% para a resistência a flexão do compósito com tela sem adição de fibra curta. Para as estruturas das edificações, VUP de 50 anos, essa perda deve ser próxima de 45% para ambos os concretos têxteis, ou seja, o projeto deve prever as perdas de resistências para garantir a vida útil da edificação.

Contudo, há de se considerar que a análise da vida útil foi realizada utilizando os dados da região do Reino Unido provenientes do trabalho de Proctor, Oakley e Litherland (1982), uma vez que para a região sul do Brasil não temos esta equivalência, o que deverá ser realizado em trabalhos futuros.

Figura 58: Perda de resistência à flexão de CTs com e sem presença de fibra curta nos períodos de 40 e 50 anos de vida útil



Fonte: autor

Pode se verificar através do gráfico acima que não existem diferenças significativas entre os concretos com e sem fibras curtas, vide Tabela 41, ou seja, as fibras curtas pouco contribuíram para diminuir a perda de resistência do compósito ao longo do tempo quando analisadas apenas as resistências à flexão nas idades entre 56, 84 e 90 dias de envelhecimento acelerado.

Na Tabela 41 foram compilados todos os resultados encontrados para as idades de 56, 84 e 90 dias de envelhecimento acelerado, para concretos com e sem adição de fibra curta, e os dados estatísticos se encontram abaixo:

$H_0$  = os resultados de flexão são iguais e não sofrem influência do tempo a partir de 56 dias de envelhecimento!

- F de significância é maior do que 0,05 que implica em afirmar que os resultados de tensão são pouco influenciados pelo tempo de exposição;
- R-quadrado ajustado confirma que apenas 5% dos resultados encontrados são explicados estatisticamente pela ação do tempo de envelhecimento;
- Também, o  $F_{\text{calculado}} < F_{\text{tabelado}}$  o que significa que aceitamos a  $H_0$ , e confirma-se que os valores são estatisticamente iguais com nível de certeza de 95%.

Tabela 41: Análise de significância dos resultados à flexão nas idades de 0, 56, 84 e 90 dias envelhecidos em concretos com e sem fibras curtas

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,28928
R-Quadrado	0,08368
R-quadrado ajustado	0,05096
Erro padrão	84,21757
Observações	30

#### ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F calculado</i>	<i>F tabelado</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	18137,16	18137,16	2,557196	4,195	0,121017
Resíduo	28	198592,8	7092,599			
Total	29	216729,9				

Fonte: autor

Abaixo na Tabela 42 e Figura 59 são representados os pontos dos deslocamentos encontrados para as resistências à flexão nas idades de 0, 40 e 50 anos de uso dos concretos têxteis.

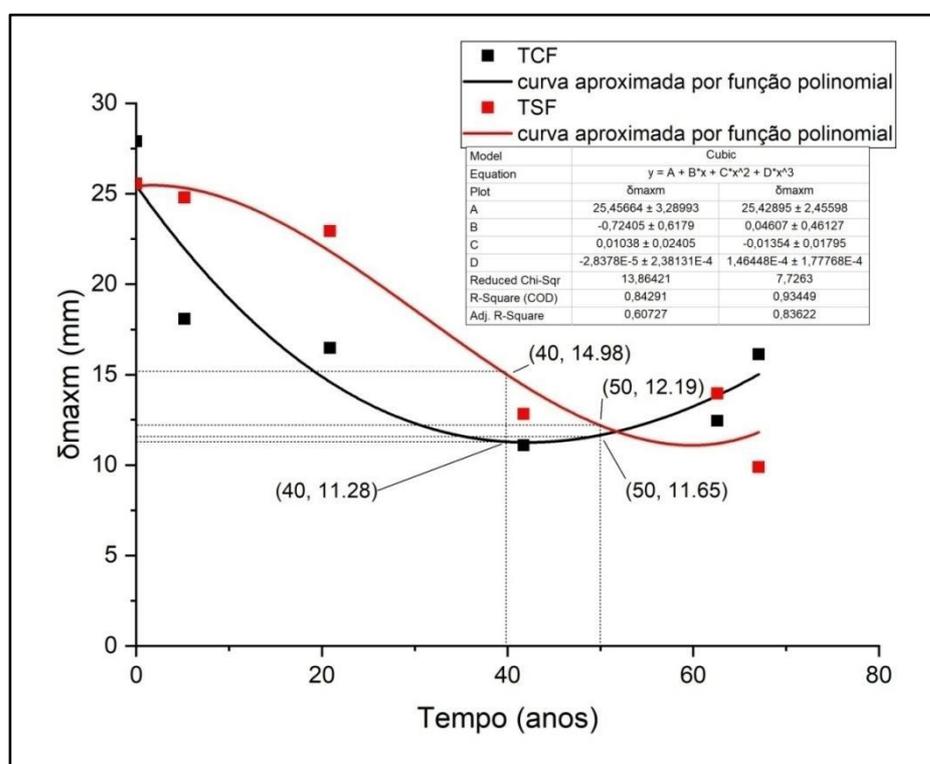
Tabela 42: Valores de deslocamento na flexão para VUP

	<i>TCF</i>	<i>TSF</i>
Tempo	$\delta_u$	$\delta_u$
Anos	(mm)	(mm)
0	23,955	21,38
40	11,28 (-53,04%)	14,98(-29,93%)
50	11,65(-51,37%)	12,19 (-42,98%)

Legenda:  $F_u$  (Tensão última);  $\delta_u$ (Deslocamento último)

Fonte: autor

Figura 59: Diagrama do deslocamento de CTs com e sem fibra curta ensaiados a flexão em 4 pontos



Fonte: autor

Os deslocamentos dos concretos têxteis devem ser considerados durante a avaliação do projeto das estruturas uma vez que tanto para 40 e 50 anos as perdas de capacidade de deslocamento foram consideráveis.

#### 4.4.1 Resistência à tração direta

Na Tabela 43 e Figura 60 são apresentados os valores de resistência à flexão dos CTs para 0, 40 e 50 anos de uso das estruturas, ainda são apresentadas em percentual as perdas ao longo do tempo de uso das estruturas...

Tabela 43: Valores de resistência a tração direta para VUP

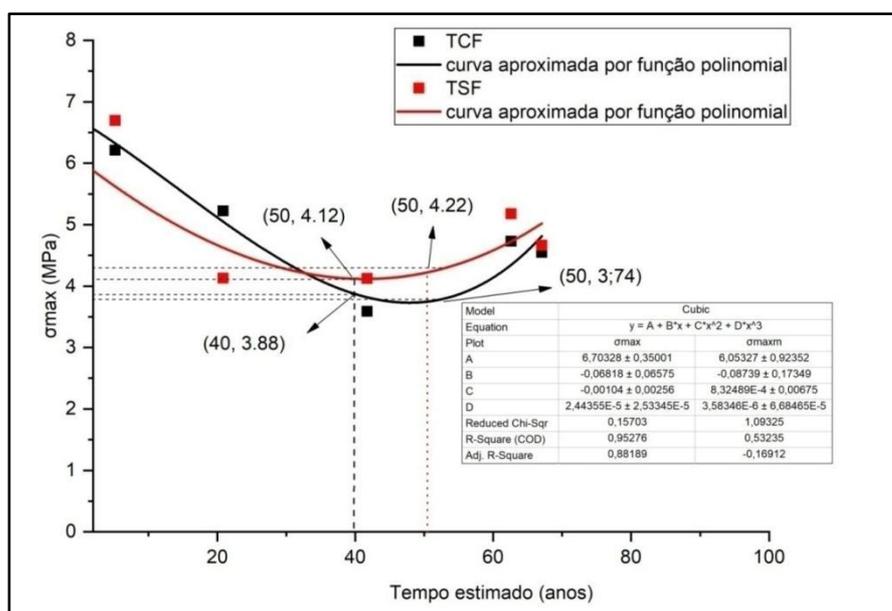
	<i>TCF</i>	<i>TSF</i>
Tempo	$\sigma_u$	$\sigma_u$
Anos	(MPa)	(MPa)
0	6,745	5,37
40	3,88(-44,5%)	3,74 (-23,46%)
50	4,12(-39,8 %)	4,22(-14,90%)

Legenda:  $\sigma_u$ (Tensão máxima);  $\epsilon_u$ (deformação máxima),

A diferença encontrada nos valores de perda estimada aparenta ser anormal para 40 e 50 anos, uma vez que os concretos com menores tempos de exposição apresentaram uma média inferior aos de maiores tempos de exposição à umidade e altas temperaturas, mas isso já foi justificado e a literatura afirma que se trata de um maior envolvimento do têxtil com a argamassa, fator esse que proporciona um rompimento brusco maior do último CT em relação ao primeiro.

Ressalta-se também que os concretos sem presença de fibra curta obtiveram perdas menores para as idades estudadas, evento explicado pelo provável aumento de porosidade na matriz cimentícia pela dosagem de fibra curta em 1% do volume.

Figura 60: Estimativa de perda de resistência a tração direta de CTs com e sem presença de fibra curta nos períodos de 40 e 50 anos de vida útil



Fonte: autor

Pela Tabela 44 não se pode afirmar que nas idades de envelhecimento de 56, 84 e 90 dias os CTs apresentaram as mesmas perdas de resistência à tração direta, apesar de ser uma a significância estatística considerada baixa.

Tabela 44: Análise de significância dos resultados à tração nas idades de 56, 84 e 90 dias envelhecidos em concretos com e sem fibras curtas

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,43657
R-Quadrado	0,19059
R-quadrado ajustado	0,15686
Erro padrão	0,84088
Observações	26

#### ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F calculado</i>	<i>F tabelado</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	3,99602	3,9960	5,6514	4,26	0,02575
Resíduo	24	16,97005	0,7070			
Total	25	20,96607				

Fonte: autor

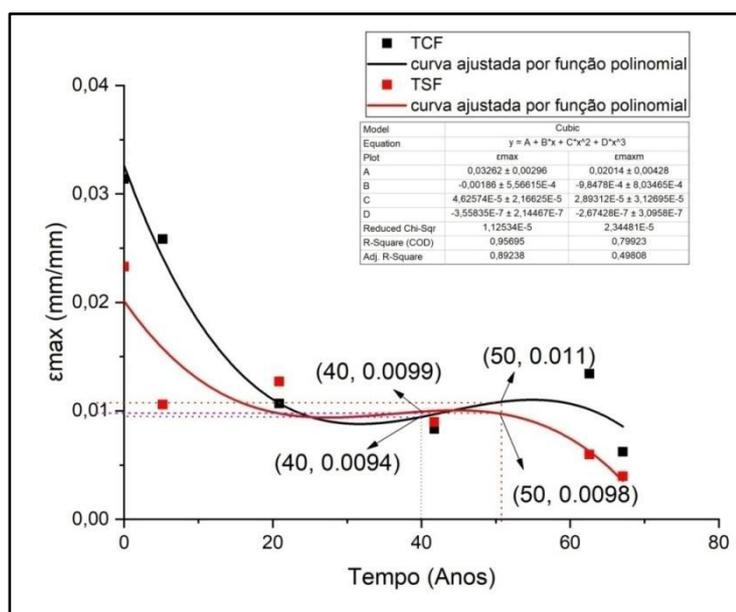
Abaixo na Tabela 43 e Figura 61 estão representados os pontos de deformação encontrados para as resistências à tração nas idades de 0, 40 e 50 anos de uso dos concretos têxteis

Tabela 45: Valores de resistência a tração direta para VUP

	TCF	TCF
Tempo	$\epsilon_u$	$\epsilon_u$
Anos	(mm/mm)	(mm/mm)
0	0,0314	0,0233
40	0,0094(-71%)	0,0099(-57,51%)
50	0,011(-64,97%)	0,0098(-57,93%)

Legenda:  $\sigma_u$  (Tensão última);  $\epsilon_u$  (deformação última),  $\delta_{um}$  (deslocamento último)

Figura 61: Diagrama de deformação de CTs com e sem fibra curta



Fonte: autor

A análise dos dados infere em resultados para a perda da capacidade de deformação bastante agressiva, ou seja, as perdas de deformação em tração direta devem ser bem avaliadas durante a fase de projeto das estruturas.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusões

Com o trabalho realizado foi possível confirmar que o uso de têxteis em concretos pode ser uma solução viável, contudo deve-se ter o conhecimento que o tempo pode afetar as suas propriedades principalmente quando se usa telas de fibra de vidro AR. Abaixo segue as conclusões conforme objetivos definidos:

O objetivo geral deste trabalho foi de avaliar a durabilidade de painéis fabricados com telas de fibras de vidro AR quanto à degradação das fibras em meio alcalino, expostas à agressividade do meio ambiente: pode se afirmar que o tempo, alcalinidade e a temperatura influenciam diretamente a durabilidade do concreto, pôde-se verificar que ocorreram perdas consideráveis de resistência na flexão, tração e deslocamento dos corpos de prova. Com isso devem ser consideradas as perdas de resistência e deformações ao longo do tempo. Como objetivos específicos determinados os seguintes:

*Analisar a resistência dos compósitos cimentícios após envelhecimento comparando com o concreto referência:* notou-se que a resistência à flexão e tração direta dos concretos têxteis com uso de tecidos de fibra de vidro decaem com o aumento do tempo de envelhecimento, mesmo com o uso de fibra de vidro AR e com a proteção extra de resinas utilizadas na conformação da tela, contudo a degradação da fibra diminui com o tempo, tendendo a estabilizar mantendo a resistência. Também, constatou-se que todos os resultados encontrados para a resistência dos corpos de prova tiveram um ganho após o aparecimento da primeira fissura, ou seja, os reforços têxteis funcionam aumentando a carga de rompimento do concreto.

*Verificar a influência da presença da fibra picada AR, com adição de 1% em relação ao volume de matriz quanto à durabilidade do compósito:* Pôde-se afirmar que o uso da fibra curta parece ter pouca influência na carga crítica, capaz de formar a primeira fissura, e carga última dos concretos têxteis. Também, pode-se afirmar que a presença da fibra influencia diretamente na perda de trabalhabilidade da mistura cimentícia no estado fresco e ainda a fibra curta auxilia na redução das retrações do concreto, principalmente nas primeiras idades, reduzindo o número de fissuras nas primeiras idades do concreto.

Simular a vida útil das estruturas aplicando curvas perda de desempenho ao longo do tempo dos CT's: por tudo que foi analisado durante a fase de projeto das edificações devem ser consideradas perdas de resistência à flexão, tração e capacidade de deformação dos concretos ao longo do tempo, contudo deve-se analisar o ambiente onde o tecido têxtil estará exposto e também o uso de dosagens de matrizes com menores teores de álcalis livres devem ser utilizadas.

Também, vale ressaltar que o rompimento dos concretos têxteis tiveram modificações no padrão de rompimento ao longo do tempo, ocorreram perdas de capacidade de deformações e deslocamentos consideráveis durante os ensaios realizados, assim sendo, os corpos de prova parecem ter mudados o padrão de fissuras mais próximas e interligadas, para fissuras espaçadas, em menor número e paralelas à largura do corpo de prova.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

O estudo realizado teve algumas limitações que poderiam ser abordadas em trabalhos futuros, seguem sugestões abaixo:

- ✓ Entender o comportamento dos concretos têxteis com variações na adição de fibra curta;
- ✓ Estudar a influência das dosagens das matrizes cimentícias na durabilidade do concreto têxtil;
- ✓ Estudar a variação de módulo de elasticidade do concreto têxtil ao longo do tempo;
- ✓ Verificar a influência do tipo de resina utilizada na impregnação dos fios na durabilidade dos têxteis;

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM. C1560** - Standard Test Method for Hot Water Accelerated Aging of Glass-Fiber Reinforced. v. 03, n. Reapproved 2009, p. 3–4, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C947-03**. Standard Test Method for Flexural Properties of Thin-Section Glass-Fiber-Reinforced Concrete (Using Simple Beam With Third-Point Loading) 1. Concrete Products, v. 03, n. Reapproved 2016, p. 5–7, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1228-96(2015)**, Standard Practice for Preparing Coupons for Flexural and Washout Tests on Glass Fiber Reinforced Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015,

ABNT NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho. **Rio de Janeiro**, 2013.

AMARAL, J.C.; SILVA, L.; MORAVIA, W.G, Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto. **Revista Matéria**, v.22, n.1, 2017

ANTONS, U. et al. High-temperature tests on concrete specimens reinforced with alkali- resistant glass rovings under bending. **FRP Composites in Civil Engineering**, n. June 2016, p. 8, 2012.

ARABI, N; MOLEZ, L; RANGEARD, D, Durability of Alkali-Resistant Glass Fibers Reinforced Cement Composite: Microstructural Observations of Degradation, **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, February 2018.

BARHUM, R.; MECHTCHERINE, V. Influence of short dispersed and short integral glass fibres on the mechanical behaviour of textile-reinforced concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 46, n. 4, p. 557–572, 2013.

BARTOS, P. J. M. Glassfibre Reinforced Concrete Principles, production, properties and applications. Scotland, UK: **Whittles Publishing**, 2017.

BENTUR, A.; MINDES, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2a edição ed. [s.l: s.n.]. v. 66

BOLINA, F. L., PRAGER, G. L., RODRIGUES, E., et al., “Evaluation off ire resistance of massive rein-forced concrete walls”, **Ambiente Construído**, v. 15, n. 4, pp. 291–305, Dez. 2015.

BRAMESHUBER, W.; BROCKMANN, T.; MOBASHER, B.; PACHOW, U.; PELED, A.; REINHARDT, H.-W.; KRÜGER, M.; WASTIELS, J. **State of the art report of RILEM technical committee 201 TRC: Textile reinforced concrete**. In **Production Technologies**;; Ed.; RILEM: Bagneux, France, 2006; pp. 57–81

BROCKMANN, T. **Mechanical and fracture mechanical properties of fine grained concrete for Textile reinforced composites**. [s.l.] Instituto RWTH de Aachen, 2005.

BUTLER, M.; MECHTCHERINE, V.; HEMPEL, S. Experimental investigations on the durability of fibre-matrix interfaces in textile-reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 4, p. 221–231, 2009.

CARVALHO, J. D. N. Sobre as origens e desenvolvimento do concreto. **Revista Tecnológica**, Maringá, v. 17, p. 19-28, 2008.

CAUICH, P. J. P. et al. Adesão, reforço e durabilidade na reabilitação de vigas de Concreto Armado (RC) usando Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP) - Uma revisão bibliográfica. **Alconpat, Revista**, v. 9, p. 130–150, mar. 2019.

CHENG, B. et al. **Fabrication of ZrO<sub>2</sub> ceramic fiber mats by solution blowing process**. **Ceramics International**, v. 40, n. 9 PART B, p. 15013–15018, 2014.

COLOMBO, I. G. et al. Textile Reinforced Concrete: Experimental investigation on design parameters. **Materials and Structures**, v. 46, n. 11, p. 1933–1951, 2013.

CURBACH, M.; BRÜCKNER, A.:Textile Reinforced Structures : Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS 2). Dresden: **Institut für Massivbau der TU Dresden**, 2003, S. 347-360

MUNCK, M. et al. Durability of sandwich beams with textile reinforced cementitious composite faces. **Construction and Building Materials**, v. 229, p. 116832,

DU, Y. et al. Flexural behavior of basalt textile-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 183, p. 7–21, 2018.

ENFEDAQUE, A. et al. Analysis of glass fiber reinforced cement (GRC) fracture surfaces. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p. 1302–1308, 2010.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, n. 37, p. 36, 2011.

H. FUNKE, S. GELBRICH, A. EHRLICH, Development of a New Hybrid Material of Textile Reinforced Concrete and Glass Fibre Reinforced Plastic, **Procedia Materials Science**, Volume 2, 2013,Pages 103-110

GAYATHRI, C. N.; SINGH, R. B.; DHANALAKSHMI, D. G. Mechanical behaviour of textile reinforced concrete. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 05, n. 05, p. 2227–2231, 2018.

GRCA. **Practical Design Guide for Reinforced Concrete (GRC)**.NORTHAMPTON: [s.n.]. Disponível em: <<https://grca.org.uk/pdf/Practical-Design-Guide-for-GRC.pdf>>.

GRIES, T. et al. **Manufacturing of Textiles for Civil Engineering Applications. Textile Fibre Composites in Civil Engineering**, p. 3–24, 2016.

HÄUSSLER-COMBE, U.; JESSE, F.; CURBACH, M. 7. **Textile reinforced concrete-overview, experimental and theoretical investigations Fracture mechanics of concrete structures.**, 2004.

HEGGER, J. et al. TRC Pedestrian Bridge-Design, Load-bearing Behavior and Production Processes of a Slender and Light-weight Construction. **International RILEM Conference on Material Science**. Anais...Aachen: Rilem, 2010

HEGGER, J.; KULAS, C.; HORSTMANN, M. ET. A. Realization of TRC façades with impregnated AR-glass textiles. **Key Engineering Materials**, v. 466, p. 121–130, 2011.

HEGGER, J.; WILL, N.; RÜBERG, K. Textile reinforced concrete-A new composite material. **Advances in Construction Materials** 2007, p. 147–156, 2007.

HEGGER, J.; ZELL, M.; HORSTMANN, M. Textile reinforced concrete — Realization in applications. Proceedings of the International FIB Symposium 2008 - Tailor Made Concrete Structures: **New Solutions for our Society**. Anais...2008

BOLINA F L.; TUTIKIAN B. F, HELENE P.. **Patologia de estruturas**. São Paulo : Oficina de Textos, 2019.

ISO10406-1. Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete - Test Methods. v. 2015, 2015.

JAMSHAID, H. et al. Interfacial performance and durability of textile reinforced concrete. **Journal of the Textile Institute**, v. 109, n. 7, p. 879–890, 2017.

KAPSALIS, P. et al. **Preliminary High-Temperature Tests of Textile Reinforced Concrete (TRC)**. Proceedings, v. 2, n. 8, p. 522, 2018.

KAPSALIS, P. et al. Thermomechanical behavior of textile reinforced cementitious composites subjected to fire. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 4, 2019.

KULAS, C. **Actual applications and potential of textile-reinforced concrete**. Grc 2015, p. 1–11, 2015.

LAMEIRAS, R. D. M. **Contribuição ao estudo das propriedades dos materiais cimentícios reforçados com fibras de vidro ( glass fibre reinforced cement – grc)**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

LAMOTTE, A.; MOURA, L.; NISHIKAWA, T. **Processo Kroll – Obtenção De Titânio E Zircônio Metálico** Monografia apresentada na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo São Paulo, 2011.

LESOVIK, V. R.; KIYUEV, V. S.; KLYUEV, V. A. The development of textile Fine-Grained fiber using technogenic raw materials. **Research, journal of applied sciences**, p. 6, 2015.

LITHERLAND, K. L.; OAKLEY, D. R.; PROCTOR, B. A. The use of accelerated ageing procedures to predict the long term strength of grc composites. **Cement and Concrete Research**, v. 1, n. c, p. 455–466, 1981.

LOBO, R. M.; ANDRADE, A. H. P. Novas Ligas De Zircônio Para Aplicação Nuclear. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Anais...Campos Jordão, SP: **19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat**, 2010

MACHOVEC, J.; REITERMAN, P. ET AL. Influence of aggressive environment on the tensile properties of textile reinforced concrete. **Acta Polytechnica**, v. 58, n. 4, p. 245–252, 2018.

MAJUMDAR, A. J.; NURSE, R. W. Glass Fibre Reinforced Cement. **Materials Science and Engineering**, v. 15, p. 107–127, 1974.

MAJUMDAR, A. J.; WEST, J. M.; LARNER, L. J. Properties of glass fibres in cement environment. **Journal of Materials Science**, v. 12, n. 5, p. 927–936, 1977.

MANSEAU, A.; SHIELDS, R. Building tomorrow: innovation in construction and engineering. [s.l.] **Taylor & Francis**, 2005.

MARTYNOVA, E.; CEBULLA, H. ET AL. Glass fibers. [s.l.] **Elsevier Ltd.**, 2018.

MECHTCHERINE, V.; SCHNEIDER, K.; BRAMESHUBER, W. Mineral-Based Matrices for Textile-Reinforced Concrete. [s.l.] **Elsevier Ltd.**, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, Fourth Edition. 4a ed. [s.l.] **McGraw-Hill Education**, 2014.

MOCEIKIS, R.; KIČAITĖ, A.; SKRIPKIŪNAS, G.; KORJAKINS, A. Ageing models and accelerated ageing tests of glass fiber reinforced concrete. **Engineering Structures and Technologies**, v. 10, n. 1, p. 10-17, 27 Apr. 2018.

NAAMAN, A. E. textile reinforced cement composites: competitive status and research directions ferrocement. **International RILEM Conference on Material Science**. Anais...Rilem, 2010

NGUYEN, T. H. et al. Experimental study of the effect of simultaneous mechanical and high-temperature loadings on the behaviour of textile-reinforced concrete (TRC). **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 253–270, 2016.

NEVILLE, A.; AİTCIN, P. C. High performance concrete - An overview. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 31, n. 206, p. 111–117, 1998.

NEVILLE, A. M., BROOKS, J. J. Tecnologia do concreto. **Bookman Editora LTDA**, 2 edição, 447 p. Porto Alegre, Rio grande do Sul, 2013.

NOBILI, A. Durability assessment of impregnated Glass Fabric Reinforced Cementitious Matrix (GFRCM) composites in the alkaline and saline environments. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 465–471, 2016.

OHIGASHI, T. durability test method for alkali-resistant glass fiber used as reinforcing element in cement. **Cement and concrete research.**, v. 16, n. c, p. 383–393, 1986.

ONDŘEJ, H. High Strength Concrete Matrix for Textile Reinforced Concrete Production in Special Curing Conditions. **Materials Science Forum**. Anais...Trans Tech Publications, 2015

ORLOWSKY, J. et al. Durability modelling of glass fibre reinforcement in cementitious environment. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 38, n. 276, p. 155–162, 2005.

ORTLEPP, R. **Increased Efficiency of Column Strengthening With Trc By Addition of Short Fibres in the Fine-Grained Concrete Matrix**. n. July, p. 29–36, 2015.

ORTOLAN, V. K.; **Estudo de matriz cimentícia reforçada com fibra têxtil para uso em painéis**; Tese (Doutorado em Eng. Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos/ UNISINOS; Rio Grande do Sul, 2021.

ORTOLAN, V. K.; MANCIO, M.; TUTIKIAN, B. F. Evaluation of the influence of the pH of concrete pore solution on the corrosion resistance of steel reinforcement. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, n. 1, p. 10, 2016.

OWENS CORNING. **Anti-CRAK® fibers for concrete reinforcement** Owens Corning, 2015. Disponível em: <<http://www.ocvreinforcements.com/CemFIL/ab-product-brands.aspx?lg=en>>

PAPANICOLAOU, C. G.; PAPANTONIOU, I. C. Mechanical Behavior of Textile Reinforced Concrete (TRC) / Concrete Composite Elements. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 8, n. 1, p. 35–47, 2010.

PELED, A.; JONES, J.; SHAH, S. P. Effect of matrix modification on durability of glass fiber reinforced cement composites. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 38, n. 276, p. 163–171, 2005.

PORTAL, N. W. et al. Sustainable Potential of Textile-Reinforced Concrete. **American Society of Civil Engineers**, v. 27, n. 7, 2015.

PORTAL, N. W et al. Tensile behaviour of textile reinforcement under accelerated ageing conditions. **Journal of Building Engineering**, v. 5, p. 57–66, 2016.

PROCTOR, B. A.; OAKLEY, D. R.; LITHERLAND, K. L. Developments in the assessment and performance of grc over 10 years. **Composites**, v. 13, n. 2, p. 173–179, 1982.

PURNELL, P. **The durability of glass fibre reinforced cements made with new cementitious matrices**. [s.l.] Aston University, 1998.

PURNELL, P. Interpretation of climatic temperature variations for accelerated ageing models. **MATERIALS SCIENCE**, v. 9, p. 113–118, 2004.

QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2015.

RAUPACH, M. **Epoxy-impregnated textiles in concrete – Load bearing capacity and durability**. International Conference Textile Reinforced Concrete (ICTRC). **Anais...2006**

EINHARDT, H. W., KRÜGER, M., & GROßE, C. U. (2003). Concrete prestressed with textile fabric. **Journal of Advanced Concrete Technology**, 1(3), 231–239. <https://doi.org/10.3151/jact.1.231>

RILEM TECHNICAL COMMITTEE 232. Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 49, n. 12, p. 4923–4927, 2016.

SCHEERER, S. et al. Shells made of textile reinforced concrete -applications in Germany. **Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures**, v. 58, n. 1, p. 79–93, 2017.

TRUE, G. **GRC Production and uses**. 2. ed. New York: Palladian Publications Ltd 1986 Any, 1986.

XIAOCHUN, Q.; XIAOMING, L.; XIAOPEI, C. The applicability of alkaline-resistant glass fiber in cement mortar of road pavement: Corrosion mechanism and performance analysis. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 10, n. 6, p. 536–544, 2017.

WANG, B. et al. Study on the mechanical property of textile reinforced self-stressing concrete sheets. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 1–10, 2016.

YAO, Y. **Characteristics of Distributed Cracking for Analysis and Design of Strain Hardening Cement Based Composites**. [s.l.] ARIZONA STATE UNIVERSITY, 2016.

ZHU, D. et al. Effects of short fiber and pre-tension on the tensile behavior of basalt textile reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 96, p. 33–45, 2019.