

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Tatiana Aparecida Lucia da Silva

**Concreto têxtil e concreto armado reforçado com fibras: Revisão bibliográfica e
exemplo numérico**

Juiz de Fora

2023

Tatiana Aparecida Lucia da Silva

Concreto têxtil e concreto armado reforçado com fibras: Revisão bibliográfica e exemplo numérico

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel Engenharia Civil.

Orientador: Me. Cleber Maestri Gonçalves

Juiz de Fora

2023

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva, Tatiana.

Concreto têxtil e concreto armado reforçado com fibras : Revisão bibliográfica e exemplo numérico / Tatiana Aparecida Lucia da Silva. – 2023.
102 f. : il.

Orientador: Cleber Maestri Gonçalves

Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Juiz de Fora,
Faculdade de Engenharia. Curso de Engenharia Civil, 2023.

1. Concreto têxtil. 2. Reforço com fibras. 3. Materiais conjugados. I. Gonçalves, Cleber Maestri, orient. II. Título.

Tatiana Aparecida Lucia da Silva

Concreto têxtil e concreto armado reforçado com fibras: Revisão bibliográfica e exemplo numérico

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel Engenharia Civil.

Aprovada em 18 de dezembro de 2023

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **CLEBER MAESTRI GONCALVES**
Data: 28/12/2023 13:28:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Cleber Maestri Gonçalves - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Documento assinado digitalmente
 **JULIANE CRISTINA GONCALVES**
Data: 28/12/2023 12:25:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Juliane Cristina Gonçalves
Universidade Federal de Juiz de Fora

Documento assinado digitalmente
 **PAULA DE OLIVEIRA RIBEIRO**
Data: 27/12/2023 19:46:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Paula de Oliveira Ribeiro
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho. Primeiramente, quero agradecer aos meus pais Conceição e Celso, pelo o apoio incondicional e por sempre acreditarem em mim. Ao meu querido irmão Rodrigo, pelo o companheirismo durante os anos de faculdade, pela amizade, parceria e motivações diárias.

Também quero estender a minha gratidão ao grupo O Resto e Armários Caídos, pela partilha dos momentos difíceis durante a faculdade, pelo o compartilhamento de experiencias e incetivos diários. Por não me deixarem desanimar.

A minha eterna dupla na Engenharia, Mariana que percorreu junto comigo esse longo caminho. A minha prima Natália, que desde o inicio sempre esteve ao meu lado e sempre me animou nos momentos mais difíceis. Agradeço também, ao meu companheiro Maikon que me incentivou, me apoiou e nunca me deixou abandonar o barco.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Cleber, pela sua orientação dedicada, conhecimento profundo e paciência ao me guiar durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação foi fundamental para que eu pudesse expandir meus horizontes acadêmicos.

Todos vocês tiveram um papel significativo na minha jornada acadêmica e pessoal, e sou profundamente grata por fazerem parte dessa conquista. Seu apoio foi essencial para que eu pudesse alcançar este momento. Obrigada a todos.

"Nada é tão nosso como os nossos sonhos."(Friedrich Nietzsche)

RESUMO

O concreto reforçado com fibras combina as propriedades das fibras de alta resistência com as do concreto convencional, aumentando sua tração, ductilidade e resistência à fissuração. Essa abordagem tem sido extensamente empregada em diversas aplicações estruturais, enriquecendo a durabilidade e a capacidade de carga das construções. Outra inovação é o concreto têxtil, que utiliza uma malha de fibras têxteis - frequentemente de vidro ou carbono - incorporada na matriz do concreto durante a moldagem, conferindo-lhe propriedades mecânicas robustas e flexibilidade de projeto. O propósito deste estudo é oferecer uma visão panorâmica sobre o uso dessas técnicas na construção de estruturas, abordando sua história, características estruturais, técnicas de reforço em fibras, vantagens e desafios. A metodologia consistiu em uma revisão bibliográfica do assunto apresentado e ao final foi apresentado um exemplo numérico de dimensionamento envolvendo exclusivamente o reforço para armaduras de flexão, utilizando um programa criado no Smath Solver©. O código desenvolvido para esse programa se encontra no Apêndice A - Código do Programa para Cálculo. Os resultados obtidos mostram que o reforço de estruturas com fibras, seja através do concreto têxtil ou do concreto reforçado com fibras, exercem um papel importante na engenharia civil. Ao empregar materiais conjugados é possível aprimorar a resistência à tração e a capacidade de suportar as cargas, aumentando a vida útil e a eficiência das construções existentes. De acordo com o progresso da engenharia civil, a utilização do concreto têxtil e do concreto armado reforçado com fibras desempenhará um papel importante na melhoria de estruturas mais resistentes e de maior durabilidade.

Palavras-chave: Concreto têxtil. Concreto reforçado com fibras (CRF). Materiais conjugados

ABSTRACT

Fiber reinforced concrete combines the properties of high-strength fibers with conventional concrete, enhancing its tensile strength, ductility, and crack resistance. This approach has been extensively employed in various structural applications, enriching the durability and load-bearing capacity of constructions. Another innovation is textile concrete, which utilizes a mesh of textile fibers—often glass or carbon—incorporated into the concrete matrix during molding, imparting robust mechanical properties and design flexibility. The purpose of this study is to provide an overview of the use of these techniques in structure construction, addressing their history, structural characteristics, fiber reinforcement techniques, advantages, and challenges. The methodology used involved a literature review of the presented subject, and, in the end, a numerical example of dimensioning was presented, exclusively involving reinforcement for flexural reinforcement, using a program created in Smath Solver©. The code developed for this program is found in Appendix A - Program Code for Calculation. The obtained results demonstrate that reinforcing structures with fibers, whether through textile concrete or fiber-reinforced concrete, play a significant role in civil engineering. By employing composite materials, it is possible to enhance tensile strength and load-bearing capacity, extending the lifespan and efficiency of existing constructions. As civil engineering progresses, the use of textile concrete and fiber-reinforced concrete will play a crucial role in improving structures for greater strength and durability.

Keywords: Textile concrete. Fiber-reinforced concrete (FRC). Composite materials.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Esquema de classificação para os vários tipos de materiais conjugados que serão discutidos.	15
Figura 2: Fibra de aramida em forma tubular.	16
Figura 3: Fibra de carbono.	16
Figura 4: Fibra de vidro.	17
Figura 5: O empilhamento (diagrama esquemático) em materiais conjugados laminados. (a) Unidirecional; (b) cruzado; (c) camada em ângulo; e (d) multidirecional.	19
Figura 6: Diagrama esquemático mostrando a seção transversal de um painel-sanduíche	20
Figura 7: Diagrama esquemático mostrando a construção de um painel-sanduíche com núcleo de colmeia	21
Figura 8: Configuração do concreto têxtil	24
Figura 9: Esquema de concentração de tensões para um concreto sem fibras (a) e com reforço de fibras(b)	24
Figura 10: Efeitos combinados do concreto armado de aço e com reforço de fibras formando o concreto têxtil	26
Figura 11: Tipos de fibras.	32
Figura 12: Fibra de vidro.	33
Figura 13: Fibras de aço.	34
Figura 14: Tecido em malha. (a) malha em trama (b) malha de urdidura, disposta em trama e urdidura.	35
Figura 15: Tecido multiaxial(a) e tecido de tela (b)	35
Figura 16: Resistência à tração do material conjugado com diferentes tipos de reforços	37
Figura 17: Representações esquemáticas de materiais conjugados reforçados com fibras (a) longas alinhadas, (b) curtas descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente.	38
Figura 18: Diagrama de tensão-deformação de concreto reforçado com têxteis sob carga uniaxial	39
Figura 19: As diferentes estruturas de tecido: (a) tecido de malha de inserção de trama, (b) tecido de malha de trama curta e (c) tecido (tecido liso).	41
Figura 20: Fatores de eficiência da resistência à flexão para os diferentes tecidos, fios frisados desamarrados e fios retos.	43
Figura 21: Filamento, itinerante azul: filamentos externos, vermelho: filamentos internos, tecido não tecido	44
Figura 22: a) Têxtil de carbono plano (impregnado de resina epóxi); b) Reforço moldado em ângulo L (vidro AR, impregnação com resina epóxi)	44

Figura 23: Efeito da impregnação na tensão de tração na ruptura: Comparação de diferentes reforços têxteis (as curvas foram determinadas em material conjugado (esteira de expansão) sob tensão de tração)	45
Figura 24: Nova extensão da sala de testes do Instituto de Concreto Estrutural (Universidade RWTH Aachen)	47
Figura 25: Construção de parede cortina do Instituto de Concreto Estrutural, Universidade RWTH Aachen; a) Visão, b) Detalhe, c) Seção(Universidade RWTH Aachen)	47
Figura 26: Dimensões e reforço de painéis de concreto armado têxtil utilizados (Universidade RWTH Aachen)	48
Figura 27: Testes de flexão realizados em painéis de concreto armado têxtil (Universidade RWTH Aachen)	49
Figura 28: Técnica de fixação dos painéis de parede cortina	49
Figura 29: Construção de parede cortina do Structural Concrete Institute, Universidade RWTH Aachen	50
Figura 30: Painéis de fachada betoShell (Hering GmbH, Alemanha).	50
Figura 31: Centro escolar, Düsseldorf, Alemanha (Fydro BV, NL)	51
Figura 32: Edifício de escritórios, Dortmund, Alemanha (Durapact, Alemanha - Fydro BV, NL).	51
Figura 33: Elementos sanduíche feitos de TRC: a) perfil do tecido do espaçador, b) elemento sanduíche completo [ITA,IMB RWTH Aachen University]. . .	52
Figura 34: Esquema da viga idealizada simplesmente apoiada com reforço externo de FRP.	67
Figura 35: Tiras de juta utilizadas	74
Figura 36: Tira de junta sendo moldada após ter sido molhada na mistura de areia, cimento e água	75
Figura 37: Tira de junta sendo moldada após ter sido molhada na mistura de areia, cimento e água	76
Figura 38: Molde pronto e deixado para secar	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo de composição de matrizes de base mineral	28
Tabela 2 – Tipo de reforço versus tipo de FRP	54
Tabela 3 – Fator de redução ambiental para vários sistemas FRP e condições de exposição.	57
Tabela 4 – Limites de tensão para cargas de serviço sustentadas e cíclicas em reforço com FRP	66
Tabela 5 – Dados do exercício	68
Tabela 6 – Propriedades do sistema de FRP	68
Tabela 7 – Valores do carregamento da viga	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO	12
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	MATERIAIS CONJUGADOS: DEFINIÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS	14
2.2	HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DO CONCRETO E SUAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	22
2.3	CONCRETO ARMADO CONVENCIONAL	22
2.4	CONCRETO TÊXTIL	23
2.4.1	História, Composição, Fabricação e Propriedades	25
2.4.2	Comportamento Mecânico em Função da Disposição das Fibras	26
2.4.3	Processo de Fabricação	29
2.4.4	Reforço Têxtil	31
<i>2.4.4.1</i>	<i>Tipos de Fibras</i>	<i>31</i>
<i>2.4.4.2</i>	<i>Principais Estruturas de Tecido</i>	<i>34</i>
<i>2.4.4.3</i>	<i>Resistência à tração e à flexão</i>	<i>36</i>
<i>2.4.4.4</i>	<i>Aplicações e Usos do Concreto Têxtil como Reforço em Estruturas Cíveis</i>	<i>43</i>
2.5	ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADOS COM FIBRAS (FRP)	53
2.5.1	Introdução	53
2.6	DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO FRP	55
2.6.1	Normatização	55
2.6.2	Dimensionamento do Reforço ao Cisalhamento	55
2.6.3	Dimensionamento do Reforço à Flexão	55
3	EXEMPLO PRÁTICO	67
3.1	EXEMPLO	67
4	FABRICAÇÃO SIMPLIFICADA DE UM ELEMENTO EM CONCRETO TÊXTIL	74
4.1	INTRODUÇÃO:	74
4.2	MATERIAIS UTILIZADOS	74
4.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	75
4.3.1	Preparação da Mistura	75
4.3.2	Moldagem do Corpo de Prova	75
4.3.3	Preenchimento com a Mistura	75
4.3.4	Cura e Secagem	76
4.3.5	Resultados	77

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICE - Código do programa para cálculo	85

1 INTRODUÇÃO

A engenharia civil enfrenta constantemente o desafio de desenvolver técnicas avançadas de reforço em estruturas, buscando aprimorar o desempenho e a durabilidade dessas construções. Nesse contexto, o uso de materiais inovadores e técnicas diferenciadas tem se mostrado promissor. Dentre essas alternativas, destacam-se o concreto têxtil e o reforço de estruturas com fibras, que têm o potencial de superar as limitações do concreto armado convencional.

O concreto reforçado com fibras (CRF) é um material conjugado que combina os benefícios das fibras de alta resistência com as propriedades do concreto convencional. Essas fibras são incorporadas na matriz de concreto durante o processo de mistura, proporcionando assim maior resistência à tração, ductilidade e resistência à fissuração. O CRF tem sido amplamente utilizado em diferentes aplicações estruturais, desde lajes e vigas até mesmo elementos pré-fabricados, devido à sua capacidade de aprimorar a durabilidade e a capacidade de carga das estruturas (BRAMESHUBER, 2015).

Uma abordagem mais recente e promissora é o uso do concreto têxtil. O concreto têxtil consiste em uma matriz de concreto reforçada por uma malha de fibras têxteis. Essa malha, geralmente feita de fibras de vidro ou carbono, é inserida no interior do concreto durante o processo de moldagem, conferindo-lhe características mecânicas e estruturais elevadas. Essa tecnologia tem ganhado destaque devido à sua capacidade de oferecer uma maior flexibilidade de projeto, facilidade de aplicação e elevada resistência à tração (SILVA, *et al.*, 2018).

O reforço de estruturas com fibras, seja por meio do concreto têxtil ou concreto reforçado com fibras, exerce um papel fundamental na engenharia civil. De acordo com Triantafyllou e Dritsos (2013), "o reforço com fibras tem o potencial de melhorar significativamente a resistência à tração do concreto e aumentar sua capacidade de suportar cargas de serviço e cargas de impacto". Diferentes tipos de fibras, como carbono, vidro, aço e polipropileno, podem ser utilizados para essa finalidade.

É importante destacar que tanto o concreto têxtil, quanto o concreto reforçado com fibras apresentam diversos desafios e limitações. O processo de fabricação exige cuidados específicos, como a seleção adequada das fibras, dosagem correta e controle da distribuição das fibras na matriz de concreto. Além de que, a análise estrutural detalhada e o acompanhamento durante a execução das estruturas são fundamentais para garantir a eficiência e a segurança do sistema reforçado (MOBASHER, *et al.*, 2017).

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar os conceitos e aplicações do concreto têxtil e do concreto armado reforçado com fibras na construção civil. Serão abordados tópicos

como: materiais conjugados, definição, classificação e características, história, composição e fabricação e propriedades do concreto têxtil, reforço têxtil e dimensionamento com polímero reforçado com fibras (Fiber Reinforced Pplymer - FRP).

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em 8 capítulos.

No capítulo 1, "Introdução", são feitas as considerações gerais a respeito do tema de concreto têxtil e o concreto armado reforçado com fibras, além disso apresentam-se os objetivos para o trabalho.

O capítulo 2, "Referencial teórico", consiste no capítulo mais extenso, no qual é abordada toda a base teórica do trabalho. Neste capítulo são descritos: materiais conjugados, definição, classificação e características, histórico e evolução do concreto e suas propriedades mecânicas, concreto armado convencional, concreto têxtil, elementos de concreto armado reforçado com fibras (FRP), dimensionamento do reforço FRP.

No capítulo 3, "Exemplo prático", é apresentado um exemplo do dimensionamento do reforço de um viga.

No capítulo 4, "Fabricação simplificada de um elemento em concreto têxtil", onde é explicitado o passo a passo para a fabricação manual de um elemento em concreto têxtil.

No capítulo 5, "Considerações Finais", são apresentadas as considerações acerca dos resultados obtidos .

No capítulo 6, "Sugestões para trabalhos futuros", são feitas sugestões para trabalhos de tema relacionado a serem desenvolvidos.

E, finalmente, são apresentadas as referências usadas para a elaboração do Trabalho de Conclusão de Curso.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

De acordo com Callister Jr. (2016), a escolha do material utilizado na matriz cimentícia é de suma importância para o desempenho mecânico do concreto, visto que a resistência e durabilidade do material dependem de forma direta das propriedades da matriz. Triantafyllou (2016) destaca que a fabricação do concreto têxtil envolve a utilização de fios de multifilamentos contínuos, posicionados na direção da tensão principal, formando uma malha semelhante a um tecido. Desse modo, é possível garantir uma taxa de filamentos uniformes em toda a extensão do material, o que contribui para o aumento da resistência e da durabilidade do concreto.

É necessário realizar a verificação das diferentes características e propriedades das fibras utilizadas como reforço no concreto têxtil. De acordo com Bentur e Mindess (2007), as fibras podem ser classificadas em três grupos: fibras de vidro, fibras de aço e fibras de carbono. Cada tipo de fibra existente possui propriedades distintas, tais como a resistência à tração, módulo de elasticidade e deformabilidade, o que influencia diretamente no comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras.

Portanto, a eficácia do concreto têxtil dependerá da escolha adequada da matriz cimentícia e das fibras utilizadas como reforço.

2.1 MATERIAIS CONJUGADOS: DEFINIÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS

Os materiais conjugados são estruturas formadas pela combinação de diferentes materiais, normalmente designados como matriz e reforço ou reforços, resultando dessa forma em um material com propriedades superiores às de seus materiais de origem. Essa classe de materiais tem sido bastante estudada em diversas áreas devido às suas propriedades mecânicas, químicas e térmicas aperfeiçoadas.

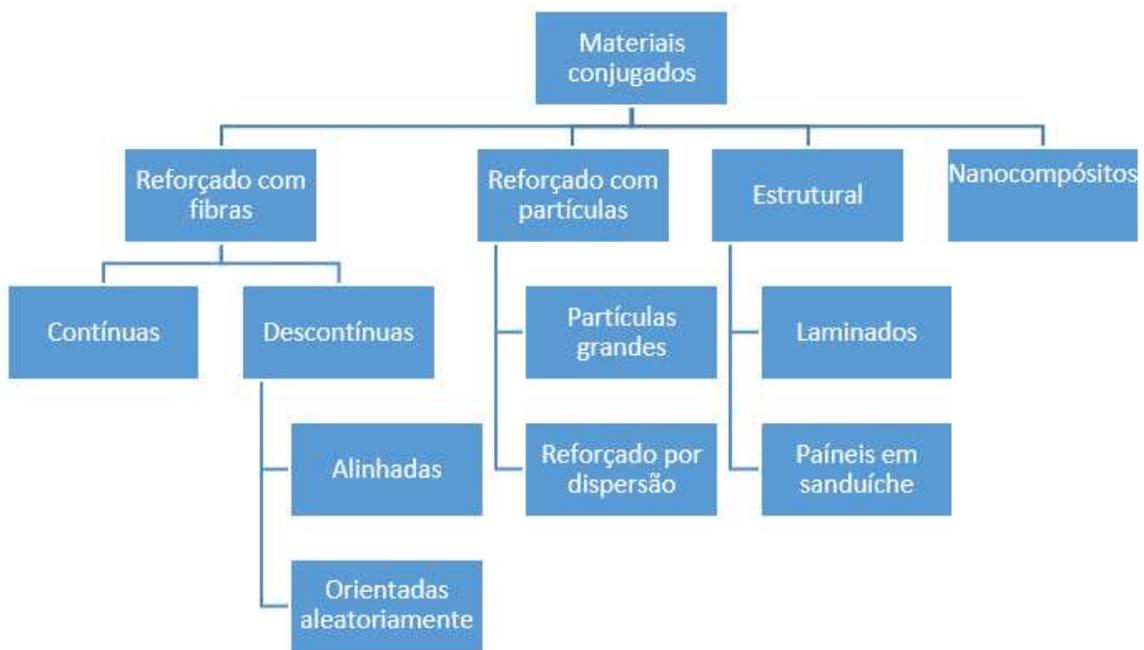
Os reforços desempenham um papel fundamental no aperfeiçoamento das propriedades mecânicas dos materiais conjugados. Alguns tipos mais comuns de reforços compreendem como:

- a. **Reforçado com Fibras:** De acordo com o ponto de vista tecnológico, os materiais conjugados mais significativos são aqueles em que a fase dispersa se apresenta na forma de fibras. Os objetivos de projeto dos materiais conjugados reforçados com fibras constantemente incluem alta resistência e/ou rigidez em relação ao peso. Essas características são expressas em termos dos parâmetros resistência específica e módulo específico, que representam a relação entre o limite de resistência à tração e a massa específica, e entre o módulo de elasticidade e a massa específica, respectivamente. Os materiais conjugados reforçados com fibras que possuem resistências e módulos

específicos excepcionalmente elevados são produzidos utilizando fibras e matrizes de baixa massa específica.

De acordo com a Figura 1, os materiais conjugados são subdivididos com base na forma e dimensões dos seus reforços. A orientação da fibra e as suas dimensões influenciam a rigidez e a resistência do produto final. Fibras contínuas ou longas, orientadas na direção do esforço, resistentes à tração e com alto módulo de elasticidade, transferem o máximo dessas propriedades ao produto final, embora tornem o material ortotrópico, com propriedades bem inferiores no sentido transversal ao esforço. O desalinhamento das fibras torna o material mais isotrópico, embora reduzindo o valor máximo das propriedades. A relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra (razão de aspecto) interfere na sua capacidade de transferir os esforços para a matriz, de tal forma que há um limite de razão de aspecto abaixo do qual a fibra não tem uma contribuição significativa no aumento de algumas propriedades, como a resistência à tração.

Figura 1: Esquema de classificação para os vários tipos de materiais conjugados que serão discutidos.



Fonte: adaptado de Callister Jr.(2016)

- **Materiais conjugados com fibras de Aramida:** A Figura 2 ilustra as fibras de aramida, como o Kevlar®, que possuem propriedades de absorção de energia e alta resistência à tração. Geralmente são utilizadas em aplicações que necessitam resistência balística, como coletes à prova de balas, além disso são utilizados em equipamentos aeroespacial e de proteção esportiva.

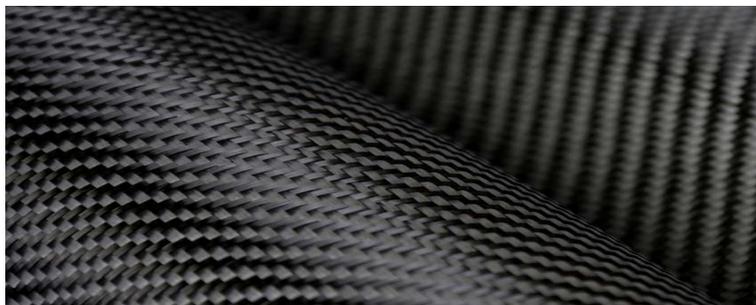
Figura 2: Fibra de aramida em forma tubular.



Fonte: Site Castro Composites (2023)¹

- **Materiais conjugados com fibras de Carbono:** A Figura 3 mostra as fibras de carbono que são conhecidas por sua baixa densidade, alta resistência específica e rigidez. São altamente utilizadas em aplicações aeroespaciais, automotivas e esportivas, onde a resistência e a leveza são requisitos essenciais.

Figura 3: Fibra de carbono.



Fonte: Manual de construção de barcos(2022) ²

¹ Disponível em: <https://www.castrocompositesshop.com/pt/fibras-de-refor%C3%A7o/1214-rede-dearamida-tubular-de-19-mm-e-20-gml.html>. Acesso em: 09 jul. 2023

² Disponível em: <https://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/tipos-de-fibra-de-carbono/>. Acesso em: 09 jul. 2023

- **Materiais conjugados com fibras de Vidro:** A Figura 4 mostra as fibras de vidro que são leves, resistentes e economicamente viáveis. Elas são constantemente utilizadas na indústria de construção civil, na fabricação de embarcações e componentes estruturais, devido à sua resistência à corrosão e facilidade de fabricação.

Figura 4: Fibra de vidro.



Fonte: Site Info Escola (2023) ³

- b. **Materiais conjugados com partículas:** De acordo com o esquema apresentado na Figura 1, os materiais conjugados reforçados com partículas podem ser subdivididos em duas subclasses: materiais conjugados com partículas grandes e materiais conjugados reforçados por dispersão. A diferenciação entre as subclasses é baseada no mecanismo de reforço e aumento da resistência. O termo "partículas grandes" é utilizado para mostrar que as interações entre as partículas e a matriz não podem ser tratadas em nível atômico ou molecular, sendo necessário o uso da mecânica do contínuo. Na maior parte desses materiais conjugados, a fase particulada é mais dura e rígida do que a fase matriz. Essas partículas de reforço tendem a limitar o movimento da fase matriz na vizinhança de cada partícula, transferindo parte da tensão aplicada para elas, que suportam uma fração da carga. A magnitude do reforço e a melhoria do comportamento mecânico dependem de uma forte ligação na interface matriz-partícula (CALLISTER JR., 2016).

Em contrapartida, nos materiais conjugados reforçados por dispersão, as partículas são geralmente muito pequenas, apresentando assim diâmetros entre 0,01 e 0,1 μm

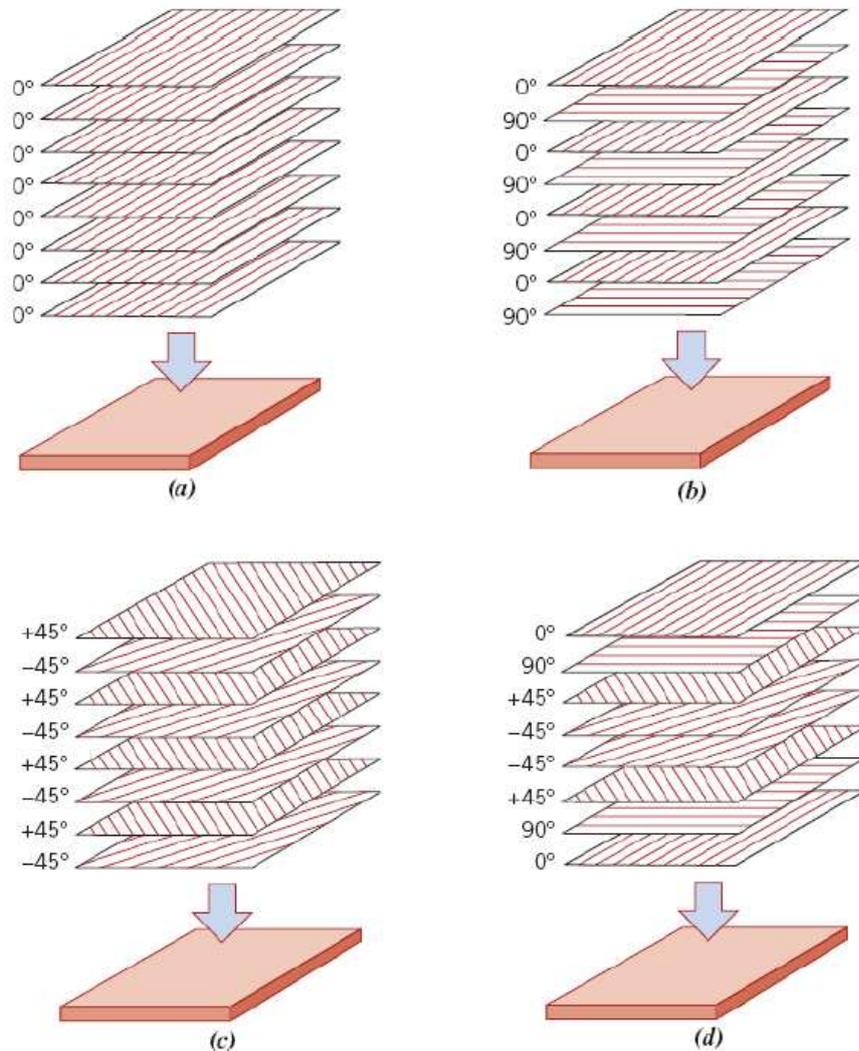
³ Disponível em: <https://www.infoescola.com/quimica/fibra-de-vidro/>. Acesso em: 09 jul. 2023.

(10 e 100 nm). As interações entre partícula e matriz que levam ao aumento da resistência ocorrem em nível molecular ou atômico. A matriz suporta a maior parte da carga aplicada, enquanto as pequenas partículas dispersas restringem a deformação plástica, levando assim a melhoria nos limites de escoamento, resistência à tração e dureza do material conjugado (CALLISTER JR., 2016).

c. **Materiais conjugados estruturais:** é o material composto por várias camadas que são normalmente de baixa densidade, utilizados em aplicações que demandam integridade estrutural, resistência à tração, compressão, torção e rigidez elevadas. As propriedades desses materiais conjugados dependem tanto das propriedades dos materiais utilizados quanto do projeto geométrico dos elementos estruturais. Dois exemplos mais comuns de materiais conjugados estruturais são os conjugados laminados e os painéis-sanduíche.

- **Materiais conjugados laminados:** é formado por camadas bidimensionais coladas entre si, cada uma com uma direção preferencial de alta resistência, como em polímeros reforçados com fibras alinhadas. Essa estrutura com multicamada é chamada de laminado. As propriedades do laminado dependem de fatores como a variação da direção de alta resistência entre as camadas e etc.. Existem quatro classes de materiais conjugados laminados: unidirecional, cruzado, com camadas em ângulo e multidirecional. Nos laminados unidirecionais, todas as camadas têm a mesma direção de alta resistência (Figura 5a). Nos laminados cruzados, as camadas alternam entre orientações de 0° e 90° (Figura 5b). Nos laminados com camadas em ângulo, as camadas posteriores alternam entre orientações de alta resistência de $+\theta$ e $-\theta$ (por exemplo, $\pm 45^\circ$) (Figura 5c). Os laminados multidirecionais têm várias orientações de alta resistência (Figura 5d). Geralmente, as camadas são empilhadas de forma simétrica em relação ao plano central do laminado para evitar torção ou flexão fora do plano. As propriedades no plano de um laminado unidirecional são altamente anisotrópicas, enquanto os laminados cruzados, com camadas em ângulo e multidirecionais são projetados para aumentar a isotropia no plano. No entanto, a isotropia diminui com materiais que possuem camadas em ângulo ou cruzadas.

Figura 5: O empilhamento (diagrama esquemático) em materiais conjugados laminados. (a) Unidirecional; (b) cruzado; (c) camada em ângulo; e (d) multidirecional.



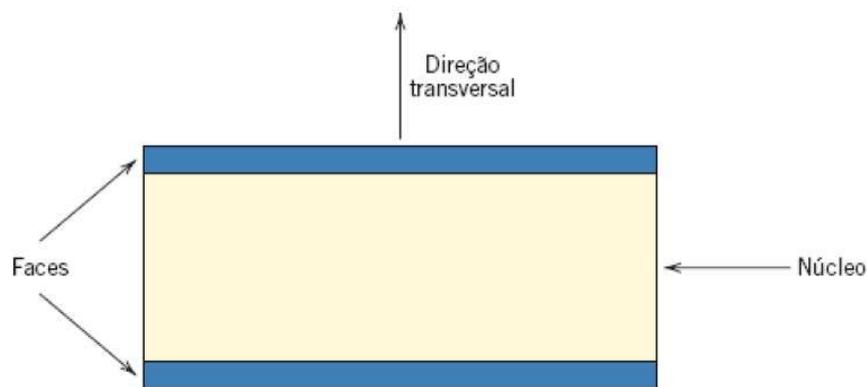
Fonte: Callister Jr.,(2016)

Várias fitas são colocadas umas sobre as outras em diferentes orientações de alta resistência para produzir uma estrutura multicamadas com a configuração desejada. A resistência global e o grau de isotropia dependem do tipo de fibra, do número de camadas e da sequência de orientações. As fibras mais utilizadas em materiais laminados são as de carbono, vidro e aramida. Após a disposição, a resina precisa ser curada e as camadas são aderidas por meio de aquecimento e pressão. As técnicas de processamento pós-disposição incluem moldagem em autoclave, por compressão de ar e moldagem a vácuo. Tecidos, como fibras de algodão, papel ou vidro, também podem ser utilizados para construção de laminados, sendo mergulhados em uma matriz plástica. Os materiais conjugados laminados possuem aplicações importantes nos setores aeroespacial, automotivo, marítimo, construção e infraestrutura civil. Alguns exemplos de aplicações incluem fuselagens, estabilizadores, portas do compartimento do trem de pouso,

pisos, carenagens, lâminas de rotores de helicópteros, painéis de automóveis, carrocerias de carros esportivos, eixos de direção, cascos de navios, tampas de escotilhas, convés, quilhas, propulsores, componentes de pontes, estruturas de telhados, vigas, painéis estruturais, painéis de telhados e tanques na construção e infraestrutura civil. Os materiais conjugados laminados são bastante utilizados em equipamentos esportivos e de recreação, como no caso de esquis modernos, que possuem uma estrutura laminada complexa. (CALLISTER JR.,2016)

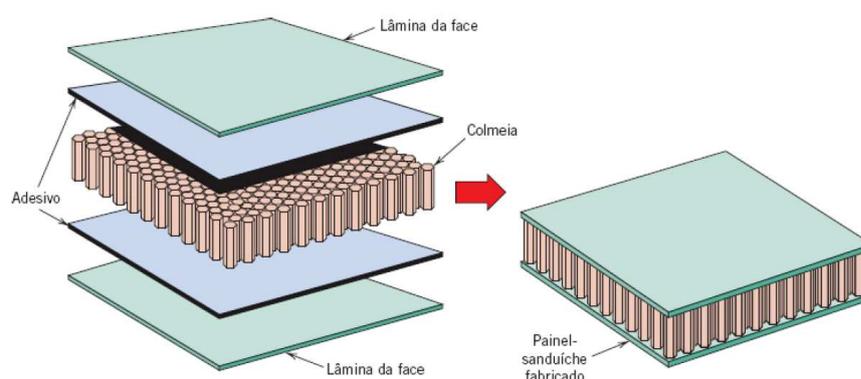
- **Painéis-sanduíches:** são materiais conjugados leves, rígidos e resistentes, constituídos por duas lâminas externas unidas a um núcleo mais espesso (Figura 6). As lâminas externas suportam cargas de flexão, enquanto o núcleo fornece suporte e resistência ao cisalhamento, evitando a flambagem. Os materiais das lâminas podem ser ligas de alumínio, aço inoxidável, plásticos reforçados com fibras e madeira compensada. O núcleo pode ser feito de espumas poliméricas, madeira balsa ou estruturas em colmeia. As colmeias oferecem resistência anisotrópica e propriedades de amortecimento sonoro e de vibrações (Figura 7). Os materiais utilizados incluem ligas metálicas e polímeros como polipropileno, poliuretano e papel kraft.

Figura 6: Diagrama esquemático mostrando a seção transversal de um painel-sanduíche



Fonte: Callister Jr. (2016)

Figura 7: Diagrama esquemático mostrando a construção de um painel-sanduiche com núcleo de colmeia



Fonte: Callister Jr.(2016)

Os painéis-sanduiche dispõem de uma vasta variedade de utilizações nos setores como aeronáutica, construção, indústria automotiva e marítima. Alguns exemplos dessas aplicações são: em aeronaves, eles são usados em bordos de ataque e de fuga, domos de radares, carenagens, carcaças de motores, flaps, lemes, estabilizadores e lâminas de rotores de helicópteros. Na construção, são empregados como revestimento arquitetônico, fachadas decorativas, sistemas de telhados e paredes de isolamento, painéis para salas limpas e gabinetes embutidos. No setor automotivo, são utilizados em revestimentos de teto, pisos de compartimentos de bagagens, coberturas de pneus sobressalentes e pisos de cabines. Na indústria marítima, são aplicados em quilhas, mobiliário e painéis de paredes, tetos e divisórias.

- d. **Nanocompósitos:** são uma nova classe de materiais conjugados que possuem partículas nanométricas introduzidas em uma matriz. Eles podem ser projetados de forma a apresentar propriedades mecânicas, elétricas, magnéticas, ópticas, térmicas, biológicas e de transporte que superam as propriedades de materiais convencionais; adicionalmente, tais propriedades podem ser ajustadas para atender a aplicações específicas. As propriedades físicas e químicas das nanopartículas se alteram por conta da diminuição do seu tamanho, o que é influenciado pela área superficial e pelo comportamento quântico. Os nanocompósitos poliméricos são os mais comuns, incluindo várias resinas e borrachas. As propriedades dos nanocompósitos dependem da matriz, das nanopartículas e das características interfaciais. Os tipos comuns de nanopartículas incluem nanocarbonos, nanoargilas e nanocristais.

2.2 HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DO CONCRETO E SUAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

O concreto é um dos materiais mais utilizado na construção civil no mundo todo. Sua história remete ao período da Antiguidade, com os romanos utilizando uma mistura de cal, areia e pedra para construir suas estruturas de tal forma que ficavam duráveis e resistentes. Com o passar dos anos, o concreto evoluiu, e atualmente é constituído principalmente por cimento, água, areia e brita.

A reação química responsável pela formação do concreto é a hidratação do cimento. Constituído por um processo complicado que acontece ao longo de um determinado período de tempo. O tempo de cura do concreto é um fator fundamental para sua resistência mecânica. De acordo com Mehta e Monteiro (2006), o concreto atinge em torno de apenas 30% de sua resistência final após 7 dias de cura, sendo necessário cerca de 28 dias para alcançar a resistência mecânica esperada.

Ao longo dos anos, alguns engenheiros veem desenvolvendo várias técnicas para aperfeiçoamento das propriedades mecânicas do concreto. Como exemplo tem-se: a adição de aditivos químicos, a utilização de agregados especiais e a introdução de fibras de distintos materiais na mistura do concreto. Segundo Neville (2011), as fibras de aço, vidro e polímero são as mais constantemente empregadas para reforçar o concreto e melhorar suas propriedades mecânicas.

Outra técnica que tem recebido destaque atualmente é o uso de concreto de alta resistência. De acordo com Ferraris (2003), o concreto de alta resistência é aquele que apresenta uma alta resistência à compressão. Utilizado em estruturas que necessitam de alta resistência mecânica como pontes, viadutos e edifícios de grande porte.

O constante progresso de novas tecnologias, materiais e técnicas de construção tem ajudado na evolução contínua do concreto e de suas propriedades mecânicas ao longo dos anos. Assim, a indústria da construção civil pode contar com um material cada vez mais resistente, durável e versátil para a edificação de obras de grande porte.

2.3 CONCRETO ARMADO CONVENCIONAL

O concreto armado convencional é bastante utilizado na engenharia civil como uma técnica para reforçar as estruturas e fornecer maior resistência mecânica. O concreto armado convencional consiste na combinação de dois materiais complementares: o concreto, com alta resistência à compressão, e o aço, resistente à tração.

Mehta e Monteiro (2008) dizem que o concreto armado convencional é constituído por uma matriz de concreto, onde o aço é colocado de forma estratégica para absorver os esforços de tração. O aço contém uma aderência eficaz com o concreto, permitindo a transferência de tensões entre os materiais.

De acordo com Neville (2011), o concreto armado convencional possui diversas vantagens importantes: durabilidade, resistência ao fogo, possui uma vida útil relativamente longa e possui um baixo custo. Com isso, faz com que o concreto armado seja uma escolha popular para a construção de estruturas ao redor do mundo.

Todavia, o concreto armado convencional possui algumas limitações, sendo uma delas a baixa resistência à tração do concreto. Mehta e Monteiro (2008) salientam que o concreto possui uma grande eficiência ao resistir a esforços de compressão, mas possui capacidade limitada de suportar tensões de tração. Logo, a utilização de barras de aço é indispensável para absorver essas forças.

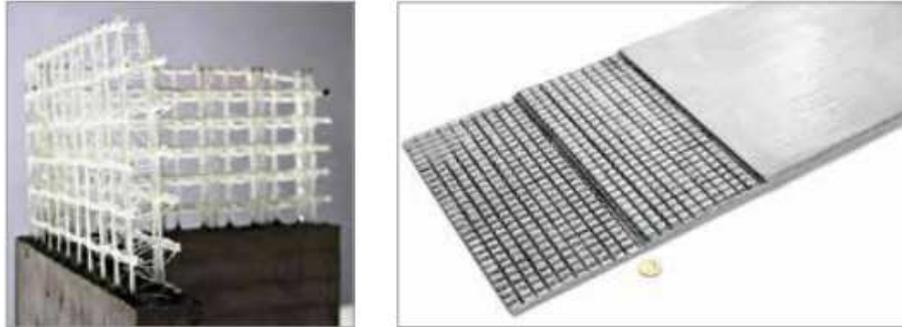
Outra questão que deve ser considerada são as patologias que podem ocorrer. Uma delas é a possibilidade de corrosão do aço no concreto armado. Essa patologia ocorre devido à exposição a ambientes agressivos, como água ou substâncias químicas, que podem levar à corrosão das barras de aço presentes no concreto armado, comprometendo assim a integridade da estrutura. Para combater essas patologias, são adotadas medidas de proteção, como o uso de revestimentos e aço com proteção anticorrosiva.

Embora o concreto armado possua algumas limitações, como mencionadas anteriormente, o mesmo continua sendo amplamente utilizado na construção de estruturas, devido à sua grande eficiência e versatilidade. Entretanto, ao longo do tempo, novas tecnologias e materiais estão surgindo para suprir essas limitações do concreto armado convencional. Um exemplo dessas tecnologias é o concreto têxtil, que representa uma alternativa para melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade das estruturas.

2.4 CONCRETO TÊXTIL

O concreto têxtil é uma tecnologia inovadora e promissora no campo da engenharia civil, que visa ser uma alternativa eficaz para o reforço de estruturas com fibras. Essa tecnologia consiste em uma matriz de cimento reforçada com fios de multifilamentos contínuos posicionados na direção da tensão principal. Esses fios são produzidos em formato de malha, assemelhando-se a um tecido, o que garante uma distribuição uniforme de filamentos em todo o material. A Figura 8 mostra a configuração do concreto têxtil.

Figura 8: Configuração do concreto têxtil

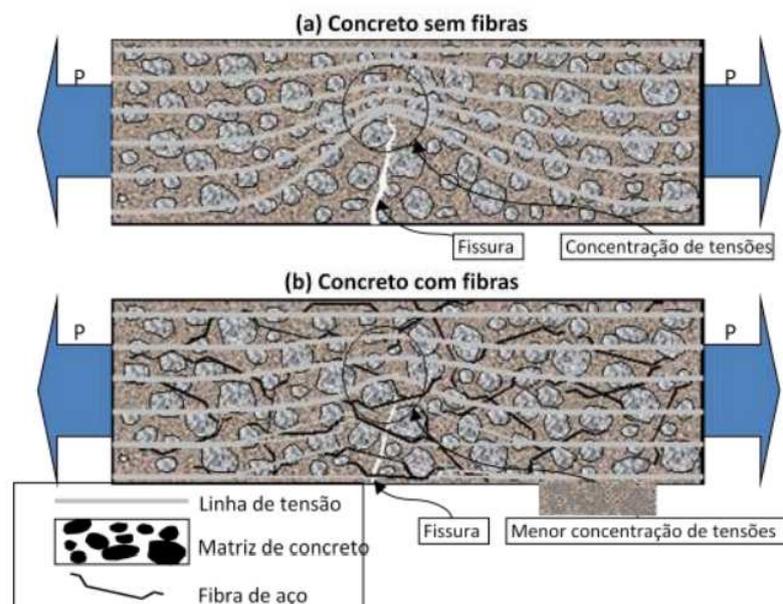


Fonte: Ortolan (2020)

De acordo com Brameshuber (2006), o concreto têxtil possui um comportamento estrutural elevado em relação ao do concreto armado convencional, possibilitando assim um aumento na capacidade de carga e na ductilidade das estruturas. A utilização de fibras na composição do concreto têxtil traz benefícios adicionais, como maior resistência à fadiga, flexão e tração, redução da fissuração e aumento da durabilidade, como apontado por Mobasher (2017).

A Figura 9 apresenta um esquema de concentração de tensões para um concreto sem fibras (a) e com reforço de fibras (b) (FIGUEIREDO, 2000).

Figura 9: Esquema de concentração de tensões para um concreto sem fibras (a) e com reforço de fibras(b)



Fonte: Figueiredo (2011)

O concreto têxtil é um material conjugado que faz a união da boa resistência à compressão do concreto e a alta resistência à tração que o reforço com fibras possui.

O concreto têxtil possui como vantagem a facilidade de aplicação e moldagem. De acordo com Triantafillou (2016), o concreto têxtil pode ser utilizado em diversas formas mais complexas, possibilitando a criação de elementos estruturais com geometrias e tamanhos distintos. Além disso, o concreto têxtil oferece excelente resistência à corrosão, tornando-o adequado para ambientes com alta agressividade e estruturas submersas (TRIANTAFILLOU, 2016).

Vale ressaltar que o concreto têxtil apresenta vantagens significativas em termos de sustentabilidade. Isso se deve ao fato de que as estruturas construídas com esse material podem usar uma quantidade reduzida de concreto, uma vez que não requerem um revestimento de armadura tão espesso quanto as estruturas de concreto armado convencional. Menos material utilizado resulta em economia de recursos e na redução das emissões de CO₂.

A aplicação e desenvolvimento do concreto têxtil são objetos de estudos e inovação contínua por se tratar de um assunto recente. O concreto têxtil possui diversas aplicações, como a utilização em lajes, vigas, pilares e fachadas. Oferece soluções versáteis para a construção civil. Porém, é importante ressaltar que existem muitos desafios a serem superados, como a definição de normas e diretrizes específicas para o uso do concreto têxtil.

2.4.1 História, Composição, Fabricação e Propriedades

O concreto têxtil é uma variação do concreto convencional que utiliza como reforço fibras têxteis em substituição às armaduras metálicas. Segundo Li *et al.* (2015), o concreto têxtil tem sido utilizado em diversas aplicações, como reforço de estruturas, recuperação de estruturas deterioradas e construção de estruturas temporárias.

Também conhecido como "concreto reforçado com fibras têxteis", o concreto têxtil surgiu no início do século XXI como resultado de pesquisas e desenvolvimentos na área de materiais conjugados. No entanto, vale ressaltar que a aplicação de reforço de fibras em materiais de construção, incluindo o concreto, remete a décadas anteriores.

A composição do concreto têxtil é semelhante à do concreto convencional, com a diferença de que o reforço é feito por meio de fibras têxteis. As fibras têxteis mais comuns utilizadas no concreto têxtil são as fibras de vidro, carbono, aramida e polipropileno. Segundo Czaderski *et al.* (2015), a utilização de fibras têxteis como reforço no concreto proporciona diversas vantagens quando se compara com as armaduras metálicas, pois possuem maior resistência à corrosão, menor peso e maior flexibilidade.

As propriedades do concreto têxtil dependem da natureza e quantidade das fibras têxteis utilizadas, bem como da dosagem de cimento, agregados e aditivos. Segundo Silva

et al. (2018), o concreto têxtil apresenta diversas propriedades superiores às do concreto convencional, como maior resistência à tração, menor deformação na ruptura e maior tenacidade.

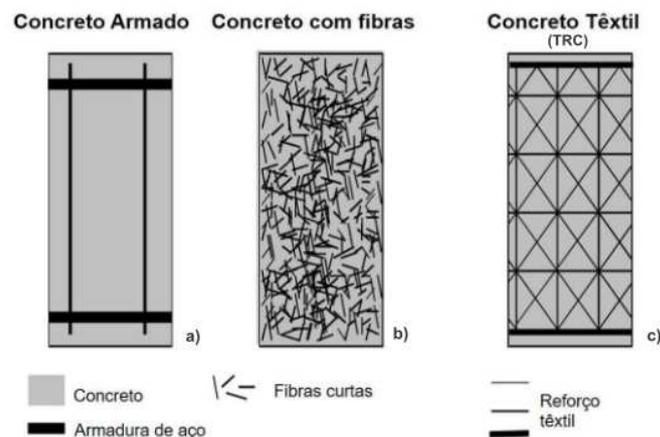
2.4.2 Comportamento Mecânico em Função da Disposição das Fibras

O concreto têxtil consiste em uma matriz cimentícia reforçada com fios de multifilamentos contínuos que estão posicionados na direção da tensão principal (BRAMESHUBER, 2006; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017). O termo "têxtil" faz referência ao processo de fabricação no qual o material assume uma configuração semelhante a dos tecidos. Nesse processo, uma rede de polímeros é empregada em substituição ao aço no concreto armado. De acordo com Peled, Bentur e Mobasher (2017), o tecido é uma estrutura têxtil fabricada em fios, montada por diversos procedimentos, que podem ser: tecelagem, tricô, tranças ou ligação de teias. Embora os têxteis estejam geralmente associados a roupas ou aplicações domésticas, sua aplicação é mais ampla em vários ramos da indústria (TRIATAFILLOU, 2016).

O concreto reforçado com têxtil pouco difere do concreto armado, segundo Schneider, Schätzke e Bergmann (2006). Ambos possuem fluidez adequada no estado fresco para moldagem em formas e geometrias diversas. No entanto, o concreto reforçado com têxtil apresenta características mecânicas positivas em elementos de espessura entre 8 e 30 mm no estado endurecido, o que não é observado no concreto armado, que demanda maiores espessuras e conseqüente maior uso de materiais em sua composição.

Hegger e Voss (2004) explicam a diferença entre o concreto armado, o concreto reforçado com fibras curtas e o concreto reforçado com têxtil (TRC), conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10: Efeitos combinados do concreto armado de aço e com reforço de fibras formando o concreto têxtil



fonte:Hegger e Voss (2004)

De acordo com a Figura 10, em termos de posicionamento do reforço, o TRC (Textile Reinforced concrete) possui uma elevada eficácia quando comparado com a utilização de fibras curtas distribuídas aleatoriamente na matriz, conforme Peled, Bentur e Mobasher (2017). Brameshuber *et al.*(2006) destacam que materiais conjugados cimentícios reforçados com fibras dispersas aleatoriamente não exploram completamente o potencial do reforço, tornando assim necessário a incorporação de grandes proporções volumétricas, a fim de abranger as regiões solicitadas. Para Hegger *et al.* (2006a), a capacidade de carga aumenta com a incorporação de fibras longas em comparação com o concreto reforçado com fibras curtas.

As matrizes de base mineral no concreto têxtil desempenham um papel fundamental na formação do material conjugado, fornecendo coesão e aderência às fibras têxteis e a matriz. O cimento Portland é um dos principais componentes das matrizes de base mineral no concreto têxtil. Segundo Brameshuber e Brockmann (2003), o cimento Portland é amplamente utilizado devido à sua disponibilidade, facilidade de produção e baixo custo. Ele reage com a água para formar compostos cimentícios hidratados, aos quais proporcionam resistência e coesão à matriz.

A Tabela 1 apresenta um exemplo de composição de uma matriz de base mineral como referência, que possui um diâmetro máximo de grão (d_{max}) de 0,6 mm. Essa composição inclui uma quantidade significativa de aglomerante, adições de pozolana e aditivos plastificantes, visando obter uma maior fluidez do material. De acordo com a literatura existente, as misturas de matriz de base mineral variam em relação à relação água/aglomerante (cimento + cinza + sílica), que pode variar de 0,10 a 0,40, e ao diâmetro máximo de grão, que varia de 0,6 a 1,2 mm. A quantidade de aditivo plastificante nessas misturas pode variar de 0,6% a 2,5% da massa do aglomerante utilizado (Brameshuber *et al.*,2006).

Tabela 1 – Exemplo de composição de matrizes de base mineral

Materiais		Matrizes a base de minerais	
		PZ-0899-01 SFB 532	A-1200-01 SFB 532
Quantidade de cimento	kg/m	490	210
Tipo de cimento	-	CEM I 52,5	CEM I 52,5
Ponto de mistura	kg/m	-	-
Cinzas pozolânicas (f)	kg/m	175	455
Sílica ativa (s)	kg/m	35	35
Aglomerantes (c+f+s)	kg/m	700	700
Plastificantes	% de massa de aglomerante	1,5	0,9
Finos silicosos 0-0,125 mm	kg/m	500	470
Areia silicosa 0,2-0,6 mm	kg/m	715	670
Água	kg/m	280	280
a/c	-	0,57	1,33
$a/ag=a/(c+f+s)$	-	0,4	0,4

Fonte: Brameshuber *et al.*(2006)

Há vários anos, o Centro de Pesquisa Colaborativa 532 (SFB 532) da Universidade RWTH Aachen tem investigado os materiais conjugados, formados pela combinação de uma matriz de concreto com têxteis. Nesse contexto, foi desenvolvido no instituto de Pesquisa de Materiais de Construção da Universidade de Aachen um concreto com granulometria fina, que é referência na pesquisa denominado como PZ-0899-01. A mistura inclui aditivos pozolânicos por razões reológicas, mecânicas e de durabilidade (REISGEN; SCHOENE; SCHLESER, 2010).

A mistura A-1200-01 também foi desenvolvida nesse estudo. Essa mistura em sua composição mais da metade do teor de cimento, substituído por cinzas volantes. Essa substituição é relacionada a durabilidade da mistura.

A composição de ambas as misturas está resumida na Tabela 1.

2.4.3 Processo de Fabricação

A escolha da técnica de produção é importante para unir a matriz e o reforço, que podem ser fibras discretas, sistemas contínuos de fibras, tecidos ou suas combinações. Métodos mecanizados e automatizados, como moldagem por compressão, extrusão, pultrusão e enrolamento de filamentos, foram desenvolvidos para melhorar a eficiência e a qualidade da produção em massa. A seleção do método de produção influencia a forma, a qualidade e as propriedades gerais do produto final (MALLICK, 2007 *apud* PELED,2017).

Além disso, para a produção de materiais conjugados à base de cimento de alto desempenho, foram desenvolvidas técnicas especiais, como extrusão, pulverização-sucção e infiltração de lama e fibras. Essas técnicas permitem o uso de uma grande quantidade de fibras, melhorando a resistência à tração, ductilidade e tenacidade dos materiais conjugados. O processo de fabricação e o tempo de processamento também afetam as propriedades do material conjugado, incluindo a aderência fibra-matriz. O uso de tecidos como reforço em conjugados à base de cimento reforçados com tecido (TRC) oferece benefícios adicionais, como maior resistência e ductilidade, além da possibilidade de criar componentes com formas complexas. Diferentes métodos de fabricação, como pulverização, laminação e técnicas inovadoras, são utilizados para atender aos requisitos específicos do projeto e da aplicação (PELED,2017).

A técnica de laminação manual, ou técnica de laminação à mão, é um dos métodos de fabricação mais antigos e simples para produzir materiais conjugados. Nesse método, as camadas de tecidos são posicionadas continuamente umas sobre as outras até atingir a espessura desejada e o número de camadas necessários, enquanto os tecidos são previamente impregnados com a matriz ou pulverizados com a matriz durante a produção, criando materiais conjugados laminados. As vantagens desse método são: sua facilidade e a possibilidade de fabricar produtos grandes e com formas complexas. As desvantagens são: a baixa taxa de produção e muita mão de obra, além das habilidades necessárias para manter a qualidade do produto dentro de limites aceitáveis de variação.

Uma forma eficiente de utilizar a técnica de laminação manual é na produção de materiais conjugados reforçados com tecidos tridimensionais (3D). Nesse caso, duas camadas de tecido são conectadas previamente durante a produção do tecido, enquanto no processo de preparação do material conjugado, a matriz cimentícia é despejada na abertura do tecido até preencher completamente o tecido 3D e cobri-lo (ADIEL e PELED, 2015 *apud* PELED,2017).

A técnica de enrolamento de filamentos é utilizada para fabricar materiais conjugados de camadas cruzadas a partir de mechas contínuas. Nesse processo, um fio contínuo é puxado de um carretel e passa por um tanque de umedecimento antes de ser enrolado ao redor de um molde. O fio, impregnado com cimento, é envolvido em torno de um mandril rotativo, resultando em um conjugado laminado. Essa técnica pode ser aplicada

na produção de tubos, chapas laminadas e materiais conjugados de camadas cruzadas e angulares. O uso de diferentes orientações de camadas permite a criação de materiais conjugados laminados com ângulos variados. Embora apresente uma camada de interface como desvantagem, esse método de enrolamento de filamentos serviu como base para o desenvolvimento do processo de pultrusão, no qual tecidos são utilizados em vez de fios individuais para produzir o material conjugado (CALLISTER JR.,2016).

A pultrusão é um processo contínuo para produção de chapas de tecido-cimento com área transversal reta e constante. Nesse processo, os tecidos passam por uma câmara de infiltração de lama semelhante ao processo de enrolamento de filamentos, permitindo a transferência da lama de cimento sem causar danos aos tecidos. A penetração da pasta de cimento entre as aberturas dos tecidos e os filamentos do feixe é um fator importante para o desenvolvimento e manutenção da aderência. Aditivos como cinza volante, sílica, polímero e fibras curtas podem influenciar a viscosidade da mistura de cimento fresco e sua capacidade de penetração. O tecido impregnado é passado por rolos para distribuir uniformemente a matriz e eliminar o excesso de cimento. As chapas laminadas de tecido-cimento são formadas em um mandril rotativo. Diversas larguras, comprimentos e espessuras de materiais conjugados podem ser produzidas utilizando a técnica de pultrusão. A pressão pode ser aplicada para melhorar a penetração da matriz entre as aberturas dos tecidos e os filamentos do feixe. A quantidade de camadas de tecido pode variar de acordo com os requisitos do compósito. A pultrusão permite o uso de diferentes tipos de tecidos e fibras. Esse método resulta em compósitos uniformes de tecido-cimento com melhorias significativas no desempenho, como comportamento à tração com múltiplas fissuras. Vários parâmetros relacionados aos efeitos do processamento têm sido estudados, incluindo formulação da matriz, direção do processamento, tipos de tecidos e tipos de materiais de fibras. Essas influências são abordadas com mais detalhes nos capítulos subsequentes (CALLISTER JR.,2016).

A técnica de protensão é um método tradicional para superar a fraqueza do concreto na tração. No método tradicional, cabos de aço ou barras são pré-tencionados sob tensão e, quando a tensão é liberada contra uma matriz endurecida, gera uma tensão compressiva que equilibra a tensão de tração que o elemento de concreto experimentaria durante o carregamento. As vantagens do concreto protendido incluem controle de fissuras e concreto mais durável. Um método semelhante foi aplicado ao reforço têxtil, no qual tecidos ou fios contínuos eram inicialmente tensionados antes da produção do material conjugado. A mistura de concreto fresco com agregado fino era moldada em um molde onde os tecidos/fios pré-tencionado eram colocados. A protensão era removida um dia após a moldagem. Diferentes tipos de tecidos foram utilizados com sucesso nesse método, como aramida, carbono e vidro. Dispositivos de fixação especiais foram desenvolvidos para ancorar os tecidos e aplicar o pré-esforço necessário. A técnica de protensão com reforços têxteis melhorou significativamente as propriedades mecânicas dos elementos

estruturais, com maior resistência de aderência entre o tecido (fio) e o concreto, maior durabilidade devido ao retardamento de fissuras e redução da largura das fissuras. Além disso, especialmente quando são utilizados tecidos de tipos trançados, a forma curva dos fios do tecido faz com que o concreto se descole da face do elemento; quando o tecido é pré-tensionado, tais efeitos de curvatura se tornam desprezíveis, não ocorrendo o descolamento do concreto (HEGGER *et al.*, 2006).

2.4.4 Reforço Têxtil

As fibras de carbono são amplamente utilizadas no reforço têxtil de estruturas. Conforme destacado por Callister Jr. (2016), essas fibras apresentam alta resistência específica, rigidez específica elevada e baixa densidade, o que as torna ideais para aplicação como reforço em estruturas de concreto.

A fibra de vidro é amplamente empregada como material de reforço têxtil em diversas aplicações. Conforme mencionado por Triantafyllou (2016), as fibras de vidro possuem alta resistência à tração, são resistentes à corrosão e apresentam baixa densidade, o que as torna adequadas para uso em ambientes agressivos. Além dessas vantagens, a fibra de vidro também se destaca pelo seu custo relativamente mais baixo em comparação a outros materiais de reforço.

As fibras de aramida também são utilizadas como material de reforço em estruturas de concreto. De acordo com Sneed e Rizkalla (2014), as fibras de aramida possuem alta resistência à tração, alta tenacidade e são resistentes à corrosão, o que as tornam ideais para aplicações em estruturas expostas a condições ambientais extremas. Além de que, as fibras de aramida apresentam alta resistência à fadiga, o que as tornam ideais para estruturas sujeitas a cargas cíclicas.

Por fim, outro material utilizado como reforço têxtil é o polímero reforçado com fibras (FRP). De acordo com Rizkalla (2014), o FRP (Fiber reinforced polymer) é constituído por um polímero termofixo (resina) e uma fibra têxtil. O polímero reforçado com fibras apresenta alta resistência à tração e alta rigidez, o que o faz ideal para aplicações de reforço em estruturas de concreto. Além de que, o FRP é resistente à corrosão e apresenta alta durabilidade.

A seguir serão apresentados os materiais fibrosos mais utilizados atualmente na confecção do concreto têxtil, abordando sua composição e propriedades típicas.

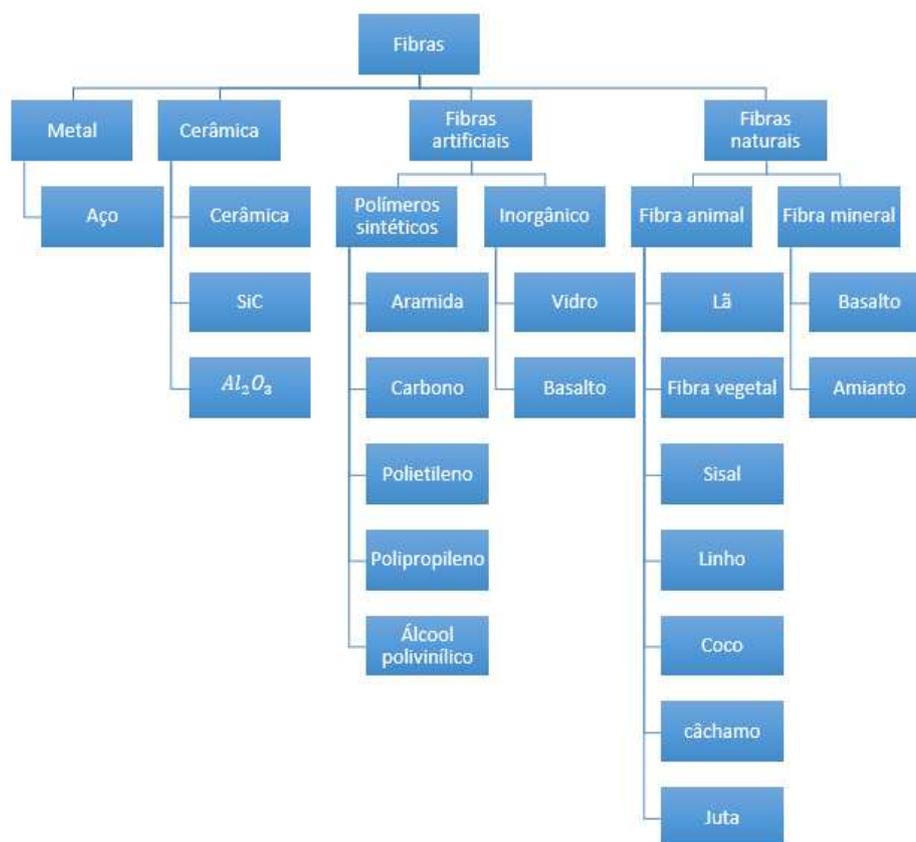
2.4.4.1 Tipos de Fibras

As fibras são produzidas a partir de uma combinação de matérias-primas e podem ser classificadas em dois principais grupos: fibras naturais e fibras artificiais (Figura11). As fibras naturais são obtidas de fontes vegetais, animais e processos geológicos. Uma vasta variedade de plantas é utilizada para produção de fibras, como algodão, celulose, agave

(sisal), coco, cânhamo, linho, juta, kenaf, piaçava, dentre outras. Exemplos de fibras de origem animal incluem seda, lã de ovelha ou cabra. As fibras minerais geológicas englobam basalto e amianto. Por outro lado, as fibras sintéticas são produzidas a partir de materiais inorgânicos, como o vidro, e de materiais sintéticos derivados de produtos petroquímicos que são utilizados para produzir polímeros, como carbono, aramida, polietileno, polipropileno, poliacetato de vinila (PVA) e outros. Além disso, as fibras podem ser feitas de cerâmica, como boro, carboneto de silício ou óxido de alumínio, e de metais, geralmente aço, para aplicações em concreto.

Até o final do século XIX, apenas as fibras naturais, como algodão, lã, linho e seda, estavam disponíveis e amplamente utilizadas. A busca por fibras mais baratas como substitutas da seda foi o principal impulso por trás das primeiras tentativas de desenvolvimento de fibras sintéticas (PELED e BENTUR, 2004).

Figura 11: Tipos de fibras.



Fonte: Adaptado de Peled Bentur (2004)

O uso de fibras têxteis no reforço de concreto é uma alternativa crescente e viável para melhorar as propriedades mecânicas e durabilidade das estruturas. Existem vários tipos de fibras têxteis utilizadas no concreto têxtil, e cada uma possui suas próprias características e vantagens. A seguir, serão apresentados os tipos mais usuais de fibras têxteis no concreto têxtil.

a. **Fibras de Polipropileno**

As fibras de polipropileno são as mais comuns e amplamente utilizadas no concreto têxtil devido à sua disponibilidade comercial e baixo custo. Elas têm um módulo de elasticidade relativamente baixo e uma boa resistência à tração, além de serem resistentes ao meio alcalino do concreto (MORASSUTTI, 2016).

b. **Fibras de Vidro**

A Figura 12 mostra as fibras de vidro que são uma opção popular para o reforço de concreto têxtil devido à sua alta resistência à tração e rigidez, além de serem resistentes à corrosão. Elas também têm uma alta resistência ao fogo e baixa absorção de umidade (MANSUR *et al.*, 2011).

Figura 12: Fibra de vidro.



Fonte: NEOMATEX(2023) ⁴

c. **Fibras de Carbono**

As fibras de carbono são conhecidas por sua alta resistência e rigidez, sendo uma opção de reforço eficiente para estruturas de alto desempenho. No entanto, seu alto custo limita seu uso a projetos de alta tecnologia e especializados (ALEXANDER, 2005).

d. **Fibras de Aço**

A Figura 13 mostra as fibras de aço que são utilizadas no concreto têxtil para melhorar a resistência ao cisalhamento, flexão e impacto das estruturas. Possuem

⁴ Disponível em: <https://www.neomatex.com> fibras-polipropileno. Acesso em: 09 jul. 2023.

alta resistência à tração e são relativamente baratas, porém podem sofrer corrosão (MORASSUTTI, 2016).

Figura 13: Fibras de aço.



Fonte: Site Soluções industriais(2023)⁵

A escolha do tipo de fibra têxtil para um projeto específico dependerá das exigências do desempenho da estrutura, das condições ambientais e das limitações de custo. A combinação de diferentes tipos de fibras também pode ser utilizada para maximizar os benefícios do reforço de fibras têxteis no concreto.

2.4.4.2 Principais Estruturas de Tecido

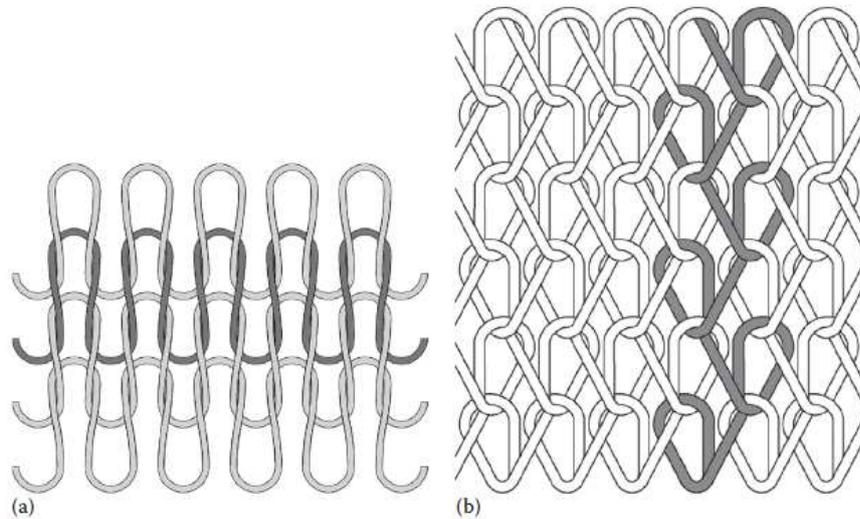
No concreto têxtil, diferentes tipos de texturas do tecido são utilizados para reforçar o material e melhorar suas propriedades mecânicas. Neste tópico, serão abordados os principais tipos de texturas do tecido empregados no concreto têxtil, suas características e aplicações.

a. Tecido de Malha

A Figura 14, mostra o tecido de malha que é uma das texturas mais comuns utilizadas no concreto têxtil. Esse tipo de tecido é formado por fios entrelaçados em um padrão de malha aberta. Ele proporciona uma boa aderência com a matriz de concreto e uma distribuição uniforme das fibras, resultando em um reforço eficiente. O tecido de malha é frequentemente utilizado em aplicações estruturais, como reforço de lajes e vigas (BRAMESHUBER *et al.*, 2006).

⁵ Disponível em: <https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/construcao/matconprodutos-para-construcao/produtos/construcao/fibra-de-aco-para-concreto>. Acesso em: 09 jul. 2023.

Figura 14: Tecido em malha. (a) malha em trama (b) malha de urdidura, disposta em trama e urdidura.



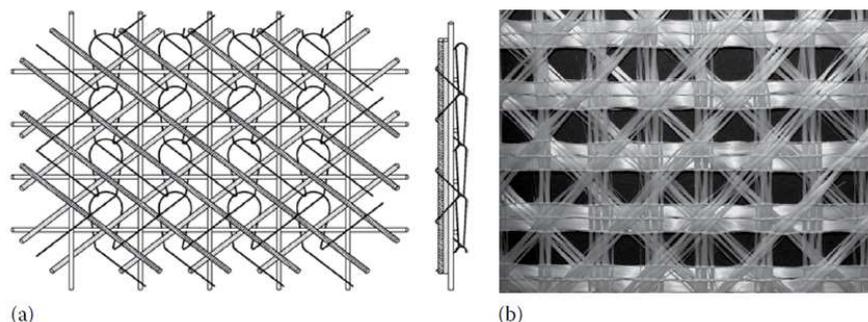
Fonte: Peled e Bentur (2004)

b. Tecido de Tela

O tecido de tela (Figura 15b) é outro tipo de textura utilizado no concreto têxtil. Esse tecido é caracterizado por fios entrelaçados em um padrão de tela, formando uma estrutura mais fechada em comparação com o tecido de malha. Ele proporciona uma maior resistência à tração e uma maior capacidade de reforço. O tecido de tela é comumente empregado em aplicações que exigem maior resistência, como reforço de pilares e estruturas de alta carga (PELED e BENTUR, 2004).

O tecido multiaxial (Figura 15a) é um tipo de textura que combina diferentes orientações de fios entrelaçados. Essa combinação de fios permite obter uma resistência e rigidez multidirecional no concreto têxtil. O tecido multiaxial é utilizado em aplicações que requerem resistência tanto na direção longitudinal quanto na direção transversal, como reforço de elementos estruturais complexos e componentes pré-fabricados (Peled; Bentur, 2004).

Figura 15: Tecido multiaxial(a) e tecido de tela (b)



Fonte: Peled e Bentur (2017)

c. Tecido Híbrido

O tecido híbrido é uma textura que combina diferentes tipos de fibras em uma única estrutura. Esse tipo de tecido é projetado para aproveitar as características de diferentes fibras, como alta resistência e ductilidade. O tecido híbrido é utilizado em aplicações que exigem um reforço específico, como reforço sísmico e reforço de estruturas sujeitas a cargas dinâmicas (PELED e BENTUR, 2004).

2.4.4.3 Resistência à tração e à flexão

A resistência à tração do material conjugado é influenciada pela coesão entre os filamentos, o que impacta os resultados dos testes de resistência. Os valores de resistência alcançados por um único filamento são superiores em comparação com os valores obtidos por um fio e pelo material conjugado. Esse fenômeno pode ser atribuído, em parte, à distribuição desigual de carga entre os filamentos dentro dos fios e à presença de defeitos no material.

Os autores ressaltam que a geometria do tecido desempenha um papel importante na aderência entre os fios, podendo afetar positivamente ou negativamente a eficiência dos fios nos materiais conjugados. Geometrias não lineares, como aquelas mostradas na Figura 15a, demonstraram uma melhor ancoragem na matriz de concreto, resultando em um desempenho global aprimorado do material conjugado (HEGGER et al., 2006a).

Os resultados dos testes de tração mostraram que os materiais conjugados reforçados com tecidos apresentaram um comportamento superior em resistência e rigidez em comparação com o cimento simples. O processo contínuo para a fabricação de materiais conjugados de FRP, foi eficaz em se tratando do vidro como material. Ela proporciona uma melhoria em relação à matriz. Diferentes tecidos, com aberturas e rigidez variadas, resultaram em uma ampla gama de materiais conjugados disponíveis, cada um com características distintas de rigidez (PE de baixo módulo, vidro E de módulo intermediário e vidro AR de alto módulo) (MOBASHER, 1989, PELED, 2005).

No estudo realizado pela Universidade RWTH Aachen na Alemanha, sobre o comportamento à tração dos materiais conjugados reforçados com tecidos, foram obtidos os seguintes resultados:

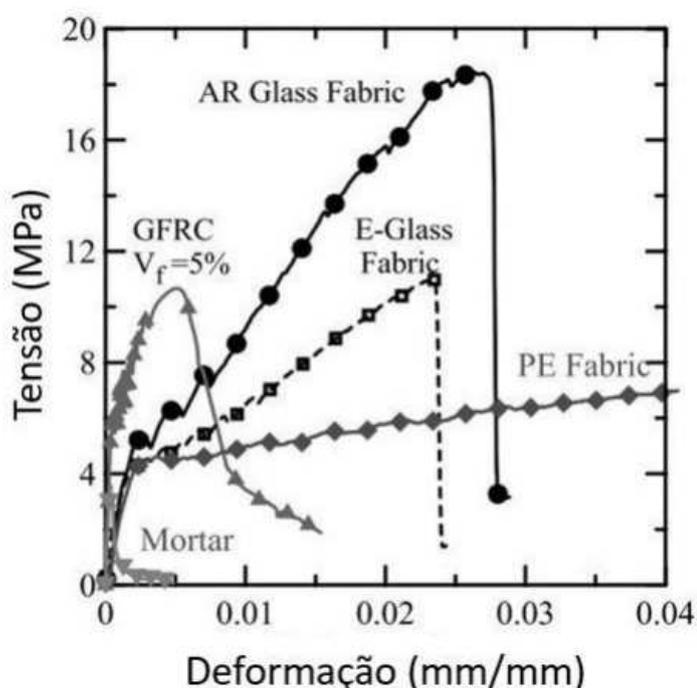
- Resistência à tração: Foi observada resistência à tração em todos os casos, mesmo nos tecidos de polietileno de baixo módulo. O tecido de vidro AR apresentou a maior resistência à tração, com valores entre 18 e 20 MPa, em comparação com 12 MPa para o tecido de vidro E e PE. Isso se deve ao alto módulo de elasticidade do tecido de vidro AR (78 GPa) e às excelentes características de aderência proporcionadas pelo dimensionamento. Por outro lado, o tecido de vidro E teve um desempenho inferior devido à sua baixa durabilidade na matriz de cimento alcalina. O tecido de PE demonstrou um comportamento dúctil, com resistência à tração relativamente baixa, devido à baixa rigidez

dos fios, mas apresentou uma capacidade de deformação superior a 3

- Comparação com outros materiais: A comparação entre os sistemas de tecidos mostrou um comportamento consistente de resistência à tração em todos os casos, evidenciando as propriedades superiores dos conjugados reforçados com tecidos em comparação com outros materiais convencionais, como o concreto reforçado com fibras (GFRC - Glass Fiber Reinforced Concrete). Os materiais conjugados apresentaram uma fase inicial linear, seguida pela formação de múltiplas trincas na matriz. A presença das fibras retardou a propagação das trincas e permitiu uma ampla faixa de deformação antes da falha final.

Em resumo, os materiais conjugados reforçados com tecidos demonstraram resistência à tração em todos os casos, com destaque para o tecido de vidro AR, que apresentou a maior resistência. Além disso, os materiais conjugados mostraram propriedades superiores em comparação com materiais convencionais, como o GFRC, devido à interação entre tecidos, matriz e condições da interface. Esses resultados indicam a eficácia dos materiais conjugados reforçados com tecidos na melhoria do desempenho estrutural, conforme Figura 16.

Figura 16: Resistência à tração do material conjugado com diferentes tipos de reforços

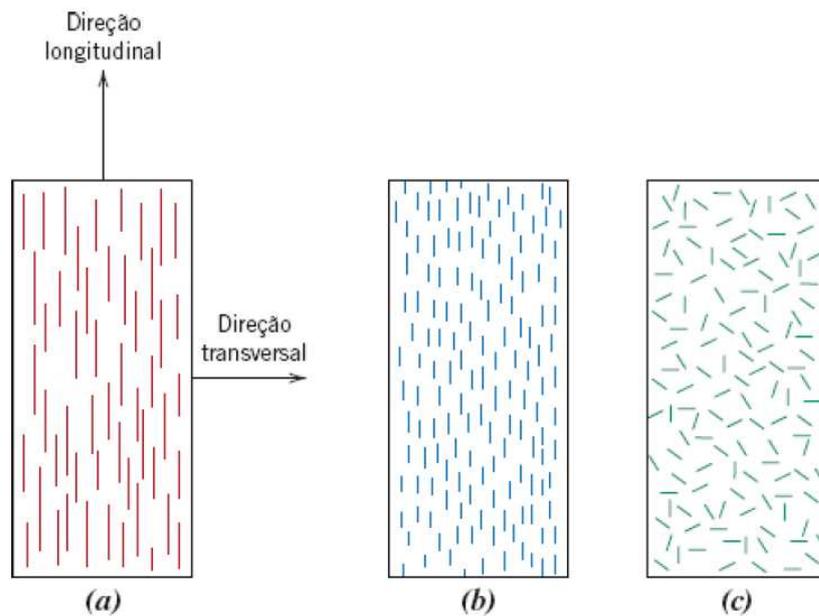


Fonte: Peled e Mobasher (2005)

A disposição ou orientação das fibras, a concentração das fibras e sua distribuição têm um impacto significativo na resistência e em outras propriedades dos materiais conjugados reforçados com fibras. Em relação à orientação, existem duas situações extremas possíveis: (1) um alinhamento paralelo do eixo longitudinal das fibras em uma única direção e (2) um alinhamento totalmente aleatório. As fibras contínuas geralmente

são alinhadas (Figura 17a), enquanto as fibras descontínuas podem estar alinhadas (Figura 17b), orientadas aleatoriamente (Figura 17c) ou parcialmente orientadas. Um conjunto geral de propriedades dos materiais conjugados é obtido quando a distribuição das fibras é feita de forma uniforme (CALLISTER JR.,2016).

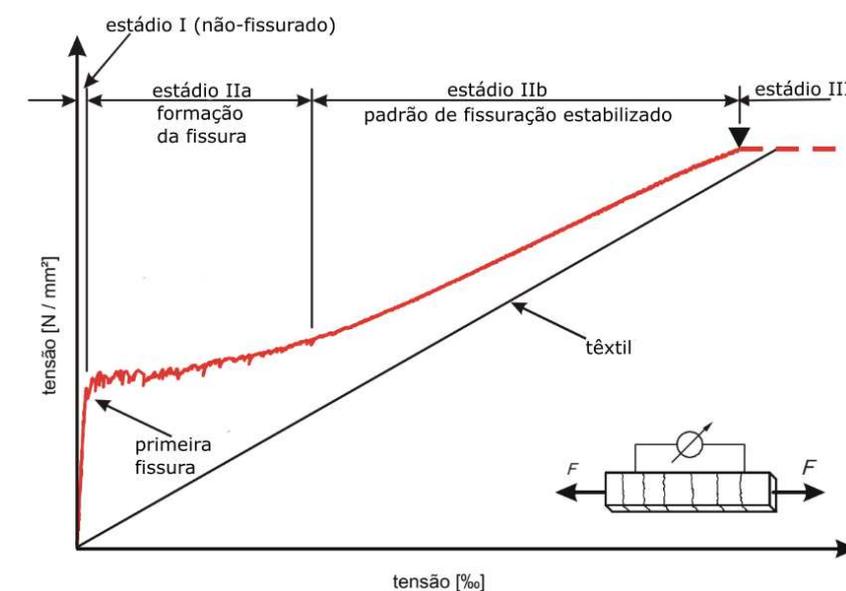
Figura 17: Representações esquemáticas de materiais conjugados reforçados com fibras (a) longas alinhadas, (b) curtas descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente.



Fonte: Callister Jr.(2016)

A curva tensão-deformação do concreto têxtil apresenta semelhanças marcantes com o concreto armado convencional. A Figura 18 ilustra um diagrama teórico de tensão-deformação do concreto têxtil sob carregamento uniaxial.

Figura 18: Diagrama de tensão-deformação de concreto reforçado com têxteis sob carga uniaxial



Fonte: Hegger *et al.* (2006a), tradução da autora

Analisando a Figura 18, pode-se observar que a curva apresenta um comportamento não linear, e pode ser dividida em três seções amplamente conhecidas do concreto convencional.

No início do carregamento, a rigidez do material conjugado não fissurado (estádio I) corresponde aproximadamente ao módulo E (elasticidade) do concreto convencional. Quando a resistência à tração do concreto é excedida, alcança-se o estágio da primeira fissura, onde toda a tensão é transferida para a armadura, que deve ser capaz de suportar essa carga para evitar a falha do material conjugado. À medida que a força de tensão aumenta, ocorrem fissuras adicionais (estádio IIa). Essas fissuras são iniciadas no concreto devido à interação entre os filamentos e as forças do concreto, até que a resistência à tração seja atingida novamente. A distância e a largura das fissuras são determinadas pelas características da armadura, suas conexões com o concreto e a resistência à tração da matriz. Durante a formação de múltiplas fissuras, a curva tensão-deformação mostra um aumento muito pequeno.

No estágio padrão de fissuras estabilizado (estádio IIb), não ocorrem mais fissuras. Com o aumento da carga, os filamentos são tensionados até atingirem sua resistência. Antes de iniciar os testes detalhados, esperava-se que a rigidez no estágio IIb fosse igual ao módulo de Young do reforço. No entanto, na maioria dos testes, a rigidez dos materiais conjugados foi cerca de 10% a 30% menor. A curva tensão-deformação continua aproximadamente paralela à curva tensão-deformação do tecido puro. A diferença é atribuída ao chamado efeito de endurecimento da tensão (HEGGER *et al.*, 2006a).

A área de deformação dúctil (estádio III) não é observada nos testes de tração com

os materiais conjugados reforçado com têxteis, devido à falta de plasticidade nos materiais utilizados (vidro AR, carbono). Portanto, o material conjugado falha de forma frágil ao atingir a tensão de falha de tração do reforço.

Detalhadamente, o concreto têxtil apresenta características específicas no comportamento de suporte de carga, que são influenciadas pelo uso de reforço têxtil feito de fios multifilamentos e pelo material do fio. Embora vários testes tenham sido realizados por pesquisadores diferentes, ainda não é possível explicar detalhadamente os mecanismos envolvidos. Os resultados dependem dos parâmetros utilizados nos testes, ou seja, o tipo de reforço têxtil utilizado e a matriz de concreto (HEGGER *et al.*, 2006).

Até o momento existe uma grande falta de informações sobre a resistência de um filamento e a resistência de um material conjugado. O que se pode afirmar, até o momento é que na maioria dos casos, a resistência de um material conjugado é inferior a 50% da resistência do filamento.

Atualmente o conhecimento sobre a falha do concreto reforçado com têxtil ainda é bastante limitado. Entretanto, sabe-se que vários fatores influenciam na capacidade de carga dos materiais conjugados. Sendo eles:

- Variações nas propriedades do filamento, como resistência e diâmetro (ou carga máxima em um ponto específico).
- Danos nos filamentos durante várias etapas de produção, incluindo manufatura têxtil e manufatura de materiais conjugados.
- Propriedades de união entre os filamentos, como tamanho, impregnação secundária, geometria do fio e confinamento/pressão transversal.
- Propriedades de união entre o fio e a matriz, como tamanho, impregnação secundária, composição da matriz, geometria do fio, idade do composto e histórico de carga.
- Ajuste do filamento, dependendo da qualidade do fio, produção do tecido e tecnologia do concreto.
- Orientação das fibras, ou seja, o ângulo entre as fibras e a carga aplicada.

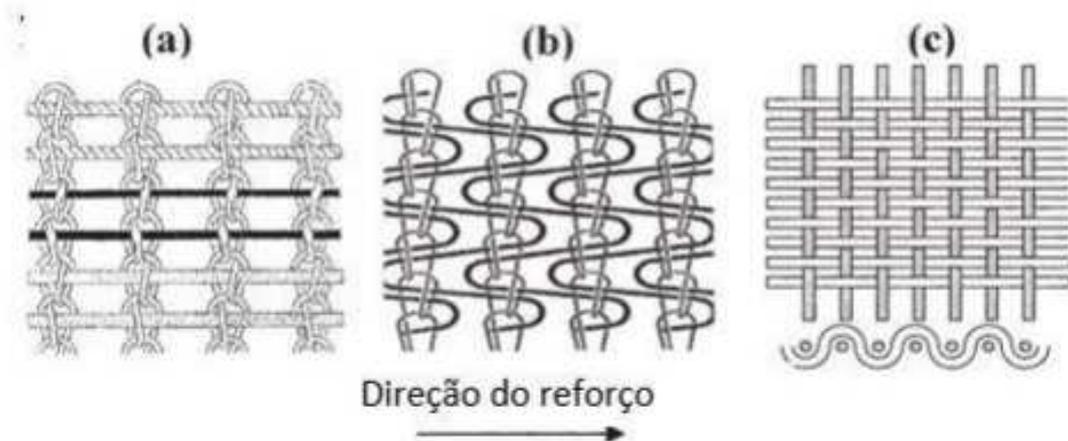
Hegger et al., (2006a, p.137) *apud* Mossaruti(2016) ainda constata:

“O problema é prever se a falha de um único filamento levará a completa falha do compósito ou não. Por isso, – ao contrário do concreto convencional – o comportamento da aderência dos fios possui uma influência determinante na capacidade de carga do material compósito.”

Diversos estudos foram conduzidos para entender a importância da geometria do tecido na interação entre os fios e a matriz de cimento nos materiais conjugados. Essas características de ligação têm um papel considerável no desempenho geral à flexão dos materiais preparados com tecidos.

Durante um estudo realizado pela Universidade de Dresden na Alemanha, foram analisadas três estruturas de tecidos distintas (Figura 19). A primeira consistia em um tecido de malha de urdidura de inserção de trama, produzido a partir de feixes de polipropileno e polietileno de alta densidade. A segunda era composta por tecidos de malha de urdidura de trama curta feitos de monofilamento de polietileno. Já a terceira envolvia tecidos feitos de monofilamentos de polietileno, com trama simples. No caso do tecido de malha de urdidura de inserção de trama, os fios na direção da urdidura eram entrelaçados para formar pontos, conectando assim os fios retos que serviam como reforço do material conjugado. Já no tecido de malha de urdidura de trama curta, os fios da urdidura também eram entrelaçados em pontos, porém, neste caso, eles ligavam um conjunto de fios dispostos intermitentemente nas direções da trama e da urdidura.

Figura 19: As diferentes estruturas de tecido: (a) tecido de malha de inserção de trama, (b) tecido de malha de trama curta e (c) tecido (tecido liso).



Fonte: Peled e Bentur (2004)

Com isso, os fios de reforço são aqueles que possuem uma forma complexa (em zigue-zague) perpendicular aos pontos. No tecido, os fios da urdidura e de trama se entrelaçam, resultando em uma aparência ondulada para os fios do tecido.

Os resultados obtidos a partir dos testes de flexão do material conjugado incluíram a determinação de três parâmetros importantes: resistência à flexão pós-fissuração, tenacidade do material conjugado e eficiência dos fios de reforço.

A resistência à flexão pós-fissuração indica a capacidade do material de suportar cargas mesmo após ocorrerem fissuras. Esse parâmetro é fundamental para avaliar a

capacidade estrutural do material. Através dos testes, foi possível calcular e registrar os valores de resistência à flexão pós-fissuração para o material conjugado.

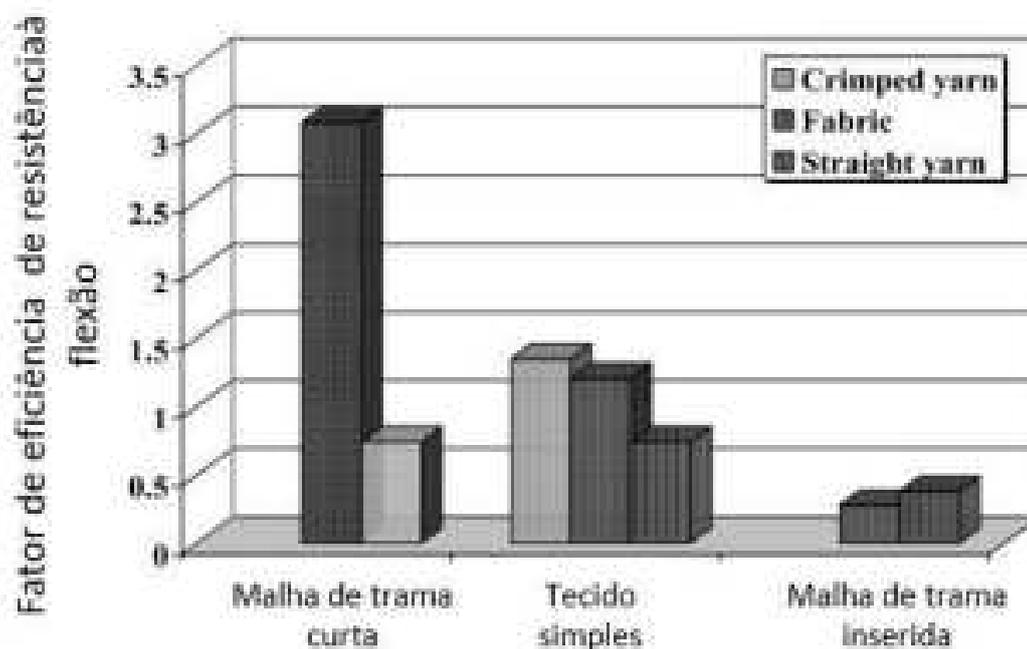
A tenacidade do material conjugado foi calculada como a área sob a curva de carga e deflexão até 7 mm de deflexão. Esse valor representa a capacidade de absorção de energia do material. Quanto maior a área sob a curva, maior a tenacidade do material.

A eficiência dos fios de reforço foi definida como a razão entre a resistência à flexão pós-fissuração e o produto do teor de volume do fio e sua resistência à tração. Esse parâmetro mede o quão eficientemente os fios de reforço estão sendo utilizados no material conjugado. Valores mais altos de eficiência indicam uma melhor utilização dos fios de reforço.

Além dos parâmetros calculados, os pesquisadores ressaltaram a importância da geometria do tecido utilizado no material conjugado. A forma e a disposição dos fios no tecido têm um impacto significativo na aderência entre os fios e na eficiência dos mesmos. Geometrias não lineares, como as ilustradas na Figura 19b, proporcionam uma ancoragem mais eficiente na matriz de concreto, resultando em um desempenho geral aprimorado do material conjugado.

Os resultados evidenciaram que a geometria do tecido desempenha um papel crucial no desempenho e na eficiência dos fios de reforço. Isso significa que o tecido utilizado não deve ser considerado apenas como um meio de manter os fios unidos, mas sim como um elemento que pode melhorar ou reduzir drasticamente a eficiência dos fios. A Figura 20, mencionada no texto, provavelmente ilustra de maneira mais clara os efeitos dessas diferentes geometrias de tecido na aderência e no desempenho geral do material conjugado.

Figura 20: Fatores de eficiência da resistência à flexão para os diferentes tecidos, fios frisados desamarrados e fios retos.



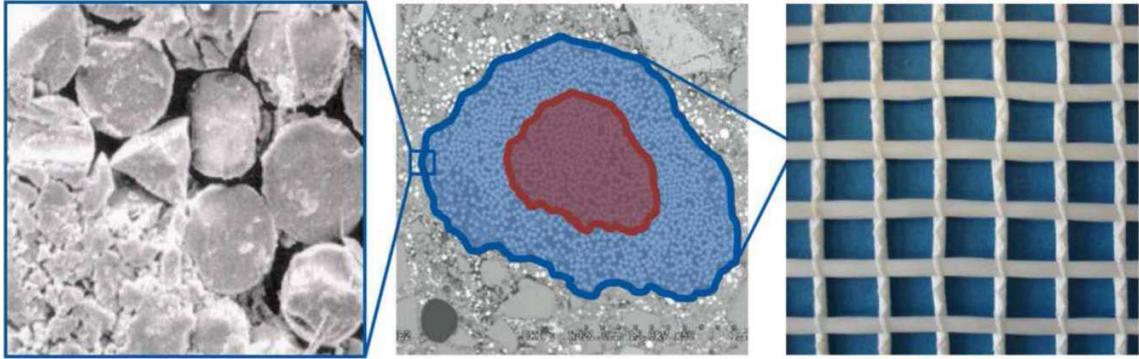
Fonte: Peled e Bentur (2004)

2.4.4.4 Aplicações e Usos do Concreto Têxtil como Reforço em Estruturas Cíveis

O concreto reforçado com aço é um material essencial na construção devido à sua versatilidade e capacidade de carga. No entanto, a corrosão é uma grande desvantagem para o reforço de aço, pois o concreto pode perder sua proteção, levando à fragmentação e falhas estruturais. As estruturas antigas são particularmente vulneráveis devido à falta de cobrimento adequado. As normas atuais exigem um cobrimento de concreto mais alto para evitar a corrosão. A utilização de reforços não metálicos, como fibra de vidro e carbono, é uma alternativa que proporciona alta resistência e não é suscetível à corrosão. O concreto têxtil permite a produção de painéis de fachada mais finos, resultando em economia de concreto e custos de transporte. O concreto têxtil já está sendo usado em novas construções e no reforço de estruturas existentes (C. KULAS,2015).

Os reforços têxteis são compostos por filamentos extremamente finos de vidro resistente a álcalis (vidro AR, ARG) ou carbono (CAR) formam os reforços têxteis (Figura 21 (à esquerda)). Os filamentos são agrupados em fios e processados em tecidos não tecidos. Os espaços microscópicos entre as fibras impedem que as partículas de concreto mais finas penetrem nos filamentos do núcleo. Isso resulta em uma absorção de carga principalmente pelos filamentos da borda externa (área azul na Figura 21, meio), enquanto os filamentos do núcleo permanecem com baixa tensão.(C. KULAS,2015)

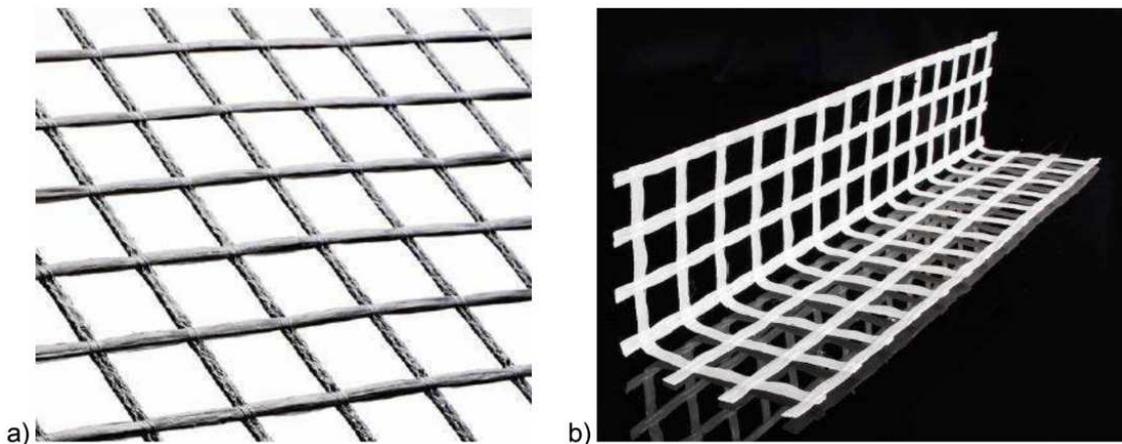
Figura 21: Filamento, itinerante azul: filamentos externos, vermelho: filamentos internos, tecido não tecido



Fonte: C. Kulas (2015)

Para utilizar os têxteis de forma mais eficiente, eles precisam ser impregnados. A mistura de impregnação é muito mais fina do que o concreto, e podem penetrar no núcleo do fio e é capaz de ativar os filamentos internos para dissipação de carga também. A impregnação com resina epóxi ou estireno-butadieno tem se mostrado particularmente eficaz para melhorar a qualidade do material conjugado. A impregnação do reforço de vidro ou carbono torna possível alcançar sistematicamente as características requeridas, como tensão de ruptura e permanência. Além da alta tensão de ruptura, a impregnação com resina epóxi é especialmente adequada para a produção de reforços robustos e dimensionalmente estáveis (Figura 22a) - fatores importantes para os processos de plantas de componentes pré-fabricados e concretagem. Além disso, reforços moldados, como ângulos, perfis em U (Figura 22b), mas também superfícies curvas de forma livre, podem ser fabricados exclusivamente com impregnação de resina epóxi. Reforços moldados são necessários para inúmeras aplicações, como forros para painéis de revestimento de fachada ou reforços de alma e aba para pontes em forma de T (C. KULAS,2015).

Figura 22: a) Têxtil de carbono plano (impregnado de resina epóxi); b) Reforço moldado em ângulo L (vidro AR, impregnação com resina epóxi)

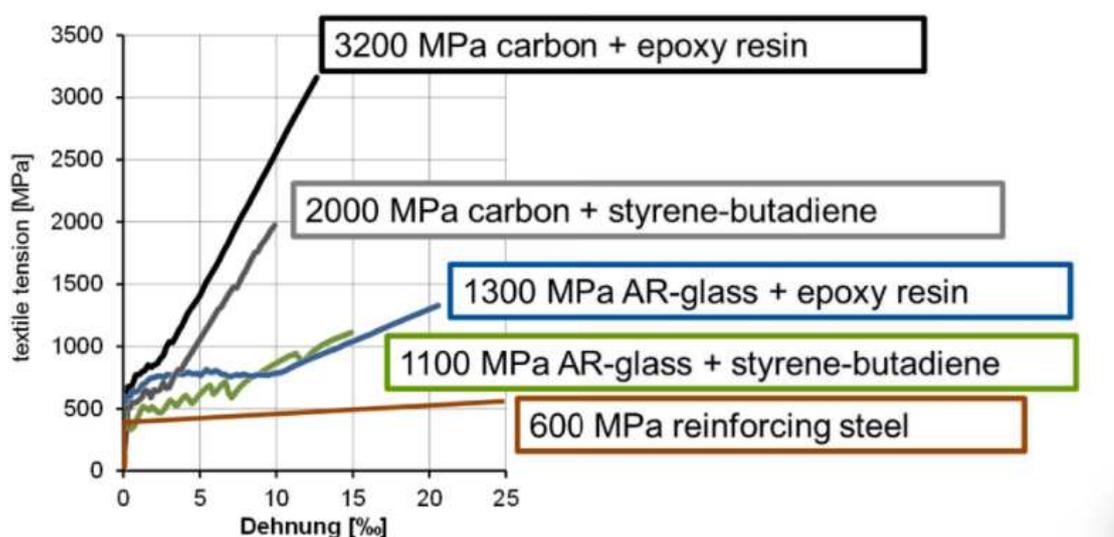


Fonte: C. Kulas (2015)

Em contrapartida, os reforços que podem ser enrolados são comumente utilizados em trabalhos de reformas. Os reforços enroláveis podem, por exemplo, ser gerados através de impregnação de estireno-butadieno.

A Figura 23 apresenta o comportamento de tensão e deformação das quatro combinações de materiais mais comuns utilizados, com base em testes realizados em elementos de construção. Esses testes são ensaios de tração realizados em corpos de prova de concreto armado. Observa-se que o nível de tensão de tração na ruptura alcançado depende da combinação das fibras e do material de impregnação, podendo superar 3000 N/mm². Por outro lado, a rigidez depende principalmente do material da fibra.

Figura 23: Efeito da impregnação na tensão de tração na ruptura: Comparação de diferentes reforços têxteis (as curvas foram determinadas em material conjugado (esteira de expansão) sob tensão de tração)



Fonte: C. Kulas (2015)

A largura da abertura do reforço têxtil é determinada pela granulometria máxima do grão do concreto utilizado. Especialmente no processo de moldagem, a largura da abertura não deve ser muito pequena, pois isso resultaria em um efeito de peneiramento, criando uma camada separadora no elemento de construção. Os reforços têxteis atuais possuem larguras de abertura comparativamente grandes, superiores a 30 mm. Isso significa que não é necessário utilizar um concreto especial com granulometria fina. No processo de moldagem, em vez disso, pode ser utilizado um concreto convencional padronizado com um tamanho máximo do agregado de 8 mm, seguindo uma formulação convencional conforme a norma DIN 1045-2, por exemplo (C. KULAS,2015).

Os reforços de vidro e carbono têm sido amplamente utilizados na construção civil devido às suas propriedades. São aplicados em diversos campos, como reforço de fachadas, elementos sanduíche e construção de pontes.

Além disso, esses reforços podem ser empregados em sistemas de fachada ventilada

de diferentes tamanhos, módulos (como garagens e estações de transformação), unidades de armazenamento (tanques e silos), pontes (tanto em novas construções quanto em manutenção), superfícies de forma livre, estruturas de suporte de carga, lajes de varanda e elementos de construção expostos a cloretos, como tetos de garagem.

A versatilidade desses reforços permite seu uso em uma ampla gama de projetos e ambientes, garantindo maior resistência e durabilidade aos elementos de construção.

Alguns exemplos selecionados da construção de fachadas e pontes são apresentados a seguir.

- **Painéis de revestimento exteriores**

Ao substituir o reforço de aço convencional por reforço têxtil, é possível criar painéis de revestimento delicados com uma ampla variedade de opções de design. A espessura do perfil, anteriormente restrita à construção em aço e estruturas de materiais conjugados de fibra de plástico, pode ser alcançada com o reforço têxtil, resultando em superfícies homogêneas de alta qualidade. Essas vantagens abrem um novo potencial de aplicação para o concreto como material de construção, especialmente para a construção de fachadas. A menor espessura dos painéis alcançada pelo concreto armado com reforço têxtil, em comparação com os 70 a 100 mm exigidos pelos painéis de concreto armado convencionais, resulta em uma carga morta reduzida e elimina a necessidade de buchas complexas para fachadas.

Na realização da construção da extensão de um edifício, foram utilizados painéis de revestimento feitos de TRC, conforme apresentado na Figura 24 do Instituto de Concreto Estrutural da Universidade RWTH Aachen. O corredor de um único piso existente, com extensão de 12,0 m, foi ampliado por meio de quatro eixos espaçados em 5,4 m cada. A parte superior da fachada foi revestida com elementos de parede cortina, enquanto na parte inferior do edifício foram instaladas placas de cascas de sanduíche com espessura de 35 mm (Figura 33).

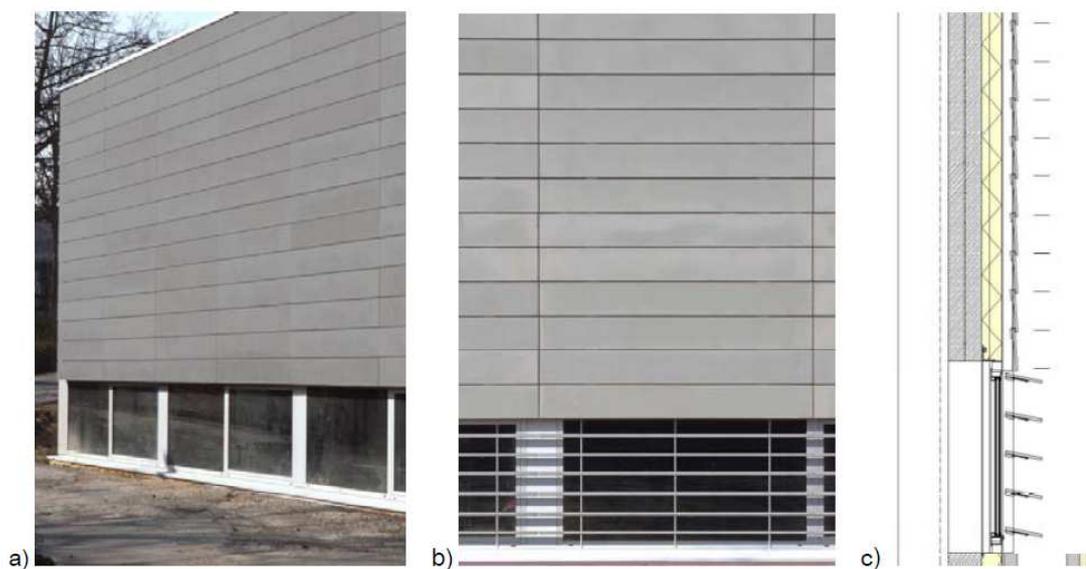
Figura 24: Nova extensão da sala de testes do Instituto de Concreto Estrutural (Universidade RWTH Aachen)



Fonte: C. Kulas (2015)

O design dos painéis da parede cortina é ilustrado na Figura 25. No lado longitudinal do corredor, foram instalados painéis de parede cortina com dimensões de 2685 x 325 x 25 mm em vez de pedras naturais, que seria a escolha típica. O custo elevado das pedras naturais e sua fabricação restrita limitam seu uso a edifícios administrativos de alta qualidade. Os painéis de revestimento reforçados com têxteis são notavelmente mais econômicos e, portanto, representam uma alternativa viável para estruturas residenciais e comerciais.

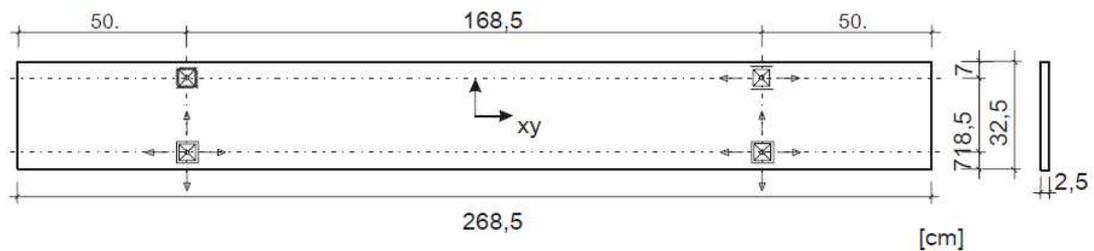
Figura 25: Construção de parede cortina do Instituto de Concreto Estrutural, Universidade RWTH Aachen; a) Visão, b) Detalhe, c) Seção (Universidade RWTH Aachen)



Fonte: C. Kulas (2015)

O projeto e cálculo do reforço têxtil requerido foram baseados nas informações provenientes do Centro de Pesquisa Colaborativa 532 em Aachen (Hegger,2001). As dimensões e reforço estão ilustrados na Figura 26.

Figura 26: Dimensões e reforço de painéis de concreto armado têxtil utilizados (Universidade RWTH Aachen)



a) Dimensões e condições de suporte dos painéis (em cm).



b) Disposição do reforço têxtil.

Fonte: C. Kulas (2015)

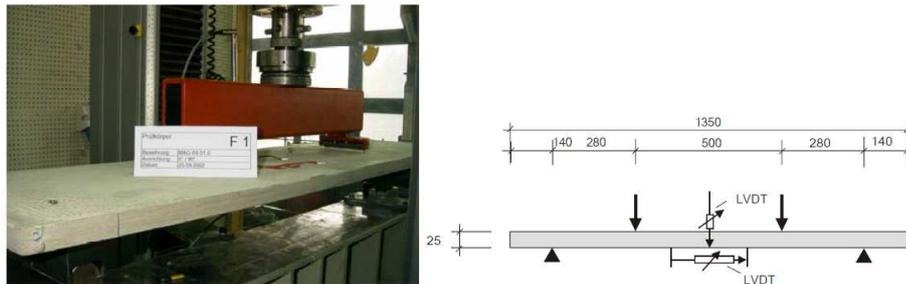
As dimensões dos painéis são $2685 \times 325 \times 25 \text{ mm}^3$. A camada de reforço na direção longitudinal tem uma variação aproximada de 4 mm a partir da superfície do painel, proporcionando uma cobertura de concreto de pelo menos 3 mm. Os painéis são fixados em quatro pontos na direção horizontal e suportados por dois mancais axiais na direção vertical, sendo os demais mancais responsáveis apenas por forças horizontais. Dessa forma, não são geradas tensões devido às mudanças de temperatura nas condições de suporte. A fachada está sujeita a cargas de vento. O design dos painéis foi realizado considerando a ausência de rachaduras sob cargas de serviço.

Com base nos resultados das investigações experimentais descritas, foi escolhido um tecido revestido de fibra de vidro resistente a álcalis (malha de 2200 TEX⁶ e 8,33 mm

⁶ TEX é uma unidade de medida que leva em conta o peso em gramas de 1 quilômetro de fio (1000 metros)

na direção longitudinal e malha de 320 TEX e 8,4 mm na direção transversal) para reforçar os painéis. Os tecidos são dispostos em duas camadas próximas à superfície, proporcionando uma camada de reforço superior e inferior. Na área dos rolamentos, uma camada foi adicionada na direção vertical, conforme mostrado na Figura 26b. A capacidade de suporte de carga foi verificada por meio de testes de flexão de quatro pontos, conforme ilustrado na Figura 27.

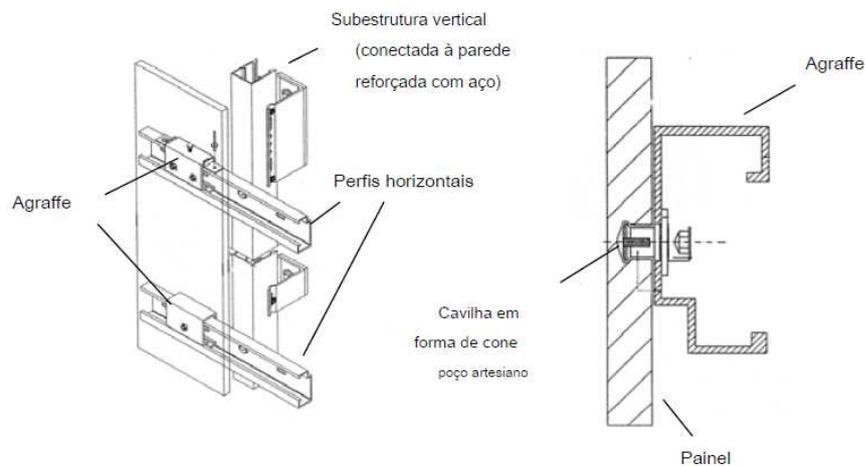
Figura 27: Testes de flexão realizados em painéis de concreto armado têxtil (Universidade RWTH Aachen)



Fonte: C. Kulas (2015)

Um dispositivo de fixação chamado agraffe (Figura 28) é utilizado para fixar os painéis na parede cortina. Foram conduzidos testes de tração e cisalhamento para verificar a capacidade de carga dos pinos de fixação. Os resultados demonstraram que os pinos são capazes de suportar mais de sete vezes a carga real a que são submetidos na prática, mesmo quando inseridos em concreto fissurado.

Figura 28: Técnica de fixação dos painéis de parede cortina



Fonte: C. Kulas (2015)

Para a fabricação dos painéis, utilizou-se um concreto autonivelante de granulometria fina (com partícula de tamanho máximo aproximado de 1 a 2 mm), com uma consistência ideal que permitiu uma completa incorporação dos tecidos. Isso possibilitou a

obtenção de superfícies de acabamento suaves, bem como perfis e juntas com arestas definidas. Os resultados foram superfícies de concreto com um visual completamente renovado. A Figura 29 apresenta a fachada finalizada.

Figura 29: Construção de parede cortina do Structural Concrete Institute, Universidade RWTH Aachen



Fonte: C. Kulas (2015)

Os primeiros painéis de fachada com aprovação da inspeção de construção alemã já estão disponíveis no mercado (Figura 30). Esses painéis possuem as dimensões de 1200 mm de comprimento, 600 mm de largura e 20 mm de espessura. Eles são produzidos pela Hering-Hochbauen GmbH, sediada em Burbach, Alemanha.

Figura 30: Painéis de fachada betoShell (Hering GmbH, Alemanha).



Fonte: C. Kulas (2015)

A fachada de um prédio escolar em Düsseldorf, Alemanha, apresentada na Figura 31, é mais um exemplo das bordas definidas e das superfícies de alta qualidade dos elementos TRC. Os elementos de fachada são fabricados pela empresa Fydro, sediada na Holanda. As dimensões dos elementos são 1250 x 3100 x 25 mm³, e a área total de revestimento TRC é de aproximadamente 14.000 m². Em 2003/2004, um prédio de escritórios em Dortmund, Alemanha, também foi revestido com 3.500 m² de painéis de fachada TRC, como mostrado na Figura 32.

Figura 31: Centro escolar, Düsseldorf, Alemanha (Fydro BV, NL)



Fonte: Hegger *et al.* (2015)

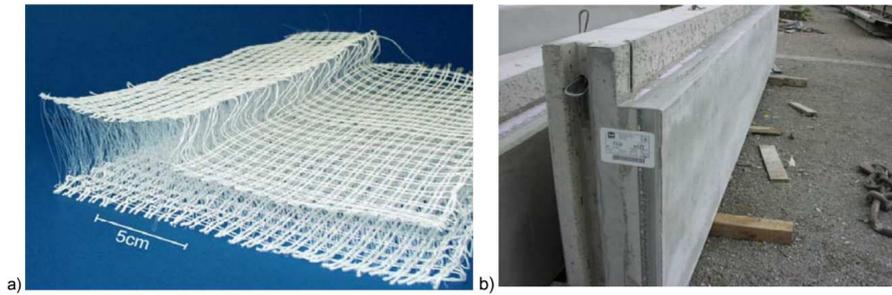
Figura 32: Edifício de escritórios, Dortmund, Alemanha (Durapact, Alemanha - Fydro BV, NL).



Fonte: Hegger *et al.* (2016)

- **Elementos sanduíche** A Figura 33, mostra os elementos de fachada do tipo sanduíche que consistem em duas lâminas externas, ou faces, que se encontram separadas, e são unidas com adesivo a um núcleo mais espesso. A concretagem desses elementos é feita de forma semelhante à produção de elementos de concreto convencionais. O reforço têxtil, que neste caso é um tecido espaçador com contornos, composto por duas camadas de cobertura e fios entre elas, é colocado na cofragem. Em seguida, o espaço vazio é preenchido com concreto fino de alta fluidez. Antes disso, as âncoras que conectam os elementos de revestimento aos elementos de apoio de concreto armado são posicionadas. Após o endurecimento das cascas, o elemento de rolamento de concreto armado é adicionado.

Figura 33: Elementos sanduíche feitos de TRC: a) perfil do tecido do espaçador, b) elemento sanduíche completo [ITA,IMB RWTH Aachen University].



Fonte: Hegger *et al.* (2016)

2.5 ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADOS COM FIBRAS (FRP)

2.5.1 Introdução

A necessidade de reabilitar estruturas de concreto armado tem crescido consideravelmente ao longo do tempo, impulsionada por diversas causas que, em conjunto ou isoladamente, demandam intervenções (JUVANDES,2000).

Entre essas causas, destacam-se as seguintes:

1. Degradação da estrutura: Esta pode ser provocada pelo envelhecimento natural da estrutura, por deficiências no projeto ou na construção, ou, ainda, pela falta de manutenção adequada.

2. Causas acidentais: Eventos inesperados, como incêndios, explosões e sismos, podem causar degradação na estrutura. Nesses casos, as ações de reparação não apenas visam restaurar as condições de segurança originais, mas podem também necessitar de adequações às normas regulamentares atuais ou a mudanças previstas no uso da estrutura.

3. Alterações no sistema estrutural: A supressão de elementos estruturais pode levar a uma redistribuição de esforços, potencialmente introduzindo esforços incompatíveis com a resistência de certos elementos.

4. Mudança na sobrecarga de utilização: A substituição de equipamentos ou mudanças no uso, como em indústrias alimentares, pode alterar a carga de utilização, exigindo ajustes na estrutura.

5. Prolongamento da vida útil: A necessidade de prolongar a vida útil da estrutura é outro motivo que impulsiona a reabilitação.

É importante destacar que, deve definir alguns conceitos fundamentais na área da reabilitação de estruturas, buscando classificar o tipo de intervenção a ser realizada. Reparções são ações destinadas a restabelecer os níveis de desempenho da estrutura de acordo com os padrões iniciais ou corrigir/prevenir os efeitos da degradação. O reforço, por sua vez, envolve intervenções para aumentar a resistência ou ductilidade dos elementos estruturais, melhorando o desempenho em relação ao seu estado inicial.

A reabilitação engloba situações mais abrangentes, incorporando ações de reparação, reforço ou combinação das duas, com o objetivo de habilitar novamente a estrutura para cumprir suas funções iniciais ou atender às novas exigências de desempenho e segurança.

Destaca-se que o processo de projeto de reabilitação de uma estrutura existente requer uma abordagem significativamente diferente do projeto de uma estrutura nova. A sequência de etapas a serem cumpridas pode variar consideravelmente, com cada projeto apresentando especificações e condições próprias, o que o torna único.

Vale ressaltar que a falta de regulamentação específica para algumas intervenções de reforço, a escassez de documentação integrada que aborde o projeto e execução das

ações de reabilitação, e a conseqüente falta de informação no meio técnico, introduzem desafios significativos em todo o processo (SOUSA,2008).

No contexto do concreto armado, a aplicação de sistemas de materiais conjugados FRP é essencialmente viável onde ocorrem tensões de flexão e cisalhamento, conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Tipo de reforço versus tipo de FRP

Tipo de reforço	Elemento estrutural a reforçar	Tipo de FRP
Reforço a flexão	Viga, lajes, muros e pilares	Laminado
Reforço a cortante	Vigas e muros	Manta ou folha
Reforço por confinamento	Pilares, silos, tanques e chaminés	

Fonte: Orlando (2018) *apud* Garcia (2001)

Algumas aplicações:

- **Reforço de vigas à flexão e ao cisalhamento:** A aplicação dos sistemas de FRP abrange a absorção dos esforços de tração provenientes de momentos positivos e negativos, além das tensões tangenciais originadas pelo cisalhamento.
- **Reforço de lajes à flexão:** Da mesma forma que ocorre com as vigas, as lajes também podem ser reforçadas em relação à flexão através do uso de laminados de FRP dispostos em duas direções. No cálculo do dimensionamento desses reforços, é possível negligenciar o peso próprio dos sistemas de FRP, uma vez que esse valor é considerado insignificante.
- **Reforço de pilares e colunas:** O reforço de pilares e colunas utilizando sistemas de materiais compostos, como os laminados de FRP, pode ser realizado de duas maneiras distintas, com o objetivo de aumentar a resistência à flexão ou aumentar a resistência à compressão por meio do confinamento da seção. É notável que esse tipo de reforço enfrenta duas demandas diferentes, abordando simultaneamente o reforço à flexão no sentido longitudinal da coluna. O procedimento é aplicado em duas etapas: inicialmente, o sistema é aplicado para lidar com flexão e corte (técnica de colagem crítica), e posteriormente, é aplicado o reforço por confinamento, com contato crítico. O mesmo princípio pode ser empregado no reforço de reservatórios cilíndricos, onde o FRP funciona como um reforço passivo adicional (ORLANDO,2018).

2.6 DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO FRP

2.6.1 Normatização

Para o cenário do dimensionamento do reforço FRP, uma das referências normativas é a ACI 440.2R-17 - *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, emitida pelo American Concrete Institute (ACI), que visa fornecer orientações detalhadas para o projeto e a construção de sistemas de reforço com FRP aplicados externamente em estruturas de concreto, abordando aspectos como requisitos de materiais, preparação da superfície, dimensionamento estrutural e critérios de desempenho.

No Brasil, ainda não se tem uma norma que estabeleça o método de dimensionamento de reforço das estruturas. Com isso, será utilizado para dimensionar o reforço a norma ACI 440.2R-17.

2.6.2 Dimensionamento do Reforço ao Cisalhamento

Os reforços por conta do aumento do carregamento, não só devem ser devido à tração decorrente da flexão, mas também por conta do aumento dos esforços cortantes. Esse assunto é tratado nos itens 11.3 e 11.4 da ACI 440.2R, mas não fará parte do escopo deste trabalho, que estará restrito ao cálculo do reforço devido aumento do momento fletor.

2.6.3 Dimensionamento do Reforço à Flexão

As hipóteses básicas estabelecidas na ACI 440.2R foram ajustadas para a realidade brasileira por Machado e Machado (2015), de acordo com o que segue:

- os estudos e cálculos deverão ser efetuados com base nas dimensões existentes da seção e da quantidade e da distribuição das armaduras de aço da mesma, assim como das propriedades e características mecânicas dos materiais constituintes do elemento de concreto a ser reforçado;
- prevalecem os critérios de Bernoulli, ou seja, as seções planas permanecem planas após a ocorrência dos carregamentos e das deformações, que são linearmente proporcionais à sua distância à linha neutra;
- despreza-se a resistência à tração do concreto;
- a deformação do concreto não pode ultrapassar 3,5‰ quando dimensionado segundo os critérios da ABNT e 3,0‰, segundo as recomendações do ACI;
- a aderência entre o sistema composto FRP e o substrato de concreto deve ser perfeita;

- a deformação será considerada linear até a ruptura no sistema composto FRP;

Para o dimensionamento do reforço, como não existe uma norma brasileira foi feito uma adaptação da norma ACI 440.2R-17, para realização dos cálculos. Segue o passo a passo:

Passo 1: Cálculo das propriedades do material do projeto do sistema FRP

É necessário calcular o projeto do sistema de FRP (*Fiber Reinforced Polymer* - Polímero Reforçado com Fibra) levando em consideração as propriedades do material. Para isso utilizam-se as expressões 2.1 e 2.2:

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* \quad (2.2)$$

Onde:

f_{fu} - resistência à tração de projeto do FRP;

f_{fu}^* - limite de resistência à tração do material FRP de acordo com o fabricante;

ε_{fu}^* - deformação final de ruptura da armadura do FRP;

C_E - é o fator de redução ambiental que é encontrado de acordo com a Tabela 3

ε_{fu} - deformação de ruptura do reforço FRP

Tabela 3 – Fator de redução ambiental para vários sistemas FRP e condições de exposição.

Condições de exposição	Tipo de fibra	Fator de redução ambiental CE
Exposição interna	Carbono	0,95
	Vidro	0,75
	Aramida	0,85
Exposição externa (pontes, piers e garagens não fechadas)	Carbono	0,85
	Vidro	0,65
	Aramida	0,75
Ambiente agressivo (fabricas químicas e estações de tratamento de águas residuais)	Carbono	0,85
	Vidro	0,5
	Aramida	0,70

Fonte: ACI 440.2R-17

Passo 2: Cálculos preliminares

- **Propriedades do concreto:** Para cálculo das propriedades do concreto a norma faz referência a norma a ACI 318-05 - *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary* (Requisitos do Código de Construção para Concreto Estrutural e Comentário). No item 10.2.7.3 tem-se a seguinte definição para o parâmetro β_1 :

Para f'_c entre 25 e 40 MPa, β_1 deve ser considerado como 0,85.

Para f'_c superior a 40 MPa, β_1 deve ser reduzido linearmente a uma taxa de 0,05 para cada 10 MPa de força superior a 40 MPa, porém β_1 não deve ser inferior a 0,65.

$$\beta_1 = 1,05 - \left(0,05 \cdot \frac{f'_c}{6,9}\right) \quad (2.3)$$

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (2.4)$$

Onde:

β_1 -razão entre a profundidade do bloco retangular , equivalente a posição da linha neutra;

f'_c - resistência à compressão do concreto;

E_c - módulo de elasticidade do concreto;

• **Propriedades do reforço FRP ligado externamente:**

$$A_f = n \cdot t_f \cdot w_f \quad (2.5)$$

Onde:

A_f - área de reforço externo de FRP;

n - número de camadas do reforço de FRP;

t_f - espessura da camada de reforço do FRP;

w_f - largura da camada de reforço do FRP;

Passo 3: Determinação da deformação existente de FRP

A deformação existente é calculado supondo que a viga está fissurada e as únicas cargas atuando na viga no momento de aplicação de FRP são cargas permanentes. O valor da posição da linha neutra diferente do proposto pela ACI 440-2R, foi considerado variável. A partir da expressão 2.6, calcula-se o valor de ε_{bi} (deformação antes da aplicação do FRP).

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_g \cdot (d_f - X_{II})}{I_{II} \cdot E_c} \quad (2.6)$$

Onde:

ε_{bi} - deformação antes da aplicação do FRP;

M_g - momento fletor devido à carga permanente;

d_f - altura efetiva do reforço de FRP;

X_{II} - posição da linha neutra no estágio II;

I_{II} - momento de inércia no estágio II;

E_c - módulo de elasticidade do concreto;

Para o cálculo do momento de inércia no estágio II será utilizado o X_{II} (posição da linha e neutra no estágio II), calculado através da equação 3.7 de Ghali & Favre apresentada em Carvalho e Figueiredo (2021).

$$X_{II} = \frac{-a_2 + \sqrt{(a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3)}}{2 \cdot a_1} \quad (2.7)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{E_s}{E_c}$$

$$a_1 = \frac{b_w}{2}$$

$$a_2 = h_f \cdot (b_f - b_w) + (\alpha - 1) \cdot A'_s + \alpha \cdot A_s$$

$$a_3 = t \cdot (\alpha - 1) \cdot A'_s - d \cdot \alpha \cdot A_s - \frac{h_f^2}{2} \cdot (b_f - b_w)$$

Com os dados obtidos, é possível calcular o momento de inércia da seção no estádio II. Através da expressão 2.8.

$$I_{II} = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot X_{II}^3}{3} + (b_f - b_w) \cdot h_f \left(X_{II} - \frac{h_f}{2}\right)^2 + \alpha \cdot A_s \cdot (X_{II} - d)^2 + (\alpha - 1) A'_s \cdot (X_{II} - t)^2 \quad (2.8)$$

Onde:

I_{II} - momento de inércia no estádio II;

b_f - largura efetiva;

b_w - largura da seção transversal em vigas de seção retangular ou da nervura;

h_f - altura total de uma peça;

X_{II} - posição da linha neutra no estádio II;

A_s - área de armadura de tração;

d - altura útil (distância do centro de gravidade da armadura longitudinal tracionada até a fibra mais comprimida de concreto);

t - distância entre a fibra mais comprimida até o centro de gravidade da armadura comprimida;

A'_s - área de armadura de compressão.

Passo 4: Determinação da deformação de projeto do sistema FRP

Independente de onde estiver a seção analisada, a ruptura controlada pelo deslocamento do conjugado deve controlar os procedimentos. Dessa forma, a deformação máxima permitida no FRP para impedir a ruptura por descolamento devido à fissuração não poderá exceder o valor encontrado na expressão 2.9:

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \quad (2.9)$$

O valor encontrado deverá ser inferior a $0,9 \cdot \varepsilon_{fu}$

Onde:

ε_{fd} - deformação de descolamento de reforço externo FRP;

f'_c - resistência à compressão do concreto;

n - número de camadas de armadura do FRP;

- E_f - módulo de elasticidade à tração do FRP em MPa;
 t_f - espessura nominal de uma camada de reforço FRP;
 ε_{fu} - deformação de ruptura de projeto da armadura de FRP;

Passo 5: O valor de x é estimado, em relação a profundidade até a linha neutra

Uma estimativa inicial razoável é de x igual a $0,20 \cdot d$. Conforme a equação 2.10, o valor do x é ajustado após a verificação do equilíbrio

$$x = 0,2 \cdot d \quad (2.10)$$

onde:

- x - distância da fibra de compressão extrema ao eixo neutro;
 d - distância da fibra de compressão extrema ao centróide do reforço de tração;

Passo 6: Determinação da deformação efetiva no reforço de FRP

Para determinação será utilizado equação 2.11:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d_f - x}{x} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (2.11)$$

Onde:

- ε_{fe} - deformação efetiva no reforço FRP até atingir a falha;
 d_f - distância efetiva do reforço de flexão FRP;
 x - distância da fibra de compressão extrema ao eixo neutro;
 ε_{bi} - nível do estado de tensão antes da aplicação do FRP;
 ε_{fd} - deformação de projeto;
 ε_{cu} - deformação específica do encurtamento do concreto na ruptura

Observa-se que para a profundidade do eixo neutro selecionada, o descolamento do FRP ocorreria no modo de falha devido à segunda expressão nesta equação. Se a primeira expressão fosse predominante, então o esmagamento do concreto estaria no modo de falha. Como o FRP controla a falha da seção, a deformação do concreto no momento da falha ε_c pode ser menor que 0,003 e pode ser calculada usando semelhança de triângulo, de acordo com a equação 2.12

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{x}{d_f - x}\right) \quad (2.12)$$

Onde:

ε_c - Deformação do concreto;

ε_{fe} - deformação efetivo no reforço FRP até atingir a falha;

ε_{bi} - deformação antes da aplicação do FRP;

d_f - distância efetiva do reforço de flexão FRP;

x - distância da fibra de compressão extrema ao eixo neutro;

Passo 7: Cálculo da deformação no aço de reforço existente

A deformação no aço de reforço pode ser calculada usando triângulos semelhantes de acordo com a equação:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - x}{d_f - x}\right) \quad (2.13)$$

onde:

ε_s - deformação do aço;

ε_{fe} - deformação efetivo no reforço FRP até atingir a falha;

ε_{bi} - deformação antes da aplicação do FRP;

d - distância da fibra de compressão extrema ao centróide do reforço de tração;

x - distância da fibra de compressão extrema ao eixo neutro;

d_f - distância efetiva do reforço de flexão FRP;

Passo 8: Cálculo do nível de tensão no aço utilizado no reforço de FRP

As tensões são calculadas a partir das equações 2.14 e 2.15:

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq f_y \quad (2.14)$$

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad (2.15)$$

onde:

f_s - tensão no aço de reforço;

E_s - módulo de elasticidade do aço;

ε_s - deformação do aço;

f_y - limite de escoamento do aço;

f_{fe} - tensão efetiva no FRP;

E_f - módulo de elasticidade de tração do FRP;

ε_{fe} - deformação efetiva no reforço FRP até atingir a falha;

Passo 9: Cálculo das forças internas resultantes e a verificação de equilíbrio

Para cálculo do bloco de tensão do concreto, utiliza-se a norma ACI 318-05. Os fatores de bloco de tensão aproximados podem ser calculados por meio da relação tensão-deformação parabólica para o concreto utilizando as equações 2.16 e ??:

$$\beta_1 = \frac{4 \cdot \varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6 \cdot \varepsilon'_c - 2 \cdot \varepsilon_c} \quad (2.16)$$

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon'_c \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon_c'^2} \quad (2.17)$$

onde:

ε'_c - deformação do concreto;

β_1 - razão entre a profundidade do bloco retangular , equivalente a posição da linha neutra;

α_1 - multiplicador em f_c para determinar a intensidade de um equivalente distribuição de tensão retangular para concreto;

ε'_c é a deformação correspondente para f'_c calculado através da expressão 2.18:

$$\varepsilon'_c = \frac{1,7 \cdot f'_c}{E_c} \quad (2.18)$$

onde:

f'_c - resistência à compressão do concreto

E_c - módulo de elasticidade do concreto;

O equilíbrio das forças é verificado através da estimativa inicial de x por meio da equação 2.19:

$$x = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b} \quad (2.19)$$

Onde b é a largura da viga.

Passo 10: Ajuste de x até que o equilíbrio seja satisfeito

Para obter um equilíbrio satisfatório, os passos 6 e 9 deverão ser repetidos inúmeras vezes com diferentes valores para x até que o equilíbrio seja alcançado.

Passo 11: Componentes de resistência à flexão

A resistência à flexão de projeto é calculada utilizando a equação 2.20:

$$M_n = A_s \cdot f_s \left(d - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(b_f - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) \quad (2.20)$$

Onde é aplicado um fator adicional $\psi_f = 0,85$ para a contribuição do sistema FRP. Para contribuição do aço para a flexão utiliza-se a equação 2.21:

$$M_{ns} = A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) \quad (2.21)$$

Para a contribuição do FRP para a flexão, tem-se a equação 2.22:

$$M_{nf} = A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) \quad (2.22)$$

onde:

M_{nf} - momento fletor resistente devido às fibras;

M_{ns} - momento fletor resistente devido ao aço;

A_s - área de armadura de tração;

f_s - tensão no aço de reforço;

d - distância da fibra de compressão extrema ao centroide da armadura de tração;

ψ_f - Fator de redução de força FRP

A_f - área do reforço do FRP;

f_{fe} - tensão efetiva no FRP;

Passo 12: Cálculo da resistência à flexão de projeto da seção

A resistência à flexão de projeto é calculado utilizando as equações 2.23, 2.24, 2.25:

$$M_n = A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) \quad (2.23)$$

$$\phi \cdot M_n \leq M_u \quad (2.24)$$

O fator de redução de resistência (ϕ) é definido da seguinte forma:

$$\phi = \begin{cases} 0,9 & \text{para } \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}} & \text{para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0,005 \\ 0,65 & \text{para } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

$$\phi \cdot M_n = \phi \cdot [M_{ns} + \psi_f \cdot M_{nf}] \quad (2.25)$$

Onde:

M_n - resistência à flexão nominal;

A_s - área da armadura de tração;

f_s - tensão no aço;

d - distância da fibra de compressão extrema ao centroide do reforço de tração;

β_1 - razão entre a profundidade do bloco retangular, equivalente a posição da linha neutra;

ψ_f - Fator adicional de redução da força FRP;

f_{fe} - tensão efetiva no FRP;

d_f - altura útil;

ϕ - fator de redução de força;

M_u - momento solicitante de uma seção;

ε_s - deformação do aço;

M_{ns} - contribuição da armadura do aço para resistência nominal à flexão;

M_{nf} - contribuição do reforço FRP para a resistência nominal à flexão,

Passo 13: Verificação das tensões de serviço no aço de reforço e no FRP

Calcula-se a profundidade elástica para o eixo neutro fissurado. O cálculo pode ser simplificado para uma viga retangular sem armadura de compressão da seguinte forma, através da equação 2.26:

$$k = \sqrt{(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c})^2 + 2 \cdot (\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c} \cdot (\frac{d_f}{d}))} - (\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}) \quad (2.26)$$

Para o cálculo do nível de tensão no aço de reforço utiliza-se a equação 2.27:

$$f_{s,s} = \frac{[M_s + \varepsilon_{bi} \cdot A_f \cdot E_f \cdot (d_f - \frac{kd}{3})] \cdot (d - kd) \cdot E_s}{A_s \cdot E_s \cdot (d - \frac{kd}{3}) \cdot (d - kd) + A_f \cdot E_f \cdot (d_f - \frac{kd}{3}) \cdot (d_f - kd)} \quad (2.27)$$

O valor encontrado, deve ser menor do que o limite recomendado de acordo a equação 2.28:

$$f_{s,s} \leq 0,8 \cdot f_y \quad (2.28)$$

Onde:

k - relação entre a profundidade da linha neutra e o reforço da profundidade medida a partir da fibra de compressão extrema;

ρ_s - proporção da armadura não protendida;

E_s - módulo de elasticidade do aço;

E_c - módulo de elasticidade do concreto;

ρ_f - taxa de reforço do FRP;

E_f - módulo de elasticidade de tração do FRP;

d_f - distância efetiva do reforço de flexão FRP;

d - distância da fibra de compressão extrema ao centroide do reforço de tração;

$f_{s,s}$ - nível de tensão em armaduras de aço não protendidas em cargas de serviço (MPa);

M_s - momento de serviço na seção (Nmm);

ε_{bi} - deformação antes da aplicação do FRP;

A_f - área do reforço externa do FRP;

f_y - limite de escoamento do aço;

Passo 14: Verificação do limite de ruptura de fluência no serviço do FRP

Para cálculo do nível de tensão no FRP utiliza-se a equação 2.29:

$$f_{f,s} = f_{s,s} \cdot \left(\frac{E_f}{E_s}\right) \cdot \left(\frac{d_f - kd}{d - kd}\right) - \varepsilon_{bi} \cdot E_f \quad (2.29)$$

O valor encontrado deve ser verificado se é menor que o limite de ruptura por influência de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 – Limites de tensão para cargas de serviço sustentadas e cíclicas em reforço com FRP

Tipo de Tensão	Tipo de Fibra		
	GFRP (polímeros reforçados com fibra de vidro)	AFRP (polímero reforçado com fibra de aramida)	CFRP (polímero reforçado com fibra de carbono)
Limite de tensão para serviço sustentado e cíclico	$0,20f_{fu}$	$0,30f_{fu}$	$0,55f_{fu}$

Fonte: ACI 440.2R-17

Os cálculos são feitos supondo que a carga total de serviço será sustentada.

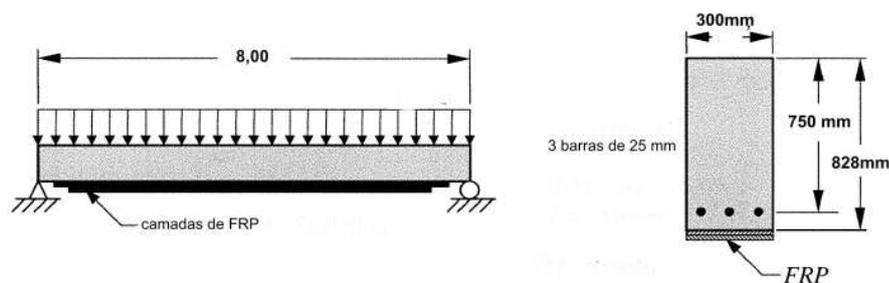
3 EXEMPLO PRÁTICO

A seguir, é apresentado um exemplo baseado nas diretrizes da ACI 440.2R-17 - Guia para o Projeto e Construção de Sistemas Externamente Colados com FRP para Reforço de Estruturas de Concreto, para o fortalecimento de estruturas de concreto sujeitas ao esforço de flexão. É importante enfatizar que este trabalho se concentrará exclusivamente no dimensionamento do reforço para armadura de flexão e não abordará o dimensionamento do reforço necessário para o esforço cortante.

3.1 EXEMPLO

Uma viga de concreto simplesmente apoiada reforçada com três barras (Figura 34) está localizada em um armazém não ocupado e está sujeita a um aumento de 50% de capacidade de carga exigidas. Uma análise da viga existente indica que a mesma ainda possui resistência suficiente ao cisalhamento para suportar a nova demanda requerida, e atende aos requisitos de serviço de controle de deflexão e fissuração. No entanto, sua resistência à flexão é insuficiente para suportar o aumento da carga viva.

Figura 34: Esquema da viga idealizada simplesmente apoiada com reforço externo de FRP.



Fonte: ACI 440.2R-17 - adaptado

As Tabelas 5, 6 e 7, representam respectivamente: os dados do exercício, as propriedades do sistema de FRP e valores do carregamento da viga.

Tabela 5 – Dados do exercício

Comprimento da viga l	8,00 m
Largura da viga b	300 mm
d	750 mm
h	828 mm
f'_c	35,00 N/mm ²
f_y	500 N/mm ²
ϕM_n sem FRP	454 kNm
Barras	$\phi=20$ mm

Fonte: Autora

Tabela 6 – Propriedades do sistema de FRP

espessura da camada de reforço do FRP (t_f)	1,02 mm
tensão de ruptura (f_{fu}^*)	621 N/mm ²
deformação de ruptura do FRP (ε_{fu}^*)	0,015 mm/mm
módulo de elasticidade de laminados FRP (E_f)	37.000 N/mm ²

Fonte: ACI 440.2R-17

Tabela 7 – Valores do carregamento da viga

\bar{G}	12,3 KNm
\bar{Q}	20 KNm
M_g	97,6 KNm
M_q	160,0 KNm
\bar{Q}^*	10 KN
M_q^*	80 KNm
M_u^*	501,02 KNm

Fonte: Autora

Onde:

\bar{G} - carga permanente distribuída;

\bar{Q} - carga variável distribuída;

M_g - momento devido à carga permanente original;

M_q - momento devido à carga variável original;

\overline{Q}^* - carga variável adicional;

M_q^* - Momento devido à carga variável adicional;

M_u^* - momentos combinados, de acordo com a ACI-318, para o Estado Limite Último.

A viga de concreto armado existente deve ser reforçada com o sistema FRP descrito na Tabela 6, especificamente, com duas camadas de 300 mm de largura por 8m de comprimento, fixadas à parte inferior da viga usando a técnica de aplicação molhada.

Passo 1: A viga está localizada em um espaço interno e um material CFRP será utilizado. Portanto, conforme a Tabela 3, é sugerido um fator de redução ambiental de 0,95.

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* = (0,95)(621N/mm^2) = 590N/mm^2$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* = (0,95)(0,015mm/mm) = 0,0142mm/mm$$

Passo 2: Cálculos preliminares

- **Propriedades do concreto:** Temos a seguinte definição para o parâmetro β_1 :

O valor de f'_c é de 35 MPa.

$$\beta_1 = 1,05 - (0,05 \cdot \frac{f'_c}{6,9}) = 1,05 - (0,05 \cdot \frac{35}{6,9}) = 0,7964$$

$$E_c = 4700\sqrt{35} = 27.805N/mm^2$$

- **Propriedades do aço de reforço existente:**

Área da armadura de tração: $A_{sef} = 14,73cm^2$ para 3 ϕ 25.

- **Propriedades do reforço FRP ligado externamente:**

$$A_f = n \cdot t_f \cdot w_f = 2 \cdot (1,02mm) \cdot (300mm) = 612mm^2$$

Passo 3: Determinação do estado existente de tensão antes da aplicação do FRP:

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_g \cdot (d_f - X_{II})}{I_{II} \cdot E_c} = \frac{(97,6KN \cdot mm) \cdot (828mm - 197,5mm)}{(40 \cdot 10^6 mm^4) \cdot (27805N/mm^2)} = 5,53 \cdot 10^{-4}$$

Cálculo do momento de inércia no estágio II:

Temos que os coeficientes a_1, a_2 e a_3 são definidos como:

$$\alpha = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{27805} = 7,19$$

$$a_1 = \frac{b_w}{2} = \frac{0,300}{2} = 0,150m$$

$$a_2 = h_f \cdot (b_f - b_w) + (\alpha - 1) \cdot A'_s + \alpha \cdot A_s = 0 \cdot (300 - 300) + (7,20 - 1) \cdot 0 + 7,20 \cdot (1,473 \cdot 10^3 m) = 0,0106m^2$$

$$a_3 = -t \cdot (\alpha - 1) \cdot A'_s - d \cdot \alpha \cdot A_s - \frac{h_f^2}{2} \cdot (b_f - b_w) = -0 \cdot (7,20 - 1) \cdot 0 - 0,750 \cdot 7,20 \cdot (1,473 \cdot 10^3 m) - \frac{0^2}{2} \cdot (300 - 300) = -0,0079m^3$$

Logo teremos a seguinte solução:

$$X_{II} = \frac{-a_2 + \sqrt{(a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3)}}{2 \cdot a_1} = 0,1975m$$

Com os dados obtidos, é possível calcular o momento de inércia da seção no estádio II, em relação a linha neutra cuja a posição X_{II} foi determinada anteriormente.

$$I_{II} = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot X_{II}^3}{3} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot (X_{II} - \frac{h_f}{2})^2 + \alpha \cdot A_s \cdot (X_{II} - d)^2 + (\alpha - 1) A'_s \cdot (X_{II} - t)^2 = 4 \cdot 10^{-3} m^4$$

Passo 4: Determinação da deformação de projeto do sistema FRP

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{35N/mm^2}{2 \cdot (37000N/mm^2) \cdot (1,02mm)}} = 0,0088$$

O valor encontrado deverá ser inferior a $0,9 \cdot \varepsilon_{fu} = 0,0128$

Uma vez que a deformação de projeto é menor do que a deformação de ruptura, o descolamento controla o dimensionamento do sistema FRP.

Passo 5: O valor de x é estimado, em relação a profundidade até a linha neutra

Uma estimativa inicial razoável é de x iguala $0,20 \cdot d$. O valor do x é ajustado após a verificação do equilíbrio

$$x = 0,2 \cdot d = 0,2 \cdot (750mm) = 150mm$$

Passo 6: Determinação do nível efetivo de deformação na armadura FRP

Para determinação será utilizado a seguinte equação:

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 \cdot \left(\frac{d_f - x}{x}\right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} = 0,003 \cdot \left(\frac{828mm - 150mm}{150mm}\right) - 0,00061 = 0,0129 > 0,009$$

Logo, $\varepsilon_{fe} = 0,009$

Observa-se que para a profundidade da linha neutra selecionada, o descolamento do

FRP ocorreria no modo de falha devido à segunda expressão nesta equação. Se a primeira expressão fosse predominante, então o esmagamento do concreto estaria no modo de falha. Como o FRP controla a falha da seção, a deformação do concreto no momento da falha ε_c pode ser menor que 0,003 e pode ser calculada usando semelhança de triângulos.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi} \cdot \left(\frac{x}{d_f - x}\right) = (0,009 + 0,0006) \cdot \left(\frac{150mm}{828mm - 150mm}\right) = 0,0021$$

Passo 7: Cálculo da deformação no aço de reforço existente

A deformação no aço de reforço pode ser calculada usando semelhança de triângulos de acordo com a equação:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d-x}{d_f - x}\right) = (0,009 + 0,0006) \cdot \left(\frac{750mm - 150mm}{828mm - 150mm}\right) = 0,0084$$

Passo 8: Cálculo do nível de tensão no aço utilizado no reforço de FRP

As tensões são calculadas a partir das seguintes equações:

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq f_y = (200kN/mm^2) \cdot (0,0084) \leq 0,435kN/mm^2$$

$$f_s = 1,68kN/mm^2 \leq 0,435kN/mm^2$$

Portanto, $f_s = 0,435kN/mm^2$

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} = (37kN/mm^2) \cdot (0,009) = 0,33kN/mm^2$$

Passo 9: Cálculo das forças internas resultantes e a verificação de equilíbrio

Para cálculo do bloco de tensão do concreto, utiliza-se a norma ACI 318-05. Os fatores de bloco de tensão aproximados podem ser calculados por meio da relação tensão-deformação parabólica para o concreto utilizando a seguinte expressão:

$$\beta_1 = \frac{4 \cdot \varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6 \cdot \varepsilon'_c - 2 \cdot \varepsilon_c} = \frac{4 \cdot (0,0021) - 0,0021}{6 \cdot (0,0021) - 2 \cdot (0,0021)} = 0,7471$$

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon'_c \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon_c^2} = \frac{3 \cdot (0,0021) \cdot (0,0021) - (0,0021)^2}{3 \cdot (0,7471) \cdot (0,0021)^2} = 0,8923$$

$$\varepsilon'_c = \frac{1,7 \cdot f'_c}{E_c} = \frac{1,7 \cdot (35)}{27.805} = 0,0021$$

O equilíbrio das forças é verificado através da estimativa inicial de x por meio da seguinte equação:

$$x = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f_c \cdot \beta_1 \cdot b} = 132,7 \neq 150$$

Passo 10: Ajuste de x até que o equilíbrio seja satisfeito

Para obter um equilíbrio satisfatório, os passos 6 e 9 deverão ser repetidos inúmeras vezes com diferentes valores para x até que o equilíbrio seja alcançado, o que aconteceu para $x=132,7$ mm

O valor de x selecionado para a iteração final está correto.

Passo 11: Componentes de resistência à flexão

A resistência à flexão de projeto é calculada utilizando a equação:

$$M_n = A_s \cdot f_s \left(d - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(h \cdot \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right)$$

Onde é aplicado um fator adicional $\psi_f = 0,85$ para a contribuição do sistema FRP.

Para contribuição do aço para a flexão utiliza-se a seguinte equação:

$$\begin{aligned} M_{ns} &= A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) = \\ &(1473,0 \text{ mm}^2) \cdot (435 \text{ N/mm}^2) \cdot \left(750 \text{ mm} - \frac{0,7312 \cdot (132,7 \text{ mm})}{2} \right) \\ &= 4,49 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm} = 449 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Para a contribuição do FRP para a flexão:

$$\begin{aligned} M_{nf} &= A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) = \\ &(612 \text{ mm}^2) \cdot (330 \text{ N/mm}^2) \cdot \left(828 \text{ mm} - \frac{0,7312 \cdot (132,7 \text{ mm})}{2} \right) = 135,8 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Passo 12: Cálculo da resistência à flexão de projeto da seção

A resistência à flexão de projeto é calculado utilizando as seguintes equações:

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(h \cdot \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) \\ \phi \cdot M_n &\leq M_u \end{aligned}$$

Como $\varepsilon_s = 0,0084 > 0,005$ um fator de redução de resistência de $\phi = 0,90$ é apropriado. Logo temos:

$$\begin{aligned} \phi \cdot M_n &= \phi \cdot [M_{ns} + \psi_f \cdot M_{nf}] = 0,9 \cdot [420 \text{ kNm} + 0,85 \cdot (154 \text{ kNm})] = 496 \text{ kNm} \geq \\ M_u &= 1,2 \cdot M_g + 1,6 \cdot M_q = 468,16 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$M_u^* = 1,2 \cdot 97,6 + 1,6 \cdot (160 + 80) = 501,02$$

Os valores de M_g e M_q são encontrados na Tabela 7.

Passo 13: Verificação das tensões de serviço no aço de reforço e no FRP

Calcula-se a profundidade elástica para o eixo neutro fissurado. O cálculo pode ser simplificado para uma viga retangular sem armadura de compressão da seguinte forma:

$$k = \sqrt{(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c})^2 + 2 \cdot (\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c} \cdot (\frac{d_f}{d}))} - (\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}) = 0,2697$$

Para o cálculo do nível de tensão no aço de reforço utiliza-se a seguinte equação:

$$f_{s,s} = \frac{[M_s + \varepsilon_{bi} \cdot A_f \cdot E_f \cdot (d_f - \frac{kd}{3})] \cdot (d - kd) \cdot E_s}{A_s \cdot E_s \cdot (d - \frac{kd}{3}) \cdot (d - kd) + A_f \cdot E_f \cdot (d_f - \frac{kd}{3}) \cdot (d_f - kd)} = 313,6 N/mm^2$$

$$\text{Para } M_s = M_g + M_q + (M_q)^*$$

O valor encontrado, deve ser menor do que o limite recomendado de acordo com a equação:

$$f_{s,s} \leq 0,8 \cdot f_y = 313,6 N/mm^2 \leq (0,8) \cdot (435 N/mm^2) = 331,2 N/mm^2$$

O nível de tensão no aço de reforço está dentro do limite recomendado.

Passo 14: Verificação do limite de ruptura por fluência em serviço do FRP

Para cálculo do nível de tensão no FRP utiliza-se a seguinte equação:

$$f_{f,s} = f_{s,s} \cdot (\frac{E_f}{E_s}) \cdot (\frac{d_f - kd}{d - kd}) - \varepsilon_{bi} \cdot E_f = 38 N/mm^2 \leq (0,55) \cdot (590 N/mm^2) = 324 N/mm^2$$

O valor encontrado deve ser verificado se é menor que o limite de tensão de ciclagem de acordo com a Tabela 4.

4 FABRICAÇÃO SIMPLIFICADA DE UM ELEMENTO EM CONCRETO TÊXTIL

4.1 INTRODUÇÃO:

Descreve-se o experimento realizado com o objetivo de ilustrar o tema do meu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) sobre concreto têxtil. O experimento consistiu na confecção de um molde representativo utilizando areia, cimento, água, caibro de madeira e tiras de tecido de juta. É importante ressaltar que o molde criado é apenas uma representação e não foi submetido a ensaios em laboratório para avaliação de suas características reais de resistência.

4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

1. Areia fina
2. Cimento
3. Água
4. Tiras de tecido de juta
5. Caibro de madeira

A Figura 35 ilustra um dos materiais utilizados no experimento, que são as tiras de juta.

Figura 35: Tiras de juta utilizadas



Fonte: autora

4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

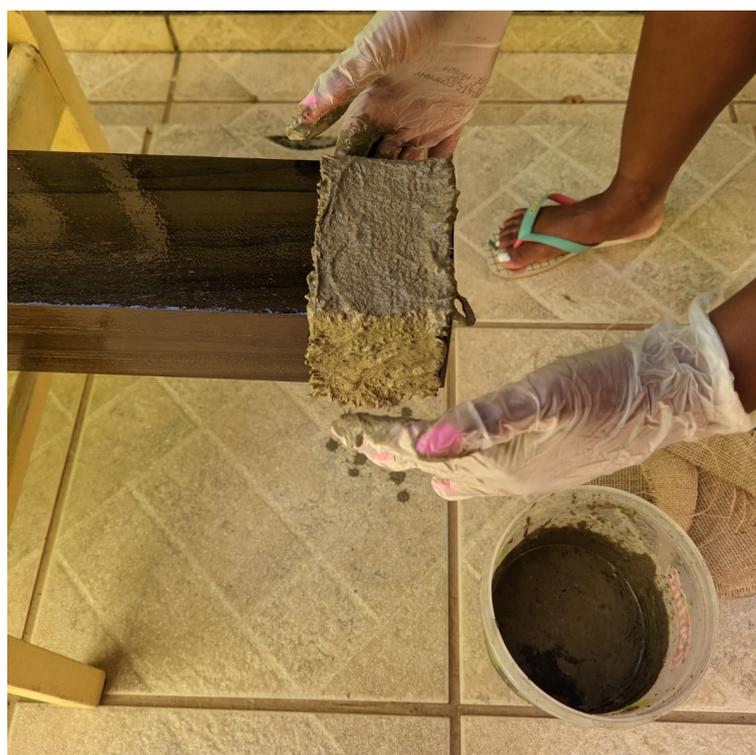
4.3.1 Preparação da Mistura

Primeiramente, a mistura para a confecção do molde foi preparada. Utilizou-se areia, cimento e água em proporções adequadas, com o objetivo de obter uma argamassa consistente.

4.3.2 Moldagem do Corpo de Prova

Em seguida, as tiras de tecido de juta foram posicionadas estrategicamente no caibro de madeira para simular o reforço têxtil no concreto. As tiras foram dispostas de forma a garantir uma distribuição uniforme por fora do molde. A Figura 36 mostra o processo de moldagem do experimento.

Figura 36: Tira de junta sendo moldada após ter sido molhada na mistura de areia, cimento e água



Fonte: autora

4.3.3 Preenchimento com a Mistura

As tiras de estopa foram cuidadosamente molhadas na mistura de areia, cimento e água e após cada tira foi colocada na peça de madeira seguindo o seu formato. Esse procedimento foi repetido 2 vezes, para se obter 2 camadas de reforço. A Figura 37, mostra as tiras de juta sendo moldadas, após terem sido molhadas na mistura de areia, cimento e água.

Figura 37: Tira de junta sendo moldada após ter sido molhada na mistura de areia, cimento e água



Fonte: autora

4.3.4 Cura e Secagem

O molde foi deixado em repouso para a cura e secagem do concreto. Durante esse período, foram observados os cuidados necessários para evitar deformações ou danos ao molde. O molde pronto é mostrado na Figura 38.

Figura 38: Molde pronto e deixado para secar



Fonte: autora

4.3.5 Resultados

Após a completa secagem do molde, foram obtidos os resultados esperados, com a forma do corpo de prova representando o conceito do concreto têxtil. No entanto, é importante ressaltar que o molde é apenas uma representação e não passou por ensaios laboratoriais para determinação de suas características reais de resistência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho abordou de maneira ampla os conceitos e aplicações do concreto têxtil e do concreto armado reforçado com fibras na engenharia civil. Ao longo deste estudo, foi possível compreender a crescente relevância dessas técnicas no contexto da reabilitação e do reforço de estruturas, bem como sua capacidade de superar as limitações do concreto armado tradicional.

O concreto reforçado com fibras demonstrou ser uma solução eficaz para melhorar a resistência à tração, ductilidade e resistência à fissuração das estruturas. A incorporação de fibras de alta resistência à matriz de concreto provou ser uma alternativa para aperfeiçoar o desempenho das construções, proporcionando maior durabilidade e capacidade de carga.

Por sua vez, o concreto têxtil apresentou-se como uma abordagem promissora, em que uma malha de fibras têxteis é incorporada à matriz de concreto, proporcionando características mecânicas e estruturais consideráveis. Essa técnica oferece maior flexibilidade de projeto, facilidade de aplicação e resistência à tração, mostrando-se adequada para diversas aplicações em engenharia civil.

O reforço de estruturas com fibras, seja por meio do concreto têxtil ou do concreto reforçado com fibras, desempenha um papel importante na engenharia civil. Através da utilização estratégica de materiais conjugados, é possível melhorar significativamente a resistência à tração e a capacidade de suportar cargas, ampliando a vida útil e a eficiência das construções já existentes.

No entanto, vale ressaltar que a implementação bem-sucedida dessas técnicas exige cuidados específicos, desde a seleção adequada das fibras até a análise estrutural detalhada e o acompanhamento rigoroso durante a execução das estruturas reforçadas.

À medida que a engenharia civil continua progredindo, a utilização do concreto têxtil e do concreto armado reforçado com fibras desempenhará um papel importante no aprimoramento de estruturas mais resistentes e de maior durabilidade. Este estudo acrescenta uma compreensão abrangente dessas técnicas, incentivando a sua adoção e a pesquisa contínua no campo da engenharia estrutural.

O experimento realizado consistiu na confecção de um molde representativo de concreto têxtil, utilizando areia, cimento, água e tiras de tecido de juta. O objetivo foi ilustrar o tema do TCC, proporcionando uma visualização prática do reforço têxtil no concreto. No entanto, é fundamental destacar que o molde criado é apenas uma representação e não foi submetido a ensaios em laboratório para avaliação de suas propriedades mecânicas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando a progressão das investigações relacionadas ao concreto têxtil e ao concreto armado reforçado com fibras, seguem algumas sugestões:

- O concreto têxtil no Brasil;
- Estudo do comportamento de materiais conjugados com mais camadas de têxteis;
- Dimensionamento de elementos estruturais em concreto têxtil;
- Estudo de modelos reduzidos no laboratório submetidos à tração e à flexão;

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575 - Edificações Habitacionais - Desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ADIEL, Eliyahu ; PELED, Alva. Three dimensional (3D) fabrics as reinforcements for cement-based composites. **Composites Part A: Applied Science And Manufacturing**, Berseba, v. 74, n. 13, p. 153-165, jul. 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 440.2R-17 - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**. Farmington Hills: ACI, 2017.

BARCOS, Manual de Construção de. **Tipos de Fibra de Carbono**. Disponível em: <https://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/tipos-de-fibra-de-carbono/>. Acesso em: 09 jul. 2023.

BARRA, M., FERRARA, L., & MARTINELLI, E. **Textile reinforced concrete: State-of-the-art review**. Construction and Building Materials, 151, 606-616, 2017.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fiber Reinforced Cementitious Composites**. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2007.

BRAMESHUBER, W. **Concrete Reinforcement with Fibers: Properties and Applications**. Springer, 2015.

BRAMESHUBER, W. **The textile reinforced concrete**. In: BARTOS, P. J. M.; DENNINGER, K. W. (Eds.). International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) in Structural Applications. Proceedings. p. 349-361, 2006.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014**. 4. ed., 2. reimp.. Sao Carlos: edUFSCAR, 2016.

COMPOSITES, Castro. **Rede de Aramida Tubular de 19 mm e 20 g/ml**. Disponível em: <https://www.castrocompositesshop.com/pt/fibras-de-refor%C3%A7o/1214-rede-de-aramida-tubular-de-19-mm-e-20-gml.html>. Acesso em: 09 jul. 2023.

COSENZA, E., & MANDREDI, G. (eds.). **Strengthening and Rehabilitation of Civil Infrastructures Using Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites: Research and Applications**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2008.

CZADERSKI, C.; JÄGER, W.; NIEDERLEITHINGER, E. **Textile Reinforced Concrete**. Berlin: Springer, 2015.

FERRARIS, C. F. **Concrete: evolution and importance**. In: KOSMATKA, S. H.; KRAIGE, L. G. (Eds.). *Innovations in concrete materials and construction: proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 9-11 September 2003*. London: Thomas Telford, p. 3-11, 2003.

FIGUEIREDO, Antônio Domingues de. **Concreto Reforçado com Fibras**. 2011. 256 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, A. D. D. **Concreto com Fibras de Aço**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 68p, 2000.

GRIES, T. et al. (2006). **Tensile Strength Analysis of Composite Materials**. *Journal of Composite Science*, vol. 2, no. 1, pp. 24-31.

HEGGER, J. et al. **6.2 Mechanical behaviour of textile reinforced concrete**. State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC: Textile Reinforced Concrete, p. 133–183, 2006.

HEGGER, J. et al. **Concrete Structures: the Challenge of Creativity**. Symposium 2004 – April 26-28 – Avignon, France.

INDUSTRIAIS, Soluções. **FIBRA DE AÇO PARA CONCRETO**. Disponível em: <https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/construcao/matcon-produtos-para-construcao/produtos/construcao/fibra-de-aco-para-concreto>. Acesso em: 09 jul. 2023.

INFOESCOLA. **Fibra de vidro**. Disponível em: <https://www.infoescola.com/quimica/fibra-de-vidro/>. Acesso em: 09 jul. 2023.

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE (FIB). *fib Bulletin 14 - Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*. Lausanne: fib, 2001.

JUVANDES, L. F. P., FIGUEIRAS, J. A. **Conceitos de Dimensionamento e Segurança para Projectos de Reforço com Sistemas Compósitos de FRP**. In: *Betão Estrutural 2000*, FEUP, Porto.

KRÜGER, M.; REINHARDT, H. W. **Departamento de Materiais de Construção, Universidade de Stuttgart, Alemanha**.

- KULAS, C. **Actual applications and potential of textile-reinforced concrete**. In: GRCA CONGRESS, 2015. Disponível em: <<https://grca.org.uk/pdf/congress2015/02%20Actual%20applications%20and%20potential%20of%20textilereinforced%20concrete.pdf>>. Acesso em: 09/07/2023.
- MACHADO, Ari de Paula; MACHADO, Bruno A.. **Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostas FRP: teoria e prática**. São Paulo: Pini, 2015.
- MALLICK, P.K.. **Fiber-Reinforced Composites**. 3. ed. Boca Raton: Crc Press, 638 p, 2007.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 3rd ed. New York: McGraw Hill, 2006.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 3rd ed. New York: McGraw Hill, 2008.
- MOBASHER, B., PLIZZARI, G. A., & RILEM Technical Committee 162-TDF. **Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 162-TDF**. Springer, 2017.
- MOBASHER, B. **Fiber-reinforced composites in structural design**. 2nd ed. Cham: Springer, 2017.
- MORASSUTTI, Daniel Salvadori. **Passarela em concreto armado e concreto têxtil: comparativo entre metodologias de dimensionamento**. 2016. 86 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2016.
- NEOMATEX. **Concreto com Fibras de Polipropileno**. Disponível em: <https://www.neomatex.com.br/concreto-fibras-polipropileno>. Acesso em: 09 jul. 2023.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª ed. São Paulo: Pini, 2011.
- ORLANDO, Igor del Gaudio. **Projeto de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos FRP: Dimensionamento à Flexão e à Força Cortante**. 2018. 196 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- PELED, Alva; MOBASHER, Barzin. **Pultruded fabric-cement composites**. *Aci Materials Journal*. Americana, p. 15-23. jan. 2005.
- PELED, Alva; BENTUR, Arnon. **Mechanisms of Fabric Reinforcement of Cement Matrices**. *Beton- Und Stahlbetonbau*. P. 456-459. jun. 2004.

PELED, Alva; BENTUR, Arnon; MOBASHER, Barzin. **Textile Reinforced Concrete**. London: 1St Edition, 2017.

REISGEN, Uwe; SCHOENE, J.; SCHLESER, Max. **INVESTIGAÇÕES TEÓRICAS E EXPERIMENTAIS SOBRE COMPORTAMENTO DE DESPARAMENTO DE BETÃO REFORÇADO TÊXTIL**. 2010. Disponível em: <https://www.rilem.net/images/publis/pro075-014.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2023.

RIZKALLA, S. **Reinforced Concrete Structures with FRP Composites**. CRC Press, 2014.

SALMOND, M. G. K.; ROBERTSON, R. E. S. **Reinforcement of concrete structures with fiber composites**. Cambridge: Woodhead, 2001.

SCHNEIDER, H. N.; SCHÄTZKE, C.; BERGMANN, I.: **Textile Reinforced Concrete – Applications and Prototypes**. In: Hegger, J.; Brameshuber, W.; Will, N. (Eds.): *Proceedings of Textile Reinforced Concrete – 1st International RILEM Conference on Textile reinforced Concrete, Aachen, 06.–07.09.2006*, Bagnaux: RILEM Publications, pp. 297–307, 2006.

SILVA, F., LIMA, J. L., & BARROS, J. A. O. **Structural Concrete with Textile Reinforcement**. In *Handbook of Composite Reinforcements for Industrial Applications* (pp. 223-251). Elsevier, 2018.

SMATH STUDIO. Versão 1.0. Smath LLC, 2022. Link <<https://smath.com/en-US/view/SMathStudio/download>> Data de acesso: 17/10/2023

SOUSA, Álvaro Fernando Vieira da Silva. **Reparação, reabilitação e reforço de estruturas de betão armado**. 2008. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

SOUZA, J. A. S. de; TAVARES, A. V. F. **Concreto reforçado com fibras: tecnologia, propriedades e aplicações**. São Paulo: Pini, 2015.

RIZKALLA, S. H. & SNEED, L. H. **Aramid Fiber Reinforcement of Concrete Structures**. *ACI Structural Journal*, 111(2), 241-249, 2014.

TRIANAFILLOU, T. C., & DRITSOS, S. E. **Textile-Reinforced Mortar (TRM) versus Fiber-Reinforced Polymer (FRP) composites as strengthening materials**. *Composite Structures*, 100, 90-97, 2013.

TRIANAFILLOU, T. C. **Tensile behavior of high-performance fiber reinforced cement composites**. Ph.D. Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, 1993.

TRIANAFILLOU, T. C. **Textile-reinforced concrete: overview and development**. *ACI Structural Journal*, v. 113, n. 4, p. 611-619, 2016.

TRANTAFILLOU, T.C. (ed.). **Strengthening of Concrete Structures with Adhesive-Bonded Reinforcement: Design and Dimensioning of CFRP Laminates and Steel Plates.** Berlin: Springer, 2009.

TOURET, L., CHEKIREL, D., & LASCOP, B. **Textile reinforced concrete: a comprehensive review on manufacturing techniques, material properties and design recommendations.** MATEC Web of Conferences, 308, 01001,2020.

APÊNDICE - Código do programa para cálculo

— ENTRADA —

☐— SAAUDAÇÃO

Programa desenvolvido pela aluna Tatiana Aparecida Lucia da Silva, para o trabalho de conclusão de curso apresentado a Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel Engenharia Civil.

— DADOS

Número de camadas do reforço FRP

$$n := 2$$

Espessura da camada de reforço FRP

$$t_f := 1,02 \text{ mm}$$

Módulo de elasticidade do FRP

$$E_f := 37000 \text{ MPa}$$

Largura da fibra

$$b_{fibra} := 305 \text{ mm}$$

Altura da laje

$$h_f := 0 \text{ m}$$

Módulo de elasticidade do aço

$$E_s := 200000 \text{ MPa}$$

Resistência característica do concreto à compressão

$$f'_c := 34,5 \text{ MPa}$$

Atura útil da viga de concreto armado

$$d := 546 \text{ mm}$$

Altura útil do reforço de flexão FRP

$$d_f := 0,6096 \text{ m}$$

Área da armadura de tração

$$A_s := 19,27 \text{ cm}^2$$

Área da armadura de compressão

$$A'_s := 0 \text{ cm}^2$$

Deformação axial última do concreto

$$\varepsilon_{cu} := 0,003$$

Tensão de ruptura final do reforço FRP

$$\varepsilon_{fuf} := 0,015$$

Distância entre o centro de gravidade da armadura comprimida

$$t := 0 \text{ cm}$$

Largura da seção transversal da viga de seção retangular ou da nervura (alma)

$$b_w := 30,5 \text{ cm}$$

Largura efetiva da alma

$$b_f := 30,5 \text{ cm}$$

Resistência de projeto de escoamento do aço

$$f_y := 414 \text{ MPa}$$

Resistência a tração

$$f_{fu} := 621 \text{ Nmm}^2$$

— Passo 1 —

Cálculo das propriedades do material do projeto do sistema FRP

É necessário calcular o projeto do sistema de FRP (Fiber Reinforced Polymer - Polímero Reforçado com Fibra) levando em consideração as propriedades do material.

Para esse cálculo é necessário informar o fator de redução ambiental de acordo com o material que será utilizado. Digite o fator do material escolhido de acordo com a tabela:

☐ Fator de redução ambiental

$$op_{cond} := \begin{cases} \text{"Exposição interior"} \\ \text{"Exposição exterior (pontes, cais e garagens não fechadas)"} \\ \text{"Ambiente agressivo (fábricas de produtos químicos e estações de tratamento residuais)"} \end{cases}$$

$$op_{e\acute{e}terior} := \begin{bmatrix} \text{"Carbono"} & 0,85 \\ \text{"Vidro"} & 0,75 \\ \text{"Desempenho"} & 0,85 \end{bmatrix}$$

$$op_{ambagressivo} := \begin{bmatrix} \text{"Carbono"} & 0,85 \\ \text{"Vidro"} & 0,50 \\ \text{"Desempenho"} & 0,70 \end{bmatrix}$$

Fator de redução ambiental

- Exposição interior
- Exposição exterior (pontes, cais e garagens não fechadas)
- Ambiente agressivo (fábricas de produtos químicos e estações de tratamento residuais)

ans_{fred}

```
opt_fred := if ans_fred = 1
            op_einterior
          else
            if ans_fred = 2
              op_eexterior
            else
              op_ambagressivo
```

Tipo de fibra

- Carbono Vidro Desempenho

C_e

Fator de redução

$C_e = 0,85$

Deformação máxima da fibra

$\varepsilon_{fu} := C_e \cdot \varepsilon_{fuf} = 0,0127$

— Passo 2 —

Cálculos preliminares

☐ — Propriedades do concreto

$$f_{ck} := \begin{bmatrix} \text{"25 Mpa"} & 25 \text{ MPa} \\ \text{"30 Mpa"} & 30 \text{ MPa} \\ \text{"34,5 Mpa"} & 34,5 \text{ MPa} \\ \text{"35 Mpa"} & 35 \text{ MPa} \\ \text{"40 Mpa"} & 40 \text{ MPa} \\ \text{"45 Mpa"} & 45 \text{ MPa} \\ \text{"50 Mpa"} & 50 \text{ MPa} \end{bmatrix}$$

- 25 Mpa 30 Mpa 34,5 Mpa 35 Mpa
 40 Mpa 45 Mpa 50 Mpa

f_{ck}

Parâmetro β_1

$$\beta_1 := 1,05 - \left(0,05 \cdot \frac{f_{ck}}{6,9 \text{ MPa}} \right) = 0,8$$

Módulo de elasticidade do concreto

$$E_c := 4700 \sqrt{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}} \text{ MPa} = 2,7606 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$$

Valor da área de deformação FRP

$$A_f := n \cdot b_{fibra} \cdot t_f = 0,0006 \text{ m}^2$$

— Passo 3 —

Determinação do estado existente de tensão antes da aplicação do FRP:

+

Posição da linha neutra

$$X_{II} := \frac{-a_2 + \sqrt{a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1} = 0,1824 \text{ m}$$

Momento de inércia da seção no estágio II em relação a linha neutra

$$I_{II} := \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot X_{II}^3}{3} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(X_{II} - \frac{h_f}{2}\right)^2 + \alpha \cdot A_s \cdot (X_{II} - d)^2 + (\alpha - 1) \cdot A'_s \cdot (X_{II} - t)^2 = 0,0025 \text{ m}^4$$

□

Cálculo do momento

Carga atuante na viga

$$p := 24,5 \text{ kN}$$

Largura do vão

$$l := 4 \text{ m}$$

Momento na viga

$$M_g := p \cdot l = 98000 \text{ J}$$

*Cálculo do momento em a uma viga biapoiada

$$\varepsilon_{bi} := \frac{M_g \cdot (d_f - X_{II})}{I_{II} \cdot E_c} = 0,0006$$

— Passo 4 —

Determinação da deformação de projeto do sistema FRP

Deformação

$$\varepsilon_{fd} := 0,41 \cdot \sqrt{\frac{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}}{n \cdot \frac{E_f}{\text{MPa}} \cdot \frac{t_f}{\text{mm}}}} = 0,0088$$

□

Condição

$$0,9 \cdot \varepsilon_{fu} = 0,0115$$

$$\text{cond}_1 := \text{if } \varepsilon_{fd} \leq 0,9 \cdot \varepsilon_{fu}$$

```

    [ "Deformação ok" "white" "green" "ButtonGlossy" ]
else
    [ "Deformação não ok" "red" "white" "ButtonGlossy" ]

```

Deformação ok

Deformação

 cond_1

— Passo 5 —

O valor de c é estimado, em relação a profundidade até o eixo neutro

$$c := 0,2 \cdot d = 0,1092 \text{ m}$$

— Passo 6 —

Determinação do nível efetivo de deformação na armadura FRP

$$\varepsilon_{fe} := \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} = 0,0131$$

$$\text{cond}_2 := \text{if } \varepsilon_{fe} > \varepsilon_{fd} \\ \varepsilon_{fe} := \varepsilon_{fd}$$

$$\varepsilon_c := (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{d_f - c} \right) = 0,002$$

— Passo 7 —

Cálculo da deformação no aço de reforço existente

Deformação do aço

$$\varepsilon_s := (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) = 0,0082$$

— Passo 8 —

Cálculo do nível de tensão no aço utilizado no reforço de FRP

$$f_s := E_s \cdot \varepsilon_s = 1,6378 \cdot 10^9 \text{ Pa}$$

$$\text{if } f_s > f_y \\ f_s := f_y$$

$$f_{fe} := E_f \cdot \varepsilon_{fe} = 3,2432 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$

— Passo 9 —

Created using a free version of SMath Studio
 Cálculo das forças internas resultantes e a verificação de equilíbrio

$$\varepsilon'_c := \frac{1,7 \cdot f_{ck}}{E_c} = 0,0021$$

$$\beta_1 := \frac{4 \cdot \varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6 \cdot \varepsilon'_c - 2 \cdot \varepsilon_c} = 0,7455$$

$$\alpha_1 := \frac{3 \cdot \varepsilon'_c \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon'^2_c} = 0,8774$$

O equilíbrio das forças é verificado através da estimativa inicial de c por meio da seguinte equação:

$$c := \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f_{ck} \cdot \beta_1 \cdot b_w} = 0,1452 \text{ m}$$

— Passo 10

```

dif := 2 mm
while dif > 0,1 mm
  
$$\varepsilon_{fe} := \varepsilon_{cu} \cdot \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi}$$

  if  $\varepsilon_{fe} > \varepsilon_{fd}$ 
    
$$\varepsilon_{fe} := \varepsilon_{fd}$$

  
$$\varepsilon_c := (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left( \frac{c}{d_f - c} \right)$$

  
$$\varepsilon_s := (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left( \frac{(d - c)}{d_f - c} \right)$$

  
$$f_s := E_s \cdot \varepsilon_s$$

  if  $f_s > f_y$ 
    
$$f_s := f_y$$

  
$$f_{fe} := E_f \cdot \varepsilon_{fe}$$

  
$$\varepsilon'_s := \frac{\varepsilon_c \cdot (c - t)}{c}$$

  
$$f'_s := E_s \cdot \varepsilon'_s$$

  if  $f'_s > f_y$ 
    
$$f'_s := f_y$$

  
$$\varepsilon'_c := \frac{1,7 \cdot f'_c}{E_c}$$

  
$$\beta_1 := \frac{4 \cdot \varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6 \cdot \varepsilon'_c - 2 \cdot \varepsilon_c}$$

  
$$\alpha_1 := \frac{3 \cdot \varepsilon'_c \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon'_c^2}$$

  
$$c_0 := c$$

  
$$c := \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b_w}$$

  
$$dif := |c - c_0|$$


```

$c = 0,1314 \text{ m}$

— Passo 11 —

Momento resistente devido ao aço

$$M_{ns} := A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1}{2} \cdot c \right) = 3,947 \cdot 10^5 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2 \text{ knm}} \text{ knm}$$

Momento resistente devido à fibra

$$M_{nf} := A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1}{2} \cdot c \right) = 112,6707 \text{ kN m}$$

— Passo 12 —

```

 $\phi := \text{if } \varepsilon_s > 0,005$ 
  0,9
else
  if  $\varepsilon_s > 0,00207$ 
     $0,65 + \frac{0,25 \cdot (\varepsilon_s - 0,00207)}{0,005 - 0,00207}$ 
  else
    0,65

```

Cargas prevista

$M_q := 176 \text{ kN m}$

$M_{n\phi} := \phi \cdot (M_{ns} + 0,85 \cdot M_{nf}) = 441,4194 \text{ kN m}$

$M_u := 1,2 \cdot M_g + 1,6 \cdot M_q = 399,2 \text{ kN m}$

■ ok !

```

cond,3 := if  $M_{n\phi} > M_u$ 
  ["ok" "white" "green" "ButtonGlossy"]
else
  ["não ok" "white" "red" "ButtonGlossy"]

```

ok

cond_{,3}

— Passo 13 —

Verificação das tensões de serviço no aço de reforço e no FRP

$$\rho_s := 0,0116$$

$$\rho_f := 0,0012$$

$$M_s := 273,91 \text{ kN}$$

$$kd := 187 \text{ mm}$$

Profundidade elástica para o eixo neutro fissurado

$$k := \sqrt{\left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2 \cdot \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c} \cdot \left(\frac{d_f}{d}\right)\right)} - \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_s} + \rho_f \cdot \frac{E_f}{E_c}\right) = 0,4099$$

$$f_{s,s} := \frac{\left(M_s + \varepsilon_{bi} \cdot A_f \cdot E_f \cdot \left(d_f - \frac{kd}{3}\right)\right) \cdot (d - kd) \cdot E_s}{A_s \cdot E_s \cdot \left(d - \frac{kd}{3}\right) \cdot (d - kd) + A_f \cdot E_f \cdot \left(d_f - \frac{kd}{3}\right) \cdot (d_f - kd)} = \blacksquare$$