

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Aline Denardi

**CONCRETO TÊXTIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
SOBRE DESENVOLVIMENTOS, APLICAÇÕES E
PERSPECTIVAS DE ESTUDOS E EMPREGOS NO BRASIL**

Porto Alegre
julho 2016

ALINE DENARDI

**CONCRETO TÊXTIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
SOBRE DESENVOLVIMENTOS, APLICAÇÕES E
PERSPECTIVAS DE ESTUDOS E EMPREGOS NO BRASIL**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil

Orientadora: Vanessa Fátima Pasa Dutra

Porto Alegre

julho 2016

ALINE DENARDI

**CONCRETO TÊXTIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
SOBRE DESENVOLVIMENTOS, APLICAÇÕES E
PERSPECTIVAS DE ESTUDOS E EMPREGOS NO BRASIL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 11 de julho de 2016

Profª. Vanessa Fátima Pasa Dutra
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientadora

Profª. Luciani Somensi Lorenzi
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Américo Campos Filho (UFRGS)
Dr. pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
PhD pela University of Leeds, UK

Rosangel Rojas de Yopez
Mestre pela Universidad de Los Andes Venezuela

Dedico este trabalho a meus pais, Roberto e Maria, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Profa. Dra. Vanessa Fátima Pasa Dutra, orientadora deste trabalho, pelos preciosos conselhos e ideias trocados.

Agradeço ao Prof. Dr. Roberto Domingo Rios e aos meus amigos do Grupo PET Engenharia Civil UFRGS pela amizade e o aprendizado construídos nos dois anos que fui bolsista do programa.

Agradeço à Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior, CAPES, pelo financiamento parcial do meu programa de duplo diplomação na École Centrale de Nantes, sem o qual a conclusão dos meus estudos na França não teria sido possível.

Agradeço aos amigos - de longa data e cultivados nas universidades - que ao longo dos últimos sete anos estiveram comigo e que deixaram comigo suas marcas.

Agradeço a todos os professores que passaram por meu percurso acadêmico, sem vocês não teria chegado aqui. Obrigada por me ensinaram que tudo que é feito com dedicação e respeito é sempre gratificante.

Em especial, agradeço aos meus pais Roberto e Maria, à minha irmã Diana e ao meu companheiro Tomas pelo amor, pelo incentivo e por acreditarem em mim.

Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.

Leonardo da Vinci

RESUMO

O presente trabalho traz uma revisão da literatura sobre o concreto reforçado com têxtil, suas principais características, propriedades, pesquisas e aplicações, bem como orientações de como encontrar referências sobre este material que ainda encontra-se em desenvolvimento. Uma análise sobre o material disponível, como também orientações para o desenvolvimento e aplicação do compósito no Brasil são sugeridas. O concreto reforçado com têxtil vem sendo estudado há mais de vinte anos e apresenta-se em constante desenvolvimento, principalmente na Alemanha. Ele consiste em uma ou mais camadas de têxteis embebidas em uma matriz de cimento de granulometria fina. Para a sua produção, maquinário têxtil de alta tecnologia é necessário e com ele, as mais variadas formas de têxteis bidimensionais e tridimensionais podem ser fabricadas. Fibras de distintos materiais não-metálicos foram estudadas para o desenvolvimento deste compósito, sendo as mais extensivamente analisadas e que apresentam melhores resultados para as aplicações atuais aquelas de carbono e de vidro álcali-resistente. O compósito apresenta resistência à tração superior ao concreto armado convencional e os poucos estudos indicaram um desempenho satisfatório a cargas cíclicas e a altas temperaturas para certas condições de reforço. O material já foi explorado em elementos de fachadas, em pontes, em reforço estrutural de estruturas de concreto convencional, em móveis, em projetos de configuração maleável. O emprego da configuração híbrida de reforço têxtil com fibras curtas dispersas melhora o comportamento à fissuração e parece ser a tendência dos estudos e futuras aplicações. O concreto reforçado com têxtil tem se mostrado promissor no mercado atual, uma vez que, ao possuir elementos de fina espessura, o consumo de massa de concreto é menor e portanto pode se tornar um material estrutural sustentável. Entretanto, todo o projeto de sua estrutura deve ser reestruturado e reavaliado para a construção específica com este compósito. Diversos grupos de pesquisa abordaram o desenvolvimento do compósito e vem utilizando o material para sua avaliação. No Brasil, entretanto, não se tem registros de seu desenvolvimento. Desta forma, traz-se com este trabalho a oportunidade de estudar e analisar criticamente como este compósito pode ser desenvolvido e aplicado à realidade brasileira, aproveitando as suas características: baixo peso, componentes não-corrosivos, não-magnéticos e de alta durabilidade frente a ataques agressivos.

Palavras-chave: Concreto Reforçado com Têxtil. Concreto Têxtil.
Novos Materiais de Construção.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistemas de reforço para concreto: (a) concreto armado convencional, (b) concreto reforçado com fibras dispersas e (c) concreto têxtil	29
Figura 2 - Diagrama das etapas da pesquisa	33
Figura 3 - a) Seção típica do ferrocimento com várias camadas de malha e b) seção típica de compósito híbrido com duas camadas externas de malha e fibras curtas dispersas	36
Figura 4 - Seções típicas de concreto têxtil com: a) diversas camadas de reforços de têxteis bidimensionais, ou b) uma camada de têxtil tridimensional	36
Figura 5 - À esquerda: Primeiros barcos de Concreto Têxtil, à direita: Tecido de fibras de vidro álcali-resistentes	37
Figura 6 - Desenvolvimento do concreto têxtil ao longo do tempo	39
Figura 7 - Exemplos de tecidos técnicos	42
Figura 8 - Filamento, feixe (em azul: filamentos de luva, em vermelho: filamentos de núcleo) e tecido não costurado	43
Figura 9 - Padrões de pontos de costura: pilar, tricô e plano	44
Figura 10 - Têxtil localmente adaptado para elementos dobrados	45
Figura 11 - Exemplos de reforços têxteis tridimensionais	46
Figura 12 - Processo de impregnação com rolo impregnador	47
Figura 13 - a) têxtil plano de carbono impregnado com resina epóxi, b) reforço moldado em ângulo-L	47
Figura 14 - Padrões de laços transpassados para têxteis costurados-colados: (a) transpasse comum e (b) transpasse simétrico	49
Figura 15 - Têxteis de carbono e vidro álcali-resistente ensaiados por HEGGER; VOSS; 2008	51
Figura 16 - Estruturas de concreto têxtil: (a) cantoneira com duas camadas de têxtil (b) elemento com várias camadas de têxtil	59
Figura 17 - Diagrama de tensão-deformação do concreto têxtil sob carregamento uniaxial de tração	61
Figura 18 - Diagrama tensão-deformação à tração dos concretos reforçados com têxteis ensaiados por HEGGER; VOSS; 2008 (tabela 2)	63
Figura 19 - Comparação da resistência à tração de um feixe com a capacidade de carga à tração de uma seção de concreto têxtil	64
Figura 20 - Curva tensão-deformação em ensaios com corpos de prova de concreto têxtil de vidro AR (Tecido 1 da tabela 2) sob carregamento cíclico e estático ..	65
Figura 21 - Diagrama esquemático de comportamento tensão-deformação do concreto têxtil com fibras curtas	66
Figura 22 - Tempo em minutos até a falha de corpos de prova de carbono e de vidro AR em 1/3 do carregamento de ruptura	68

Figura 23 - Tempo em minutos até a falha de corpos de prova de carbono e de vidro AR em 1/2 do carregamento de ruptura	68
Figura 24 - Carregamento x Deflexão do CT reforçado com vidro AR	69
Figura 25 - Carregamento x Deflexão do CT reforçado com carbono	69
Figura 26 - Ponte em concreto têxtil em Kempten, Alemanha (redução de massa de 75%; comprimento de 18m)	76
Figura 27 - Abordagens propostas para alocação de têxteis em placas dobradas	77
Figura 28 - Placa dobrada desenvolvida pelo projeto ConcreteFold	77
Figura 29 - Fachada ventilada de pequeno formato em Albstadt, Alemanha	78
Figura 30 - Elemento de fachada sanduíche	79
Figura 31 - Projeto e protótipo de cobertura em casca feita de concreto têxtil	80
Figura 32 - Passarela de pedestres em Albstadt	80
Figura 33 - Seção transversal da passarela em Albstadt	80
Figura 34 - Reforço de CRT esquemático: concreto armado convencional e concreto têxtil	81
Figura 35 - Laje de sacada na base de Metallbau Guke GmbH em Seerhausen, Saxônia	82
Figura 36 - Parede de concreto têxtil com sistema de aquecimento integrado	83
Figura 37 - Desenvolvimento do concreto têxtil no mundo	93
Figura 38 - Marca CONTEXT UFRGS	93
Figura 39 - Pertinência da inserção do concreto têxtil no Brasil	97
Figura 40 - Desafios a serem enfrentados pelo Brasil na inserção do concreto têxtil como material de construção	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Influência do padrão de ponto de costura nas propriedades do concreto reforçado com têxtil	44
Quadro 2 - Principais características de reforços com diferentes fibras e materiais de impregnação	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades e estruturas dos fios ensaiados por PELED; BENTUR; 2000 e BENTUR et al., 2006	50
Tabela 2 - Características dos têxteis de reforços ensaiados por HEGGER; VOSS; 2008	52
Tabela 3 - Proporções de mistura por BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2003	53
Tabela 4 - Proporções de mistura para concreto reforço com têxtil com inserção de fibras curtas por HINZEN, BRAMESHUBER, 2014	54
Tabela 5 - Proporções de mistura para matrizes testadas por XU et al., 2016	55
Tabela 6 - Composição química dos cimentos utilizados por XU et al., 2016	56
Tabela 7 - Proporções de mistura para concreto reforçado com têxtil protendido por REINHARDT et al., 2003	56
Tabela 8 - Propriedades da mistura apresentada na tabela 7 nas idades de 1, 7 e 28 dias	57
Tabela 9 - Teores de massa para misturas de matrizes para concreto reforçado com têxtil e concreto convencional	58
Tabela 10 - Resistência à tração e eficiência de têxteis em ensaios à tração do componente	72
Tabela 11 - Coeficiente de carregamento à flexão k_{fl}	73
Tabela 12 - Relações de preços em 2004 para preços disponíveis de pagamento (assumindo preço da malha de aço galvanizado convencional como 1 unidade por quilo)	75

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Limite superior da capacidade de carga do concreto reforçado com têxtil ..	62
Equação 2 - Capacidade de carga à tração F_{ctu}	71
Equação 3 - Eficiência deduzida do feixe	72
Equação 4 - Coeficiente de carregamento oblíquo $k_{0,alfa}$	72
Equação 5 - Momento último do componente de concreto reforçado com têxtil	73

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

abZ - Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (procedimentos gerais)

ACI - American Concrete Institute (Instituto Americano de Concreto)

AR - Álcali-Resistente

CC - Concreto Convencional

CFRP - Carbon Fibre Reinforced Plastics (Plásticos Reforçados com Fibras de Carbono)

CRC - Collaborative Research Centre (Centro colaborativo de pesquisa)

CT - Concreto Têxtil

CSA - Cimento Sulfoaluminato de Cálcio

CSAB - Cimento Sulfoaluminato de Cálcio Belítico

DFG - German Research Foundation (Fundação de Pesquisa Alemã)

EP - Resina Epóxi

FRP - Fibre Reinforced Plastics/Polymers (Plásticos Reforçados com Fibras)

GFRP - Glass Fibre Reinforced Plastics (Plásticos Reforçados com Fibras de Vidro)

HDPE - Polietileno de alta densidade

HPFRC - High Performance Fiber Reinforced Composites (Compósitos Reforçados com Fibras de Alto Desempenho)

ITA - Instituto de Tecnologia Têxtil da RWTH Aachen

PE - Polietileno

PP - Polipropileno

SBR - Butadieno-estireno

SFB - Sonderforschungsbereich (Centro Colaborativo de Pesquisa)

TRC - Textile Reinforced Concrete (Concreto rRforçado com Têxtil)

TRSSC - Textile Reinforced Self-Stressing Concrete (Concreto Reforçado com Têxtil de Auto Tensão)

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A_f - área da seção transversal da fibra

E_{fil} - módulo de elasticidade do filamento

$e_{máx}$ - deformação última

f_c - resistência à compressão

$f_{ct,fl}$ - tração na flexão

F_{ctu} - capacidade de carga à tração F_{ctu}

f_t, f_{fil} - resistência à tração do filamento

$k_{0, \alpha}$ - coeficiente de carregamento oblíquo

k_1 - eficiência deduzida do têxtil

k_2 - coeficiente de carregamento biaxial

k_b - fator que representa o número de fibras intactas no roving e varia de 0,6 a 0,9

k_{fl} - coeficiente de carregamento à flexão dependendo do material da fibra

M_u - momento último

S_{fu} - tensão última da fibra

S_{max} - resistência à tração do reforço no compósito

z - braço de alavanca interno

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	31
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	31
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	31
2.2.1 Objetivo principal	31
2.2.2 Objetivo secundário	31
2.3 HIPÓTESE	31
2.4 PRESSUPOSTO	31
2.5 DELIMITAÇÕES	32
2.6 LIMITAÇÕES	32
2.7 DELINEAMENTO	32
3 DEFINIÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA	35
4 CONCRETO REFORÇADO COM TÊXTIL: COMPONENTES E SUAS PROPRIEDADES	41
4.1 TÊXTEIS	41
4.1.1 Constituição e formas dos têxteis	43
4.1.2 Influência dos processos de produção	46
4.1.2.1 Impregnação	46
4.1.2.2 Ponto sobre transpasse	48
4.1.3 Propriedades mecânicas	49
4.1.3.1 Aderência	49
4.1.3.2 Capacidade de carga	49
4.2 MATRIZ	52
4.3 CONCRETO REFORÇADO COM TÊXTIL	58
4.3.1 Processos de fabricação	59
4.3.2 Capacidade de carga	60
4.3.3 Comportamento sob cargas cíclicas	65
4.3.4 Influência de fibras curtas dispersas	66
4.3.5 Influência de altas temperaturas	67
4.3.6 Influência da protensão	69
5 DIMENSIONAMENTO, AVALIAÇÃO DE CUSTOS E APLICAÇÕES	71
5.1 DIMENSIONAMENTO	71
5.2 AVALIAÇÃO DE CUSTOS	74

5.3 APLICAÇÕES	75
5.3.1 Placas dobradas	77
5.3.2 Paineis de revestimento de fachadas	78
5.3.3 Elementos sanduíche	78
5.3.4 Cascas	79
5.3.5 Passarelas	80
5.3.6 Reparo e reforço estrutural de estruturas de concreto armado	81
5.3.7 Lajes de sacadas e varandas	82
5.3.8 Aquecimento com reforço de carbono	83
6 PESQUISAS, DESENVOLVIMENTOS E PUBLICAÇÕES	85
6.1 PESQUISAS E DESENVOLVIMENTOS	85
6.1.1 CRC 528: Reforços têxteis para reforço e reparo estrutural	86
6.1.2 CRC 532: Concreto reforçado com têxtil - bases para o desenvolvimento de uma nova tecnologia	86
6.1.3 Plataforma de troca para CRCs e classificação de excelência	87
6.1.4 C3 - Carbono concreto compósito	87
6.1.5 ConcreteFold	88
6.1.6 Projetos fora da Alemanha	88
6.2 PUBLICAÇÕES	89
7 ANÁLISE DA SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS	91
7.1 NOMENCLATURA	91
7.2 PESQUISAS MUNDIAIS	92
7.3 APLICABILIDADE NO BRASIL	95
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
9 REFERÊNCIAS	103

1 INTRODUÇÃO

A importância dos materiais para a geração de infra estrutura urbana é inquestionável: para qualquer aglomerado social, existe a necessidade de construir-se moradias, redes de transporte, sistemas de abastecimento de água e esgoto, abastecer-se de energia elétrica e construir a infraestrutura necessária para suprir essas demandas. Por isso, o conhecimento dos materiais e do seu comportamento tem papel fundamental no processo de desenvolvimento humano.

Entre os materiais de construção, o concreto é o mais utilizado no mundo, estimando-se seu consumo anual na ordem de 11 bilhões de toneladas métricas. Suas principais vantagens comparando-se com outros materiais de construção, como o aço, por exemplo, é a sua grande resistência à água, a facilidade e a versatilidade das formas e tamanhos nas quais ele pode ser moldado e seu desempenho econômico, sendo de fácil produção e de baixo custo. Além disso, também apresenta baixo custo de manutenção, boa resistência ao fogo e a cargas cíclicas, características que fazem do concreto um importante material de construção (MEHTA; MONTEIRO, 2006, p. 3-10).

O concreto reforçado com barras de aço - concreto armado - surgiu como alternativa à alvenaria na metade do século XIX, quando as primeiras aplicações começaram na Inglaterra, França e Bélgica com Coignet e Wilkinson em 1854 e com Lambot em 1865. Este ganho de relevância se deve ao fato do contínuo progresso no desenvolvimento dos materiais que compõem o concreto armado, nas técnicas de construção e no aperfeiçoamento de projetos (SCHEERER et al., 2015, p. 15).

Apesar das suas grandes vantagens, como alta capacidade de carga, produção relativamente simples, baixo custo e de fácil moldagem, observa-se, também, uma grande desvantagem: o reforço de aço pode corroer. A matriz de concreto, por ser altamente alcalina, passiva o aço, protegendo-o. Entretanto, substâncias externas podem penetrar através dos poros do concreto e baixar a alcalinidade com o passar do tempo - causando a despassivação da armadura. Assim, o reforço de aço do concreto perde a sua proteção e começa a corroer. Nos casos extremos, a corrosão leva ao deslocamento do concreto próximo às armaduras, reduzindo a

durabilidade da estrutura e levando à possíveis falhas estruturais (KULAS; GMBH, 2015, p. 1).

O cobrimento das armaduras auxilia na sua proteção e geralmente possui 35 mm de espessura para estruturas convencionais, de acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), o que impossibilita a produção de elementos mais esbeltos. Se o reforço de aço for substituído por reforços não-metálicos, por exemplo, malhas de reforço feitas de fibras de vidro ou de carbono, uma espessura de apenas alguns milímetros é suficiente para assegurar durabilidade e forte aderência entre o concreto e o reforço.

O uso de fibras em materiais aglomerantes não é um conceito novo. Fibras curtas de vidro álcali-resistentes, de aço e de plástico são comumente utilizadas como reforço do concreto. Estas fibras trazem efeitos positivos quanto ao seu desempenho à flexão, sendo amplamente utilizadas em pisos industriais altamente carregados e em elementos pré-moldados de fina espessura (SCHEERER et al., p. 16). Entretanto, uma vez que as fibras são dispersadas aleatoriamente, seus benefícios não são explorados totalmente, sendo necessário incorporação de grandes proporções volumétricas. (BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2003, p. 94).

No início dos anos 2000, a partir dos fundamentos desenvolvidos pelo estudo do concreto reforçado com fibras curtas (figura 1b) e pelos princípios utilizados no dimensionamento de estruturas convencionais de concreto armado (figura 1a), desenvolveu-se o concreto têxtil (figura 1c). Duas universidades, na Alemanha, Universidade de Aachen¹ e Universidade de Tecnologia de Dresden², destacaram-se pelo investimento em desenvolver este novo compósito (HEGGER et al., 2006, p. 133).

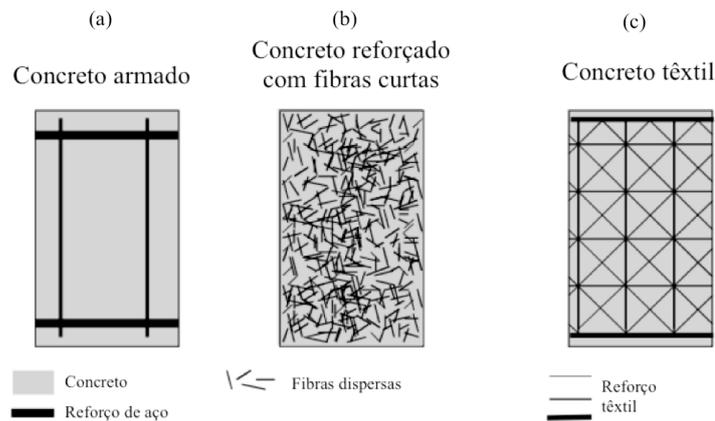
Este material compósito é conhecido como concreto têxtil³ (CT) e com ele é possível produzir elementos com economias de até 80% na massa de concreto em relação à estruturas de concreto armado convencionais. Esse fato tem um impacto direto nos custos de transporte para componentes pré-fabricados, os quais podem reduzir em até 80% (KULAS; GMBH, 2015, p. 1-2).

¹ RWTH Aachen University.

² Dresden University of Technology ou TU Dresden.

³ Do inglês: textile reinforced concrete (TRC).

Figura 1 – Sistemas de reforço para concreto: (a) concreto armado convencional, (b) concreto reforçado com fibras dispersas e (c) concreto têxtil



(fonte: adaptado de HEGGER et al., 2006, p. 133)

O concreto têxtil é composto de quatro materiais principais: cimento, água, agregado e têxtil. Além disso, pode conter aditivos e adições comumente utilizadas em concreto convencional. Os têxteis são principalmente constituídos de fibras de vidro, fibras de carbono e de aramida (GRIES et al., 2006, p. 11). Também são encontrados têxteis feitos de polipropileno (PP), polietileno de alta densidade (HDPE) e de polietileno (PE) (HEGGER et al., 2006, p. 150). Os formatos destes têxteis podem ser tanto tecidos bidimensionais, quanto tridimensionais, adaptados aos processos de produção e às solicitações dos elementos estruturais do projeto (HEGGER et al., 2008, p. 357).

O concreto têxtil, apesar de ser um material de construção bastante novo, já foi utilizado em diferentes projetos e apresentou resultados motivadores para a contínua pesquisa de seu aperfeiçoamento, como é o caso de passarelas, painéis de fachada para edificações, painéis sanduíches (KULAS; GMBH, 2015, p. 5-7,9; WESERLAND), reparos e reforços estruturais (JESSE, et al., 2008, p. 50).

Com base na sua propriedade não corrosiva, elementos de CT podem ser produzidos com seções transversais muito mais finas (5-50 mm) do que aquelas de concreto convencional. Além disso, possuem alta capacidade de carregamento e são mais duráveis, graças ao uso de matrizes de fina granulometria e consequente baixa porosidade. Uma grande vantagem do CT é a sua capacidade de se adaptar a diversas formas arquitetônicas dadas pelo reforço têxtil. A elaboração de elementos curvos de alta qualidade de acabamento é possível devido à inerente maleabilidade do têxtil em comparação ao reforço de aço (KOCH et al., 2015, p. 419).

Apesar de ser um material que vem se consolidando no mercado há mais de duas décadas, carecem no Brasil literaturas, grupos de pesquisa e fontes especializadas neste compósito. Assim, o presente trabalho se concentrará em reunir informações relevantes para aqueles que pretendem estudar e trabalhar com este material, apresentando os desenvolvimentos já realizados por grupos de pesquisa internacionais. Ele está dividido em 4 partes: relatos históricos que remetem à evolução do concreto têxtil, introdução às suas propriedades mecânicas, documentação das pesquisas desenvolvidas até então e análise dos conhecimentos e aplicações encontrados, sugerindo futuros pontos iniciais de pesquisa e empregos para o compósito no Brasil.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

O que é o concreto têxtil e quais são os desenvolvimentos, aplicações e perspectivas de empregos no Brasil?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho consiste na análise crítica e síntese dos desenvolvimentos e aplicações já publicados e disponíveis sobre o concreto têxtil nacional e internacionalmente, desde a sua origem até perspectivas de trabalhos e empregos futuros no Brasil.

2.2.2 Objetivo secundário

Entender a origem deste material, quais os benefícios que o mesmo apresenta, fazer comparativos com materiais já conhecidos, montar uma linha do tempo com a sua evolução e principais desenvolvimentos, descrever os estudos, as pesquisas e aplicações atuais, além de fornecer possíveis sugestões de avanços e empregos no Brasil.

2.3 HIPÓTESE

Neste trabalho, define-se como concreto têxtil toda matriz de cimento, composta de materiais granulométricos finos, reforçada com uma ou mais camadas de têxteis não-metálicos.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por premissa que alguns estudos sobre o CT foram publicados mundialmente, sendo os desenvolvimentos, entretanto, bastante recentes. Muitas questões ainda precisam ser avaliadas para a total compreensão e melhor entendimento, com consequente aproveitamento das potencialidades do material. A reunião das informações já conhecidas e das bibliografias disponíveis, a análise das mesmas e a disponibilização de um texto em português podem contribuir para que os primeiros desenvolvimentos e aplicações possam ocorrer no Brasil. O

Concreto têxtil: uma revisão bibliográfica sobre os desenvolvimentos, aplicações e perspectivas de estudos e empregos no Brasil

trabalho não tem como pressuposto esgotar os conhecimentos adquiridos ao longo do tempo, mas sim de contextualizar e apresentar os principais desenvolvimentos e fazer uma análise com base nos dados encontrados.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se à análise de compósitos de matriz cimentícia reforçados com têxteis não metálicos.

2.6 LIMITAÇÕES

O trabalho se limitou ao conteúdo gratuito disponível à comunidade da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em línguas portuguesa, inglesa e francesa.

2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, representadas pela figura 2.

- a) definições e relatos históricos;
- b) compósito, componentes e suas propriedades;
- c) dimensionamento;
- d) análise de custos;
- e) aplicações;
- f) pesquisas e desenvolvimentos;
- g) análise do conteúdo estudado;
- h) considerações de empregos no Brasil;
- i) considerações finais.

Figura 2 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pela autora)

3 DEFINIÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

A principal desvantagem do concreto armado convencional envolve a sua suscetibilidade a ataques corrosivos. A busca por novas alternativas de reforço seguiu um percurso natural do desenvolvimento de novos materiais e foi uma consequência lógica deste processo (RAMM⁴, 2007, p. 27-130 apud SCHEERER et al., 2015, p. 15). Já nos anos 1980 estudava-se substituir as barras de aço por fibras contínuas ou por malhas feitas de fibras contínuas. Desde o final dos anos 1990 este compósito é chamado de concreto têxtil (NAAMAN, 2010a, p.3).

Apesar de uma definição clara não ter sido dada ao concreto têxtil na ocasião em que diversas pesquisas, seminários, relatórios e trabalhos vinham sendo desenvolvidos sobre o mesmo, um compósito com características similares, o ferrocimento, já era conhecido e definido pelo Comitê 549 do Instituto Americano de Concreto⁵. "O ferrocimento é um tipo de concreto reforçado, de fina espessura, comumente constituído de argamassa de cimento hidráulico e camadas de malhas de arames de aberturas relativamente pequenas e espaçadas próximas umas às outras. A malha pode ser metálica ou de outro material adequado" (Tradução livre de NAAMAN, 2010a, p.4). Esta definição permite que o concreto têxtil seja inserido no contexto do ferrocimento. Ainda, suas configurações geométricas são bastante similares, como é visto nas figuras 3 e 4. No entanto, esta definição exclui os reforços tridimensionais e limita-se ao método construtivo de várias camadas juntamente espaçadas. Igualmente, ela não aborda as características da matriz que envolve o reforço. Diferentemente do CT, o Ferrocimento é uma tecnologia amadurecida (NAAMAN, 2010a, p.4) e que vem sendo estudada desde os anos 1970 através de pesquisas de base, publicações, simpósios, cursos curtos e aplicações (NAAMAN, 2010b, p. 7).

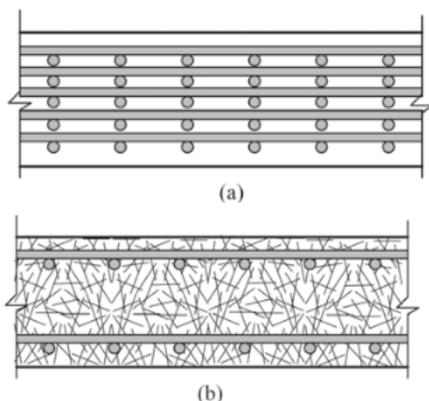
NAAMAN, 2010a, sugere uma nova definição para o compósito: "concreto têxtil é um tipo de concreto reforçado geralmente constituído de uma matriz de cimento hidráulica reforçada com diversas camadas de têxteis bidimensionais espaçadas próximas umas às outras ou uma ou várias camadas de têxteis tridimensionais. No mínimo uma camada de têxtil deve ser colocada

⁴ Ramm, W. 'Über die faszinierende Geschichte des Betonbaus', em 'Gebaute Visionen. 100 Jahre Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 1907–2007. 2007. p. 27-130.

⁵ Do inglês: American Concrete Institute, ACI.

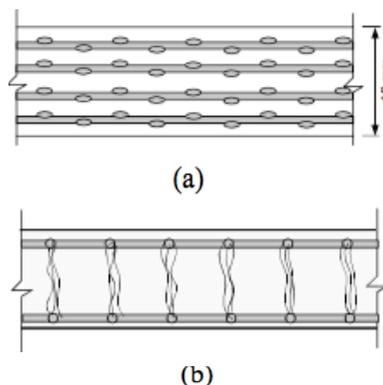
próxima às duas superfícies externas da estrutura resultante. Os têxteis podem ser polímeros, sintéticos, metálicos, orgânicos ou de outro material adequado. A granulometria do agregado da matriz de cimento e sua composição deve ser compatível com o sistema de armadura têxtil e esse deve ser envolvido por ela. A matriz pode também conter fibras descontínuas ou microfibras de dimensões apropriadas" (Tradução livre de NAAMAN, 2010a, p.5).

Figura 3 – a) Seção típica do ferrocimento com várias camadas de malha e b) seção típica de compósito híbrido com duas camadas externas de malha e fibras curtas dispersas



(fonte: adaptado de NAAMAN, 2010b, p. 20)

Figura 4 – Seções típicas de concreto têxtil com: a) diversas camadas de reforços de têxteis bidimensionais, ou b) uma camada de têxtil tridimensional



(fonte: adaptado de NAAMAN, 2010a, p.5)

Enquanto que têxteis e tecidos feitos de fibras poliméricas de alta performance tais como carbono, Kevlar e Spectra estavam disponíveis para a indústria aeroespacial desde o começo dos anos 1960, eles só começaram a ser utilizados em compósitos de matriz cimentícia no final da década de 1980 e começo da década de 1990 (NAAMAN, 2010a, p. 8).

Fuchs⁶ (2001 apud SCHEERER et al., 2015, p. 17) referencia o Instituto de Pesquisa de Têxtil Saxão⁷ em Chemnitz, Alemanha e o WTZ Tecnologia Têxteis⁸ em Dresden, Alemanha, como os primeiros desenvolvedores de patentes de concreto têxtil. Em 1990, a patente DD 275 008 descreve exemplos de reforços têxteis: "fios de reforço" com diâmetro de 8mm e um espaçamento de malha de 25mm, dando a primeira impressão do concreto têxtil (SCHEERER et al., 2015, p. 17).

⁶ Fuchs, H. **Ausarbeitung zu Vorarbeiten des WIZTT / STFI vor 1991 für das FK Textil**. 2001 (não publicado).

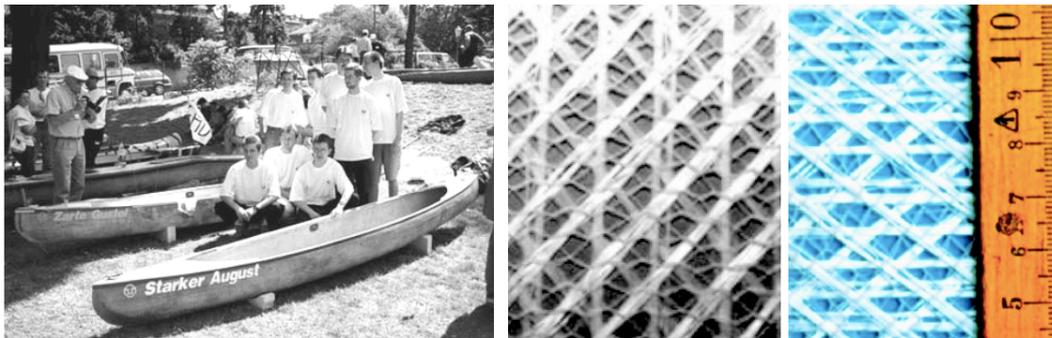
⁷ Do inglês: Saxon Textile Research Institute e do alemão: Sächsisches Textilforschungsinstitut.

⁸ Do inglês: WTZ Technology Textiles e do alemão: WTZTT.

No início dos anos 1990, na Alemanha, as pesquisas se concentraram a entender os aspectos relacionados à eficiência dos têxteis embebidos na fina matriz de cimento. Por exemplo, a interação entre as fibras de envoltória e as fibras de núcleo do feixe, a aderência ou a resistência à álcali. As universidades em Dresden e Aachen trabalharam e continuam trabalhando estreitamente conduzindo as pesquisas de concreto têxtil. (SCHEERER et al., 2015, p. 18).

Em 1996, dois barcos foram construídos de concreto têxtil, um com têxteis de vidro álcali-resistentes e outro com têxteis de carbono. Esses foram desenvolvidos por estudantes apoiados por diversos institutos de pesquisas da TU Desden e venceram pela primeira vez o concurso da Associação Alemã de Concreto⁹, deixando claro que construir com têxteis possui um enorme potencial. O barco viajou por Amsterdam, Atlanta e Ulm. Além disso, de acordo com Hempel¹⁰ (1996, p. 76-79 apud SCHEERER et al., 2015, p. 18) o êxito no desenvolvimento dos primeiros fios contínuos de vidro álcali-resistente se deram graças aos pesquisadores de têxteis que utilizaram a técnica Malimo, a qual foi empregada no reforço dos barcos (SCHEERER et al., 2015, p. 18-19). A figura 5 mostra um dos primeiros barcos construídos em concreto têxtil e um tecido de vidro álcali-resistente.

Figura 5 – À esquerda: Primeiros barcos de concreto têxtil, à direita: Tecido de fibras de vidro álcali-resistentes.



(fonte: SCHEERER et al., 2015, p. 19)

⁹ Do inglês: German Concrete Association e do alemão: Detscher Betonverein.

¹⁰ Hempel, R., 'Bauingenieurstudenten der TU Dresden erfolgreich bei der 6. Deutschen Betonkanuregatta – ein Beispiel für gelungene Verknüpfung von Forschung und Lehre', Jahresmitteilungen. 1996, Schriftenreihe des Inst. f. Tragwerke und Baustoffe, TU Dresden, 76–79.

Na segunda metade dos anos 1990, iniciaram-se pesquisas com reforços têxteis de aramida na Universidade de Stuttgart, Alemanha, pelo professor Reinhardt e colegas. Estes também posteriormente conduziram pesquisas quanto à protensão do CT. Na segunda metade dos anos 1990, professor Wörner, da TU Darmstadt, estudou o uso de malhas têxteis próximas à superfície para restringir a espessura das fissuras dos elementos de construção (SCHEERER et al., 2015, p. 20). NAAMAN, 2010b, relata que após os estudos em protensão iniciarem, verificou-se limitações quanto a ductilidade e resistência ao cisalhamento do compósito ao se utilizar reforços com tais fibras. A experiência adquirida serviu para transpor o foco do estudo da protensão para o seu uso em reparos e reforços estruturais (NAAMAN, 2010b, p. 5).

Grupos de pesquisa na Universidade de Surrey, Reino Unido, e na Universidade de Bento Gurion do Negev, Israel, além de algumas pesquisas realizadas no Japão, indicam ser os três pontos focais de produção científica deste compósito fora da Alemanha. Apesar de serem profundamente relevantes e de contribuírem ao desenvolvimento do compósito, nenhuma atividade internacional excede o profundo e extenso estudo conduzido por dois centros colaborativos de pesquisa¹¹ (CRC 528 e CRC 532) fundados pela Fundação de Pesquisa Alemã¹² DFG iniciados em 1999. Nestes centros, não somente a combinação dos têxteis e do concreto foi abordada, mas também o reforço da alvenaria e de estruturas de madeira com têxtil. O primeiro centro se intitula "Reforços têxteis para fortalecimento e reparo estrutural" e o segundo "Concreto têxtil - bases para o desenvolvimento de uma nova tecnologia". As pesquisas realizadas por estes grupos se estenderam até 2011 (SCHEERER et al., 2015, p. 21).

O concreto têxtil ainda não possui regulamentações para seu uso aprovadas, alguns procedimentos abZ¹³ pontuais foram necessários para o desenvolvimento de suas aplicações. Os primeiros procedimentos gerais foram dados para pequenos painéis de fachadas e, em 2014, para reforço de estruturas internas de concreto armado, especialmente submetidas a reforço de flexão na zona de tração sob carregamento predominantemente estático. Este último é um importante marco para o concreto têxtil e deixa precedentes para futuros (SCHEERER et al., 2015, p. 28).

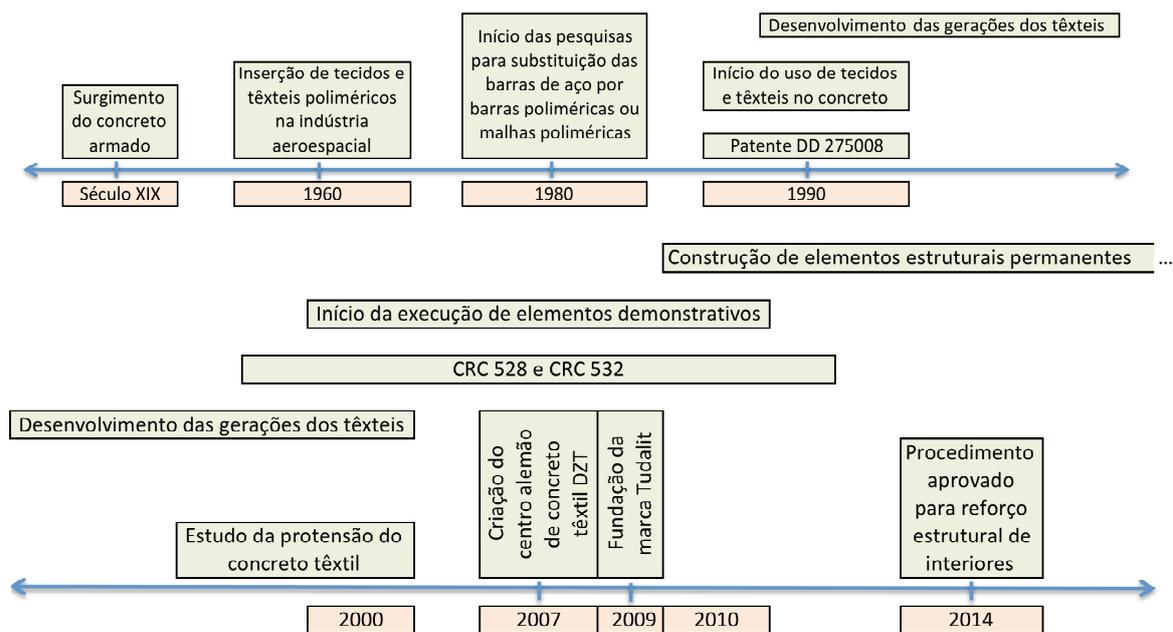
¹¹ Do inglês: Collaborative Research Centre, CRC, e do alemão: Sonderforschungsbereich, SFB.

¹² Do inglês: German Research Foundation e em alemão: Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG.

¹³ Do inglês: procedure for national approvals e do alemão: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung.

Algumas obras foram executadas em concreto têxtil, principalmente na Alemanha, como por exemplo: 3500 m² de fachada de um edifício de escritórios revestidos com painéis de CT em Dortmund; aproximadamente 18000m² de painéis de proteção contra ruído na rodovia Amsterdam - Paris construídos em 2003 (HEGGER et al., 2006, p. 241); lajes de varandas na empresa Metallbau Guke GmbH em Seerhausen, Alemanha; cobertura de elementos pré-moldados de CT na RWTH Aachen. Atualmente, a principal utilização dos compósitos CT é reforço e reparo de estruturas de concreto armado, como em colunas, telhados, lajes, silos e pontes. Um dos maiores projetos de reforço estrutural utilizando têxteis foi realizado na ponte West Gate Bridge, na Austrália, com têxteis de carbono¹⁴ (SCHEERER et al., 2015, p. 27; Hii; AL-MAHAIDI apud WILLIAMS et al., 2011, p. 72-2). Um esquema representativo do desenvolvimento do concreto têxtil ao longo do tempo pode ser visto na figura 6.

Figura 6 – Desenvolvimento do concreto têxtil ao longo do tempo



(fonte: elaborado pela autora)

Atualmente, há muitas pesquisas em desenvolvimento sobre este material compósito e muito trabalho ainda precisa ser feito para torná-lo mais rentável, eficiente, ecológico e viável. No

¹⁴ Hii, AKY; Al-Mahaidi, R. **Experimental Investigation on Torsional Behavior of Solid and Box-Section RC Beams Strengthened with CFRP Using Photogrammetry'**, *Journal of Composites for Construction*, vol. 10, no. 4, pp. 321-9. 2006

próximo capítulo, as propriedades mecânicas deste material compósito e dos seus componentes serão apresentadas.

4 CONCRETO TÊXTIL: COMPONENTES E SUAS PROPRIEDADES

O concreto têxtil consiste basicamente de reforços têxteis que são embebidos em camadas finas de concreto. Os reforços têxteis são produzidos do processamento de fibras de alto desempenho (isto é, fibras com alta resistência, ductilidade e durabilidade) em estruturas planas ou espaciais que utilizam tecnologia têxtil de ponta (JESSE et al., 2008, p. 50).

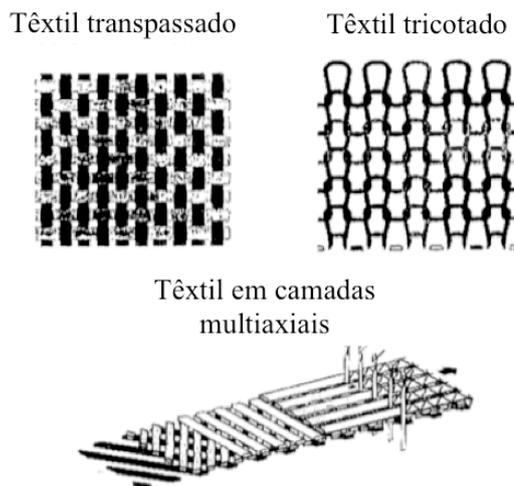
4.1 TÊXTEIS

A moderna tecnologia têxtil oferece uma grande variedade de tecidos, com ótima flexibilidade no design da geometria e das fibras (PELED; BENTUR, 2000, p. 781). O conjunto das características do têxtil, como, por exemplo, a sua gramatura e o seu tipo de ponto, relaciona a sua estrutura com a sua maleabilidade (KOCH et al., 2015, p. 420).

A unidade básica contínua do têxtil é o filamento. Cada filamento possui entre 5 a 30 μm de diâmetro, dependendo do material (KULAS; GMBH, 2015, p. 2). Conjuntos de filamentos formam os fios e os feixes, que são agrupamentos de filamentos. Eles são principalmente de vidro álcali-resistente, de carbono e de aramida. A unidade de medida do feixe é dada por tex, cujo significado é grama por quilômetro e pode ser calculado em função do seu diâmetro e da sua massa específica. Por exemplo, um feixe de 320 tex consiste de aproximadamente 800 filamentos com um diâmetro de aproximadamente 14 μm e massa específica de 2,68 g/cm^3 (RAUPACH et al., 2006, p. 77). Processos adicionais aos feixes os tornam têxteis técnicos como, por exemplo, os tecidos tricotados, transpassados, trançados (BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2003, p. 94), não costurados, colados, costurados-colados¹⁵ e ainda serem constituídos de camadas multiaxiais. Os têxteis técnicos diferem principalmente na forma com a qual os feixes são conectados uns aos outros nos pontos de ligação. O entrelaçamento dos fios para formar um tecido afeta não somente a geometria do tecido mas também a geometria dos fios individuais (PELED; BENTUR, 2000, p. 781; KLEICKE et al., 2010, p. 46). Exemplos de configurações de tecidos técnicos são mostrados na figura 7.

¹⁵ Do inglês: knitted, woven, baided, non-woven, glued e stitch-bonded, respectivamente.

Figura 7 – Exemplos de tecidos técnicos



(fonte: adaptado de BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2003, p. 105)

Além de diferirem pelo processo de produção, outros parâmetros, tais como densidade do fio, fineza, o número de filamentos em um feixe e o comprimento de laço de ligação podem influenciar a estabilidade e as propriedades mecânicas do têxtil como um todo e alterar a penetrabilidade da partícula de cimento. A penetrabilidade da matriz dentro do tecido e especialmente entre filamentos depende da natureza da encontros dos tecidos, da estrutura do tecido, do número de filamentos em um feixe e do processo de produção do compósito. O processo de preparação de compósitos de cimento com tecidos têxteis deve assegurar a boa penetrabilidade das partículas de cimento entre os espaços dos tecidos e entre os espaços dos filamentos dos do feixe que compõem o tecido (COHEN et al., 2006, p. 23; PELED et al., 2008, p. 174; PELED; BENTUR, 2000, p. 781).

As fibras que compõem os filamentos comumente são classificadas como de alto ou de baixo módulo relativamente ao módulo de elasticidade do concreto. As fibras de polipropileno (PP), polietileno (PE) e Nylon são ditas de baixo módulo (NAAMAN, 2010a, p. 8), já as fibras de aramida, vidro álcali-resistente, fibras polietileno de alta densidade (HDPE) e de carbono são de alto módulo (PELED; BENTUR, 2000, p. 783). Estas fibras são adequadas para aplicação ao concreto por serem estáveis em ambientes carbonatados e em ambientes com cloretos (REINHARDT et al., 2003, p. 231).

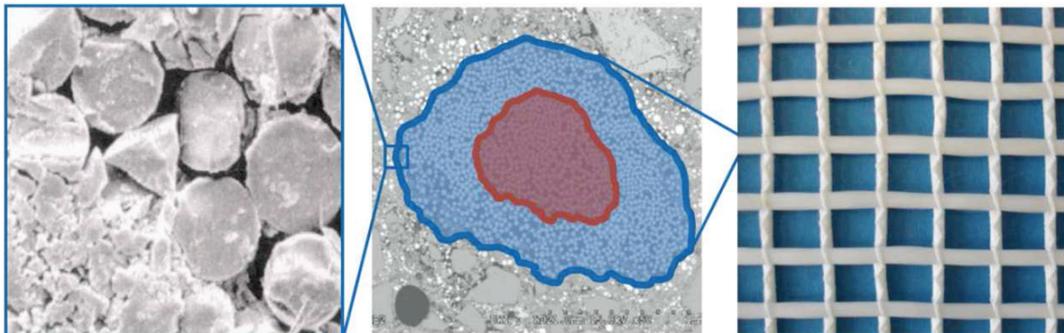
Outra classificação refere à combinação de resistência e módulo de elasticidade. Fibras de alta resistência à tração e alto módulo de elasticidade são chamadas de *high-end*, fibras de menor resistência e baixo módulo de elasticidade são chamadas de *low-end*. Fibras *low-end* são

compatíveis com matrizes leves e fibras *high-end* com matrizes de peso normal ou compactadas (NAAMAN, 2010a, p. 19).

4.1.1 Constituição e formas dos têxteis

Ao agrupar filamentos de pequenos diâmetros, formam-se espaços vazados microscópicos, tão pequenos que as partículas mais finas do concreto não podem penetrá-los. A estrutura de filamentos, de um feixe e de um tecido são apresentadas na figura 8. O concreto acessa apenas os filamentos exteriores - de luva (área azul da figura 8), enquanto que os filamentos interiores - de núcleo, não são alcançados (área vermelha da figura 8) (KULAS; GMBH, 2015, p. 2).

Figura 8 – Filamento, feixe (em azul: filamentos de luva, em vermelho: filamentos de núcleo) e tecido não costurado

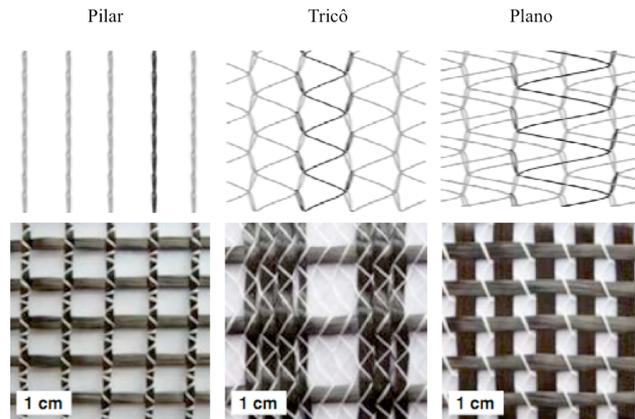


(fonte: KULAS; GMBH, 2015, p. 2)

A distância das aberturas da malha e a dimensão máxima do grão utilizado devem ser compatíveis para permitir a penetração adequada. Distâncias de abertura de malha são comumente inferiores a 30 mm (KULAS; GMBH, 2015, p. 4).

O design do têxtil pode ser adaptado alterando-se o material, a gramatura do fio, o tamanho de abertura de malha, o padrão de ponto de costura (pilar, tricô, plano). Estes padrões de pontos estão representados pelos croquis técnicos e suas fotografias na figura 9. O quadro 1 apresenta a influência destes padrões de pontos de costura nas propriedades do concreto têxtil (KOCH et al., 2015, p. 420).

Figura 9 – Padrões de pontos de costura: pilar, tricô e plano



(fonte: adaptado de KOCH et al., 2015, p. 421)

Quadro 1 – Influência do padrão de ponto de costura nas propriedades do concreto têxtil

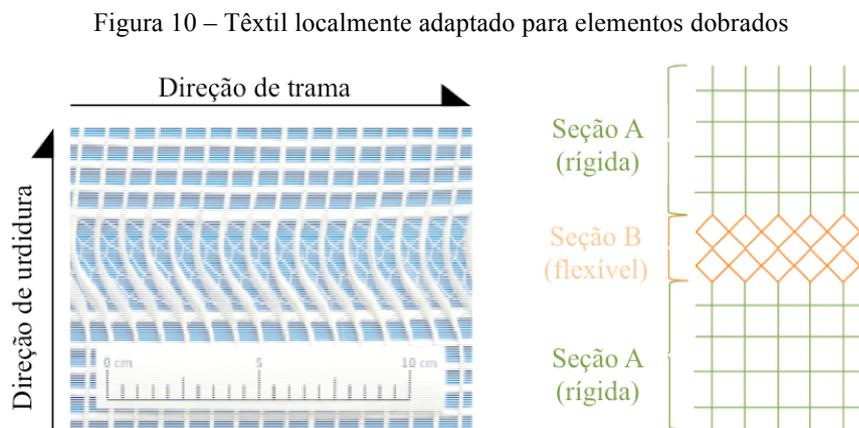
Padrão de ponto de costura	Pilar	Tricô	Comum
Geometria da seção transversal dos feixes de urdidura			
Propriedades de aderência com respeito à matriz de concreto	baixa	média	boa
Rigidez a flexão	alta	média	baixa
Resistência ao deslocamento	alta	média	baixa

(fonte: adaptado de KOCH et al., 2015, p. 420)

O projeto do têxtil permite que ele possa ser maleado localmente. Um projeto de pesquisa que se iniciou em junho de 2014, chamado ConcreteFold, estuda a possibilidade de produzir-se têxteis maleados localmente com a finalidade de utilizá-los em elementos dobrados (KOCH et al., 2015, p. 421). Na figura 11 tem-se um exemplo da composição técnica de um têxtil utilizado no projeto. Para a produção desse elemento, produziu-se o têxtil com ponto pilar,

parou-se a produção, mudou-se o tipo de ponto para o tipo plano durante 4-5 cm, trocou-se mais uma vez o tipo de ponto de plano para pilar (KOCH et al., 2015, p. 422).

Os fios que compõem o tecido são classificados em fios de urdidura e de trama. Os fios de urdidura são os fios na direção das solicitações principais (também chamados de fios a 0 graus) e os fios de trama são os fios transversais às solicitações principais (também chamados de fios a 90 graus), como está assinalado na figura 10 (COHEN et al., 2006, p. 24). No caso de fios reforçando mais direções, eles são identificados pela sua orientação em graus.

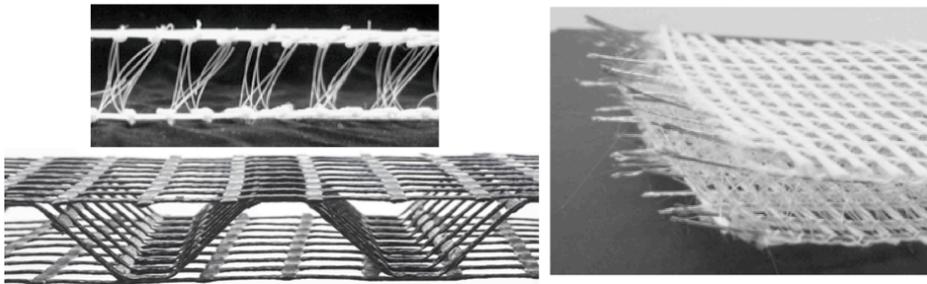


(fonte: adaptado de KOCH et al., 2015, p. 422)

Atualmente, camadas múltiplas biaxiais ou multiaxiais costuradas-coladas feitas de fibras de vidro álcali-resistentes ou de carbono são majoritariamente utilizadas como reforços têxteis para o concreto. Estes têxteis são arranjados em uma ou mais camadas com diferentes ângulos e laços de ligação que permitem a costura entre os feixes (KLEICKE et al., 2010, p. 46).

Além dos tecidos bidimensionais, têxteis técnicos tridimensionais podem ser utilizados para aplicações em compósitos de cimento e concreto finos. A tecnologia têxtil oferece a possibilidade de colocar quanto reforço for necessário pelo projeto e exatamente onde ele é necessário, ajustando as propriedades e geometrias do tecido para aplicações particulares. Eles também oferecem vantagens na simplificação do processo de construção e em economias de custo de mão de obra. Exemplos de têxteis tridimensionais são dados na figura 11 (NAAMAN, 2010a, p. 13).

Figura 11 – Exemplos de reforços têxteis tridimensionais



(fonte: adaptado de NAAMAN, 2010a, p. 15; SOLIDIAN)

4.1.2 Influência dos processos de produção

A produção dos têxteis dependem do maquinário disponível. O ITA Aachen utiliza a máquina Karl Mayer Malimo para fabricar têxteis biaxiais longitudinais com uma largura de até 50 polegadas (aprox. 1200 mm) (KÖCKRITZ et al., 2006, p. 4). A impregnação e o ponto sobre transpasse, apresentados nesta seção, são processos importantes na confecção do têxtil e que influenciam as suas propriedades.

4.1.2.1 Impregnação

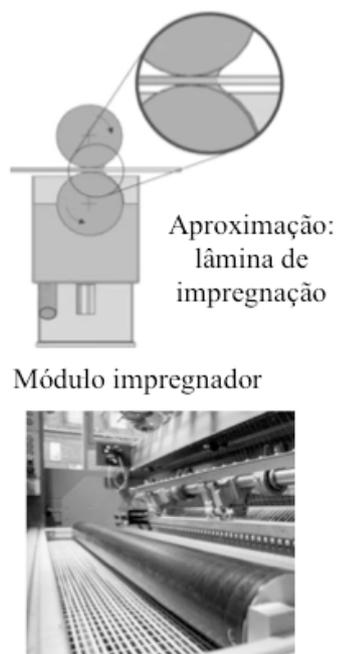
As etapas subsequentes à produção dos têxteis técnicos alteram a orientação e a configuração do material de reforço. Por este motivo, desenvolveu-se processos de impregnação para os têxteis com a finalidade de estabilizar estruturalmente estes reforços (KÖCKRITZ et al., 2006, p. 3). CURBACH et al.¹⁶ (2005 apud KÖCKRITZ et al., 2006, p. 4) verificaram que o melhor processo de impregnação é aquele com dispersões poliméricas a base de água através de rolos e subsequente secagem por radiação infravermelha (KÖCKRITZ et al., 2006, p. 4). Através da impregnação, é possível ativar os filamentos de núcleo do feixe e transmitir a carga igualmente através deles. Resina epóxi (EP) e butadieno-estireno (SBR) têm se mostrado materiais de impregnação eficientes em reforços têxteis. (KULAS; GMBH, 2015, p. 2).

Um desenho esquemático do processo de impregnação é visto na figura 12. A impregnação de resina epóxi (EP) é particularmente adequada para a produção de reforços robustos,

¹⁶ Curbach, M.; Jesse, F.; Köckritz, U.; Offermann, P. **Influence of Textile Manufacturing Technology on Load Bearing Behaviour of Textile Reinforced Concrete.** 13th International Techtexil Symposium, 2005.

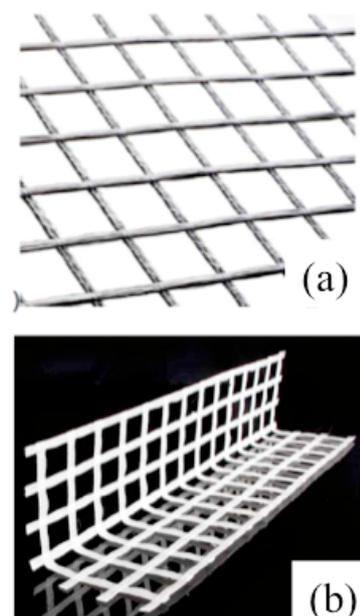
dimensionalmente estáveis (figura 13) - fatores importantes para o processo de trabalho em plantas de componentes pré-fabricados e no processo de concretagem (KULAS; GMBH, 2015, p. 2). Reforços em rolos são geralmente obtidos com impregnação de butadieno-estireno (SBR).

Figura 12 – Processo de impregnação com rolo impregnador



(fonte: adaptado de KÖCKRITZ et al., 2006, p. 4)

Figura 13 – (a) Têxtil plano de carbono impregnado com resina epóxi e (b) reforço moldado em ângulo-L.



(fonte: KULAS; GMBH, 2015, p. 3)

O quadro 2 apresenta as principais características dos reforços com diversos materiais de fibra e de impregnação (KULAS; GMBH, 2015, p. 3). ARG/SBR se refere a fibras de vidro álcali resistentes com impregnação de butadieno-estireno; ARG/EP a fibras de vidro álcali resistentes com impregnação de resina epóxi; CAR/SBR a fibras de carbono com impregnação de estireno-butadieno; CAR/EP a fibras de carbono com impregnação de resina epóxi. Os símbolos significam: "-" significa não aplicável a situação, "o" característica na média, "+" boa característica, "++" característica muito boa e "+++" característica ótima (KULAS; GMBH, 2015, p. 3).

Quadro 2 – Principais características de reforços com diferentes fibras e materiais de impregnação

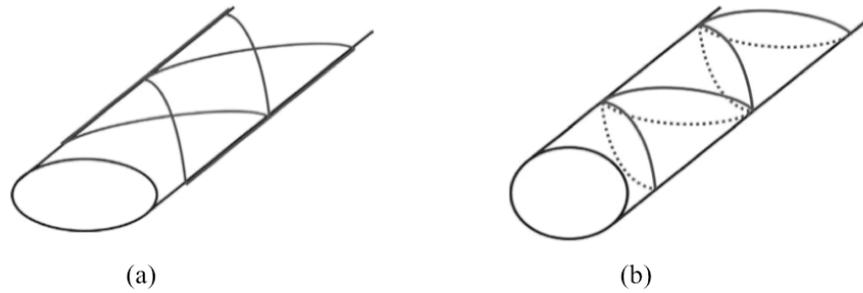
Característica	ARG/SBR	ARG/EP	CAR/SBR	CAR/EP
Tensão à tração	o	+	++	+++
Comportamento de aderência ao concreto	o	+++	o	++
Manuseio	pode ser em rolos	inerente estabilidade	pode ser em rolos	inerente estabilidade
Estabilidade quando do lançamento do concreto	-	++	-	++
Adequado a componentes pré-fabricados	o	+++	o	+++
Adequado para reforços	+++	++	+++	++
Custo por m2	+++	o	++	o

(fonte: adaptado de KULAS; GMBH, 2015, p. 3)

4.1.2.2 Ponto sobre transpasse

Os pontos sobre transpasse garantem a estabilidade entre feixes do próprio reforço contínuo e da ligação entre as direções de reforço. O ciclo convencional de produção de têxteis costurados-colados possui uma natureza assimétrica e constitui-se de duas fases de costura para o laço de ligação sobre a direção longitudinal (figura 14a). Este processo aumenta os danos das fibras e diminui drasticamente a produtividade. Com um padrão de ponto simétrico e de fase de processo única, exclui-se estas variáveis. Além disso, para o operador que executa o concreto têxtil, o processo fica mais simples, uma vez que ele não precisa se concentrar em qual lado do têxtil encontra-se o transpasse. A figura 14b apresenta o simétrico (KÖCKRITZ et al., 2006, p. 9-11).

Figura 14 – Padrões de laços transpassados para têxteis costurados-colados: (a) transpasse comum e (b) transpasse simétrico



(fonte: adaptado de KÖCKRITZ et al., 2006, p. 11)

4.1.3 Propriedades mecânicas

4.1.3.1 Aderência

Uma melhor aderência da estrutura têxtil foi encontrada em geometrias não lineares induzidas nos fios individuais pela estrutura do tecido. Tecidos que possuem uma forma relativamente complicada de fios, tais como nos tecidos tricotados e transpassados, melhoram a aderência e a performance do compósito pela geometria e ancoragem fornecida pela configuração dos feixes (PELED; BENTUR, 2003, p. 117; PELED; BENTUR, 2000, p. 786). Também, os estudos mostraram que fios torcidos resultaram em uma melhor aderência à matriz e que um revestimento de latex, apesar de ser hidrofílico e ter sido adicionado com a intenção de melhorar a aderência, diminuiu-as (PELED; BENTUR, 2000, p. 785). No têxtil, não há uma correlação clara entre a aderência e o módulo de elasticidade. (PELED; BENTUR, 2000, p. 785).

4.1.3.2 Capacidade de carga

Apenas os filamentos exteriores do feixe absorvem o carregamento. Os filamentos de núcleo, por permanecerem livres de deformação e por oferecerem uma penetração limitada da matriz de cimento entre os filamentos, resulta em um fator de carga de apenas 30 a 35% para os fios, independentemente da sua natureza (filme, feixe ou filamento único) (KULAS; GMBH, 2015, p.2; PELED; BENTUR; 2000 , p. 785).

Observou-se um comportamento de endurecimento (*strain-hardening*) na flexão para todas as configurações de têxteis, inclusive as de baixo módulo. O efeito de *strain-hardening* corresponde ao comportamento superior de resistência após a primeira fissuração (PELED; BENTUR; 2000 , p. 788).

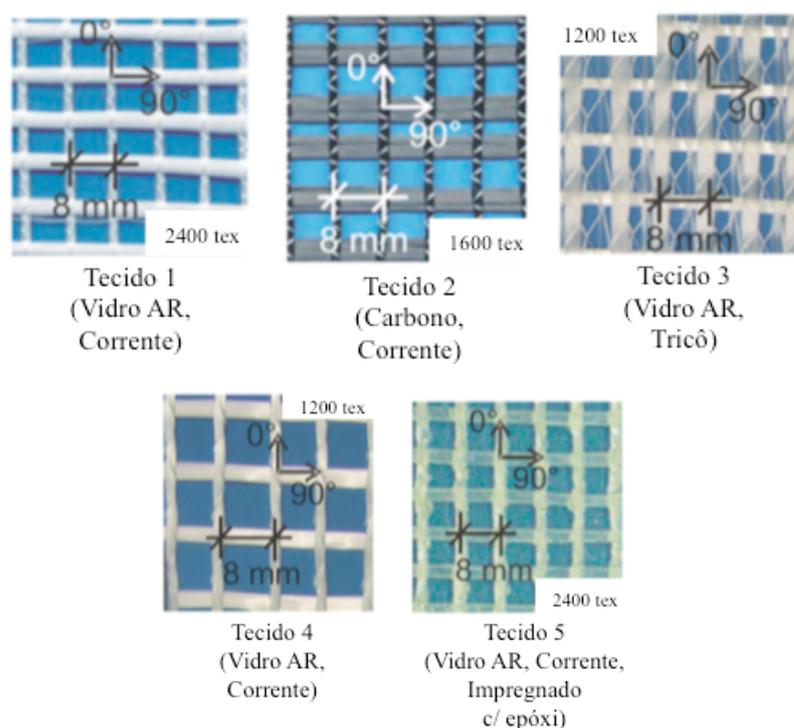
As propriedades mecânicas dos filamentos que compõem os têxteis ensaiados por PELED; BENTUR;2000 e BENTUR et al., 2006 são apresentados na tabela 1. Os têxteis e suas características utilizados em testes por HEGGER; VOSS, 2008, de fibras de vidro álcali resistentes (AR) e de carbono encontram-se na figura 15 e tabela 2. O Tecido 5 da tabela 2 foi impregnado com resina epóxi (HEGGER; VOSS, 2008, p. 2052).

Tabela 1 – Propriedades e estruturas dos fios ensaiados por PELED; BENTUR; 2000 e BENTUR et al., 2006

MATERIAL	Resistência (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Tamanho de filamento (mm)	Número de filamentos em um feixe	Diâmetro do feixe (mm)
PE	260	1700	0,25	1	0,25
PP (monofilamento)	370	3400	0,25	1	0,25
PP (filme)	670	4300	2 x 0,02	1	2 x 0,02
PP (feixe)	500	6900	0,04	100	0,40
Kevlar	2300	44000	0,011	325	0,20
Vidro álcali-resistente	1276 - 2448	78600	0,0135	400	0,27
PVA	920	36000	0,025	200	0,93
Nylon	900	8400	0,03	240	0,40

(fonte: adaptado de PELED; BENTUR, 2000, p. 781 e PELED et al., 2006, p. 1662)

Figura 15 – Têxteis de carbono e vidro álcali-resistente ensaiados por HEGGER; VOSS; 2008



(fonte: adaptado de HEGGER; VOSS, 2008, p. 2051)

Tabela 2 – Características dos têxteis de reforços ensaiados por HEGGER; VOSS; 2008.

NOME	Material	Gramatura do feixe (tex)	Padrão de ponto	Tamanho de malha 0°/90° (mm)	Área transversal 0°/90° (mm ² /m)	f_{fil} (MPa)	E_{fil} (MPa)	$\epsilon_{máx}$ (‰)
Tecido 1	Vidro AR	2400	Corrente	8/8	105/105	1808	70000	25,8
Tecido 2	Carbono	1600	Corrente	8/8	105/105	3912	235555	16,5
Tecido 3	Vidro AR	1200	Tricô	8/8	52,5/52,5	2018	70000	28,8
Tecido 4	Vidro AR	1200	Corrente	8/8	52,5/52,5	2018	70000	28,8
Tecido 5 (impregnado com EP)	Vidro AR	2400	Corrente	8/8	105/105	1808	70000	25,8

(fonte: adaptado de HEGGER; VOSS, 2008, p. 2052)

4.2 MATRIZ

Os reforços têxteis demandam propriedades reológicas especiais e tamanhos de grãos máximos compatíveis às suas estruturas. Altas taxas de aglomerante são empregadas, bem como adições de finos, como cinza volante, sílica ativa e aditivos como superplastificantes e redutores de água. Devido ao alto teor de aglomerante, concretos de finas granulometrias apresentam baixo módulo de Young e deformações maiores que concretos comuns para mesma resistência à compressão. Em função de sua estrutura homogênea, um comportamento menos dúctil é observado quando comparado a concretos comuns (BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2003, p. 95).

Sistemas que possuem menor teor de clínquer por substituição de escória de alto forno e materiais pozolânicos foram desenvolvidos para contrapor os efeitos da alcalinidade do concreto sobre os feixes de vidro álcali-resistentes, os quais resultam em uma perda de resistência e de ductilidade do reforço. As composições de três matrizes de concreto utilizadas no concreto têxtil são apresentadas na tabela 3 (BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2003, p. 95).

Em concreto têxtil e inserção de fibras curtas na matriz, a necessidade de características de fluidez e de trabalhabilidade na matriz fresca são ainda maiores, devido ao intertravamento promovido pelas fibras curtas. Os componentes da matriz de concreto utilizada nos experimentos com concreto têxtil com a inserção de fibras curtas por HINZEN; BRAMESHUBER, 2014 encontram-se na tabela 4.

Investigações quanto a fluência e a fadiga do concreto de fina granulometria resultaram em comportamentos característicos similares aos do concreto convencional (HEGGER; VOSS, 2008, p. 2051).

XU et al., 2016, citam a importância de se desenvolverem novas matrizes baseadas de cimentos diferentes aos de cimento portland comum e enfatizam a concentração majoritária do uso deste tipo de cimento nos estudos de concreto têxtil. Entretanto, BLOM et al., 2011, testaram cimentos inorgânicos fosfatos (IPC) como aglomerante de matriz e estes não trouxeram bons resultados sob altas temperaturas.

Tabela 3 – Proporções de mistura por BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2003

MISTURA	cimento	adições		aglomerante	água	a/a	plastificante	areia fina ¹⁷	areia grossa ¹⁸	valor de pH	a/c
		cinza volante	sílica ativa								
PZ-0899-01 (CEM I 52.5)	490	175	35	700	280	0,4	1	599	714	13,5	0,57
HZ-1000-01 (CEM III/B 42.5 NW/HS/NA)	490	175	35	799	280	0,4	2	497	710	13,3	0,57
FA-1200-01 (CEM I 52.5)	210	455	35	700	280	0,4	0,85	468	668	13,3	1,33

(fonte: adaptado de BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2003, p. 103)

Tabela 4 – Proporções de mistura para concreto reforço com têxtil com inserção de fibras curtas por HINZEN, BRAMESHUBER, 2014

COMPONENTES	Unidade	Quantidade
Cimento CEM I 52,5 N	kg/m ³	700
Cinza volante	kg/m ³	150
Sílica ativa	kg/m ³	150
Água	kg/m ³	400
Pó de quartzo	kg/m ³	218
Areia	kg/m ³	384
Superplastificante	% em massa de teor de aglomerante	0,37/0,75
Teor de aglomerante	kg/m ³	1000

¹⁷ Do inglês: siliceous dust¹⁸ Do inglês: siliceous sand

COMPONENTES	Unidade	Quantidade
Relação água/aglom.	-	0,4
Resistência à compressão f_c (7d)	N/mm ²	53
Resistência à flexão $f_{ct,fl}$ (7d)	N/mm ²	8,2

(fonte: adaptado de HINZEN; BRAMESHUBER, 2014, p. 106)

Observou-se que cimentos aluminatos são compatíveis ao concreto têxtil. Estes cimentos passam por mudanças físicas e químicas diferentes que as passadas pelo cimento portland. Cimentos aluminatos exibem estabilidade de volume favorável e tensões de falha por desidratação térmica bastante pequenas. Devido à presença do silicato de cálcio, a alumina gerada sob calor pode reagir com agregados refratários e produzir um amplo número de minerais de alto ponto de fusão¹⁹ (SUN et al., 2003 apud XU et al., 2016, p. 507). MOSTAFA et al.²⁰ (2012 apud XU et al., 2016, p. 507) mostraram que a resistência a longo termo do cimento de alumina pode ser melhorado efetivamente adicionando-se sílica ativa e cinza de carvão²¹. BRAMESHUBER et al.,²² (1991 apud XU et al., 2016, p. 507) conduziram um estudo preliminar na possibilidade de cimento de alumina ser adotado como base material para componentes de CT. Como indicado em seus experimentos, uma compatibilidade química favorável entre a base mineral das fibras de vidro álcali-resistentes pôde ser alcançada. Adicionalmente, componentes de CT que endurecem rapidamente são favoráveis a aplicações industriais (XU et al., 2016, p. 507).

Para fins de comparação, dois sistemas de matrizes foram elaborados por XU et al., 2016: a matriz de cimento portland comum (OPC) e a matriz de cimento aluminato (CAC). As proporções das misturas encontram-se na tabela 5. O redutor de água empregado foi o de

¹⁹ H.M. Sun, L.J. Wang, M.L. Cao, **The test research on strength and durability of refractory concrete with high aluminum cement after a fire**, Ind. Constr. 33 (9) (2003) 60–62 (em chinês).

²⁰ N.Y. Mostafa, Z.I. Zaki, O.H.A. Elkader, Chemical activation of calcium aluminate cement composites cured at elevated temperature, Cem. Concr. Compos. 34 (2012) 1187–1193.

²¹ Do inglês: coal ashes.

²² W. Brameshuber, T. Broekmann, **Calcium aluminate cement as binder for textile reinforced concrete, in: Proceedings of the International Conference on Calcium Aluminate Cements (CAC)**, IOM Communications, London, 1991, pp. 659–666.

terceira geração (Sika). As composições químicas dos cimentos são listadas na tabela 6 (XU et al., 2016, p. 507).

Tabela 5 – Proporções de mistura para matrizes testadas por XU et al., 2016

ITEM	Cimento (kg/m ³)	Cinza de carvão (kg/m ³)	Sílica ativa (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Redutor de água (kg/m ³)	Areia fina (0-0,6 mm) (kg/m ³)	Areia grossa (0,6-1,2mm) (kg/m ³)
OPC	472	168	35	262	3,8	460	920
CAC	472	168	35	200	3,8	460	920

(fonte: adaptado de XU et al., 2016, p. 508)

Deve-se ter uma atenção especial ao moldar-se a matriz de concreto uma vez que feixes não revestidos ou não impregnados possuem alta capilaridade e influenciam consideravelmente na relação água/cimento durante o processo de hidratação. Logo, eles devem ser saturados de concreto antes da matriz ser moldada e dos ensaios serem realizados (KRÜGER et al., 2001, p. 35).

Os estudos conduzidos por REINHARDT et al., 2003, para avaliação da protensão em têxteis de carbono e de vidro álcali resistentes utilizaram a matriz de componentes listados na tabela 7. Suas resistências nas idades de 1, 7 e 28 dias são apresentadas na tabela 8 (REINHARDT et al., 2003, p. 233). A composição estabelecida por REINHARDT, 2003, é a que mais apresenta teor de cimento entre as matrizes apresentadas (30% de massa em comparação a aproximadamente 15% para as demais).

Tabela 6 – Composição química dos cimentos utilizados por XU et al., 2016

TIPO	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
Cimento Portland (P. II 52,5 R)	60-67%	4-9%	20-24%	2,5-6%
Cimento aluminato (CA-50)	29-40%	50-60%	<=8,0%	<=2,5%

(fonte: adaptado de XU et al., 2016, p. 508)

Tabela 7 – Proporções de mistura para concreto têxtil protendido por REINHARDT et al., 2003

COMPONENTE	kg/m ³
Cimento CEM I 42,5 R	480
Cinza volante	154
Sílica ativa (seca)	41
Areia (0-0,6 mm)	460
Areia (0,6-1,2 mm)	920
Superplastificante	17
Água	211

(fonte: adaptado de REINHARDT et al., 2003, p. 233)

Independentemente da finalidade com a qual a matriz foi concebida, em todos os estudos apresentados, nota-se a alta taxa de aglomerante e finos presente em suas composições. A mistura que apresenta menores taxas de cimento (FA-1200-01) possui maiores teores de cinza volante e portanto suas reações são mais lentas, não sendo conveniente para aplicações em elementos pré-fabricados. Uma compatibilidade entre composições da mistura da matriz e a finalidade do elemento estrutural deve ser avaliada.

Tabela 8 – Propriedades da mistura apresentada na tabela 7 nas idades de 1, 7 e 28 dias

COMPONENTE	1 dia	7 dias	28 dias
Resistência à compressão (MPa)	25	62	75
Resistência à flexão (MPa)	5	9	11,5
Retração (mm/m)	-	0,5	0,6

(fonte: adaptado de REINHARDT et al., 2003, p. 233)

As matrizes apresentadas possuem resistência à compressão na faixa de 75 MPa em 28 dias. Para fins de comparação para com concretos convencionais (CC) - com a presença de agregado graúdo - buscou-se traços de matrizes com a mesma faixa de resistência. As matrizes escolhidas foram desenvolvidas por MEHTA; AİTCIN, 1990. Observou-se que as matrizes para concreto convencional possuem massa específica na faixa de 2500 kg/m³ e que as desenvolvidas para o concreto têxtil são mais leves, possuindo entre 2100 a 2300 kg/m³ de concreto. Ambas as matrizes possuem aproximadamente 500 kg/m³ de cimento, exceto pela desenvolvida por HINZEN; BRAMASUBER, 2014 para CT com a inserção de fibras curtas. Percebe-se um maior teor de aglomerante (cimento + adições), água e agregados miúdos - este último naturalmente pela não presença de agregado graúdo na composição - em matrizes para CT que para concreto convencional. A tabela 9 resume as proporções mássicas das misturas de matrizes apresentadas no presente trabalho e as proporções mássicas das misturas de matrizes desenvolvidas por MEHTA; AİTCIN, 1990. Neste último trabalho, de acordo com as informações fornecidas pelos autores, admitiu-se 15 kg de superplastificante por m³ de concreto. Para o trabalho de HINZEN; BRAMASUBER, 2014 admitiu-se que o pó de quartzo é uma adição.

Tabela 9 – Teores de massa para misturas de matrizes para concreto têxtil e concreto convencional

Concreto	Mistura	Tipo de cimento	Massa específica total (kg/m ³)	Cimento (%)	Adições (%)	Aglomerante (%)	Água (%)	Aditivos (%)	Agregado miúdo (%)	Agregado graúdo (%)	A/a	A/c
Concreto têxtil	PZ-0899-01	CEM I 52.5	2300	21,3	9,1	30,4	12,2	0,3	57,1	0	0,4	0,57
	HZ-1000-01	CEM III/B 42.5 NW/HS/N	2203	22,2	9,5	36,3	12,7	0,7	54,8	0	0,4	0,57
	FA-1200-01	CEM I 52.5	2122	9,9	23,1	33,0	13,2	0,3	53,5	0	0,4	1,33
	HINZEN; BRAMASH UBER, 2014	CEM I 52.5	2189	32,0	32,0	64,0	18,3	0,2 - 0,3	17,5	0	0,29	0,57
	XU et al., 2016	OPC	2321	20,3	8,7	37,8	11,3	0,1	59,5	0	0,3	0,56

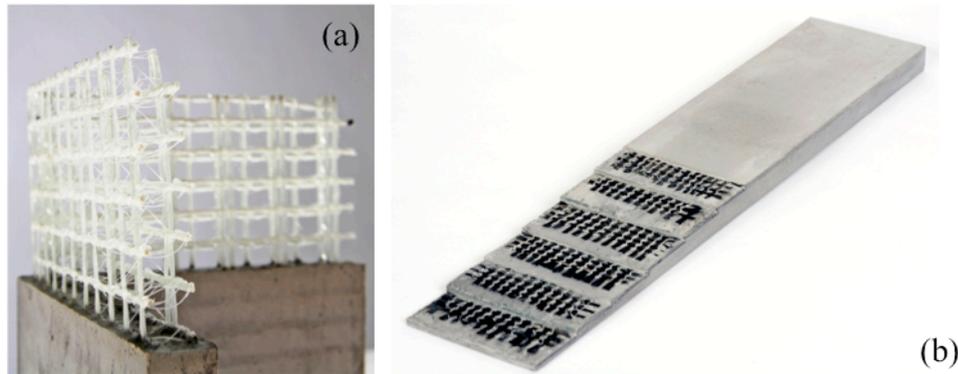
Concreto	Mistura	Tipo de cimento	Massa específica total (kg/m ³)	Cimento (%)	Adições (%)	Agglomerante (%)	Água (%)	Aditivos (%)	Agregado miúdo (%)	Agregado graúdo (%)	A/a	A/c
Concreto convencional (MEHTA; AITCIN, 1990)	XU et al., 2016	CAC	2259	20,9	9,0	38,9	8,9	0,1	61,1	0	0,23	0,42
	REINHA RDT et al., 2003	CEM I 42.5 R	2283	21,0	8,5	38,1	9,2	0,7	60,4	0	0,24	0,44
	B1	OPC	2455	23,0	0,0	23,0	5,5	0,6	27,3	44	0,23	0,24
	B2	OPC	2426	17,4	4,7	26,8	5,6	0,6	27,6	44	0,27	0,32
	B3	OPC	2419	17,5	4,4	26,3	5,6	0,6	27,7	44	0,26	0,32
Faixas de valores												
CT	Diversos	2100 - 2300	10 - 22	8 - 22	30 - 64	6 - 12	0,1 - 0,7	17 - 61	0	0,23 - 0,40	0,42 - 1,33	
CC	Diversos	~ 2430	17 - 23	0 - 5	23 - 27	~ 6	~ 0,6	~ 27	44	0,23 - 0,27	0,24 - 0,32	

(fonte: adaptado de BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2003; HINZEN; BRAMASHUBER, 2014; XU et al., 2016; REINHARDT et al., 2003; MEHTA; AITCIN, 1990)

4.3 CONCRETO TÊXTIL

O concreto têxtil, como visto anteriormente, é composto de têxteis bidimensionais e tridimensionais de diferentes materiais de fibras envolvidos em uma matriz de concreto de fina granulometria. Estes compósitos são obtidos por diferentes processos de fabricação. Sua capacidade de carga é até seis vezes maior que a do concreto armado convencional (KULAS; GMBH, 2015, p. 1) e apresenta comportamentos particulares sob diferentes condições, como no caso de inserção de fibras curtas dispersas, ao ser submetido a altas temperaturas e ao ser protendido. Estas características serão introduzidas nas seções que seguem. Configurações do concreto têxtil são apresentadas na figura 16.

Figura 16 – Estruturas de concreto têxtil: (a) cantoneira com duas camadas de têxtil
(b) elemento com várias camadas de têxtil



(fonte: BFT INTERNATIONAL, AMERICA PINK)

4.3.1 Processos de fabricação

Os resultados dos estudos conduzidos por PELED et al., 2006, mostraram que o processo de fabricação do concreto têxtil deve ser coordenado com a estrutura do tecido e do fio utilizados para otimizar a eficiência de aderência. Por exemplo, o processo de pultrusão não apresenta melhorias na eficiência da aderência para feixes impregnados, diferentemente do que acontece para fios não impregnados. Logo, para tecidos feitos de fios impregnados, como os de fibras de vidro álcali-resistentes, processos de pultrusão e de moldagem resultam em um comportamento similar de aderência, mostrados por ensaios de arrancamento. Processos a vácuo levam a uma matriz mais densa e rígida e portanto beneficia a zona de transição tecido-matriz melhorando a aderência com feixes impregnados ou não. A penetração de tal matriz rígida entre os filamentos do feixe do tecido, no entanto, é reduzida, diminuindo as vantagens gerais de tal sistema para reforço de tecidos (PELED et al., 2006, p. 1671).

O processo de pultrusão é um método de produção eficiente para compósitos de cimento-tecido que emprega uma configuração simples e baixo custo de equipamento. Durante a pultrusão, reforços contínuos são impregnados por uma matriz fresca e então puxados através de um conjunto de cilindros rotatórios que aplicam pressão, removem o excesso da matriz de cimento e formam um laminado de tecido compósito (PELED et al., 2006, p. 1661).

A moldagem é um processo de fabricação onde uma camada única de tecido "limpa" é colocada embebida no centro da pasta da matriz de cimento ao longo do elemento (PELED et al., 2006, p. 1663).

No processo de laminação camadas de concreto de fina granulometria e tecido têxtil são construídas em uma fôrma horizontal intercaladamente até que se alcance a geometria desejada do componente (SCHEERER et al., 2015, p. 26)

No processo a vácuo, após os ingredientes da pasta serem misturados em um misturador estacionário, a mistura fresca é transferida a uma câmara a vácuo e uma mistura adicional é conduzida sob vácuo durante 2 minutos. Uma camada "limpa" da camada de tecido é então colocada entre duas camadas da pasta produzidas a vácuo. Uma carga de tração de aproximadamente 1,7 N é aplicada para manter o tecido paralelo ao eixo longitudinal. A tensão é solta após 24h da preparação do corpo de prova (PELED et al., 2006, p. 1663).

4.3.2 Capacidade de carga

O concreto têxtil apresenta comportamento de diagrama tensão-deformação muito similar ao concreto armado convencional sob ensaios de tração ou flexão. Uma curva típica de tensão-deformação sob ensaio de tração uniaxial de um corpo de prova de concreto reforçado com fibras contínuas ou com têxtil de fibras vidro álcali resistentes ou de carbono, pode ser vista na figura 17 (JESSE et al., 2005, p. 2). Os principais trechos da curva serão descritos a seguir.

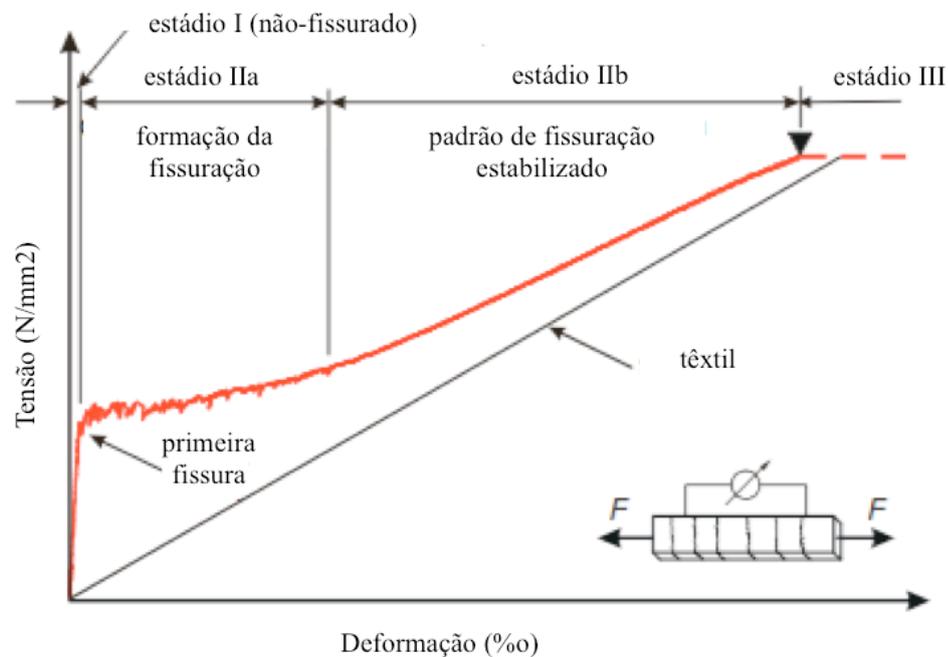
No início do carregamento a rigidez do compósito não-fissurado corresponde aproximadamente ao módulo de elasticidade da matriz (estádio I) (JESSE et al., 2005, p. 2).

Excedendo a resistência à tração do concreto, a primeira fissura aparece. Com o aumento da tração, fissuras adicionais ocorrem. O esforço é suportado pelo reforço e pela matriz de concreto entre fissuras. A distância entre fissuras e a espessura das mesmas são influenciadas pelo reforço e as suas características de aderência com a matriz. A curva tensão-deformação mostra um baixo aumento da tensão durante a múltipla fissuração (estádio IIa) (JESSE et al., 2005, p. 2; HEGGER et al., 2006, p. 135).

No estado de estabilização do padrão da fissuração não ocorrem fissuras adicionais. Com o aumento da carga, os filamentos são tensionados até atingirem a resistência dos filamentos

(estádio IIb). Na maioria dos testes, a rigidez do compósito é de 10 a 30% menor a rigidez do reforço. Esta redução pode ser explicada pela ruptura dos filamentos como previsto na teoria de OHNO; HANNANT²³, 1994. JESSE et al.²⁴, 2002, interpretam esta redução como o número de fibras intactas, representado pelo k_b da equação 1. A máxima resistência do compósito pode ser estimada pela equação 1. A curva tensão-deformação procede aproximadamente paralela à curva tensão-deformação do têxtil puro. A diferença entre as duas curvas - do concreto têxtil e do reforço têxtil - é a então chamado efeito de enrijecimento à tração²⁵ (JESSE et al., 2005, p. 2; HEGGER et al., 2006, p. 135, 138-129).

Figura 17 – Diagrama de tensão-deformação do concreto têxtil sob carregamento uniaxial de tração



(fonte: adaptado de JESSE et al., 2005, p. 2)

²³ Ohno, S., Hannant, D. J., **Modelling the Stress-Strain Response of Continuous Fiber Reinforced Cement Composites**. ACI Materials Journal, 1994, Vol. 91, No.3, pp. 306- 312.

²⁴ Jesse, F., Ortlepp, R., Curbach, M.. **Tensile Stress-Strain Behaviour of Textile Reinforced Concrete**. In: **Proceedings of the IABSE Symposium, "Towards a better built environment – innovation, sustainability, information technology"**. Melbourne, Setembro 2002 por IABSE, ETH Zurich, CH-8093 Zurich, Switzerland (www.iabse.ethz.ch) – CD-ROM.

²⁵ Do inglês: tension stiffening effect.

$$F_u = k_b \cdot A_f \cdot S_{fu} \leq 1,0 \quad (\text{equação 1})$$

Sendo:

F_u = máxima resistência do compósito;

k_b = fator que representa o número de fibras intactas no feixe e varia de 0,6 a 0,9;

A_f = área da seção transversal da fibra;

S_{fu} = tensão última da fibra.

Uma área de deformação dúctil não aparece nos ensaios à tração do CT, pois os materiais utilizados - vidro álcali-resistente, carbono - não possuem capacidade plástica. Consequentemente, o compósito falha quando alcançada a deformação última à tração do reforço de uma maneira frágil (estádio III) (HEGGER et al., 2006, p. 135).

Este comportamento pode ser verificado, por exemplo, nos trabalhos realizados por RAUPACH et al., 2006, HEGGER; VOSS; 2008 e KULAS; GMBH, 2015. Nestes trabalhos, utilizaram-se matrizes de fina granulometria com uma camada de têxtil de vidro AR ou de carbono. Nota-se através destes estudos que a rigidez do compósito depende amplamente do material da fibra e que a resistência última média do reforço aumenta com o decréscimo da gramatura do feixe. Também, verificou-se que componentes reforçados com têxteis impregnados possuem capacidade de carga à tração superiores aos não impregnados.

Outro aspecto é a influência dos estados de tensões biaxiais na capacidade de carga do reforço têxtil. Os poucos estudos que abordaram este tema mostram que há um aumento da capacidade de carga para o estado biaxial de tração/compressão²⁶ e uma diminuição para o estado biaxial de tração/tração²⁶ quando comparados ao estado uniaxial de tração na direção de urdidura do têxtil (HEGGER; VOSS, 2008, p. 2053; HEGGER; VOSS, 2004, p. 1470; BEYER et al., 2010, p. 297). Observa-se, no entanto, que em ensaios de tração biaxial onde as tensões não estão orientadas nas direções de urdidura e de trama do têxtil, o compósito possui uma capacidade de carga superior quando comparada à capacidade de carga do estado uniaxial de tração oblíquo à direção de urdidura do têxtil (BEYER et al., 2010, p. 297). O comportamento de tração biaxial (orientado nas direções de urdidura e de trama) é

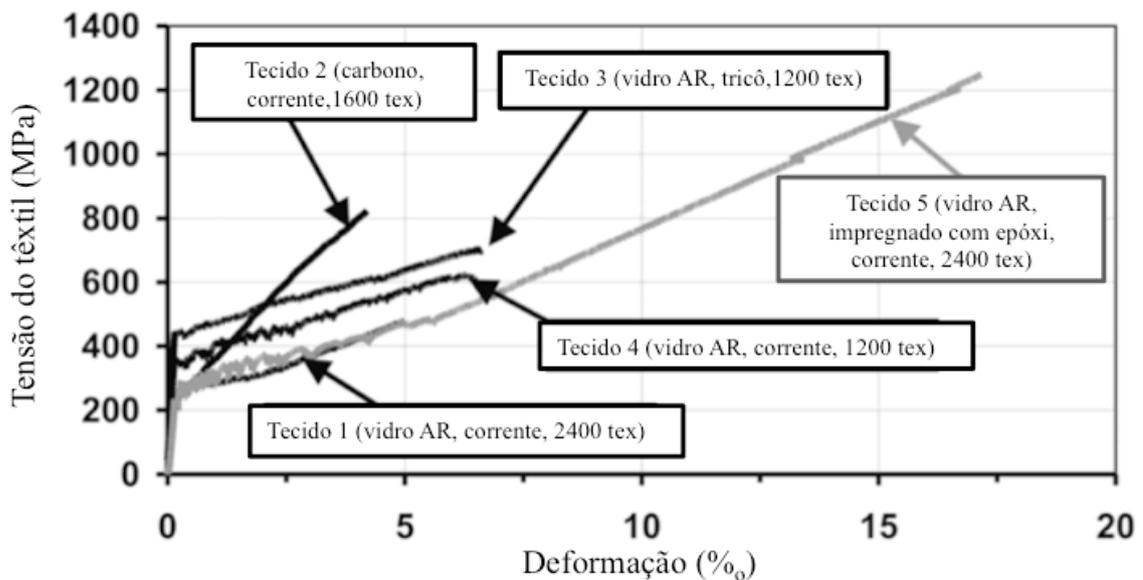
²⁶ Direção de urdidura/direção de trama do têxtil.

representado pelo coeficiente k_2 e é obtido de ensaios biaxiais de tração para cada tipo de material e padrão de têxtil.

Os reforços têxteis possuem uma relativa sensibilidade a carregamentos uniaxiais de tração em direções oblíquas aos feixes de urdidura. Os resultados dos testes com ângulos oblíquos entre o reforço e a carga mostram que há aproximadamente uma correlação linear entre a angularidade e o decréscimo da capacidade de carregamento do reforço, identificado como o coeficiente k_0, α (HEGGER; VOSS, 2008, p. 2053).

A figura 18 apresenta as curvas de tensão-deformação de corpos de prova reforçados com têxtil ensaiados por HEGGER; VOSS; 2008.

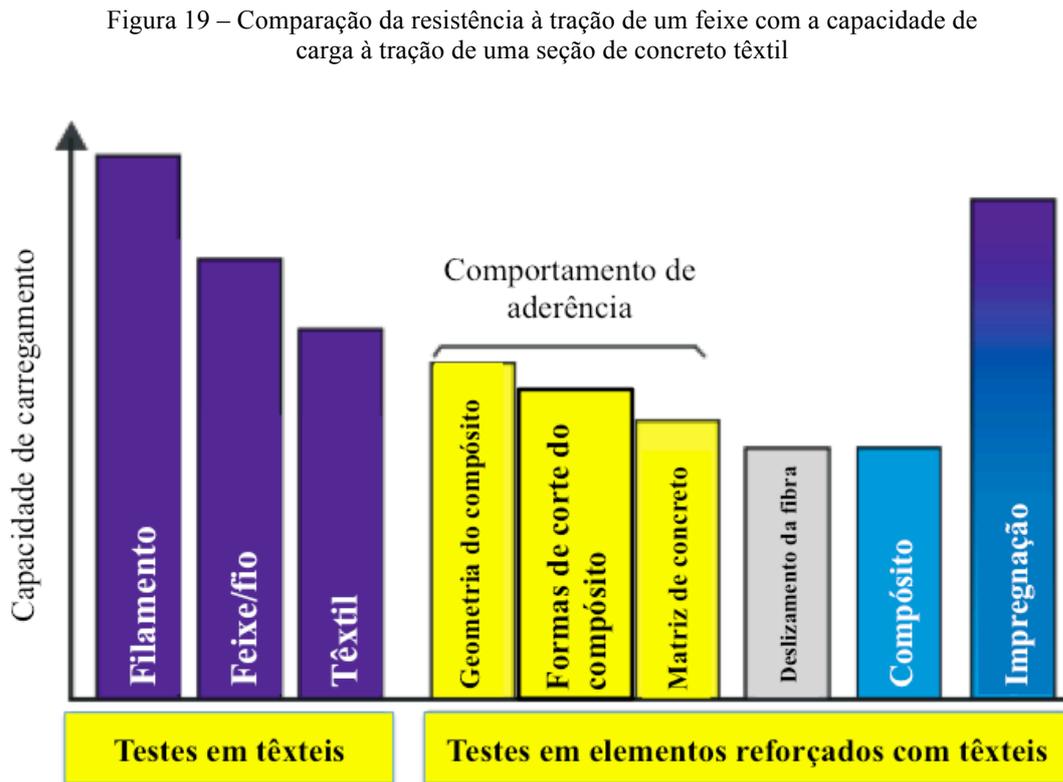
Figura 18 – Diagrama tensão-deformação à tração dos concretos reforçados com têxteis ensaiados por HEGGER; VOSS; 2008 (tabela 2)



(fonte: adaptado de HEGGER; VOSS, 2008, p. 2052)

Na maioria dos casos, a resistência do compósito é menor que 50% da resistência do filamento (figura 19). Isto é influenciado pela dispersão das propriedades dos filamentos (principalmente resistência dos filamentos e diâmetro deles (ou carga última do filamento)); pelo dano causado aos filamentos durante as diversas etapas de produção (produção do têxtil, do compósito); propriedades de aderência entre os filamentos (dependendo do tamanho, impregnação secundária, geometria do fio, pressão de confinamento/transversal; propriedades

de aderência entre o fio e a matriz (dependendo do tamanho, impregnação secundária, composição da matriz, geometria dos fios, idade do compósito, histórico de carregamento; ajuste do filamento (dependendo da qualidade do fio, produção do tecido, tecnologia do concreto); orientação da fibra (ângulo entre as fibras e o carregamento) (HEGGER et al., 2006, p. 137).



(fonte: HEGGER, 2001²⁷ apud HEGGER et al., 2006, p. 137)

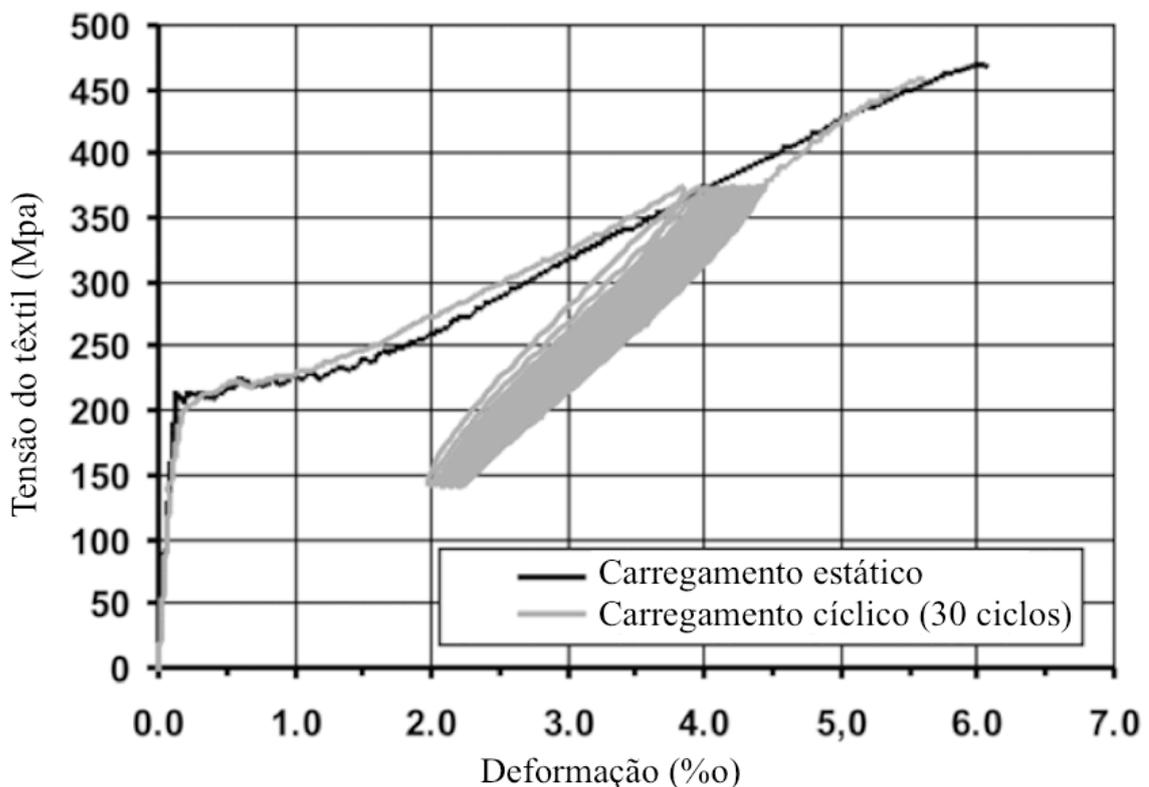
O comportamento de aderência dos feixes tem uma influência determinante na capacidade de carga do material compósito. Uma vez que eles não possuem um comportamento homogêneo na seção transversal, uma analogia direta ao comportamento de aderência do aço no concreto não é possível. Para isso é necessário considerar a interação das centenas de filamentos em um pacote com propriedades imprecisas não somente na seção mas também ao longo do pacote de fibras (HEGGER et al., 2006, p. 137).

²⁷ Hegger, J. (Hrsg.), **Textilbeton (Textile reinforced concrete.)**, Tagungsband zum 1. Fachkolloquium der Sonderforschungsbereiche 532 und 528, Aachen, 15. + 16. Feveireiro 2001.

4.3.3 Comportamento sob cargas cíclicas

Ensaaios à tração de corpos de prova submetidos a carregamentos cíclicos de 100 ciclos de carregamento e máximos carregamentos de até 70% da capacidade de carga última foram conduzidos por HEGGER; VOSS, 2008. Foi detectado que a deformação do elemento de construção cresce durante ciclos de carregamento uma vez do aumento das espessuras de fissuras (figura 20). Após a realização dos ciclos de carregamento, os corpos de prova a tração mostram o mesmo comportamento que em testes onde os corpos de prova foram carregados uniformemente até a falha, isto é, não foi observada uma influência na rigidez e nem na capacidade de carga. As causas possíveis para este aumento das deformações durante os ciclos de carregamento é a falha dos filamentos únicos assim como um deslocamento gradual dos filamento (HEGGER; VOSS, 2008, p. 2053).

Figura 20 – Curva tensão-deformação em ensaios com corpos de prova de concreto têxtil de vidro AR (Tecido 1 da tabela 2) sob carregamento cíclico e estático



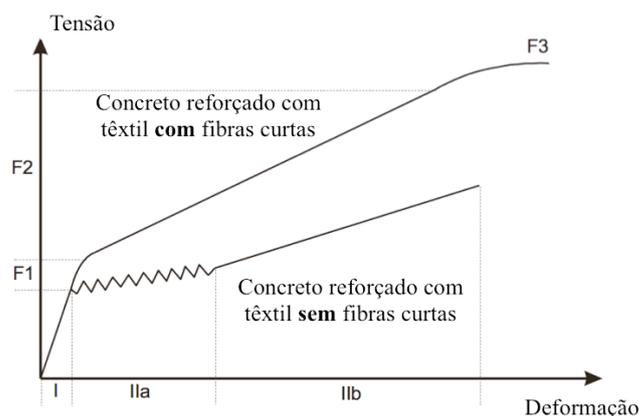
(fonte: adaptado de HEGGER; VOSS, 2008, p. 2053)

4.3.4 Influência de fibras curtas dispersas

NAAMAN, 2010b, já havia exaltado os benefícios de se trabalhar com concretos reforçados com fibras curtas, uma vez que, praticamente, todas as propriedades mecânicas, no estado de pós-fissuração, são melhoradas com reforço de fibras. Em um nível material, tenacidade, capacidade de absorção de energia e energia de fratura são melhoradas igualmente. Melhorias na ductilidade, resistência ao impacto e à explosão e resistência a vários esforços tais como flexão, cisalhamento, tração, carregamento biaxial são esperados. Percebe-se outros benefícios, tais como menor deslocamento sob carregamento cíclico, redução da fragmentação sob carregamento de impacto e melhor aderência de barras de reforço e barras protendidas, melhor durabilidade e menor permeabilidade e escape de gases (NAAMAN, 2010b, p. 15).

Os mecanismos exatos, os quais permitem um ajuste orientado ao comportamento da capacidade de carga não são ainda totalmente compreendidos. O potencial comportamento da capacidade de carga, por HINZEN; BRAMESHUBER, 2012, do concreto têxtil com fibras curtas foi definido esquematicamente e está representado na figura 21 (HINZEN; BRAMESHUBER, 2012, p. 1).

Figura 21 – Diagrama esquemático de comportamento tensão-deformação do concreto têxtil com fibras curtas



(fonte: HINZEN; BRAMESHUBER²⁸, 2007 apud HINZEN; BRAMESHUBER, 2012, p. 2)

²⁸ HINZEN, M.; BRAMESHUBER, W. **Improvement of Serviceability and Strength of Textile-Reinforced Concrete Elements with Short Fibre Mixes**. Farmington Hill: American Concrete Institute, ACI SP-251, 2008. -In: Design and Applications of Textile Reinforced Concrete, ACI Fall Convention 2007, Fajardo, Puerto Rico, 14-18.10.2007 (Aldea. C.-M. (Ed.)) 12 Seiten

A primeira fase F1 descreve a contribuição das fibras curtas a um aumento do carregamento de primeira fissura do concreto. A fase F2 é caracterizada pelo comportamento endurecimento com formação de fissuras iniciais. Durante esta fase de formação de fissuras, as fibras curtas ajudam a criar pontes entre as arestas das fissuras e melhoram o padrão de fissuração. Com aumento da taxa de reforço eficaz, a rigidez local e o nível de carregamento quando comparado ao concreto têxtil comum podem ser aumentados. A transição de F2 e F3 descreve a contribuição máxima das fibras curtas. Assim que a aderência adesiva das fibras se transforma em aderência de fricção ou as fibras curtas fissuram, a contribuição das fibras curtas é reduzida e a rigidez diminui. As fibras curtas são arrancadas e o gradiente da curva tensão-deformação se aproxima do comportamento de capacidade de carga original do têxtil. Quando fibras curtas de alta resistência com boa aderência são utilizadas, a ruptura dos têxteis ocorre antes da transição de F2 para F3. Neste caso, a adição de fibras curtas leva a um nível de carregamento maior em toda a área da curva tensão-deformação (HINZEN; BRAMESHUBER, 2012, p. 1).

A área F2 de acordo com a figura 21 descreve a fase de formação da fissura a qual inicia após a primeira falha da matriz. Durante a fase de formação da fissura, as fibras curtas na fissura aberta interagem com o têxtil. Espera-se então que esta interação influencie a rigidez local do material compósito no estágio II assim como o nível de carregamento e a formação da fissura. (HINZEN; BRAMESHUBER, 2012, p. 1).

Os componentes de concreto têxtil são comumente expostos - como em elementos de fachada - e portanto devem permanecer sem fissuras durante a vida de serviço (HINZEN; BRAMESHUBER, 2012, p. 3). Em geral, com a inserção de fibras curtas na matriz, o carregamento de primeira fissura é aumentado e padrões mais finos de fissuração são obtidos (HINZEN; BRAMESHUBER; 2014, p. 108).

4.3.5 Influência de altas temperaturas

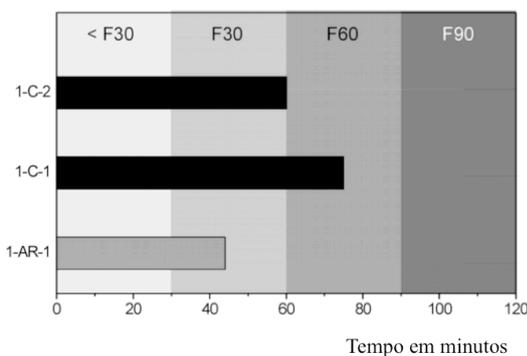
Uma vez que os componentes de concreto têxtil possuem camadas de cobertura de concreto relativamente finas, a proteção ao fogo destas estruturas é um assunto pertinente nos estudos do compósito. Estas finas camadas oferecem uma proteção fraca em altas temperaturas. Uma vez que o uso de elementos de concreto têxtil está sendo cada vez mais utilizado em painéis,

este assunto é uma questão fundamental para seu desenvolvimento. Infelizmente, poucos estudos tem sido direcionados ao comportamento mecânico do CT a altas temperaturas, inclusive pela dificuldade de realizar tais ensaios (XU et al., 2016, p. 507).

Os resultados obtidos por XU et al., 2016, confirmam que matrizes de cimentos aluminatos exibem uma resistência mais favorável que matrizes de cimento portland comum a temperaturas maiores que 800oC (XU et al., 2016, p. 508-509). Quando submetidos a altas temperaturas, elementos de concreto têxtil não impregnados possuem melhor desempenho que os impregnados (XU et al., 2016, p. 518).

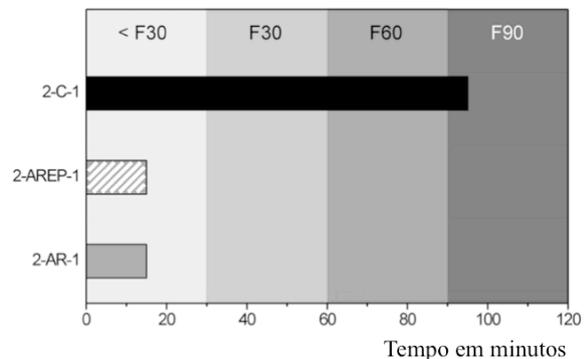
Um estudo realizado por BÜTTNER et al., 2014, avaliou o desempenho de têxteis de vidro álcali resistente e de carbono sob altas temperaturas. Observou-se que compósitos reforçados com têxteis de carbono suportam carregamentos durante mais tempo sob altas temperaturas que os reforçados com têxteis de vidro (figuras 22 e 23) (BÜTTNER et al., 2014, p. 370).

Figura 22 – Tempo em minutos até a falha de corpos de prova de carbono e de vidro AR em 1/3 do carregamento de ruptura



(fonte: adaptado de BÜTTNER et al., 2014, p. 368)

Figura 23 – Tempo em minutos até a falha de corpos de prova de carbono e de vidro AR em 1/2 do carregamento de ruptura



(fonte: adaptado de BÜTTNER et al., 2014, p. 370)

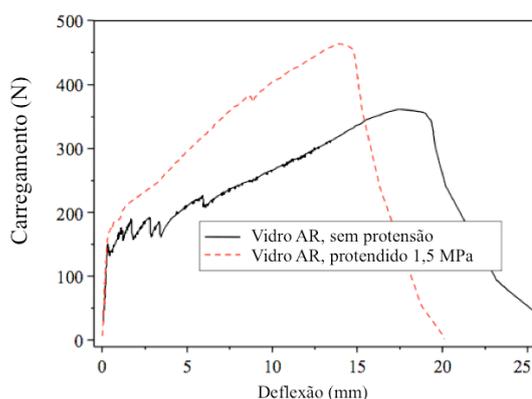
Apesar destes ensaios possuírem fins puramente experimentais e de análise, está claro que o reforço de carbono consegue suportar o mínimo de 60 minutos requerido pela norma alemã e que um aumento de sua carga não diminui o seu tempo de suporte (BÜTTNER et al., 2014, p. 371).

4.3.6 Influência da protensão

Com a finalidade de aproveitar a alta resistência dos materiais de reforço do concreto têxtil e de reduzir-se a fissuração do concreto, utiliza-se a protensão. Nas pesquisas conduzidas por REINHARDT et al., 2003, estudaram-se tecidos de carbono e de vidro álcali-resistente.

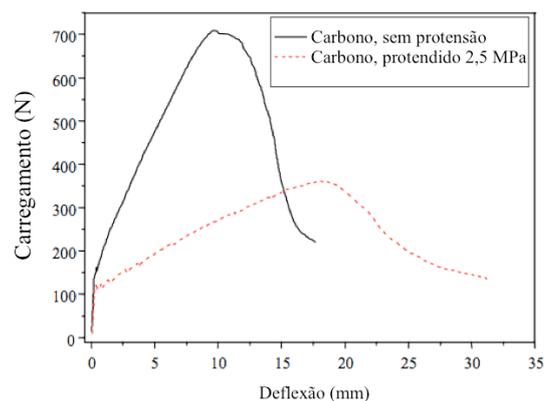
Observa-se que o elemento protendido com têxtil de vidro AR suporta cargas superiores quando protendido (figura 24). O oposto é observado para têxteis de carbono (figura 25), contrariando expectativas. O baixo desempenho da protensão sobre elementos reforçados com têxteis de carbono se deve à interação dos filamentos de núcleo do feixe que possuem menor fricção e portanto deslizam uns aos outros em situações de fissuração e ancoragem sob cargas diferenciais (REINHARDT et al., 2003, p. 234-236).

Figura 24 – Carregamento x Deflexão do CT reforçado com vidro álcali-resistente



(fonte: adaptado de REINHARDT et al., 2003, p. 234)

Figura 25 – Carregamento x Deflexão do CT reforçado com carbono



(fonte: adaptado de REINHARDT et al., 2003, p. 234)

Os ensaios também mostraram fissuras de menores espessuras ao protenderem-se placas reforçadas com reforços de vidro AR e de carbono, sendo adequado para avaliações no estado limite de serviço (REINHARDT et al., 2003, p. 235).

Os limites de proporcionalidade e de ruptura são consideravelmente aumentados quando utilizados têxteis de carbono impregnados protendidos. Foi constatado um melhor comportamento de aderência, igualmente. Isto se deve à melhor adesão interfilar do feixe e ao

fato de que a resina epóxi fornece uma melhor resistência de adesão e fricção na superfície do feixe (REINHARDT et al., 2003, p. 236).

Em elementos de concreto reforçados com têxtil auto tensionante TRSSC²⁹, obtidos de misturas com cimentos expansivos, observou-se um comportamento de aderência entre o têxtil e o concreto superior ao daquele com cimento portland comum, aqui chamado apenas de CT (WANG et al., 2016, p. 3). Igualmente, o carregamento de fissuração da placa de TRSSC é significativamente maior que a placa de CT. Isso se dá ao fato da maior produção de cristais Aft (produto de hidratação do cimento). A expansão dos cristais protendem as fibras, uma vez que elas são limitadas pelos cristais, assim melhorando a capacidade de carga dos corpos de prova. A taxa de distribuição do têxtil também influencia as propriedades de flexão, de carregamento de fissuração e de carregamento último da placa do TRSSC, estas propriedades aumentam com o aumento da taxa de distribuição do têxtil. A espessura da camada de cobertura do reforço da placa também influencia na sua capacidade de carga à flexão. Ensaios mostraram um aumento de deflexão de fissuração, carregamento de fissuração e carregamento último são maiores para espessuras de placas maiores (WANG et al., 2016, p. 7).

²⁹ Do inglês: textile reinforced self-stressing concrete.

5 DIMENSIONAMENTO, AVALIAÇÃO DE CUSTOS E APLICAÇÕES

Os modelos de dimensionamento estabelecidos conhecidos de concreto armado não podem ser simplesmente transferidos ao dimensionamento de membros de concreto têxtil. O comportamento de carregamento dos reforços têxteis diferem ao dos reforços de aço devido ao material em específico e das propriedades de aderência (HEGGER; VOSS, 2008, p. 2050). Além disso, o custo de uma malha típica (aço, têxtil ou outro reforço) é baseado em unidade de peso enquanto que a eficiência mecânica do compósito é baseada na fração de volume do compósito, assim, a comparação de custo deve ser baseada em desempenho do reforço (NAAMAN, 2010a, p. 9). Essas variáveis precisam ser consideradas na execução de projetos. Nas próximas seções, apresentar-se-á modelos de dimensionamento, a avaliação de custos desenvolvida por um autor e aplicações encontradas com o compósito.

5.1 DIMENSIONAMENTO

Assume-se geralmente que o material do têxtil e a matriz de cimento são quimicamente compatíveis, e que a aderência perfeita existe na interface entre o reforço e a matriz. NAAMAN, 2010a, sugere a seguinte regra simples de duas partes baseada na mecânica para projetar estruturas de concreto reforçadas com têxtil: "Aumentar ambos, a proporção da resistência à tração do reforço sobre a resistência à compressão da matriz e a proporção do módulo elástico do reforço sobre o módulo elástico da matriz." (NAAMAN, 2010a, p. 8).

Estabelecidos os materiais que compõem o elemento a ser dimensionado, a capacidade de carga à tração F_{ctu} de uma seção de concreto têxtil pode ser calculada pelas equações 2, 3 e 4. A tabela 10 mostra os coeficientes k_1 obtidos com os têxteis listados na tabela 2 (Seção 4.1.3.2) (HEGGER; VOSS, 2008, p. 2052-2053).

$$F_{ctu} = A_t \cdot f_t \cdot k_1 \cdot k_{0,alfa} \cdot k_2 \quad (\text{equação 2})$$

Sendo:

F_{ctu} = capacidade de carga à tração F_{ctu} ;

A_t = área da seção transversal do reforço têxtil;

f_t = resistência à tração do filamento;

k_1 = coeficiente de eficiência (equação 3);

$k_{0,alfa}$ = coeficiente de carregamento oblíquo (equação 4);

k_2 = coeficiente de carregamento biaxial.

$$k_1 = S_{max} / f_{fil} \quad (\text{equação 3})$$

Sendo:

k_1 = eficiência deduzida;

S_{max} = resistência à tração do reforço no compósito;

f_{fil} = resistência à tração do filamento.

Tabela 10 – Resistência à tração e eficiência de têxteis em ensaios à tração do componente

NOME	S_{max} (MPa)	k_1	Modo de ruptura
Tecido 1	460	0,25	Ruptura do filamento
Tecido 2	753	0,19	Ruptura de ancoragem
Tecido 3	813	0,40	Ruptura do filamento
Tecido 4	550	0,27	Ruptura do filamento
Tecido 5	1200	0,66	Ruptura de deslocamento ³⁰

(fonte: adaptado de HEGGER; VOSS, 2008, p. 2052)

$$k_{0,alfa} = 1 - \alpha/90^\circ \quad (\text{equação 4})$$

³⁰ Do inglês: splitting

Sendo:

$k_{0, \alpha}$ = coeficiente de carregamento oblíquo;

α = ângulo entre a direção do reforço e a direção de carregamento.

Equivalente à construção de concreto armado, a capacidade de carga à flexão calculada resulta da resistência à tração do reforço e o braço de alavanca interno. A deformação do filamento na falha é determinada como a deformação máxima do reforço têxtil. As influências do carregamento de carga e da taxa de reforço avaliadas nos testes são levadas em consideração pelo fator k_{fl} . As equações para dimensionamento à flexão são dadas pela equação 5 (HEGGER; VOSS, 2008, p. 2054).

$$M_u = k_{fl} \cdot F_{ctu} \cdot z \quad (\text{equação 5})$$

Sendo:

M_u = momento último;

k_{fl} = coeficiente de carregamento à flexão dependendo do material da fibra;

F_{ctu} = capacidade à tração (equação 3);

z = braço de alavanca interno.

O coeficiente de carregamento à flexão k_{fl} para alguns têxteis é dado pela tabela 11, onde p_l é o grau de reforço longitudinal em porcentagem. Uma explicação mais detalhada destes modelos e uma abordagem para dimensionamento em corte podem ser consultados em VOSS; HEGGER, 2006.

Tabela 11 – Coeficiente de carregamento à flexão k_{fl}

TIPO DE TECIDO	k_{fl}
Corrente - vidro AR	1,0
Tricô - vidro AR	$1,0 + 0,15 \cdot p_l$
Carbono	$1,0 + 0,4 \cdot p_l$

(fonte: adaptado de HEGGER; VOSS, 2008, p. 2054)

5.2 AVALIAÇÃO DE CUSTOS

NAAMAN, 2010a, relata uma extensa pesquisa para comparar os custos de compósitos de cimento finos - de 0,5 a 12,5 mm - de placas reforçadas com diversos tipos de malhas sob as mesmas condições de flexão de carregamento. Ele chamou de preço disponível de pagamento³¹ o preço máximo que alguém estaria disposto a pagar para utilizar tal malha. Os detalhes do estudo encontram-se em NAAMAN, 2005, "Thin Cement Composites: Performance Comparison between Steel and Textile Reinforcements", e refletem os preços para as malhas em 2004 dados em dólares. Para os resultados obtidos serem mais úteis com tempo e localização geográfica, a unidade de preço de 1 unidade é tomada como sendo o preço de um quilo de malha de arame de aço galvanizado do tipo utilizado em aplicações típicas de ferrocimento (NAAMAN, 2010a, p. 9).

A tabela 12 apresenta a competitividade dos materiais frente ao aço para o ano de 2004. Apesar dos resultados destas análises preliminares, os têxteis de polímeros reforçados com fibras podem oferecer vantagens apesar do seu alto custo inicial. Isto porque diferentemente das malhas de arame de aço, eles podem ser ajustadas a requerimentos exatos (isto é, denier³², diâmetro ou abertura de malha, etc.) por pouco custo extra, eles podem ser entregues em qualquer comprimento, eles são leves e eles podem ser facilmente ajustados às formas especificadas. É então provável que os desenvolvimentos e aplicações futuras farão dos têxteis cada vez mais competitivos quanto ao custo, especialmente quando uma análise do custo da mão de obra e do ciclo de vida são consideradas (NAAMAN, 2010a, p. 12).

Outro fator a ser considerado é que o custo da matriz em um compósito de cimento reforçado fino típico é muito pequeno (5%) comparado com o custo do reforço e da mão de obra, os quais nos países mais desenvolvidos são da mesma ordem. Consequentemente, a redução do custo é dependente principalmente do custo do material e do custo da mão-de-obra. O uso de têxteis 3D terá um impacto significativo na redução do custo da mão de obra (NAAMAN, 2010a, p. 19).

³¹ Do inglês: willingness-to-pay price.

³² Denier (den) é uma unidade de medida para massa linear de fibras, definida pela massa em gramas para 9000 metros.

Tabela 12 – Relações de preços em 2004 para preços disponíveis de pagamento (assumindo preço da malha de aço galvanizado convencional como 1 unidade por quilo)

MATERIAL	Unidade de preço, 2004, unidade/kg	Relação de preço disponível de pagamento	Observação
Malha de arame de aço galvanizado convencional	7	1	Referência base para comparação
Manto de aço de resistência muito alta (com micro fibras)	2,25	3 - 3,4	Competitivo
Vidro AR, 2500 tex, 500 g/m ²	2,25	2,25 - 4,5	Competitivo
Carbono, 1700tex, 320 g/m ²	7,8	6,75 - 11,5	Competitivo
Aramida, 1288tex, 260 g/m ²	17,25	13 - 14	Não competitivo
Vidro AR, 2500tex, 500 g/m ² , impregnado com epóxi	5	2,25 - 4,5	Quase competitivo
Carbono, 1700te, 333 g/m ² , impregnado com epóxi	11,6	6,75 - 11,5	Competitivo
Aramida, 1288tex, 260 g/m ² , impregnado com epóxi	22,5	13 - 14	Não competitivo

(fonte: adaptado de NAAMAN, 2010a, p. 12)

5.3 APLICAÇÕES

As vantagens do concreto têxtil dominam nos campos de aplicações onde elementos estruturais finos necessitam grande capacidade de carregamento (RAUPACH et al., 2006, p. 77).

Reforços de alto desempenho, como os oferecidos pelo concreto têxtil, são adequados quando a conservação dos produtos armazenados na construção é uma preocupação, os padrões de durabilidade são altos ou para elementos de construção onde há uma alta exposição a ataques agressivos, por exemplo, em áreas costeiras, estruturas marítimas, garagens de estacionamento, passarelas de pedestres, pontes de veículos, etc. No campo não estrutural, a construção de mobília é outro campo de aplicação para o concreto têxtil (KULAS; GMBH, 2015, p. 5).

Os campos de aplicação já explorados são: sistemas ventilados de fachadas em formatos pequenos, médios e grandes; paredes sanduíches; módulos, por exemplo: garagens, estações de transformadores; unidades de estocagem (tanques, silos e similares); pontes (novas construções e manutenção); superfícies de forma livres; estruturas de cascas de sustentação; lajes de sacadas/varandas; elementos de construção com exposição à cloretos; elementos de edifícios marítimos; reforços estruturais; remediações de concreto, aplicações de concreto por spray (KULAS; GMBH, 2015, p. 4).

Até 2030, 20% do concreto armado poderá ser substituído por concreto têxtil em novas construções. Os elementos de construção em concreto têxtil são leves e podem contribuir de maneira relevante a construções duráveis. Eles reduzem a consumação de energia e as emissões de carbono e poupam fontes naturais (WESERLAND).

Como exemplo de estruturas que consomem menos massa de cimento, tem-se a ponte da figura 26 onde pôde-se reduzir 75% da massa de concreto quando comparada a uma ponte de concreto armado tradicional (KLEICKE et al., 2010, p. 45). Aplicações para o compósito serão introduzidas nas seções que seguem.

Figura 26 – Ponte em concreto têxtil em Kempton, Alemanha (redução de massa de 75%; comprimento de 18m)

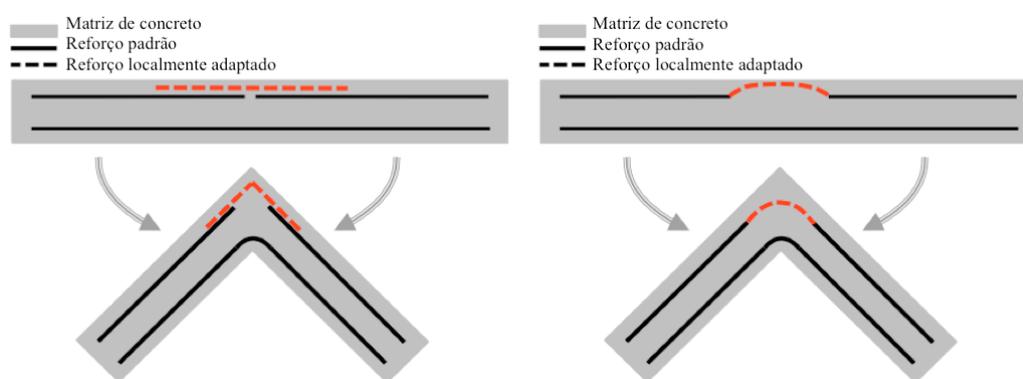


(fonte: KLEICKE et al., 2010, p. 46)

5.3.1 Placas dobradas

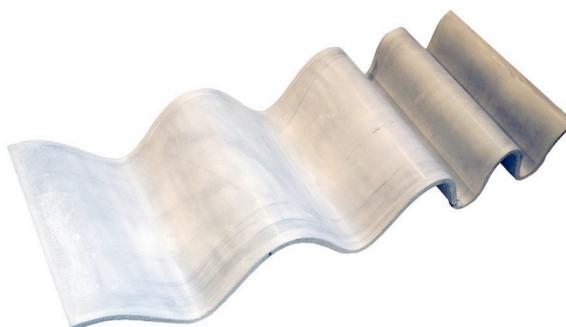
Dentro do projeto de pesquisa "ConcreteFold", elementos de concreto dobrados são executados. A grande dificuldade deste tipo de elemento é alocar as dobras das peças para que estas não se movam para a superfície de concreto. Duas soluções são propostas pelo consórcio do projeto para responder esta questão de pesquisa: sobreposição do reforço têxtil e desenvolvimento de têxteis localmente adaptados. A figura 27 mostra as soluções mencionadas em um croquis esquemático e a figura 28 mostra um exemplo de placa dobrada (KOCH et al., 2015, p. 421).

Figura 27 – Abordagens propostas para alocação de têxteis em placas dobradas



(fonte: adaptado de KOCH et al., 2015, p. 422)

Figura 28 – Placa dobrada desenvolvida pelo projeto ConcreteFold



(fonte: adaptado de DEPARTMENT FOR SCULPTURAL DESIGN; RWTH AACHEN UNIVERSITY)

5.3.2 Painéis de revestimento de fachadas

Uma das primeiras aplicações do concreto têxtil como fachadas ventiladas de edifícios foi feita na ocasião da ampliação da instalação de ensaios do Instituto de Concreto Estrutural da Universidade RWTH Aachen em 2002 (figura 29). Os elementos de concreto foram reforçados com tecido de vidro álcali-resistente (Tecido 1 da tabela 2) em duas camadas próximas à superfície. As dimensões e a resistência à tração do concreto foram ajustadas em uma maneira que as lajes permanecessem sem fissuração sob carregamento de serviço (HEGGER; VOSS, 2008, p. 2054).

Figura 29 – Fachada ventilada de pequeno formato em Albstadt, Alemanha



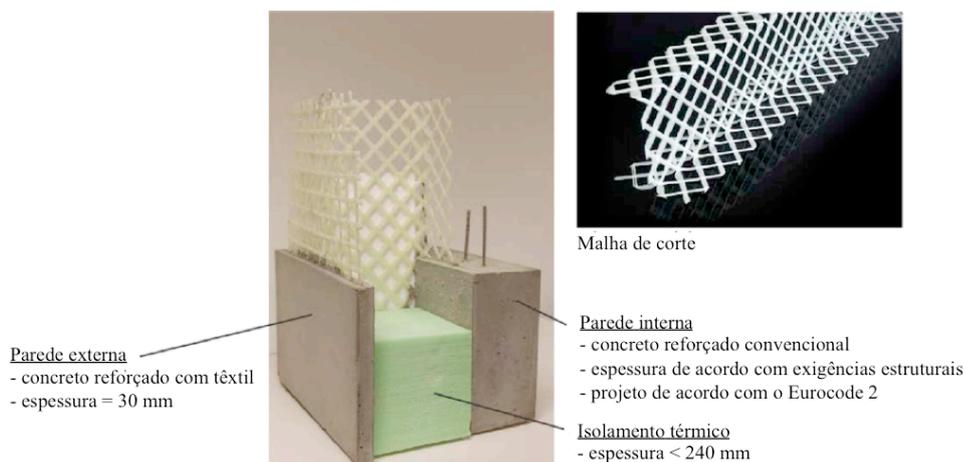
(fonte: adaptado de HEGGER; VOSS, 2008, p. 2054)

5.3.3 Elementos sanduíche

A vantagem dos elementos sanduíche é o alto grau de pré-fabricação, uma vez que os componentes anexos, como por exemplo a estrutura de sustentação e o isolamento térmico podem ser produzidas com antecedência. Reduções de peso podem ser alcançadas mais uma vez reforçando a fachada com malhas de vidro álcali-resistentes, assim a espessura de apenas 30 mm é requerida para a folha. A folha interna pode ser feita de concreto armado convencional, uma vez que minimizar a seção transversal não seria produtivo devido à flambagem da parede causada pelo alto carregamento dos pisos (figura 30). A folha externa, por outro lado, é exposta principalmente a cargas horizontais de vento o que significa que é apenas sujeita a tensões de flexão. Calcular a capacidade de carregamento de flexão da folha

externa é baseada em modelos familiares de construções de concreto armado, como descrito na Seção 5.1 (KULAS; GMBH, 2015, p. 7).

Figura 30 – Elemento de fachada sanduíche

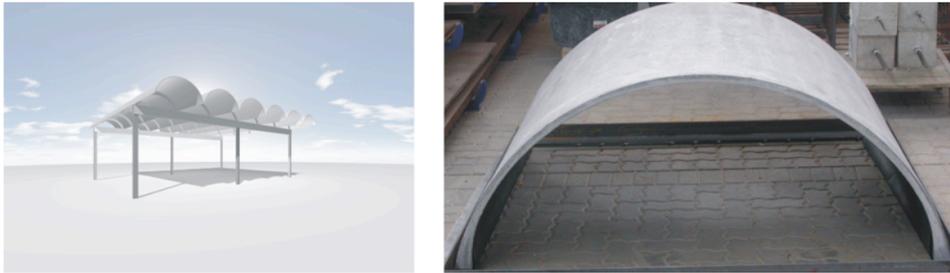


(fonte: KULAS; GMBH, 2015, p. 8)

5.3.4 CASCAS

Devido às suas propriedades, o concreto reforçado com têxteis é também adequado para produção de geometrias mais complexas, como construções de coberturas. Um melhoramento da capacidade de carga pode ser produzido especialmente para formação de dobras de componentes de construção bidimensionais. A fácil aplicação dos têxteis permite uma realização relativamente simples de superfícies curvas, como por exemplo, em elementos de casca (figura 31). O método mais simples de fabricação desta estrutura é por concreto projetado, onde camadas de concreto com espessura variando de 3 a 5 mm e reforço são aplicados alternadamente. Para um projeto específico de um protótipo de cobertura em casca na Universidade de Aachen, o vão possuía 7 m e 1,5 m de vão livre em ambos lados. A espessura do elemento de construção era de 2,5 cm com uma espessura de até 6 cm nas arestas mais tencionadas nas quais foram utilizadas até 10 camadas de tecido de vidro álcali-resistente (Tecido 3 da tabela 2) (HEGGER; VOSS, 2008, p. 2055).

Figura 31 – Projeto e protótipo de cobertura em casca feita de concreto têxtil



(fonte: HEGGER; VOSS, 2008, p. 2055)

5.3.5 PASSARELAS

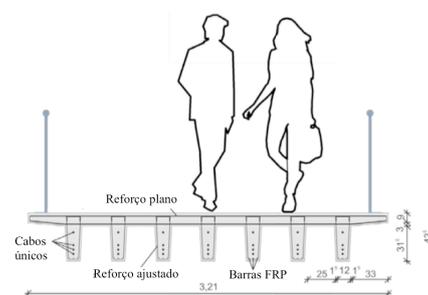
Uma passarela de pedestres em Albstadt com um comprimento de 97 metros é um exemplo de ponte construída em concreto têxtil (figura 32). A superestrutura da passarela de pedestres é feita com componentes pré-fabricados e consiste em seis elementos individuais com um máximo comprimento de 17,2 metros. O vão é de 15 metros. Através da combinação de reforço de vidro álcali-resistente e protensão, uma seção transversal de viga T com uma altura de 0,435 metros e possuindo uma esbelteza de 1:34 pode ser alcançada (figura 33). Em complemento às características à flexão, o reforço de vidro álcali-resistente contribui para a capacidade transversal de carregamento de carga na direção longitudinal da ponte. Na direção transversal da ponte, os carregamentos são dissipados exclusivamente através do reforço de vidro álcali-resistente (KULAS; GMBH, 2015, p. 9)

Figura 32 – Passarela de pedestres em Albstadt



(fonte: KULAS; GMBH, 2015, p. 9)

Figura 33 – Seção transversal da passarela em Albstadt



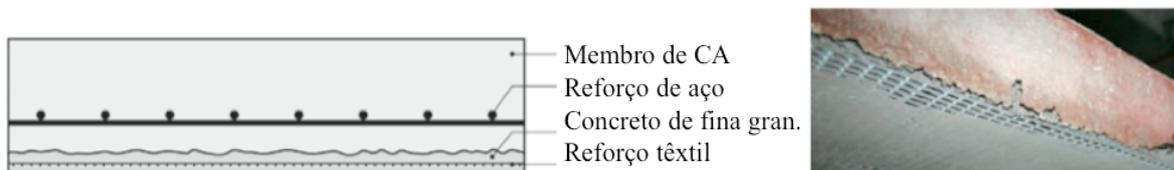
(fonte: adaptado de KULAS; GMBH, 2015, p. 9)

O grande benefício desta construção de passarela é que o peso da superestrutura é reduzido de aproximadamente a 40% quando comparado ao método de construção convencional com concreto reforçado com aço e protensão. Esta construção de ponte é mais permanente, uma vez que o reforço não corrói mesmo se à exposição ao sal de degelo for alta (KULAS; GMBH, 2015, p. 10)

5.3.6 REPARO E REFORÇO ESTRUTURAL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Uma ilustração esquemática da aplicação do reforço de concreto têxtil sobre uma estruturas de concreto armado convencional (CA) é representada na figura 33 (JESSE et al., 2008, p. 50).

Figura 34 – Reforço de CT esquemático: concreto armado convencional e concreto têxtil



(fonte: JESSE et al., p. 50)

O processo de reforço realizado por JESSE et al., 2008, ocorreu basicamente nestas etapas: A laje a ser testada recebeu um jato de areia, a superfície da laje foi molhada para evitar absorção da água da mistura de concreto e prover uma boa aderência entre o concreto antigo e novo. Uma primeira camada de concreto fino foi aplicada e em seguida, a camada de reforço têxtil. Subsequentemente, camadas de cobertura de concreto fino adicionais foram executadas. Após atingir-se as camadas necessárias, uma última camada de concreto era aplicada e curada com panos molhadas por um período de 7 dias. A matriz de concreto de reforço possuía uma dimensão máxima de agregado de 1 mm (JESSE et al., 2008, p. 53).

Os experimentos mostraram que as curvas tensão-deformação das lajes reforçadas são mais acentuadas, caracterizando uma maior rigidez, e apresentam as primeiras fissuras em carregamentos maiores quando comparadas a lajes não reforçadas. Este efeito não está

baseado apenas na aplicação do material adicional mas também está aliado ao fato de que os membros permanecem mais tempo no estágio não fissurado I (JESSE et al., 2008, p. 51, 56).

A ruptura do reforço têxtil na zona de tração da flexão foi a ruptura típica em todos os testes. Não foi observada nenhuma falha na aderência. Além disso, as superfícies que receberam o jato de areia nos substratos existentes e aplicação direta camada-a-camada levaram a um forte intertravamento entre o concreto existente e o reforço aplicado. Conseqüentemente, falhas de aderência podem ocorrer apenas em duas camadas: ou no substrato existente de concreto ou como delaminação dentro da camada de têxtil (JESSE et al., 2008, p. 57).

5.3.7 LAJES DE SACADAS E VARANDAS

Frequentemente varandas são colocadas em frente à edifícios residenciais já construídos, consistindo-se de uma estrutura de metal e placas de concreto armado. O peso de 20-25 centímetros de espessura de lajes de concreto armado é frequentemente decisivo para o projeto da estrutura de suporte de metal, para os custos de transporte e para a escolha de maquinário de peso adequado. Neste sentido, lajes de CT para varandas foram desenvolvidas, as quais possuíam uma espessura média de aproximadamente 7 cm (figura 35). Como resultado, material pode ser economizado e os custos de transporte e capacidade de carga necessários da grua são significativamente reduzidos (SCHEERER et al., 2015, p. 26).

Figura 35 – Laje de sacada na base de Metallbau Guke GmbH em Seerhausen, Saxônia



(fonte: adaptado de SCHEERER et al., 2015, p. 27)

5.3.8 AQUECIMENTO COM REFORÇO DE CARBONO

Fibras de carbono são eletricamente condutoras. Em um projeto do Programa Central de Inovação PME, um reforço-aquecimento foi desenvolvido, o qual assume funções de suporte e de aquecimento simultaneamente (figura 36). Esta técnica permitirá futuramente economizar em sistemas de aquecimentos separados das casas de CT no futuro. Após testes extensivos, um primeiro elemento com uma parede de aquecimento foi instalada no laboratório de edificações na HTWK Leipzig (SCHEERER et al., 2015, p. 27).

Figura 36 – Parede de concreto têxtil com sistema de aquecimento integrado



(fonte: adaptado de SCHEERER et al., 2015, p. 27)

6 PESQUISAS, DESENVOLVIMENTOS E PUBLICAÇÕES

6.1 PESQUISAS E DESENVOLVIMENTOS

Entre o final da década de 1990 e o final da década de 2000, o desenvolvimento dos reforços têxteis mostrou um progresso considerável. Os têxteis passaram por três gerações de desenvolvimentos. A primeira geração de reforços têxteis não era ajustada às matrizes minerais, a conexão entre as construções das estruturas têxteis e a capacidade de carga dos compósitos foi delineada. A partir disso, a segunda geração reflete um esforço harmonizado para obtenção de propriedades específicas dos têxteis. Este desenvolvimento levou à terceira geração dos têxteis, onde desenvolvem-se estruturas têxteis customizadas para cada caso particular de reforço (JESSE et al., 2008, p. 51). Inicialmente, os primeiros têxteis possuíam menor capacidade de carga dos que existem hoje, a espessura das camadas de reforço cresceram de 10 a 15% desde então, contrastando o ganho em capacidade de carga de até 75% (SCHEERER et al., 2015, p. 20):

O concreto têxtil é um tópico de pesquisa que vem crescendo nos últimos 20 anos na Alemanha, principalmente em Aachen e Dresden. Pesquisa de base foi feita durante dois projetos de pesquisa colaborativos fundados pelo DFG³³ de 1999 até 2011 na Universidade RWTH Aachen e TU Dresden. São eles: CRC 528 - Reforços têxteis para reforço e reparo estrutural e CRC 532 - Concreto têxtil - bases para o desenvolvimento de uma nova tecnologia. O primeiro foi liderado pela Universidade de TU Dresden e o segundo pela Universidade RWTH Aachen (KOCH et al., 2015, p. 419; SCHEERER et al., 2015, p. 21) .

6.1.1 CRC 528: Reforços têxteis para reforço e reparo estrutural

Os pesquisadores deste grupo de pesquisa tinham como objetivo fornecer uma base tecnicamente sólida para o uso de reforços têxteis em reforços e reparos na construção. Os

³³ Fundação de pesquisa alemã.

cientistas conduziram as pesquisas no que diz respeito aos materiais e suas descrições mecânicas, projeto e detalhes construtivos. Era de interesse maiores aplicações tecnológicas, trabalho de construção técnica e propriedades a longo termo do CT e conseqüentemente, segurança e durabilidade. O projeto se desenvolveu durante 12 anos e quatro fases distintas, a aplicação do CT se tornou mais proeminente a partir da terceira fase. Durante este projeto, 11 institutos, quatro faculdades e uma instituição não universitária se envolveram na pesquisa do CRC 528. Durante os 12 anos, 48 dissertações de doutorado e centenas de publicações foram escritas. O centro de pesquisa se dividiu em cinco grandes áreas: nível mesoscópico das estruturas têxteis e matrizes de concreto; nível macroscópico do concreto têxtil; aderência entre estruturas antigas de concreto e novas de concreto têxtil; reforço de componentes estruturais e segurança e durabilidade (SCHEERER et al., 2015, p. 22).

6.1.2 CRC 532: Concreto têxtil - bases para o desenvolvimento de uma nova tecnologia

O projeto de pesquisa CRC-SFB 532 "Concreto Reforçado com Têxteis - Desenvolvimento de uma nova tecnologia" estabelecido na Universidade de Aachen (RWTH Aachen) investigou os mecanismos básicos referentes à aderência, durabilidade e capacidade de carregamento do concreto têxtil. O objetivo do projeto era de prover diretrizes e padrões para dimensionamento de estruturas de concreto reforçadas com têxteis e produzir elementos de concreto pré-fabricados para aplicações adequadas (SCHEERER et al., 2015, p. 23).

O projeto se dividiu em seis áreas de concentração, cada qual se concentrando em um tópico em específico, são eles: filamentos; têxteis; concreto; compósito, membros estruturais e produção e sistema de informação técnica (SCHEERER et al., 2015, p. 23).

Cabe citar que no início de ambos CRCs, Aachen lidou essencialmente com reforços feitos de vidro álcali-resistentes. Mais tarde, os pesquisadores de Dresden focaram no material carbono. Isto se deve parcialmente à queda do preço das fibras de carbono durante a pesquisa e por outro lado, à melhor performance e durabilidade do carbono para as aplicações planejadas. Em Aachen, no entanto, a pesquisa com tecidos de vidro álcali-resistentes foi aprofundada (SCHEERER et al., 2015, p. 24).

6.1.3 Plataforma de troca para CRCs e classificação de excelência

Diversos projetos foram realizados em parceria com a indústria através do "Programa de Inovação Central de Pequenas e Médias Empresas"³⁴, abrindo o caminho para a prática da construção em CT.

Em 2007, estabeleceu-se o Centro Alemão de Concreto Têxtil DZT³⁵ em 2007. Este centro fazia parte do projeto modelo "Plataforma de Troca para CRCs e Classificações de Excelência", iniciado pela Associação Donor para Ciência Alemã³⁶.

Pela primeira vez a troca de nova tecnologia da ciência para indústria foi promovida paralelamente às pesquisas de base. Como parte do TU Dresden AG (TUDAG), o DZT é o centro competente e ponto focal para todas as companhias interessadas no CT. Experiência e networking de todos os autores ao longo dos desenvolvimentos são acrescentados. Esta troca de informações teve um impacto direto no êxito do lançamento do concreto têxtil no mercado. Com este propósito, TUDALIT e.V.³⁷ foi fundado em 2009. Esta associação registrada tem atualmente 28 membros da indústria e da ciência. Os objetivos da associação é networking e especialmente trabalho conjunto nos procedimentos de construções genéricas (abZ) no campo do concreto têxtil para estabelecer o nome TUDALIT (r) como uma marca de qualidade. Entre outros, o texton e.V. e grupos da Alliance fibre-based materials Baden-Württemberg e.V. e do Carbon Composites e.V. lidam com o tópico do CT hoje (SCHEERER et al., 2015, p. 25).

6.1.4 C3 - Carbono concreto compósito

Há hoje um projeto de grande escala C3 - Carbono Concreto Compósito fundado pelo Ministério Federal Alemão para Educação e Pesquisa em 2014. Ele faz parte do programa de financiamento "Twenty20 - Parcerias para Inovação", foi iniciado pela TU Dresden e será financiado até o ano de 2020 com aproximadamente 45 milhões de euros. O projeto está

³⁴ Do inglês: Central Innovation Programme SME: SME: Small and medium-sized enterprise e do alemão: Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand ZIM.

³⁵ Do inglês: German Centre Textile Reinforced Concrete e do alemão: Deutsches Zentrum Textilbeton DZT.

³⁶ Do inglês: Donors' Association German Science e do alemão: Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft.

³⁷ Do alemão: eingetragener Verein (associação registrada).

sendo realizado em consórcio com atualmente 130 parceiros da indústria e da ciência que se agruparam em uma única organização: o C3 e.V. A visão do projeto é encontrar um novo conceito de projeto de construção com concreto reforçado de carbono e colocá-lo no mercado (SCHEERER et al., 2015, p. 29).

6.1.5 ConcreteFold

Em outra linha de pesquisa, o projeto "ConcreteFold" que iniciou em junho de 2014 e chegará ao seu fim em 2016, pretende realizar têxteis adaptados localmente os quais combinam dois diferentes níveis de maleabilidade em um único tecido, o objetivo é gerar a possibilidade de produzir têxteis adaptados para elementos especiais. O maior desafio é classificar as combinações possíveis de padrões de pontos para determinar a influência destes pontos na maleabilidade dos têxteis avaliados em testes em balanço. Este projeto foi fundado pelo Ministério Federal de Economia e Energia (BMWE) em cooperação com a Universidade de RWTH Aachen (ITA, ibac, LfP), Florack Bauunternehmung GmbH, Alemanha, ingema t+h ingenieurgesellschaft mbH, Alemanha e W+S bau-instandsetzung GmbH, Alemanha (KOCH et al., 2014, p. 421).

6.1.6 Projetos fora da Alemanha

Fora da Alemanha, três grupos de pesquisa se destacaram no desenvolvimento do concreto têxtil (SCHEERER et al., 2015, p. 20):

Universidade de Surrey (UK), com o professor D.J Hannant e colegas: reconhecido e frequentemente citado nas referências quanto ao comportamento dos feixes de fibras na matriz mineral pelo efeito Ohno-Hannant. Eles são autores de diversos trabalhos sobre malhas feitas de fibras de polipropileno desde os anos 1980 (SCHEERER et al., 2015, p. 20).

Universidade de Ben Gurion do Negev e do Technion (Israel): Desde o início dos anos 90, a professora Alva Peled, professor Amon Bentur e colegas tem estudado a influência da estrutura dos tecidos nas propriedades mecânicas dos materiais compósitos feitos de têxteis na matriz de concreto. Até hoje, há uma estreita troca de pesquisas entre institutos de pesquisas

em Israel e na Alemanha. Profa. Peled é uma das principais cientistas no campo de reforços têxteis para o concreto (SCHEERER et al., 2015, p. 21).

O Japão iniciou cedo com pesquisa intensa na aplicação de materiais de fibra alternativos no concreto. ASAH I et al., 1987³⁸, descreve o uso de fibras com resina utilizadas como elemento de reforço em forma de malhas robustas. Estas malhas podem ser de materiais de fibra como vidro, carbono ou aramida (SCHEERER et al., 2015, p. 21).

Somando-se a estes projetos de pesquisa, ainda existem e existirão mais projetos que lidarão com o concreto têxtil e suas aplicações práticas para a indústria da construção. Também é certo que o número de projetos de construção com CT assim como seus usuários continuarão a crescer constantemente na maneira que mais profissionais estarão convencidos dos benefícios deste novo material e design (SCHEERER et al., 2015, p. 29).

6.2 PUBLICAÇÕES

Após a execução do primeiro barco construído de concreto têxtil, em 1996, várias dissertações de doutorado, como por exemplo, Jesse e Kleingries foram escritas. Maiores e também menores projetos foram iniciados nas Universidades de TU Dresden e RWTH Aachen. O conhecimento adquirido foi reunido no grupo de pesquisa comunitário de Concreto têxtil³⁹ da Associação de Concreto Alemã e sintetizado em 1998 no relatório de status do uso de têxteis no concreto⁴⁰. As contribuições não vinham apenas dos pesquisadores de Dresden e Aachen mas também de colegas da Universidade de Stuttgart, TU Darmstadt, Dywidag e de STFI Chemnitz. O relatório inclui uma síntese e resultados de pesquisa preliminares do compósito estrutural concreto têxtil (SCHEERER et al., 2015, p. 19).

Importantes publicações e eventos internacionais têm sido elaboradas sobre o concreto têxtil, entre eles o "Colóquio de Estruturas Reforçadas com Têxteis"⁴¹, CTRS, que acontece

³⁸ ASAH I GLASS MATEX et al., 'Patent no EP0227207 et al.', 1987-07-01.

³⁹ Do inglês: Community Research Group Textile Reinforced Concrete e do alemão: "Gemeinschaftsforschungskreis")

⁴⁰ Do inglês: Status report on the use of textiles in concrete e do alemão: Sachstandbericht zum Einsatz von Textilien im Massivbau".

⁴¹ Do inglês: Colloquium on textile reinforced structures, CTRS.

alternadamente em Aachen e Dresden com participações nacionais e internacionais desde 2001; "Conferência do Usuário⁴²": primeira conferência em CT que aconteceu diretamente após o CTRS. Este evento irá acontecer pela sétima vez em novembro de 2016; Relatório Rilem Estado da Arte⁴³ em 2006; Edição de Junho de 2004 da revista alemã Beton-und Stahlbetonbau que foi completamente dedicado ao tópico do CT; Uma edição especial da mesma revista para a primeira aprovação geral de construção; Novo relatório RILEM 232-TDT: "Métodos de teste e projeto do Concreto têxtil" está sendo criado atualmente liderado pelo Prof. Brameshuber (RWTH Aachen) (SCHEERER et al., 2015, p. 25). Estes eventos visam reunir as informações sobre o compósito e com a troca de experiências, avançar no seu desenvolvimento.

A autora deste trabalho teve acesso a portais eletrônicos gratuitos para a obtenção dos documentos de base para elaboração deste trabalho. Através deles, pode-se obter uma extensa gama de artigos, publicações, anais e conteúdo relacionados ao concreto têxtil. Os portais consultados foram: RILEM, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, GLASSFIBRE REINFORCED CONCRETE ASSOCIATION, Periódicos CAPES, SCIENCE DIRECT, RESEARCH GATE, Sabi-Lume UFRGS e Scholar GOOGLE. Para ter acesso a alguns destes portais, deve-se realizar cadastro com o e-mail da universidade ou estar conectado através de um computador da UFRGS (ou através do proxy).

Recentemente, um livro foi publicado sobre o concreto têxtil e outro está em desenvolvimento. O primeiro se intitula *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*, publicado em março de 2016 e editado por Thanasis Triantafillou. O segundo se chama *Textile Reinforced Concrete* e será lançado em outubro de 2016, seus autores são Alva Peled, Arnon Bentur e Barzin Mobasher. Além destes, BENTUR; MINDNESS, 2007 dedicam um capítulo exclusivo em sua obra à síntese de informações sobre reforços de fibras contínuos, incluindo têxteis.

⁴² Do inglês: user reference.

⁴³ Do inglês: RILEM State-of-the-Art Report

7 ANÁLISE DA SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS

Algumas questões a respeito do compósito e do seu desenvolvimento devem ser levantadas para preencher as lacunas que circundam o concreto têxtil. Observações, sugestões de avanços e aplicações serão introduzidos nas seções que seguem.

7.1 NOMENCLATURA

O primeiro problema encontrado quando da análise do material disponível, é a divergência quanto aos autores para se referirem ao concreto têxtil. Neste trabalho, chamou-se de concreto têxtil toda matriz de cimento, composta de materiais granulométricos finos, reforçada com uma ou mais camadas de têxteis não-metálicos. Entretanto, caso o leitor venha a se interessar sobre este material e queira procurar bibliografias internacionais a respeito do mesmo, alguns autores o abordam como:

- a) *Textile Reinforced Concrete, TRC* (SCHEERER et al., 2015; HINZEN; BRAMESHUBER, 2014; BÜTTNER et al., 2014);
- b) *Fiber Reinforced polymeric meshes (or textiles of fabrics) in ferrocement and thin cementitious composites* ou *Textile Reinforced Cement Composites* (NAAMAN, 2010a);
- c) *Cement composites with fabrics* ou *Fabric-cement systems* (PELED et al., 2006);
- d) *Textile fabrics for reinforcing cement composites* (PELED; BENTUR, 2000);
- e) *Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM)* (DONNINI et al., 2016).

Por ser um material relativamente novo, quando comparado ao concreto armado, por exemplo, não há concordância em um único termo. As pesquisas atuais, principalmente as baseadas na Alemanha, concentram-se no termo *Textile Reinforced Concrete*, aqui traduzido como concreto têxtil.

O material compósito concreto convencional, amplamente utilizado como material estrutural na construção civil é constituído por cimento, água, adições, agregados miúdos e graúdos. Na ausência de agregado graúdo, tem-se a argamassa, geralmente empregada como material de

preenchimento e de revestimento, comumente não possuindo capacidade estrutural, com resistências muito baixas para serem consideradas como tal. Nos diversos trabalhos publicados nos últimos 20 anos a respeito do concreto têxtil, verifica-se a ausência do agregado graúdo na sua matriz, tornando possível caracterizá-la como uma argamassa. Logo, seria este compósito chamado de concreto pela sua capacidade estrutural ou simplesmente com o intuito de possuir um apelo comercial, uma vez que o termo argamassa não traria em um primeiro momento uma ideia de alta capacidade mecânica e robustez. Em relação ao emprego do termo "têxtil" ao invés de utilizar-se os termos "tecido" ou "malha", ressalta-se que este termo é conhecido da indústria aeroespacial (NAAMAN, 2010a, p. 8) e vem associado à ideia de alto desempenho e de alto desenvolvimento.

Como é natural de pesquisas desenvolvidas em universidades e indústrias, almeja-se tornar o produto viável e rentável. O nome concreto têxtil pode não ter sido escolhido pelas universidades e indústrias que mais se especializam no assunto ao acaso, mas como uma estratégia de induzir ao futuro consumidor apenas pelo nome, o potencial do compósito - instigando-o a procurar maiores informações quanto a ele. Além disso, percebe-se que as instituições envolvidas no desenvolvimento no compósito almejam verdadeiramente transformar estruturas construídas com este material em uma alternativa rentável e viável para o concreto reforçado com aço convencional.

7.2 PESQUISAS MUNDIAIS

Os desenvolvimentos se concentram na Alemanha principalmente, e em segundo plano no Reino Unido, nos Estados Unidos, no Japão e em Israel. Percebe-se a expansão de pesquisas na França, Itália, Espanha, Suécia, China e pesquisas embrionárias com têxteis no Brasil (figura 37), como é o caso do estudo de têxteis com fibra de sisal desenvolvidas pela Universidade Federal do Rio de Janeiro pelos professores SILVA et al., 2014. Os reforços são colocadas na orientação das solicitações sem utilizar maquinário têxtil para produzi-los, talvez pela não disponibilidade da tecnologia para estes tipos de fibras.

Uma importante linha de pesquisa sobre concreto têxtil de alto desempenho foi formada no Brasil em 2014, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, a CONTEXT (figura 38). O projeto visa, entre outros objetivos, viabilizar através dos estudos e desenvolvimentos, a construção da primeira estrutura em concreto têxtil na América (CONSULTA DE LINHAS

DE PESQUISA UFRGS). Também no Rio Grande do Sul, um conjunto de pesquisadores apresentaram análises numéricas de estruturas de vigas de concreto armado reforçadas com este compósito (PALIGA et al., 2013).

Figura 37 – Desenvolvimento do concreto têxtil no mundo



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 38 – Marca CONTEXT UFRGS



(fonte: CONTEXT UFRGS)

No início dos anos 2000 até 2010, as pesquisas concentraram-se no estudo da aderência dos têxteis impregnados e não impregnados em Israel e na Alemanha. Enquanto que na Alemanha

os têxteis mais utilizados eram os de vidro álcali-resistentes, carbono e de aramida, as pesquisas conduzidas principalmente por PELED, Israel, concentraram-se nos têxteis de vidro álcali-resistentes, PP, PVA. Em ambos pontos focais, percebeu-se as grandes vantagens que as fibras de vidro álcali-resistentes trazem. As fibras de carbono apresentam maior resistência última, melhor resistência ao fogo quando não impregnadas, mas menor eficiência e são mais onerosas em relação às fibras de vidro. Nesta primeira fase até os anos 2010, procurou-se conhecer o material compósito e a apresentar suas propriedades de resistência e de durabilidade.

A partir dos anos 2010, mostra-se uma tendência em evidenciar a aplicabilidade do compósito, com a construção de novos elementos estruturais, bem como de reforços. Análises numéricas e modelos analíticos de capacidade de carga (não abordados neste trabalho) também foram desenvolvidos.

Também, percebe-se que as pesquisas conduzidas em Israel tratam de compósitos de cimento-tecido e não se referenciam diretamente ao concreto têxtil. A grande diferença destes dois compósitos é dada pela matriz, onde a matriz de cimento-tecido é composta apenas por cimento, adições, aditivo e água, sem a presença de nenhum agregado.

Apesar de todos estes esforços para conhecer a aplicar este novo compósito, não se encontraram muitos estudos que avaliem a sustentabilidade deste método construtivo. Embora ele reduza o consumo de cimento - uma vez que a massa de concreto pôde ser reduzida em até 80% - as matrizes são geralmente ricas em cimento, possuindo normalmente em torno de 500 kg/m³ de concreto e chegando, como em alguns registros, até a 700 kg de cimento por metro cúbico de concreto. Visto que a tendência do mercado atual é de empregar materiais eco-amigáveis, mais estudos avaliando a sustentabilidade deste material seriam bastante pertinentes. PORTAL, 2013 introduz este tema.

NAAMAN, 2010b, sugere estudos em elementos constituídos de matrizes reforçadas com fibras curtas combinados à protensão do reforço têxtil. O autor sugere que o uso de fibras curtas de alto desempenho pode substituir a protensão do reforço. O desenvolvimento de materiais com memória de auto-tensão pode ser estudado para sua utilização em aplicações sísmicas (NAAMAN, 2010b, p. 7).

Materiais "inteligentes" permitem a auto-tensão. Ligas de memória de forma^{44,45} (SMA) e algumas fibras poliméricas especiais tais como polímeros de cristais líquidos, possuem a propriedade de serem capazes de serem congelados temporariamente em um estado particular (em um estado alongado, por exemplo) e então, com tratamento adequado de aquecimento ou radiação, voltarem ao estado de equilíbrio prévio (portanto, encurtando elasticamente). O reforço poderia ser produzido, inserido no compósito e seu retorno ao estado original seria desencadeado (induzindo protensão) em qualquer momento apropriado (NAAMAN, 2010a, p. 16). Carecem estudos que explorem esta possibilidade de auto-tensão do compósito.

NAAMAN, 2010a, também sugere a exploração da fácil produção do têxtil 3D em produtos de larga escala, uma vez que aliados a concretos de espessura muito pequenas e preços razoáveis, podem se tornar competitivos quando comparados a estruturas de concretos armado convencionais. O autor sugere que em um futuro próximo, a escolha de um tipo de produto frente a outro será dado a critério de desempenho, acima de critérios de resistência e módulo de ruptura; esses critérios de desempenho incluiriam peso, facilidade de manuseio e custo de ciclo de vida (NAAMAN, 2010a, p. 14-16).

BÜTTNER et al., 2014, sugerem o estudo de concreto têxtil com têxteis mistos de vidro álcali-resistente e de carbono, com impregnação intumescentes protetiva ao fogo, mudança da composição da estrutura do concreto, tudo para que estas estruturas sejam mais resistentes a altas temperaturas.

Não foram encontrados estudos que abordam a sobreposição de têxteis ou de ancoragem em compósitos com têxteis dispostos lado a lado. Para viabilizar a construção de grandes estruturas sem a necessidade de grandes equipamentos de maquinários têxteis, estudos nesta direção devem ser dirigidos.

7.3 APLICABILIDADE NO BRASIL

No Brasil, são poucos os fabricantes que fabricam têxteis similares aos abordados neste trabalho. Por exemplo, as marcas Saint-Gobain Vertotrex e Tenax Fibers que produzem os

⁴⁴ CURBACH, M., *Proceeding of Second "Colloquium on Textile Reinforced Structures - CTRC2"* Dresden, Alemanha. 2003.

têxteis de vidro AR e de carbono ensaiados em laboratórios na Alemanha e nos Estados Unidos, não atendem o Brasil. A marca Porcher (PORCHER) possui malhas de vidro em rolos, mas estes não são álcali-resistentes, não sendo oportunos à inserção em matrizes cimentícias. A marca Texiglass (TEXIGLASS) possui produtos de carbono e de aramida para reforços estruturais, telas de vidro para restauração, telas de vidro álcali-resistente para reforços estruturais, telas de vidro para pisos elevados e telas de vidro álcali-resistentes para junções de alvenaria. Entretanto, não foi possível obter da empresa mais detalhes dos seus produtos e de suas propriedades.

A marca mais promissora até agora encontrada foi a Fibertex (FIBERTEX) que indica em seu portfólio resistência mecânica à tração de 1000 a 1100 MPa e módulo de elasticidade de 80 GPa em têxteis de fibras de vidro AR. As aplicações fornecidas pela empresa para estas telas pelo fornecedor, são: costados de mármore, ancoragem para mosaicos, reforço estrutural de placas cimentícias, reforço estrutural de gesso acartonado, fita tela para correção de trincas de parede, fita tela para emenda de placas de Drywall, reforço estrutural para pisos de concreto, laminado com resina, reforço estrutural para reboco e reforço estrutural para piso elevado. Além disso, são indicadas para substituir as telas de aço, por exemplo as utilizadas no controle de juntas e de fissuração do concreto.

Um campo promissor pode se abrir ao concreto têxtil no Brasil (figura 39). Ele pode ser utilizado, por exemplo, para construções de estruturas situadas em solos menos competentes - economia da massa de concreto; em obras de difícil acesso para maquinário pesado - reforços leves; em ambientes industriais - bom desempenho em pisos muito carregados e a cargas cíclicas; em ambientes agressivos - boa desempenho frente a cloretos; e em situações emergenciais - transporte leve e execução rápida. Além disso, resultados promissores quanto à resistência ao fogo foram apresentados com reforços de carbono, apesar de um estudo mais aprofundado ser necessário com reforços de fibras de vidro álcali-resistentes impregnadas.

Dada a novidade do CT, a indústria frequentemente exige o desenvolvimento de tecnologia adequada necessária para seu processamento adequado. JESSE et al., 2008, mantém a convicção que procedimentos igualmente simples e que são testados apresentando bons resultados (isto é, o testado e verdadeiro "tried and true") podem ser utilizados como referência base ao invés de seguirem-se impreterivelmente procedimentos elaborados de

⁴⁵ Do inglês: Shape memory alloys.

ensaios e execuções (JESSE, et al., 2008, p. 51). Através desta linha de raciocínio apresentada pelos autores, é possível dizer que, apesar de não serem encontradas no Brasil variedades abrangentes de marcas e produtos de têxteis como ocorrem em outros países, um primeiro passo consiste em testar e analisar os resultados oferecidos pelos têxteis já comercializados no país, como os da Fibertex.

Figura 39 – Pertinência da inserção do concreto têxtil no Brasil



(fonte: elaborado pela autora)

Após pesquisas e desenvolvimentos no campo dos reforços têxteis terem sido principalmente conduzidos em universidades na forma de pesquisas nos últimos anos, a indústria está se posicionando quanto à produção de reforços feitos de fibras de vidro álcali-resistentes e de carbono. Uma destas empresas é a solidian GmbH, uma subsidiária do Groz-Beckert, a qual está representada no mercado desde Janeiro de 2014 na Alemanha. Esta empresa presta serviço desde o dimensionamento do concreto têxtil, em seguida prestando consultoria na aplicação à escala industrial do reforço têxtil e estando presente igualmente em serviços de pós-venda. A empresa desenvolve, produz e distribui malhas inovadoras de filamentos de vidro álcali-resistentes e de carbono sob a marca soligrind (r) (KULAS; GMBH, 2015, p. 10). Do ponto de vista da autora, este seria o segundo passo de fundamental importância para a difusão do concreto têxtil no Brasil. Após terem-se os resultados dos compósitos fabricados no país e terem-se conclusões claras da aplicabilidade e desempenho adequado destes, é de fundamental importância que a empresa que forneça o material, preste consultoria e que atue

estritamente ao lado dos usuários, afim de receber um constante feedback e, conseqüentemente, aprimorar seus produtos.

Até 2015, utilizar-se elementos de construção feitos de concreto têxtil para componentes de capacidade de carregamento na Alemanha somente era possível apenas com procedimentos caso a caso. É por este motivo que a Solidian(r) está atualmente trabalhando em três procedimentos gerais para as quais as aplicações foram submetidas ao Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) (KULAS; GMBH, 2015, p. 10). Seguindo o exemplo da Alemanha, o terceiro passo para consolidar a aplicabilidade destas estruturas, normalizando os procedimentos de execução do compósito em órgãos competentes, como a ABNT.

No entanto, seria suficiente obter mais aprovações e patentes para o material e o método de construção, aumentar a capacidade de carregamento do reforço, melhorar a utilização do material e reduzir o preço de venda? Especialistas - projetistas, empreiteiros, engenheiros e instituições de pesquisa - concordam que isto não seria suficiente. O projeto e o método de construção deve ser reconsiderado e um novo projeto de construção deve ser introduzido. Acima de tudo: futuras construções devem ter consciência ambiental, suficientes de energia, duráveis, estéticas e flexíveis. Ainda há aspectos em aberto como a necessidade de padronização mundial de ensaios e da construção assim como de demolição, de reciclagem, de saúde e de segurança do trabalho, assim como intervalos em aberto sobre o conhecimento do compósito devem ser concluídos (SCHEERER et al., 2015, p. 29).

A maioria dos ensaios realizados nos outros países foram realizados com misturas de cimento portland comum puro com adições de outros aglomerantes (cinza volante, sílica ativa, entre outros). Entretanto, no Brasil, não são comercializados especificamente os mesmos tipos de cimentos e existem uma infinidade de aditivos e adições disponíveis a serem testados. Logo, misturas especiais adaptadas à realidade de mercado brasileira devem ser testados. A autora também salienta a importância de se desenvolver misturas com cimentos mais ecológicos, como o Cimento Sulfoaluminato de Cálcio Belítico (CSAB) e o Cimento Sulfoaluminato de Cálcio (CSA) que requerem menos energia de queima na sua fabricação. Além disso, visto que não são todos os estados brasileiros que dispõem dos têxteis, uma avaliação do ciclo de vida do compósito e sua viabilidade poderia ser iniciado, por exemplo.

Devido ao bom desempenho em ambientes agressivos, estruturas mistas de barras de polímeros com têxteis poderiam estudadas como alternativas de reforço para pilares e estacas

de fundação, por exemplo. O concreto têxtil possui um enorme potencial em estruturas arquitetônicas das mais variadas formas, devido à alta capacidade de carga em elementos esbeltos e maleáveis. Projetos que eram até então limitados pelos métodos construtivos devem ser iniciados e explorados pelos arquitetos e engenheiros brasileiros.

Uma boa forma de alavancar as pesquisas no Brasil, seria de adotar o modelo de base de dados interdisciplinar entre instituições como o utilizado em Aachen. A troca constante de informações e da situação em tempo real do progresso dos desenvolvimentos ajudaria a manter uma sinergia entre os projetos. Igualmente, projetos e execuções básicos de desenvolvimento de estruturas simples, como lajes, coberturas, painéis devem ser realizados de imediato com os materiais disponíveis no Brasil, só assim seria possível inserir e avaliar o real desempenho do compósito ao longo do tempo no país. Um esquema demonstrativo sugerido pela autora dos desafios que o Brasil tem a enfrentar está representado na figura 40.

Figura 37 – Desafios a serem enfrentados pelo Brasil na inserção do concreto têxtil como material de construção

Curto Prazo	Médio Prazo	Longo Prazo
Ensaio com materiais brasileiros	Parcerias indústria-universidade	Execução de elementos estruturais e de construções adaptadas e sustentáveis
	Padronização de ensaios	Execução de elementos demonstrativos
	Base de dados interdisciplinar entre instituições	Adaptação e padronização de métodos construtivos
		Padronização de normas construtivas

(fonte: elaborado pela autora)

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O concreto têxtil surgiu da necessidade de se obterem materiais alternativos de reforço que não sofram com a alcalinidade do concreto e com a possibilidade de criar compósitos mais resistentes e de menor espessura. Este compósito tem sido estudado extensivamente nos últimos 20 anos e muito se aprendeu sobre ele.

A compatibilidade dos têxteis que compõem o material se aperfeiçoaram ao longo do tempo, desde a sua aplicação crua até desenvolvimentos de revestimentos para melhorar a sua aderência à matriz. A geometria deles também foi amplamente estudada, originalmente inspirada em pontos de costura comuns, atualmente evoluíram a estudos onde tecidos localmente adaptados para finalidades específicas são confeccionados.

As matrizes que compõem o concreto são de fina granulometria e devem ser compatíveis às aberturas dos têxteis. Novas matrizes foram estudadas com a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas do concreto têxtil e novas matrizes ainda devem ser desenvolvidas.

O concreto têxtil mostrou-se capaz de suportar elevadas cargas à tração - ultrapassando facilmente 1000 MPa -, cargas cíclicas e altas temperaturas dependendo do têxtil que o compõe. Além disso, produz estruturas leves, reduzindo o consumo de cimento, termodinamicamente eficientes - visto que podem ser produzidas estruturas sanduíches e se adaptam às mais diversas formas e aplicações.

Entretanto, no Brasil, seu conhecimento e sua utilização são embrionários, necessitam de estudos e de aprimoramentos de acordo com a realidade brasileira. Pode-se dizer que este material, assim como ocorreu com o concreto armado convencional, ganhará importância e notoriedade a partir que novos desenvolvimentos e aperfeiçoamentos - no sentido de produção e de projeto adaptado ao compósito - forem acontecendo com a participação concomitante de instituições de pesquisa, da indústria, de órgãos de normalização e do usuário final.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI**. Disponível em: <<https://www.concrete.org>>. Acesso em: 10 mar. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA. **Abnt nbr 6118: projeto de estruturas de concreto - procedimento**. 2003
- BENTUR, A.; MINDNESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. 2. ed. [s.l.] Taylor & Francis, 2007.
- BEYER, F.; ZASTRAU, B. W.; JESSE, D.; JESSE, F. **On the Load Bearing Behavior of Textile Reinforced Concrete Under Biaxial Loading**. v. I, p. 295–305, 2010.
- BFT INTERNATIONAL. **Textile-reinforced concrete roof shells with a component thickness of just 2 cm**. Disponível em: <http://www.bft-international.com/en/artikel/bft_Textile-reinforced_concrete_roof_shells_with_a_component_thickness_of_just_1856524.html>. Acesso em: 20 maio. 2016.
- BLOM, J.; ACKEREN, J. Van; WASTIELS, J. **Study of the bending behaviour of textile reinforced cementitious composites when exposed to high temperatures**. n. December, p. 233–241, 2011.
- BRAMESHUBER, W.; BROCKMANN, T. **Textile Reinforced Concrete (TRC) - Durability Aspects of Fine Grained Binder Systems**. 2003.
- BÜTTNER, T.; ORLOWSKY, J.; RAUPACH, M. **Fire resistance tests of textile reinforced concrete under static loading – results and future developments**. p. 363–372, 2014.
- CAPES. **Periódicos Capes**. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: 10 nov. 2015.
- COHEN, Z.; PELED, A.; PASDER, Y.; ROYE, A.; GRIES, T. **Effects of warp knitted fabrics made from multifilament in cement-based composites**. First International RILEM Symposium on Textile Reinforced Concrete, n. c, p. 23–32, 2006.
- CONTEXT UFRGS. **Context - Textile Concrete**. Disponível em: <<https://www.facebook.com/textileufrgs>>. Acesso em: 30 maio. 2016.
- DEPARTMENT FOR SCULPTURAL DESIGN; RWTH AACHEN UNIVERSITY. **Concrete Fold**. Disponível em: <<http://www.lfp.rwth-aachen.de/cms/LFP/Forschung/Projekte-laufend/~jmgf/Concrete-Fold/lidx/1/>>. Acesso em: 10 maio. 2016.
- DONNINI, J.; CORINALDESI, V.; NANNI, A. **Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments**. Composites Part B, v. 88, p. 220–228, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.012>>.

FIBERTEX. **Fibertex**. Disponível em: <<http://www.fibertex.com.br/produtos/construcao-civil>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

GLASSFIBRE REINFORCED CONCRETE ASSOCIATION. **GRCA**. Disponível em: <<http://www.grca.org.uk>>. Acesso em: 1 abr. 2016.

GOOGLE. **Google Acadêmico**. Disponível em: <<https://scholar.google.com.br>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

GRIES, T.; ROYE, A.; OFFERMANN, P.; ENGLER, T.; PELED, A. **3 Textiles**. State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC: Textile Reinforced Concrete, p. 11–27, 2006.

HEGGER, J.; VOSS, S. **Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete**. v. 30, p. 2050–2056, 2008.

HEGGER, J.; WILL, N.; BENTUR, A.; CURBACH, M.; JESSE, F.; MOBASHER, B.; PELED, A.; WASTIELS, J. **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.; ZELL, M.; HORSTMANN, M. **Textile Reinforced Concrete–Realization in applications**. SYMPOSIUM OF TAILOR MADE CONCRETE STRUCTURES, p. 357–362, 2008. Disponível em: <<http://www.abece.com.br/web/restrito/restrito/Pdf/CH051.pdf>>.

HINZEN, M.; BRAMESHUBER, W. **Load-bearing behaviour of textile reinforced concrete with short fibres**. 2012.

HINZEN, M.; BRAMESHUBER, W. **Influence of short fibres on strength , ductility and crack development of textile reinforced concrete**. p. 105–112, 2014.

HIRAI, T. **Use of continuous fibers for reinforcing concrete**. CONCRETE INTERNATIONAL, v. 12, p. 58–60, 1992.

JESSE, F.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M. **Tensile Stress-Strain Behaviour of Textile Reinforced Concrete**. v. 15, 2005.

JESSE, F.; WEILAND, S.; CURBACH, M. **Flexural Strengthening of RC Structures with Textile-Reinforced Concrete**. 2008.

KLEICKE, R.; HAUSDING, J.; MATERIALS, H. P.; LORENZ, E.; ORTLEPP, R. **Research regarding the use of stitch-bonded and leno woven non crimp fabrics reinforcements in textile reinforced concrete**. TECHNOLOGY OF STITCH BONDING. v. I, p. 45–55, 2010.

KOCH, A.; KERSCHL, C.; GRIES, T.; BRAMESHUBER, W. **Locally adapted biaxial warp knitted textiles as reinforcement of folded concrete elements**. (W. Brameshuber, Ed.) In: FERRO-11 – 11th International Symposium on Ferrocement and 3rd ICTRC - International Conference on Textile Reinforced Concrete, RILEM Publications SARL, 2015.

- KÖCKRITZ, U.; HAUSDING, J.; ENGLER, Th.; CHERIF, Ch. **Innovative technology for the manufacture of textile reinforcements for concrete.** In: 1st International Conference Textile Reinforced Concrete (ICTRC) INNOVATIVE, 2006.
- KRÜGER, M.; REINHARDT, H.-W.; FICHTLSCHERER, M. **Bond behaviour of textile reinforcement in reinforced and prestressed concrete.** OTTO-GRAF-JOURNAL, v. 12, p. 33–50, 2001.
- KULAS, C.; GMBH, S. **Actual applications and potential of textile-reinforced concrete.** In: GRCA CONGRESS, 2015.
- MEHTA, P.; AİTCIN, P. C. **Principles Underlying Production of High-Performance Concrete.** Cement, Concrete and Aggregates, v. 12, n. 2, p. 70, 1990.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials.** 3. ed. [s.l.] McGraw-Hill, 2006.
- NAAMAN, A. E. **Textile reinforced cement composites : competitive status and research directions.** v. I, p. 3–22, 2010a.
- NAAMAN, A. E. **Four Decades of Progress : Personal Perspective.** p. 1–24, 2010b.
- PALIGA, C. M.; REAL, M. V; CAMPOS FILHO, A. **Numerical analysis of reinforced concrete beams strengthened with high strength cement-based composite material (Análise numérica de vigas de concreto armado reforçadas por compósitos formados por fibras de alta resistência e argamassa de cimento).** v. 6, n. 2, p. 211–218, 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/riem/v6n2/04.pdf>>.
- PELED, A.; BENTUR, A. **Geometrical characteristics and efficiency of textile fabrics for reinforcing cement composites.** v. 30, p. 0–9, 2000.
- PELED, A.; BENTUR, A. **Fabric structure and its reinforcing efficiency in textile reinforced cement composites.** v. 34, p. 107–118, 2003.
- PELED, A.; COHEN, Z.; PASDER, Y.; ROYE, A.; GRIES, T. **Influences of textile characteristics on the tensile properties of warp knitted cement based composites.** v. 30, p. 174–183, 2008.
- PELED, A.; SUEKI, S.; MOBASHER, B. **Bonding in fabric – cement systems : Effects of fabrication methods.** v. 36, p. 1661–1671, 2006.
- PORCHER. **Porcher do Brasil.** Disponível em: <<http://www.porcher.com.br/>>. Acesso em: 25 abr. 2016.
- PORTAL, N. W. **Sustainability and flexural behaviour of textile reinforced concrete.** 2013
- RAUPACH, M.; ORLOWSKY, J.; DILTHEY, U.; SCHLESER, M. **Epoxy-impregnated textiles in concrete – load bearing capacity and durability.** 2006.

REINHARDT, H. W.; KRÜGER, M.; GROSS, C. U. **Concrete Prestressed with Textile Fabric**. v. 1, n. 3, p. 231–239, 2003.

RESEARCH GATE. **Research Gate**. Disponível em: <<https://www.researchgate.net>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

SCHEERER, S.; SCHLADITZ, F.; CURBACH, M. **Textile reinforced concrete – from the idea to a high performance material**. p. 15–34, 2015.

SCIENCE DIRECT. **Science Direct**. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

SILVA, F. A.; FILHO, R. D. T.; FILHO, J. A. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Effect of reinforcement ratio on the mechanical response of compression molded sisal fiber textile reinforced concrete**. p. 175–182, 2014.

SOLIDIAN. **Solidian**. Disponível em: <<http://www.solidian.com>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

TEXIGLASS. **Texiglass**. Disponível em: <http://www.texiglass.com.br/tecidos_construcao.asp>. Acesso em: 20 abr. 2016.

UFRGS. **Lume**. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

UFRGS. **Consulta Linhas de Pesquisa**. Disponível em: <http://www1.ufrgs.br/pesquisa/forms/form_paginaInicial.php?Op=1>. Acesso em: 1 maio. 2016b.

UFRGS. **Sabi UFRGS**. Disponível em: <<http://sabi.ufrgs.br/>>. Acesso em: 1 out. 2015c.

VOSS, S.; HEGGER, J. **Dimensioning of textile reinforced concrete structures**. In: **1st International Conference Textile Reinforced Concrete (ICTRC)**. 2006.

WANG, B.; JIN, H.; MAN, T.; WANG, Q. **Study on the mechanical property of textile reinforced self-stressing concrete sheets**. CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS, v. 107, p. 1–10, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.167>>.

WESERLAND. **Un matériau composite performant : le béton textile avec de nouvelles propriétés**. Disponível em: <<http://www.weserland.eu/weser/fr/nouvelles/315-trc-composite.html>>. Acesso em: 1 jan. 2015.

WILLIAMS, G.; AL-MAHAIDI, R.; KALFAT, R. **The west gate bridge: Strengthening of a 20 TH century bridge for 21 ST century loading**. American Concrete Institute, ACI Special Publication, v. 2, n. 275 SP, p. 1283–1299, 2011.

XU, S.; SHEN, L.; WANG, J. **The high-temperature resistance performance of TRC thin-plates with different cementitious materials : Experimental study**. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, v. 115, p. 506–519, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.070>>