

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

KÁTIA JOCASTA ORTIZ GRINGS

**COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS TÊXTEIS REFORÇADOS COM RESÍDUO DE
VESTUÁRIO**

**São Leopoldo
2020**

KÁTIA JOCASTA ORTIZ GRINGS

**COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS TÊXTEIS REFORÇADOS COM RESÍDUO DE
VESTUÁRIO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientadora: Prof.^a Dra. Marlova Piva Kulakowski

São Leopoldo

2020

G867c Grings, Kátia Jocasta Ortiz.
Compósitos cimentícios têxteis reforçados com
resíduo de vestuário / Kátia Jocasta Ortiz Grings. – 2020.
159 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do
Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, 2020.

“Orientadora: Prof.^a Dra. Marlova Piva Kulakowski.”

1. Compósitos cimentícios têxteis. 2. Tratamento de
têxteis. 3. Matrizes pozolânicas. 4. Resíduo de vestuário.
5. Poliéster. I. Título.

CDU 624

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Amanda Schuster – CRB 10/2517)

KÁTIA JOCASTA ORTIZ GRINGS

**COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS TÊXTEIS REFORÇADOS COM RESÍDUO DE
VESTUÁRIO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 28 de outubro de 2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Flávio de Andrade Silva – PUC-Rio

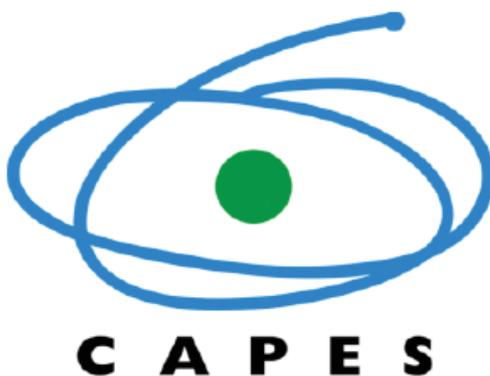
Prof^a. Dra. Maria Ernestina Alves Fidelis – IF SUDESTE MG

Prof. Dr. Mauricio Mancio – UNISINOS

Profa. Dra. Regina Célia Espinosa Modolo – UNISINOS

AGRADECIMENTOS À CAPES

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.



Aos meus pais, Jorge e Elisabeth.
Ao meu irmão, Mateus.

AGRADECIMENTOS

Todos sabem da estreita ligação que tenho com a minha família, sem dúvida eles são a minha base em todos os momentos da vida, por isso a eles dedico e agradeço por todas as minhas conquistas.

Fui uma aluna de arquitetura que estudou e concluiu a graduação com a mãe. Quando eu voltei a estudar, no mestrado, muitos me perguntavam se minha mãe também faria o curso. Mesmo agora não estando na sala de aula junto, minha mãe, Elisabeth Ortiz Grings, foi meu grande suporte em cada momento. Meu pai, Jorge Grings, me auxiliou desde a busca dos materiais, fabricação das formas metálicas para a moldagem das amostras, até a parte pesada da prática experimental. O meu irmão, Mateus Rafael Ortiz Grings, que para mim é um exemplo, a pessoa que sempre procuro quando estou com dúvidas, foi durante este processo do mestrado uma ajuda especial sempre que necessário. À minha cunhada Cristina Trisch e ao meu sobrinho Murilo Trisch Grings, meu agradecimento pelos momentos de apoio nessa jornada acadêmica. As minhas primas Juliana Konrath Ortiz e Maila Souza Ortiz, a quem dei minhas primeiras aulas e descobri meu gosto de ensinar. Aos meus tios, grandes incentivadores do meu sucesso, e aos meus avós que mesmo não mais presentes em matéria, são os responsáveis pela construção dos meus valores junto da minha família, valores esses que levo em todas as áreas da minha vida.

Lembro exatamente do dia que resolvi que iria me inscrever para a seleção de mestrado. Eu estava passando por um período difícil na minha vida pessoal e sentia que precisava de um resgate. Meu pai, que sempre soube do meu apreço pelo estudo, um dia chegou até mim e fez a pergunta que daria o pontapé inicial dessa trajetória: “Filha, por que você não volta a estudar?”

A pergunta fez eco na minha mente e eu resolvi ir até a universidade que tantas lembranças boas me trazia, ainda meio sem saber exatamente o que eu iria fazer. Caminhando pelos corredores, não levou muito tempo para encontrar a Simone, que na época ainda era secretária do PPGE. Ela, entusiasmada com minha ideia de retomar os estudos, logo sugeriu que eu realizasse a inscrição na seleção do mestrado, afinal eu tinha um excelente histórico acadêmico e experiência com pesquisa durante a graduação. Hoje, agradeço à Simone Trisch Kiefer, que muito me auxiliou nesse início. Nunca esqueço que ela sabia de detalhes da minha trajetória

acadêmica que nem eu recordava para colocar no Lattes quando eu me candidatei para a vaga de mestrado.

No mesmo dia, entrei em contato com a professora Marlova Piva Kulakowski, que sempre muito carinhosa e prestativa, me apoiou desde o primeiro momento. Pelos anos de convivência que tenho com a professora, desde o dia que me candidatei para ser bolsista de iniciação científica em 2007, eu posso dizer com todas as letras que eu tenho mais que uma orientadora, tenho uma grande amiga. Minha gratidão eterna por sempre ter acreditado em mim, querida orientadora, e por ter apostado em ideias criativas para o desenvolvimento dessa dissertação!

A aprovação na seleção do mestrado veio e tive a felicidade de ganhar a única bolsa integral da CAPES existente naquele semestre no curso que eu havia escolhido. Aqui, os desafios só estavam começando, mas já tinham um gosto doce de vitória! Meu muito obrigada à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

As aulas começaram, foram grandes os conhecimentos adquiridos ao longo das disciplinas e somente tenho a agradecer a todos os professores, bem como a secretaria do Programa de Pós-Graduação, pelas trocas compartilhadas e auxílios. Um agradecimento especial para os professores Claudio Kazmierczak, Maurício Mancio e Regina Espinosa Modolo que muito agregaram também no desenvolvimento da minha dissertação. À professora Feliciane Andrade Brehm sempre prestativa quando eu a procurava para tirar dúvidas referentes a minha pesquisa, e a professora Tatiana Rocha que muito contribuiu para o desenvolvimento do meu programa experimental.

Ao longo do curso, conheci pessoas especiais, colegas que se tornaram amigos e que nunca negaram ajuda quando a arquiteta estava perdida nos assuntos de engenharia. Amanda Pauletto, Guilherme Manfredini Bueno, Roger Ribeiro, Cristian Franco de Lima, Valéria Oliveira, Ieda Zanolla e Fernanda dos Santos, vocês fizeram eu me sentir capaz diante das dificuldades.

Ao Marcelo Krumenauer e a toda equipe da Concesul pela doação dos materiais cimentícios utilizados no programa experimental e ao pessoal da Valentys Uniformes, sempre muito prestativos, que forneceram o resíduo de tecido de poliéster utilizado na pesquisa.

As minhas bolsistas Luana Garcia e Manuela Plentz, pelo auxílio na execução do programa experimental e o cuidado dedicado à minha pesquisa.

Meu muito obrigada à toda a equipe dos laboratórios que precisei utilizar para o desenvolvimento do meu programa experimental, Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC), Laboratório de Valorização e Caracterização de Materiais (LCVMat), Laboratório de Laminação Petrográfica, Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional (Itt Fuse) e Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil (Itt Performance). Um agradecimento especial ao Roberto Christ, Gian Moreira, Giovana Poletto, Matheus Donadello e Vanessa Oerle Kautzmann que muito me auxiliaram nos ensaios até mesmo nos momentos mais difíceis para acessar os laboratórios durante a pandemia de COVID-19.

Ao Leonardo Corá, meu grande amigo desde os nossos 17 anos quando nos conhecemos na faculdade de arquitetura, com quem sempre compartilho os sonhos arquitetônicos, acadêmicos e de vida.

À galera 10, meus amigos de uma vida inteira, desde a educação infantil até os dias de hoje. Com eles aprendi o que é amizade e o que é estudar. Bruna Martins Schweinberger, nunca vou me esquecer quando você me disse num momento difícil que a minha capacidade era tamanha que se eu focasse nos meus sonhos, só Deus saberia onde eu iria chegar. Patryck Boschetti, Anderson Boschetti, Adroaldo Gomes, Simone Beck, Vanessa Silveira Corrêa e Giovani Rosa Mognon, muito obrigada pelo apoio em todos os momentos durante essa pesquisa, pelas conversas, chimarrões e carnavais.

A professora Débora Becker, minha orientadora no trabalho de conclusão do curso de arquitetura, incentivadora para que eu continuasse meus estudos na pós graduação, e a todos os professores que contribuíram para o meu crescimento como estudante e ser humano em todas as épocas da minha vida estudantil.

A tantas outras pessoas que não citei, mas cruzaram meu caminho nesse período e me fizeram mais feliz.

Tenho certeza que nada disso seria possível, sem o apoio de todos vocês, que não somente me auxiliaram em cada momento dessa trajetória chamada mestrado, mas que também vibraram com cada conquista minha. Voltar a estudar foi mais que adquirir novos aprendizados científicos, foi muito importante não somente para a minha vida profissional, mas sem dúvidas para a minha vida pessoal. Muito obrigada conhecimento, tenho muito a agradecer a você, você proporcionou o resgate dos meus sonhos!

“Sou o sonhador dos meus sonhos.”
(Eanes A. de Souza)

RESUMO

O poliéster é a fibra com maior produção mundial e maior potencial de geração de resíduos. Os retalhos de tecidos são passíveis de serem reciclados, tornando-se matéria-prima para outras indústrias. Nesta pesquisa, o objetivo é avaliar o emprego de resíduo de vestuário de poliéster como reforço em compósitos cimentícios sem função estrutural. Para isso, foram desenvolvidos, traços com baixa massa específica com o uso de agregado leve de vermiculita. Para não haver uma degradação rápida dos têxteis, empregou-se substituição parcial do cimento (25%) por cinza volante (CV) e o resíduo foi tratado por impregnação com polímero estireno butadieno (SBR) e sílica ativa (SA). Realizou-se caracterização física e química dos materiais; triagem e tratamento dos resíduos para a conversão em reforço, e a sua caracterização; caracterização da matriz cimentícia no estado fresco e endurecido; avaliação das propriedades mecânicas e microestrutura dos compósitos sem reforço, reforçado com resíduo de vestuário sem tratamento, tratado por impregnação com SBR e com SBR + SA. Os tecidos sem impregnação e impregnados com SBR apresentaram, respectivamente, desempenho 22,69% e 13,48% mais satisfatório no sentido da urdidura, já os impregnados com SBR + SA obtiveram valores equivalentes nos dois sentidos do tecido. O elevado tamanho de partícula da CV, a resistência à compressão axial da matriz cimentícia inferior nos corpos de prova (CPs) com CV e o baixo consumo de CH verificado no ensaio de TG/DTG na pasta com CV, indicam a baixa reatividade da pozolana. Nos CPs sem CV, houve um incremento da resistência à tração direta de 53,57% e 64,28%, bem como de 92,10% e 94,73% na tração na flexão dos compósitos com reforço impregnado com SBR e SBR + SA, respectivamente, em relação aos sem reforço. Além disso, no ensaio de tração direta, o maior número de fissuras nos CPs em que o reforço recebeu SBR em relação ao sem impregnação, indicam o benefício do tratamento. As placas com maior tenacidade no ensaio de impacto, foram as com tecido impregnado com SBR + SA. Diante do estudo realizado, é possível afirmar que em função da CV ter sido empregada sem beneficiamento, não se observou benefícios no seu emprego nas condições da pesquisa. Por sua vez, os reforços contribuíram para o desempenho do compósito quanto às propriedades avaliadas, principalmente quando o reforço recebeu tratamento por impregnação.

Palavras-chave: Compósitos cimentícios têxteis. Tratamento de têxteis. Matrizes pozolânicas. Resíduo de vestuário. Poliéster.

ABSTRACT

Polyester is the fiber with the highest production in the world and greatest potential for generating waste. The fabric scraps are liable to be recycled, becoming a raw material for other industries. In this research, the objective is to evaluate the use of polyester clothing waste as reinforcement in cementitious composites without structural function. For this, low specific mass traits were developed with the use of light vermiculite aggregate. In order to avoid a fast degradation of the textiles, partial replacement of the cement (25%) by fly ash (FA) was used and the waste was treated by impregnation with styrene butadiene polymer (SBP) and silica fume (SF). Physical and chemical characterization of the materials was carried out; screening and treating waste for conversion to reinforcement, and its characterization; characterization of the cementitious matrix in the fresh and hardened state; evaluation of the mechanical properties and microstructure of composites without reinforcement, reinforced with untreated clothing waste, treated by impregnation with SBP and SBP + SF. The fabrics without impregnation and impregnated with SBP showed, respectively, 22.69% and 13.48% more satisfactory performance in the warp direction, whereas those impregnated with SBP + SF obtained equivalent values in both directions of the fabric. The high particle size of the FA, the resistance to axial compression of the lower cement matrix in the specimens with FA and the low consumption of CH verified in the TG/DTG test in the FA paste, indicate the low reactivity of the pozzolana. In the specimens without FA, there was an increase in the resistance to direct traction of 53.57% and 64.28%, as well as 92.10% and 94.73% in the tensile strength of the composites with reinforcement impregnated with SBP and SBP + SF, respectively, in relation to those without reinforcement. In addition, in the direct traction test, the greater number of cracks in the specimens in which the reinforcement received SBP in relation to the one without impregnation, indicate the benefit of the treatment. The plates with greater tenacity in the impact test were those with fabric impregnated with SBP + SF. Based on this study, since FA was used without processing, no benefits were observed. In turn, the reinforcements contributed to the performance of the composite in terms of the properties evaluated, especially when the reinforcement received treatment by impregnation.

Key-words: Textile cement composites. Textile treatment. Pozzolan matrices. Clothing waste. Polyester.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mobiliários em concreto: Mesa Kepler (a), Mesa de Centro Hertz (b), Mesa de Apoio Hooke (c) e Poltrona Kepler (d).....	24
Figura 2 - Tipos de sistemas de reforço do concreto: (a) concreto armado, (b) concreto reforçado com fibras e (c) concreto têxtil.....	28
Figura 3 - Classificação das fibras natural e sintética.....	31
Figura 4 - (a) Tecido composto por monofilamentos; (b) tecido composto por multifilamentos inseridos na matriz cimentícia.....	31
Figura 5 - Tipos de tecidos: tecido (a), malha (b) e não-tecido (c).....	32
Figura 6 – Produção mundial de fibras em 2019.....	33
Figura 7 - MEV mostrando as fibras PET em processo de degradação após 150 dias no ambiente alcalino do concreto: ampliação de: a) 250x e b) 1500x.....	38
Figura 8 - Tratamento do tecido de juta por impregnação: (a) imersão do tecido no polímero; (b) quadro de madeira com pregos para fixação do tecido impregnado; (c) fixação do tecido no quadro de madeira e (d) posição do quadro para secagem.....	40
Figura 9 - Espectro de FTIR esperado para o polímero PET.....	46
Figura 10 - Gráfico de TG/DTG em atmosfera inerte e oxidante para PET.....	47
Figura 11 - Análise de TG e DTG realizada nas matrizes PC e MK aos 28 e 180 dias...	48
Figura 12 - Comportamento à tração do compósito têxtil, incluindo (a) evolução da tensão de tração, (b) mecanismo de fissuração múltipla.....	49
Figura 13 - Comportamento típico dos FRCs e HPFRCCs sob tração direta.....	50
Figura 14 - Tensão x deformação de (a) filamento, fio e tecido de juta, (b) compósitos reforçados com 5 camadas de tecido de juta não tratado e tratado e (c) compósitos têxteis com fibras não tratadas e tratadas respectivamente, após testes de tração .	51
Figura 15 - Força x deslocamento para fios em matriz cimentícia.....	52
Figura 16 - Micrografias de MEV: (a) e (b) Compósito cimentícios reforçado com tecido de cânhamo, (c) e (d) nanocompósito reforçado com cânhamo e 1% de nanoargila, (e) e (f) nanocompósito reforçado com cânhamo e 3% de nanoargila.....	54
Figura 17 - Imagens de MEV após ensaio de tenacidade à fratura:.....	55
Figura 18 - Organograma geral das etapas do programa experimental.....	56
Figura 19 – (a) Resíduo de poliéster coletado na confecção e (b) padrão de tecido selecionado na triagem.....	61
Figura 20 - Organograma de ensaios da Etapa 1 de caracterização dos materiais..	62

Figura 21 - Tratamento do tecido de poliéster por impregnação: (a) imersão do tecido no polímero ou mistura de SBR mais sílica ativa; (b) colocação do tecido impregnado no varal para secagem.....	65
Figura 22 - Organograma de ensaios da Etapa 2 de caracterização do reforço têxtil	66
Figura 23 - Estrutura do tecido	67
Figura 24 - Ensaio de Tração direta em Tecido de Poliéster	68
Figura 25 - Organograma de ensaios da Etapa 3 de caracterização da matriz cimentícia.....	69
Figura 26 - Mini-slump em pasta	70
Figura 27 - Análise visual da borda da pasta ensaiada no mini-cone de Kantro.....	70
Figura 28 - Fluxograma do método de mistura do concreto leve	71
Figura 29 - Aparelhagem para ensaio de mini slump-flow: (a) cone de Abrams e (b) placa base	72
Figura 30 - Organograma de ensaios da Etapa 4 de caracterização do compósito ..	75
Figura 31 - (a) Esquema das camadas do compósito em 3d, (b) dimensões e posicionamento do reforço têxtil no corpo de prova de concreto leve para cada ensaio	76
Figura 32 - Moldagens dos compósitos têxteis: (a) Mistura realizada em betoneira de eixo vertical; (b) formas metálicas de resistência ao impacto, tração direta e tração na flexão; (c) e (d) camada inferior de concreto leve conforme nível demarcado na forma, posicionamento das tiras de tecido de poliéster e preenchimento da camada de concreto leve superior; (e) e (f) fechamento da forma com vidro	77
Figura 33 - (a) Dimensões do corpo de prova retangular e (b) configuração da amostra na prensa universal para realização de ensaio de tração direta	78
Figura 34 - (a) Configuração do ensaio de tração na flexão e (b) realização do ensaio na prensa universal.....	79
Figura 35 - (a) esfera de aço para aplicação dos impactos, (b) quadro de madeira para apoiar a amostra no momento do ensaio, (c) configuração do ensaio com as delimitações das alturas para as diferentes energias de impacto, (d) momento do lançamento da esfera.....	80
Figura 36 – Granulometria do cimento e adições: (a) Curvas acumuladas e (b) Curvas de distribuição granulométrica	83

Figura 37 - Curva granulométrica da vermiculita com limites da norma NBR 11355 (ABNT, 2015)	85
Figura 38 - Difratoograma da cinza volante.....	87
Figura 39 - Difratoograma da sílica ativa.....	88
Figura 40 - Morfologia do tecido de poliéster	89
Figura 41 - Imagens de MEV do tecido de poliéster (a) e (b) impregnado com	90
Figura 42 - Curvas tensão x deformação da trama e urdidura do tecido de poliéster: (a) sem impregnação, (b) com impregnação de SBR e (c) com impregnação de SBR + SA.....	92
Figura 43 - Tração direta da trama e da urdidura do tecido de poliéster com e sem tratamento por impregnação	94
Figura 44 - Espectro de FTIR do tecido de poliéster	95
Figura 45 - Gráfico de TG/DTG do tecido de poliéster	96
Figura 46 - Ponto de saturação em pasta do aditivo superplastificante: (a) referência e (b) com substituição da massa de cimento por 25% de CV.....	97
Figura 47 - Mini-cone de Kantro em pasta com aditivo superplastificante e teores de AMV: (a) referência e (b) com 25% de CV	98
Figura 48 – Espalhamento pelo Mini-cone de Kantro: (a) pasta de cimento com 0,30% de superplastificante; pasta de cimento com 0,30% de superplastificante e 0,20% AMV medidas em (b) 0 min, (c) 5 min e (d) 15 min após a mistura; (e) pasta de cimento com 25% CV e 0,30% de superplastificante; pasta de cimento com 25% CV, 0,30% de superplastificante e 0,20% AMV medidas em (f) 0 min, (g) 5 min e (h) 15 min após a mistura.....	99
Figura 49 - Mini slump-flow para diferentes porcentagens de vermiculita em misturas sem CV (REF) e com substituição da massa de cimento por 25% de CV	100
Figura 50 - Mini slump-flow do traço 1:0,70:0,4 sem CV: (a) vista superior e (b) perfil.	101
Figura 51 - Mini slump-flow do traço 1:0,55:0,4 com 25% de CV: (a) vista superior e (b) perfil.....	102
Figura 52 - Mini slump-flow com teores de agente desincorporador de ar em misturas sem CV (REF) e com substituição da massa de cimento por 25% de CV	103
Figura 53 - Amostras com diferentes teores de desincorporador de ar em misturas sem substituição da massa de cimento (a) 0,00%, (b) 0,10%, (c) 0,20% e (d)1,00%; e misturas com 25% CV (e) 0,00%, (f) 0,10%, (g) 0,20% e (h)1,00%.....	105

Figura 54 - Gráfico de TG/DTG das pastas de cimento aos 91 dias.....	107
Figura 55 - Múltiplas fissuras nas amostras com (a) reforço sem tratamento, (b) reforço tratado com SBR e (c) reforço impregnado com SBR + SA	110
Figura 56 – Gráficos tensão x deformação do compósito (a) sem CV e (b) com 25% de CV.....	111
Figura 57 - Médias das resistências máximas das amostras (a) sem CV e (b) com CV no ensaio de tração direta.....	111
Figura 58 - Resistência à tração na flexão das (a) amostras sem CV e (b) com CV	113
Figura 59 – Aspecto das amostras após impactos com energia de 2,5J: (a), (b), (c) e (d) sem CV e respectivamente sem reforço, com reforço, com reforço SBR e com reforço com SBR + SA; e (e), (f), (g) e (h) amostras com CV	116
Figura 60 - Aspecto das amostras após impactos com energia de 5,0J: (a), (b), (c) e (d) sem CV e respectivamente sem reforço, com reforço, com reforço SBR e com reforço com SBR + SA; e (e), (f), (g) e (h) amostras com CV	118
Figura 61 - Micrografias de MEV do compósito cimentício sem e com CV, respectivamente, reforçado com tecido de poliéster: (a) e (b) têxtil sem tratamento, (c) e (d) têxtil impregnado com SBR, (e) e (f) têxtil impregnado com SBR + SA.....	121
Figura 62 - (a) Dimensões do corpo de prova “dog bone” e (b) configuração da amostra na prensa universal para realização de ensaio de tração direta.....	146
Figura 63 - Resistência à tração direta dog bone das amostras (a) de referência e (b) com 25% de CV	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do poliéster.....	36
Tabela 2 - Propriedades físicas do poliéster	36
Tabela 3 - Bandas de absorção espectroscópicas de infravermelho de fibras	46
Tabela 4 - Propriedades físico/químicas dos aditivos e agente desincorporador de ar	60
Tabela 5 - Caracterização física dos materiais pulverulentos.....	82
Tabela 6 - Caracterização física do agregado	84
Tabela 7 - Granulometria da vermiculita.....	84
Tabela 8 - Composição química do cimento e cinza volante	85
Tabela 9 - Composição química da sílica ativa	86
Tabela 10 - Equivalente alcalino do cimento e da CV	86
Tabela 11 - Resultados do ensaio de tração direta do tecido de poliéster sem tratamento e com tratamento por impregnação.....	91
Tabela 12 - Determinação do espalhamento, tempo de escoamento (t_{250}) e do índice de estabilidade visual (IEV) de variações do traço de vermiculita em misturas com e sem substituição da massa de cimento por 25% de CV.....	100
Tabela 13 - Determinação do espalhamento, tempo de escoamento (t_{250}) e do índice de estabilidade visual (IEV) em misturas com e sem substituição da massa de cimento por 25% de CV e teores de material desincorporador de ar	104
Tabela 14 - Consumo dos materiais em Kg/m^3 de concreto	106
Tabela 15 - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ medido nas pastas de cimento aos 91 dias	107
Tabela 16 - Resistência à compressão da argamassa	108
Tabela 17 - Resultados do ensaio de tração direta do compósito de referência e com 25% de CV (valores em parêntese correspondem ao desvio padrão).....	109
Tabela 18 - Resultados do ensaio de tração na flexão das amostras sem e com CV	113
Tabela 19 - Resultados das médias das profundidades, médias dos diâmetros das mossas e áreas fissuradas das amostras (energia de impacto de 2,5J)	117
Tabela 20 - Resultados das médias das profundidades e diâmetros das mossas geradas nas amostras pela energia de impacto de 5,0J	119
Tabela 21 - Resultados das médias das massas específicas dos compósitos têxteis	120

Tabela 22 - Dimensões das amostras de tecido.....	138
Tabela 23 - Resultados do ensaio de resistência à tração do tecido de poliéster...	138
Tabela 24 - Resultados dos ensaios de mini-cone de Kantro em pastas com aditivo superplastificante	139
Tabela 25 - Resultados dos ensaios de mini-cone de Kantro em pastas com aditivo superplastificante	140
Tabela 26 - Mini slump-flow para diferentes porcentagens de vermiculita em misturas com somente cimento e com substituição da massa de cimento por 25% de CV ..	141
Tabela 27 - Mini slump-flow, densidade de massa no estado fresco e massa específica no estado endurecido para diferentes porcentagens de aditivo desincorporador de ar em misturas com e sem CV	143
Tabela 28 - Resultados do ensaio de tração direta das amostras de referência (0% CV)	144
Tabela 29 - Resultados do ensaio de tração direta das amostras com cinza volante (25% CV)	145
Tabela 30 - Resistência à tração direta dog bone das amostras sem CV.....	148
Tabela 31 - Resistência à tração direta dog bone das amostras com 25% CV	149
Tabela 32 - Resistência à tração na flexão das amostras sem CV.....	150
Tabela 33 - Resistência à tração na flexão das amostras com 25% CV.....	151
Tabela 34 - Resultados das medições das mossas geradas pelos impactos com energia de 2,5J nas amostras sem CV.....	152
Tabela 35 - Resultados das medições das mossas geradas pelos impactos com energia de 2,5J nas amostras com 25% CV	153
Tabela 36 - Resultados das medições das mossas geradas pelos impactos com energia de 5,0J nas amostras de referência e com 25% CV	154
Tabela 37 - Resultados das medições das fissuras geradas pelos impactos com energia de 2,5J nas amostras de referência com reforço sem impregnação.....	155
Tabela 38 - Resultados das medições das fissuras geradas pelos impactos com energia de 2,5J nas amostras de referência com reforço impregnado com SBR ...	156
Tabela 39 - Resultados das medições das fissuras geradas pelos impactos com energia de 2,5J nas amostras com 25% CV e reforço sem impregnação.....	157
Tabela 40 - Resultados das medições das fissuras geradas pelos impactos com energia de 2,5J nas amostras com 25% CV e reforço com impregnação SBR	157

Tabela 41 - Resultados das medições das fissuras geradas pelos impactos com energia de 2,5J nas amostras com 25% CV e reforço com impregnação SBR + SA	157
Tabela 42 - Fissuras geradas pelos impactos com energia de 5,0J nas amostras com 0% CV e reforço com impregnação SBR + SA.....	158
Tabela 43 - Resultados das medições das fissuras geradas pelos impactos com energia de 5,0J nas amostras com 25% CV e reforço com impregnação SBR + SA	159

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivos	25
1.1.1	Objetivo Geral	25
1.1.2	Objetivos Específicos	25
1.2	Justificativa	26
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
2.1	Compósitos Cimentícios Têxteis	28
2.2	Tecidos	30
2.2.1	Resíduo de Vestuário	33
2.2.2	Propriedades dos Tecidos Sintéticos	35
2.2.3	Fibras Sintéticas como Reforço de Compósitos Cimentícios	36
2.2.4	Tratamento do Tecido	39
2.3	Matriz Cimentícia Leve	41
2.3.1	Concreto com Agregado Leve de Vermiculita Expandida	42
2.3.2	Tratamento da Matriz Cimentícia	44
2.4	Métodos de Avaliação dos Compósitos Têxteis	45
2.4.1	Identificação e Caracterização dos Tecidos	45
2.4.2	Avaliação da Atividade Pozolânica da Matriz Cimentícia	47
2.4.3	Propriedades Mecânicas do Compósito Têxtil	49
2.4.4	Identificação de Falhas na Microestrutura Através de MEV	54
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	56
3.1	Planejamento Experimental	57
3.1.1	Fatores de Controle com um Nível Fixo de Estudo	57
3.1.2	Fatores de Controle com Multiníveis de Estudo	57
3.1.3	Variáveis de Resposta	58
3.2	Materiais	58
3.2.1	Cimento	58
3.2.2	Cinza Volante	58
3.2.3	Sílica Ativa	59
3.2.4	Agregado	59
3.2.5	Aditivos e Agente Desincorporador de Ar	59
3.2.6	Resíduo de Vestuário	60

3.2.7	Polímero Estireno Butadieno.....	61
3.3	Etapa 1 - Caracterização dos Materiais.....	61
3.3.1	Caracterização dos Materiais Pulverulentos.....	62
3.3.2	Caracterização do Agregado.....	63
3.4	Etapa 2 – Beneficiamento e Caracterização do Resíduo Têxtil.....	64
3.4.1	Triagem do Resíduo.....	64
3.4.2	Tratamento do Resíduo de Vestuário por Impregnação	64
3.4.3	Caracterização do Reforço.....	66
3.4.4	Morfologia do Tecido e Tratamentos	66
3.4.5	Resistência à Tração Direta do Tecido de Poliéster	67
3.4.6	Caracterização Química do Resíduo de Tecido	68
3.4.7	Análise Térmica	68
3.5	Etapa 3 - Caracterização da Matriz Cimentícia	69
3.5.1	Dosagem e Caracterização da Matriz no Estado Fresco.....	69
3.5.2	Caracterização da Matriz no Estado Endurecido.....	73
3.6	Etapa 4 - Compósito.....	75
3.6.1	Produção do Compósito.....	75
3.6.2	Tração Direta	78
3.6.3	Tração na Flexão	78
3.6.4	Impacto.....	79
3.6.5	Massa Específica	80
3.6.6	Microestrutura	81
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	82
4.1	Caracterização dos Materiais	82
4.1.1	Caracterização Física	82
4.1.2	Caracterização Química.....	85
4.1.3	Caracterização Mineralógica.....	87
4.2	Caracterização do Reforço	88
4.2.1	Morfologia	89
4.2.2	Comportamento Mecânico	91
4.2.3	Composição Química.....	95
4.2.4	Análise Térmica	96
4.3	Caracterização da Matriz Cimentícia.....	97
4.3.1	Dosagem e Caracterização da Matriz no Estado Fresco.....	97

4.3.2	Estado Endurecido	105
4.4	Caracterização do Compósito	109
4.4.1	Tração Direta	109
4.4.2	Tração na Flexão	113
4.4.3	Resistência ao Impacto	115
4.4.4	Massa Específica	119
4.4.5	Microestrutura	120
5	CONCLUSÃO	123
5.1	Considerações Finais	123
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	125
	REFERÊNCIA.....	126
	ANEXO A - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA DO POLIÉSTER	138
	APÊNDICE B - PONTO DE SATURAÇÃO EM PASTA	139
	APÊNDICE C – MINI-CONE DE KANTRO EM PASTAS COM AMV	140
	APÊNDICE D - MINI SLUMP-FLOW E DENSIDADE DE MASSA PARA DIFERENTES PERCENTUAIS DE VERMICULITA.....	141
	APÊNDICE E - MINI SLUMP-FLOW E DENSIDADE DE MASSA PARA PERCENTUAIS DE DESINCORPORADOR DE AR.....	142
	APÊNDICE F – TRAÇÃO DIRETA	144
	APÊNDICE G – TRAÇÃO DIRETA DOG BONE	146
	APÊNDICE H – TRAÇÃO NA FLEXÃO	150
	APÊNDICE I – IMPACTO	152

1 INTRODUÇÃO

As preocupações ambientais com os resíduos resultantes da indústria têxtil não são recentes. Em Portugal, por exemplo, em 2009 foram gerados 293 mil toneladas de resíduos têxteis. Parte substancial desses resíduos são resultantes das indústrias de tecidos, sendo os principais de lã, algodão e fibras sintéticas e artificiais (BRIGA-SÁ *et al.*, 2013). Ainda segundo o relatório de mercado de fibra preferencial (TEXTILE EXCHANGE, 2020), mundialmente, a fibra mais consumida em 2019 foi o poliéster, sendo também a fibra com maior potencial de geração de resíduos.

Já no Brasil, de acordo com dados da Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção - ABIT (2017), foram produzidos 6,7 bilhões de peças de vestuário e gerados 170 mil toneladas de resíduos de tecidos em 2016. Estes dados indicam que o setor gera um passivo ambiental considerável, descartando uma provável fonte de matéria-prima secundária. Segundo Briga-Sá *et al.* (2013) para encorajar a reciclagem, esta questão tem sido tratada por diversos países, e na Europa, por exemplo, políticas públicas buscaram definir leis que regulem a gestão desses resíduos, como por exemplo, a diretiva 2008/98/EC publicada em dezembro de 2008 que tem o intuito de reformular a Waste Framework Directive (WFD) (2006/12/EC). Já no Brasil, diversas entidades (ABIT, 2017) incentivam o recolhimento e reciclagem dos resíduos têxteis, mas faltam políticas públicas que acarretem números expressivos no que diz respeito ao correto destino dos resíduos de vestuário.

De acordo com Briga-Sá *et al.* (2013), o resíduo têxtil é resultado do processo produtivo do vestuário, no qual há uma otimização da peça de tecido, o que gera resíduos com tamanhos e formatos diferentes. Portanto as distintas propriedades dos materiais como composição, textura (estrutura, espessura e o arranjo dos fios) e tamanho podem aumentar a dificuldade de estudar possíveis aplicações. No entanto, mesmo com essa dificuldade, a reutilização de resíduos têxteis em coprodutos, já é uma realidade (ABIT, 2017; AMARAL *et al.*, 2018; WANG, 2006, 2010).

No que se refere ao setor da construção, é sabido que essa é uma das áreas que mais consome recursos como matéria-prima proveniente da natureza, energia e água. Assim, é essencial adotar ações mais eficientes em todas as etapas do processo de construção, incluindo o uso de materiais mais sustentáveis. Chama-se a atenção para o fato de que a reciclagem de diferentes tipos de resíduos na construção pode contribuir significativamente para a sustentabilidade (BRIGA-SÁ *et al.*, 2013).

Diante desse cenário, a transformação de resíduos em coprodutos pode ser uma maneira de contornar problemas ambientais. No entanto, grandes desafios necessitam ser superados, principalmente no que tange ao desempenho técnico adequado e viabilidade econômica, (TEXTILE EXCHANGE, 2020, BENÍCIO *et al.*, 2014).

Os estudos sobre compósitos cimentícios reforçados com fibras e de concretos têxteis vêm sendo desenvolvidos cada vez mais (AMIN *et al.*, 2017; FIDELIS *et al.*, 2019). Cabe destacar, que o concreto têxtil deriva do concreto reforçado com fibras, porém com o aumento da sua eficiência, uma vez que conta com o posicionamento do tecido na matriz cimentícia e, portanto, uma orientação organizada das fibras (SCHEERER; SCHLADITZ; CURBACH, 2015).

O concreto reforçado com têxtil, apresenta acréscimo nas propriedades mecânicas, com elevada resistência à tração direta e à tração na flexão. Devido ao seu desempenho comprovado, o uso de fibras sintéticas em compósitos cimentícios está se tornando cada vez mais popular. A literatura apresenta estudos mostrando que a ductilidade, resistência à tração, tenacidade, resistência ao impacto e energia absorvida podem apresentar melhorias significativas através da adição de fibras de aço e poliméricas, como as fibras têxteis de vidro, por exemplo (ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016; YAN; KASAL; HUANG, 2016; VOGEL, 2014).

No entanto, alguns estudos revelam que as fibras de poliéster podem perder resistência rapidamente na matriz cimentícia, o que leva a concluir que esse tipo de fibra sofre degradação química quando em contato com ambiente alcalino promovido pelos produtos de hidratação do cimento Portland (ALANI; BECKETT, 2013; FRATERNALI, *et al.*, 2014, YIN *et al.*, 2015).

Na literatura também é possível encontrar diversas pesquisas em compósitos cimentícios voltadas aos reforços com fibras naturais vegetais. Os benefícios de sustentabilidade apontados são o caráter renovável, a biodegradabilidade, baixa densidade, boas propriedades de resistência, além do baixo custo devido a larga produção e disponibilidade local. Em contrapartida, esses estudos revelam que as fibras celulósicas são incapazes de resistir no ambiente cimentício de alto pH, uma vez que ocorre a sua mineralização (ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016).

Esta baixa durabilidade das fibras vegetais e que alguns autores apontam ocorrer em algumas fibras sintéticas, influenciam na redução do desempenho

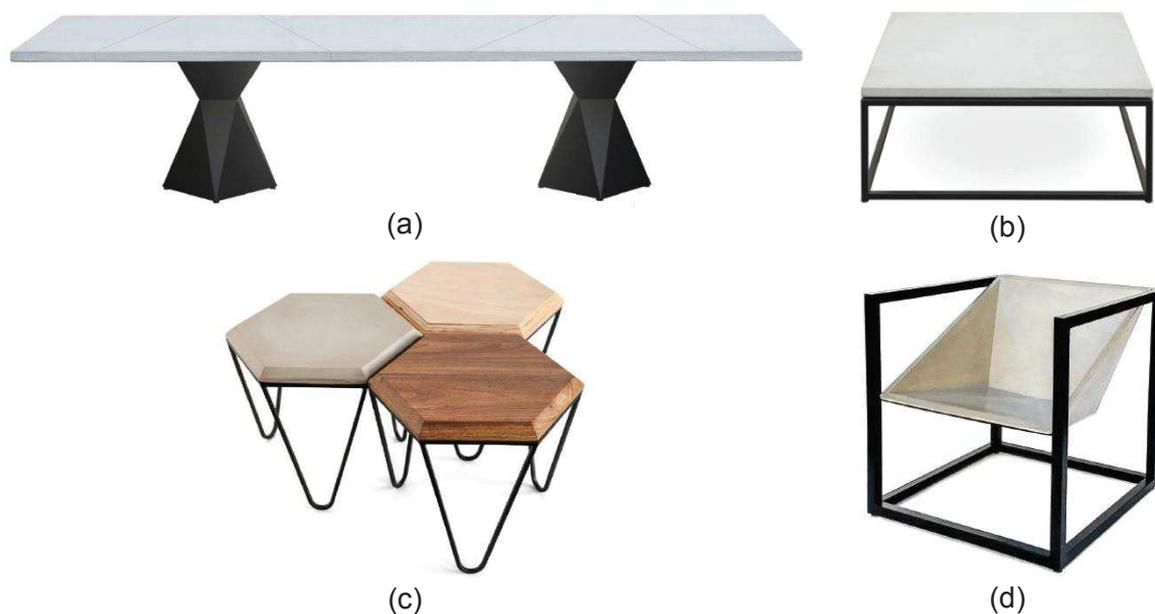
mecânico dos compósitos cimentícios ao longo do tempo devido à degradação das fibras e perda de adesão entre a fibra e a matriz (TONOLI *et al.*, 2010).

Desta maneira, a situação ideal é proteger as fibras com tratamentos e com uma matriz menos agressiva, de forma a manter a resistência da fibra. A diminuição da alcalinidade da matriz de cimento com maior precipitação de CaCO_3 , poderia explicar a mitigação da degradação dos compósitos cimentícios reforçados com fibras ou tecidos, além disso, o tratamento do têxtil concomitante a evitar a mineralização da fibra pode garantir melhor aderência entre interface fibra-matriz (PIZZOL *et al.*, 2014; YAN; KASAL; HUANG, 2016).

Quanto ao emprego do concreto têxtil na construção civil, a incorporação de reforços têxteis na matriz de concreto, por apresentar benefícios nas propriedades mecânicas, possibilita a utilização em diversas aplicações, tais como placas estruturais e reforços ou reparos estruturais em elementos em concreto armado. (BÖSCHE *et al.*, 2008; WEILAND *et al.*, 2007; MECHTCHERINE, 2013; MUELLER *et al.*, 2016). Mechtcherine; Schneider e Brameshuber (2016) destacam também, um outro possível campo de utilização do concreto reforçado com têxtil que envolvem painéis de fachada.

No entanto, para viabilizar tecnicamente a reciclagem dos resíduos têxteis, deve-se prospectar alternativas de materiais/componentes que possam incorporá-los. Uma das possibilidades de reciclagem é o desenvolvimento de produtos com valor agregado, cujo público alvo esteja predisposto a aceitar inovações. Como exemplo, pode-se citar os consumidores de produtos com design contemporâneo, com formas simples e minimalistas, duráveis e de qualidade, e que empregam materiais, alternativos ou não, que representam esse conceito, como o aço, a madeira, o concreto e a pedra. Produtos com essas características ganham mais espaço no segmento da arquitetura e design de produtos. Um exemplo são os móveis com design exclusivos, assinados pelos arquitetos Matthias Ambros von Holleben e Simone Weber, da Mezas Design CO, empresa dedicada à criação e produção de móveis de inovação e design, que surgiu para suprir uma demanda em termos de mobiliário existente no mercado (MEZAS DESIGN CO, 2018). Estão entre os mobiliários produzidos pela empresa Mezas, poltronas, cadeiras, mesas e bancadas. Com diversos formatos, acabamentos e materiais, chama-se a atenção para a grande quantidade de mobiliários em que são utilizados concreto aparente (Figura 1).

Figura 1 - Mobiliários em concreto: Mesa Kepler (a), Mesa de Centro Hertz (b), Mesa de Apoio Hooke (c) e Poltrona Kepler (d)



Fonte: Mezas Design CO (2018).

Por sua vez, esses componentes construtivos e de decoração devem obedecer a uma limitação de peso, tendo em vista a ergonomia do usuário. No que diz respeito ao limite de peso recomendado pela legislação, a Consolidação das Leis do Trabalho (CLT), art. 198/199, e Convenção OIT n.127, determinam um limite de 60 kg para homens e 25 kg para mulheres. No entanto, esse padrão está ultrapassado. Para se ter uma ideia, esse valor foi estipulado com base nas sacas de café que pesavam 60 kg. Já a Norma Regulamentadora NR 17, que trata especificamente sobre ergonomia, não define nada a esse respeito.

A comunidade Europeia determinou, por consenso, 25 kg. Porém, a American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), entidade que determina os limites de tolerância, toma como aceitável 32 kg. Já entidades como a National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), nos Estados Unidos, na década de 1990, descreveram como limite máximo para o levantamento de cargas 23 kg, podendo este valor ser reduzido significativamente conforme o posto de trabalho ou atividade que é realizada.

Ao encontro a esses fatores, pode-se abordar o concreto leve que é uma alternativa de material que apresenta os requisitos necessários para peças sem função estrutural como mobiliários e divisórias leves, uma vez que conforme a Norma Brasileira NBR 8953, este tipo de concreto, diferentemente do concreto convencional,

proporciona massa específica seca inferior a 2000 kg/m³. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2015).

Para alcançar essa redução da massa específica, os autores comentam que ocorre a introdução de ar em substituição de materiais sólidos através de três diferentes maneiras: com o uso de agente aerador que formam bolhas de ar no concreto celular; pelos vazios na mistura ao empregar somente agregado graúdo no concreto sem finos; e através do emprego de agregado leve no concreto (NEVILLE, 2016; WONGKEO; CHAIPANICH, 2010).

Neste contexto, a presente pesquisa propõe investigar o emprego de têxteis de resíduo de vestuário como reforço em compósitos cimentícios sem função estrutural, de forma que o produto possa vir a ser aplicado como mobiliário ou divisórias leves.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar o emprego de resíduo de poliéster proveniente de confecções de vestuário, como reforço em compósitos cimentícios leves sem função estrutural.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) avaliar a resistência à tração direta do resíduo de vestuário de poliéster não tratado e tratado por impregnação;
- b) desenvolver traços de compósito cimentício com baixa massa específica e baixo teor de hidróxido de cálcio;
- c) avaliar a influência do resíduo de vestuário nas propriedades mecânicas de resistência à tração direta, resistência à tração na flexão e resistência ao impacto do compósito têxtil;
- d) avaliar a microestrutura do compósito reforçado.

1.2 Justificativa

O conceito de Sustentabilidade foi definido pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, como a capacidade de atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de satisfazer suas próprias necessidades. Um grande problema que a humanidade enfrenta é a crescente população mundial e a pressão associada ao ambiente construído. As demandas por infraestrutura construída causaram geração significativa de resíduos, consumo de energia e de materiais (BRIGA-SÁ *et al.*, 2013).

Em nível mundial, segundo relatório de mercado de fibra preferencial (TEXTILE EXCHANGE, 2020), a produção e consumo da fibra sintética de poliéster em 2019 foi mais do que o dobro do rival mais próximo, a fibra natural de algodão, sendo, portanto, um dos tipos de resíduos têxteis que são gerados em maior quantidade. As fibras sintéticas são desenvolvidas a partir de combustíveis fósseis ou seja recursos não renováveis. Há uma grande preocupação das indústrias sobre a disponibilidade para a demanda atual do mercado desse tipo de fibra e sobre os altos custos que elas possuem (PIZZOL *et al.*, 2014). As saídas para os resíduos têxteis compostos por essas fibras incluem reutilização, reciclagem de materiais e recuperação de energia, de forma a tornarem-se matéria-prima para outros mercados e indústrias.

Por sua vez, a indústria da construção, não é apenas uma grande consumidora de energia, materiais e terra, mas também contribui imensamente para a poluição do meio ambiente, especialmente emissões de gases de efeito estufa. Segundo Onuaguluchi e Banthia (2016), para melhorar a sustentabilidade na área da construção, deve-se abraçar a reciclagem de subprodutos industriais e materiais renováveis.

Neste sentido, parece interessante, o emprego de um material que aplica concreto leve reforçado com resíduo têxtil de poliéster, e que possa vir a ser utilizado em vedações e divisórias na construção civil, de maneira a reduzir o carregamento da estrutura e conseqüentemente as dimensões dos elementos estruturais. Ou até mesmo de um material que possa ser empregado para a fabricação de mobiliários, que além de dar um destino adequado ao resíduo, possibilita a criação de um coproduto.

De encontro a isso, vem a tendência crescente em usar tecidos de fibras celulósicas e poliméricas como reforço de materiais cimentícios uma vez que podem

oferecer reforços em ambas as direções de trama e distribuição uniforme no concreto. A obtenção de uma boa estabilidade nas propriedades mecânicas, seria um fator agregador, uma vez que com um processo de fabricação padronizado, os tecidos permitem o controle da orientação das fibras com qualidade, produtividade e repetibilidade, de maneira a trazer ganhos a resistência ao impacto e flexão-tração (RAI; JOSHI, 2014; YAN; KASAL; HUANG, 2016).

No entanto quando se fala de resíduos, há diversas pesquisas que abordam concreto com fibras, ou seja, utilizam fibras curtas recicladas misturadas na matriz, uma vez que o resíduo geralmente apresenta diversos formatos e tamanhos, necessitando de beneficiamento que gera um material particulado, impossibilitando que funcione como reforço têxtil (WANG; WU; LI, 2000; KAZMIERCZAK *et al.*, 2003; WANG, 2010; UCAR; WANG, 2011). No caso do poliéster, o mesmo acontece.

Existem diversas pesquisas, entre elas Pelisser *et al.* (2012) e Nakrani e Nathani (2016), que empregam resíduo de tecido de poliéster, bem como o tereftalato de polietileno (PET), um polímero de poliéster obtido a partir de garrafas recicláveis, para produzir fibras e obter produtos à base de cimento reforçado com fibras e propriedades aprimoradas. No entanto, há uma carência de pesquisas que utilizem resíduo de poliéster provenientes de retalhos originados do corte de vestuário como reforço têxtil em camadas.

Com base neste cenário, faz-se necessário, primeiramente, conhecer o comportamento do resíduo de vestuário de poliéster como reforço têxtil, para então avaliar o seu potencial como reforço na matriz à base de cimento Portland e adições minerais de baixa massa específica, sem função estrutural, ou seja, para divisórias e mobiliários.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo abrange a temática compósitos cimentícios têxteis, bem como os conceitos referentes ao tema. Através da revisão da literatura, são apresentadas as propriedades dos tecidos sintéticos e o comportamento como reforço nos compósitos, bem como os tratamentos para evitar a sua degradação na matriz cimentícia. Também são abordados assuntos referentes aos resíduos têxteis, matriz cimentícia leve e de baixa alcalinidade, assim como os ensaios que avaliam as propriedades dos compósitos cimentícios reforçados com tecidos.

2.1 Compósitos Cimentícios Têxteis

Dentre os diversos compósitos cimentícios reforçados com fibra, destaca-se nesse trabalho o concreto têxtil. Este compósito é proveniente da incorporação de fios em forma de malha na matriz cimentícia composta por pasta de cimento Portland e agregados de tamanho miúdo. Os fios de multifilamentos contínuos que compõem um tecido reforçam a matriz uma vez que são posicionados na direção da tensão principal e garantem a mesma taxa de reforço por toda a extensão do material (BRAMESHUBER, 2006; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

A diferença entre o concreto armado, concreto reforçado com fibras e concreto reforçado com têxtil, pode ser verificada, de forma esquemática, na Figura 2.

Figura 2 - Tipos de sistemas de reforço do concreto: (a) concreto armado, (b) concreto reforçado com fibras e (c) concreto têxtil



Fonte: Hegger *et al.* (2006, p. 766).

No concreto reforçado com fibras (CRF) é incorporado à matriz cimentícia um número pequeno de fibras curtas, em torno de 0,2 a 2,0%, distribuídas aleatoriamente. Chama atenção também que, ao contrário do concreto convencional, em que é comum microfissuras se desenvolverem por conta da retração durante o processo de cura, o CRF possui ganhos na resistência à fissuração por retração plástica e conseqüentemente na durabilidade. Além disso, possui excelente resistência ao congelamento, excelente resistência à tração-flexão e ao impacto (RAI; JOSHI, 2014; YAN; KASAL; HUANG, 2016).

Vários tipos de fibras podem ser empregados para reforçar compósitos cimentícios, entre elas têm-se fibras poliméricas; metálicas; de vidro; celulósicas. Apesar de todas essas fibras apresentarem propriedades mecânicas adequadas para o emprego como reforço, para alguns tipos, o comportamento no compósito pode ser muito distinto. Por exemplo, apesar de algumas fibras celulósicas, quando comparadas às fibras de vidro, serem semelhantes em resistência, há uma grande diferença de comportamento quando comparadas as propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados por fibras curtas naturais. Essa disparidade entre as propriedades da matéria-prima e as melhorias limitadas das propriedades mecânicas dos compósitos gerados, pode ser atribuída ao uso de frações de baixo volume de fibra incorporada na matriz (YAN; KASAL; HUANG, 2016).

De acordo com Rai e Joshi (2014), o mesmo ocorre, quando se trata de concreto com fibras curtas de aço: frações de baixo volume, menor que 1%, têm um efeito insignificante na resistência à compressão e à tração. Em contrapartida, altos teores dificultam a mistura e a distribuição das fibras, além de alterarem negativamente a trabalhabilidade e aumentar a porosidade do concreto (YAN; KASAL; HUANG, 2016).

A incorporação de tecidos, ao contrário das fibras curtas, pode oferecer reforços em multidireções (em ambas as direções de trama). Essa distribuição uniforme de fibras no concreto traz ganhos ainda maiores nas propriedades mecânicas (tração, flexão e impacto) e na diminuição da fissuração (CLARAMUNT *et. al.*, 2017; HAKAMY; SHAIKH; LOW, 2013; YAN; CHOUW; YUAN, 2012).

De acordo com Yan, Kasal e Huang (2016), os benefícios ocorrem também no isolamento térmico com a redução da condutividade térmica, e na absorção sonora quanto as propriedades de amortecimento de vibrações.

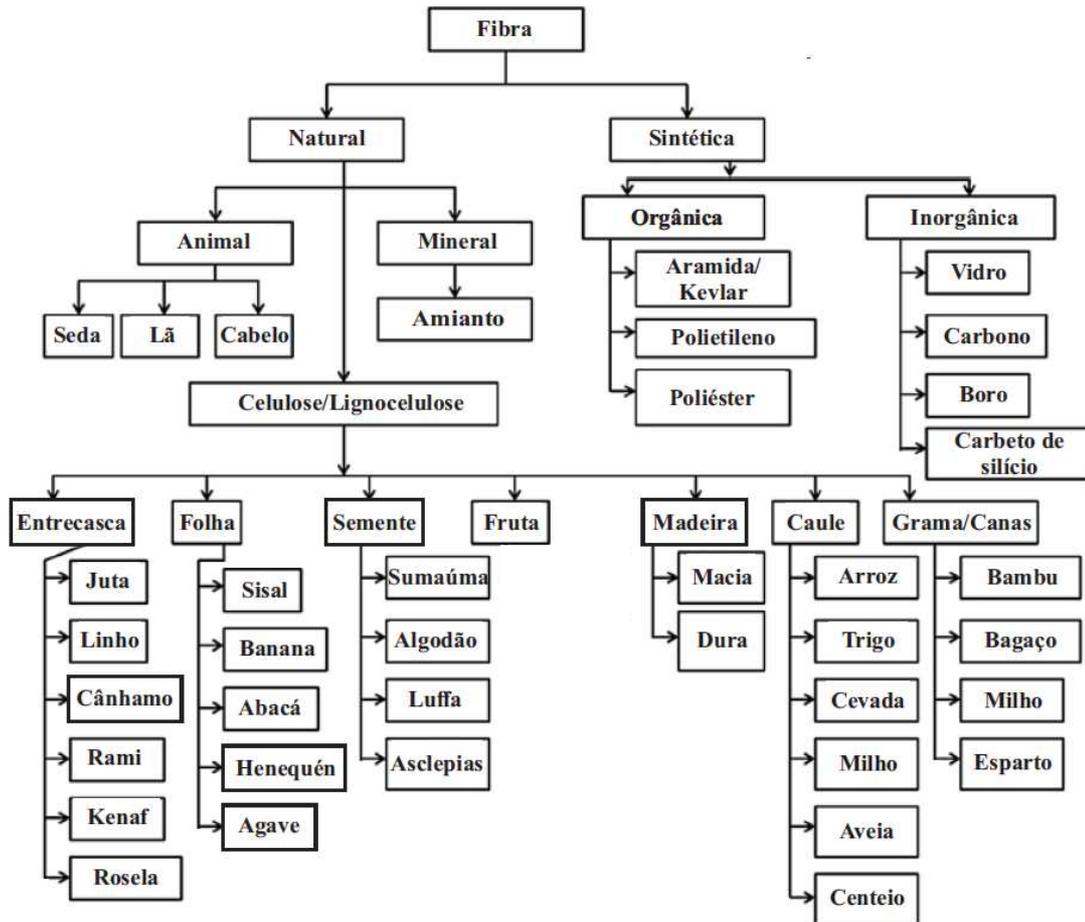
Concomitante a obtenção de uma boa estabilidade nas propriedades mecânicas, uma vez que com o processo de fabricação padronizado, os têxteis permitem o controle da orientação das fibras com qualidade, boa reprodutibilidade, além de alta produtividade, há uma crescente tendência em usar tecidos de fibras celulósicas e poliméricas como reforço de materiais para a construção, e não somente aplicados em aeronaves, barcos e automóveis. (FIDELIS, 2014; FIDELIS *et al.*, 2016; YAN; KASAL; HUANG, 2016).

Uma outra vantagem do concreto têxtil, em relação ao concreto armado com aço, é a eliminação da corrosão da armadura. Por consequência, não há a necessidade de grandes cobrimentos, assim possibilitando também a produção de peças mais leves. No entanto, é importante ressaltar também, que as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com têxteis são altamente dependentes das propriedades do tecido e da matriz utilizada (YAN; KASAL; HUANG, 2016).

2.2 Tecidos

Os tecidos são compostos basicamente por fibras monofilamentares, ou seja, são fibras torcidas em conjuntos para compor fios e estes formam as tramas dos tecidos. Portanto, fio é o nome de um grupo de fibras agrupadas que possuem comprimento substancial e seção transversal pequena, na ordem de 10 μm . Como pode-se verificar na Figura 3, as fibras podem ser classificadas em naturais e sintéticas (YAN; KASAL; HUANG, 2016; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

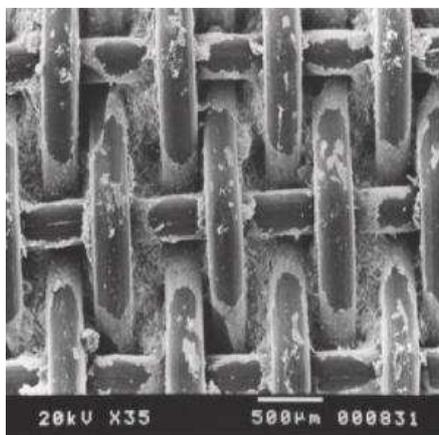
Figura 3 - Classificação das fibras natural e sintética



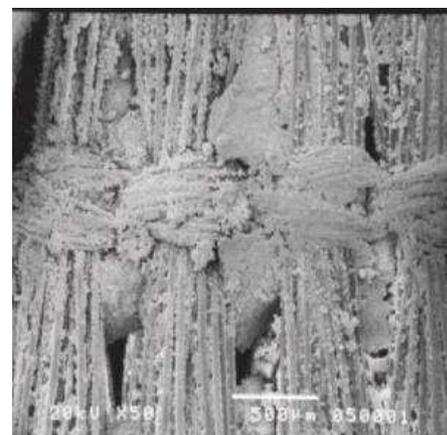
Fonte: Yan, Kasal e Huang (2016, p. 96).

Estas fibras longas que compõem os fios dos tecidos podem configurar-se em forma de monofilamento ou multifilamentos. O último é composto por centenas ou milhares de filamentos agrupados em feixes (Figura 4) (PELED, 2016).

Figura 4 - (a) Tecido composto por monofilamentos; (b) tecido composto por multifilamentos inseridos na matriz cimentícia



(a)



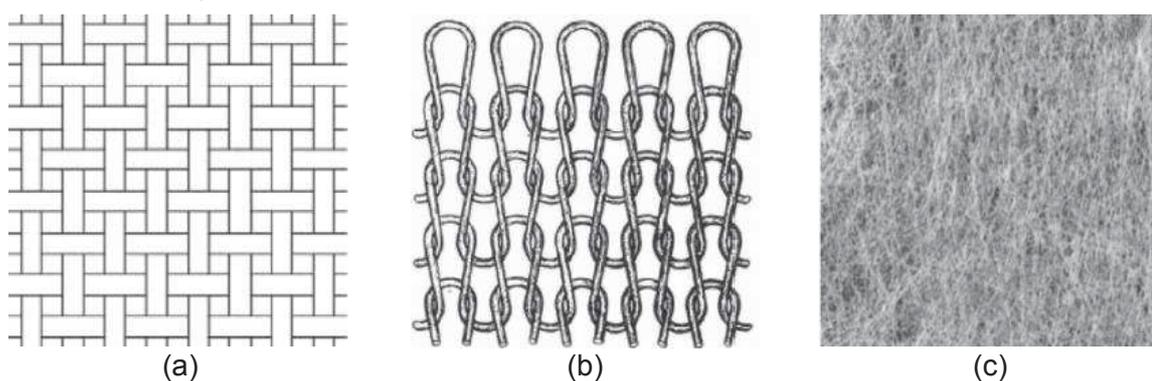
(b)

Fonte: Peled (2016, p. 66).

Quanto a classificação dos tecidos, três tipos distintos são fabricados, conforme pode-se ver na Figura 5. Além dos mencionados a seguir, que são conhecidos como tecidos 2D, existem ainda os tecidos 3D que podem ser produzidos em diferentes técnicas (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017; YAN; KASAL; HUANG, 2016):

- a) Tecido - composto por dois fios entrelaçados em ângulos retos uns aos outros. Os fios dispostos ao longo do comprimento são chamados de urdiduras, enquanto que os fios do sentido transversal do tecido, são intitulados de trama;
- b) Malha - consiste em fios entrelaçados como se fosse um *tricô*. Existe mais de um método de fabricação da malha, a diferença está na disposição das alças tricotadas, que podem ser feitas ao longo do comprimento, ou na sua largura;
- c) Não-tecido - é uma estrutura têxtil produzida pela colagem ou intertravamento de fibras, realizada por meios químicos, térmicos ou solventes e suas combinações. São exemplos desse tipo de tecido o TNT, o feltro, a entretela e o carpete. Uma das vantagens é que geralmente o tecido acabado é obtido diretamente do processamento da matéria-prima, não passando por uma fase intermediária de fiação.

Figura 5 - Tipos de tecidos: tecido (a), malha (b) e não-tecido (c)



Fonte: Yan, Kasal e Huang (2016, p. 106).

A maioria das fibras de alto desempenho estão na forma de fios com feixes de multifilamentos (REINHARDT *et al.*, 2006; PELED, 2016). Quanto à questão da geometria do tecido, Haik, Sasi e Peled (2017) analisaram a resistência à tração direta de tecidos 2D e verificaram que os tecidos manifestaram melhor desempenho à tração na direção da urdidura, em relação à direção da trama. Segundo os mesmos autores,

isso ocorre devido ao fato do urdume estar enlaçado pelos fios da trama, o que resulta em um maior atrito entre os filamentos. Já os filamentos no fio de trama estão livres e são solicitados separadamente, o que gera um resultado inferior de resistência.

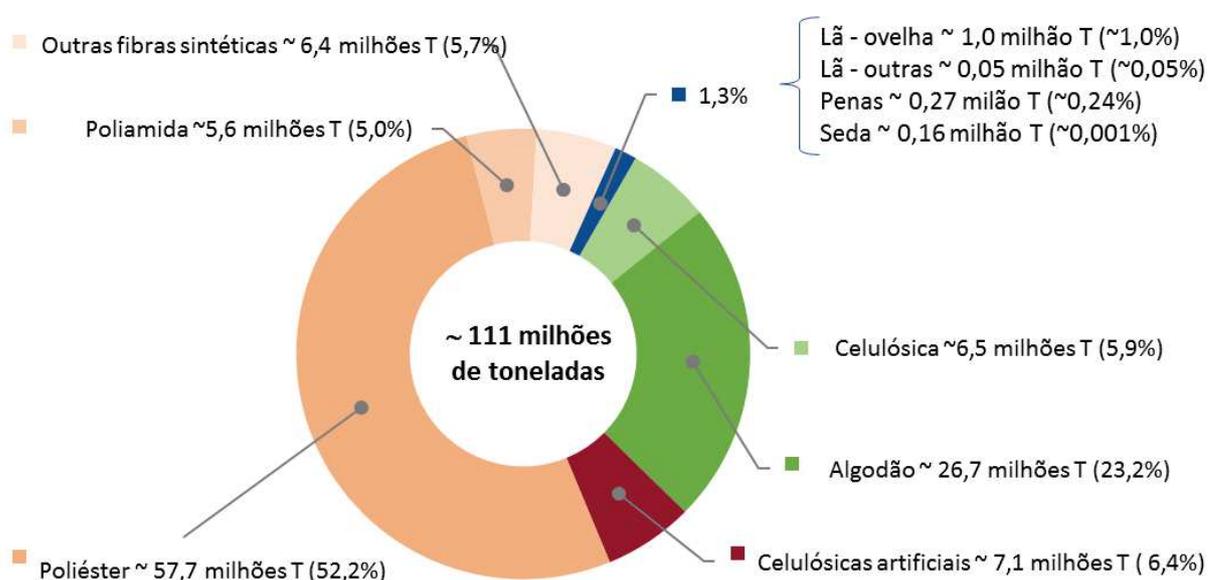
2.2.1 Resíduo de Vestuário

Dados da Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT, 2017), revelam que o Brasil tem o quarto maior parque produtivo de confecção do mundo e quinto maior produtor têxtil. O Brasil conta com produção média de confecção de 6,7 bilhões de peças dentre elas vestuário, acessórios, cama, mesa e banho, e dados referentes ao ano de 2016, revelam que o país produziu 170 mil toneladas de resíduos de tecidos.

Segundo Amaral *et al.* (2018), no Brasil, o consumo de fibra de algodão é predominante, cerca de 84% do consumo total, seguidas das fibras sintéticas (13%) e outras (3%). O Brasil é o terceiro maior exportador de algodão, o quinto maior consumidor e um dos cinco maiores produtores, com volume médio de 1,7 milhões de toneladas de plumas por safra, ao lado da China, Índia, EUA e Paquistão.

No entanto, a nível mundial, segundo relatório de mercado de fibra preferencial (TEXTILE EXCHANGE, 2020) a produção de poliéster em 2019 foi mais do que o dobro do rival mais próximo, o algodão. Na Figura 6, pode-se verificar o percentual de preferência das principais fibras disponíveis no mercado.

Figura 6 – Produção mundial de fibras em 2019



Fonte: Textile Exchange (2020, p. 6).

Segundo Wang (2010), em geral, as aplicações de fibras pertencem a três grandes categorias: vestuário, mobiliário doméstico e industrial. A vida útil dos produtos varia de curto prazo (descartáveis), médio prazo (vestuário, carpete, interior automotivo) e longo prazo (têxteis para construção).

A principal fonte de matéria-prima para polímeros sintéticos é o petróleo e a produção de têxteis requer energia e produtos químicos que são baseados em recursos não renováveis mesmo quando são utilizadas fibras naturais. As saídas para os resíduos têxteis incluem a reutilização, a reciclagem de materiais, e a recuperação de energia (WANG, 2010).

A Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT, 2017), chama a atenção que retalhos de tecidos podem ser reciclados quando limpos e separados, tornando-se matéria-prima para outras indústrias.

Segundo Briga-Sá (2013), só nos Estados Unidos, cerca de 5,8 milhões de toneladas de têxteis são descartadas pelos consumidores por ano. Apenas 1,5 milhões de toneladas (25%) são reciclados por instituições de caridade e empresas industriais. Os restantes 4,3 milhões de toneladas vão para aterros ou incineradores de resíduos urbanos. Somando-se a esse tipo de resíduo, há também os resíduos têxteis da indústria de tecidos.

Somente de resíduo de carpete nos Estados Unidos, é estimada uma geração de mais de 2 milhões de toneladas por ano e devido ao alto custo dos aterros, eliminá-los torna-se cada vez mais difícil, por isso a grande necessidade da reciclagem em novos produtos. A maior parte dos resíduos fibrosos que são consumidos e descartados em grandes quantidades é composta por materiais poliméricos sintéticos, com misturas de algodão, lã, seda, poliéster, nylon e polipropileno (WANG, 2010).

O uso de fibras recicladas de resíduos industriais ou pós-consumo oferece vantagens adicionais que vão além da melhora das propriedades mecânicas do compósito, como a redução de resíduos e conservação de recursos. Wang, Wu e Li (2000) e Wang (2010) comentam que várias pesquisas já estudaram a utilização de fibras recicladas de resíduos de pneus, madeira, papel e polietileno de alta densidade e carpetes.

O estudo de Ucar e Wang (2011), por exemplo, analisou o resíduo de carpete como reforço de concreto leve, e obteve resultados satisfatórios, o que aponta para coprodutos que podem ser adequados para muitas aplicações.

Kazmierczak *et al.* (2003) pesquisaram compósitos desenvolvidos com matriz de gesso reforçada com partículas de contraforte moído e obtiveram resultados positivos nas propriedades mecânicas, além da indicação de custo competitivo, quando comparado aos de outros materiais existentes no mercado. O contraforte, utilizado para reforçar o sapato na região do calcanhar, é fabricado com tecido de poliéster impregnado por resinas que é cortado e desta forma é gerado o resíduo.

Relacionado ao poliéster, encontra-se mais pesquisas que utilizaram o resíduo como fibra para reforço de matrizes cimentícias. Pelisser *et al.* (2012) é um exemplo de estudo experimental de concreto reforçado com fibra de garrafa de PET reciclado. Foram utilizadas fibras com comprimentos de 10, 15 e 20 mm e frações volumétricas de 0,05, 0,18 e 0,30% relacionadas ao volume do concreto, e verificaram que com exceção de 0,05%, aos 28 dias, a resistência à flexão e a resistência ao impacto do concreto aumentaram com a presença de fibras PET.

Já Nakrani e Nathani (2016) pesquisaram a utilização da fibra de poliéster proveniente de resíduos industriais têxteis reforçando o concreto nas proporções de 0%, 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1% em peso de cimento. Os autores verificaram que as propriedades mecânicas das amostras melhoraram proporcionalmente com o aumento do volume de fibras de poliéster, sendo que a resistência à compressão aumentou até 44%, a resistência à flexão até 40% e resistência à tração até 36% em relação a amostra de referência.

2.2.2 Propriedades dos Tecidos Sintéticos

Jawaid e Khalil (2011) classificam as fibras sintéticas em orgânicas e inorgânicas. São exemplos de orgânicas, a aramida, o polietileno e o poliéster, já a fibra de vidro e a de carbono são exemplos de fibras sintéticas inorgânicas.

As fibras sintéticas inorgânicas como a fibra de vidro, de acordo com Peled, Bentur e Mobasher (2017), tornaram-se populares como reforço em matriz cimentícia pela elevada resistência específica e módulo por custo unitário. Além disso, são amorfas (não cristalinas) e isotrópicas (propriedades iguais em todas as direções).

Quanto as fibras sintéticas orgânicas, um exemplo largamente difundido no cotidiano destacado por Kajiwara e Ohta (2009), é o poliéster. A sua produção comercial começou em 1948 nos EUA e em 1952 no Reino Unido. Na atualidade

tornou-se a fibra sintética mais amplamente produzida, um dos melhores sintéticos e de maior sucesso.

O poliéster é fabricado com qualquer polímero sintético de cadeia longa composto por pelo menos 85% em peso de éster de um ácido carboxílico aromático substituído, incluindo, mas não restrito a tereftalato e hidroxibenzoato. Neste caso, a fibra é formada pela interação de dois ou mais polímeros quimicamente distintos (dos quais nenhum excede 85% em peso), e contém grupos ésteres (KAJIWARA; OHTA, 2009; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

O polietileno tereftalato (PET) trata-se de um poliéster. O PET é produzido industrialmente por esterificação direta do ácido tereftálico purificado (PTA) com monoetileno glicol (MEG). Ou seja, esses dois elementos (PTA e MEG) são misturados, formando uma pasta que durante o processo de fabricação, reagirão entre si, passando por cristalização e formando o PET como é conhecido (KAJIWARA; OHTA, 2009; PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017).

Quanto as propriedades mecânicas do tecido sintético de poliéster, estão descritos na Tabela 1 os valores típicos e na Tabela 2 as propriedades físicas do poliéster podem ser verificadas.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do poliéster

Densidade relativa	Modulo de elasticidade (GPa)	Resist. à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongam. na ruptura (%)
1,09-1,5	2,8-4,1	48,3-72,4	59,3	30-300

Fonte: Callister (2002, p. 329).

Tabela 2 - Propriedades físicas do poliéster

Diâmetro do filamento (μm)	Diâmetro efetivo (mm)	Densidade (g.cm-3)	Absorção de água (%)	Temperatura Vítreia ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura de fusão ($^{\circ}\text{C}$)
25-30	0,08-0,1	1,34-1,39	2,84-5,69	62	252,8

Fonte: Pelisser *et. al.* (2012, p. 680); Nakrani e Nathani (2016, p. 2281-2282).

2.2.3 Fibras Sintéticas como Reforço de Compósitos Cimentícios

Zheng e Feldman (1995) comentam que para aumentar a resistência mecânica dos compósitos cimentícios, acredita-se que as fibras devem ter um módulo de elasticidade maior que a da matriz, condição difícil de encontrar na maioria das fibras sintéticas. No entanto, a pesquisa dos autores indicou que, mesmo com fibras de baixo

módulo, melhorias consideráveis podem ser obtidas nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Pelisser *et al.* (2012) comentam ainda que a incorporação de pequenas frações de volume (0,05 a 0,5%) de fibras sintéticas com baixo módulo no concreto, não levam a um aumento da resistência, mas melhora as propriedades de fissuração, tenacidade à fratura e resistência ao impacto do material. A pesquisa demonstrou também que a adição de 1,0% em volume de fibras de poliéster ao concreto produz um aumento de 75%, 9%, 7% e 5% na resistência ao impacto, resistência à tração de ruptura, resistência à flexão e resistência à compressão, respectivamente.

Apesar das fibras sintéticas serem amplamente utilizadas ainda são materiais caros, originados a partir de produtos químicos submetidos a reações e recursos não renováveis, ao contrário das fibras celulósicas que são baratas, abundantes e renováveis (KAJIWARA; OHTA, 2009; JAWAID; KHALIL, 2011).

No entanto, fibras sintéticas ganharam popularidade, particularmente em aplicações onde a suscetibilidade à corrosão, no caso de fibras metálicas, e de ataque alcalino, no caso de fibras celulósicas, são significativos. No caso das fibras celulósicas, um grande obstáculo que precisa ser superado para a comercialização de materiais cimentícios reforçados é em relação a durabilidade (AMIN *et al.*, 2017; PACHECO-TORGAL; JALALI, 2011; TOLÊDO FILHO *et al.*, 2000).

Pesquisas com fibras sintéticas como o nylon, o polipropileno (PP) e o polietileno (PE) revelam que estas fibras são muito resistentes a álcalis e não degradam na matriz cimentícia. Já fibras sintéticas de poliéster e acrílico são menos resistentes em ambiente alcalino (WANG; BACKER; LI, 1987).

Zheng e Feldman (1995) pesquisaram sobre a durabilidade das fibras sintéticas tais como polietileno, polipropileno, aramida, poliéster e carbono aplicadas como reforço de compósitos cimentícios. Os autores indicam que a grande maioria dessas fibras possui resistência a água e álcalis. Quanto à resistência térmica, observou-se perda progressiva da resistência a tração em 100°C para todas as fibras estudadas, com exceção da aramida e carbono.

Quanto a fibra de poliéster, os estudos que os autores realizaram, submeteram o poliéster ao envelhecimento acelerado, e indicaram resultados favoráveis com módulo de ruptura iniciais, mas os valores diminuem após algum período, concluindo-se que o poliéster perde força na matriz de cimento ao longo do tempo devido à sua degradação química (ZHENG; FELDMAN, 1995).

No entanto, na época em que os estudos foram realizados, os autores já diziam ser necessário mais pesquisas sobre o poliéster, no que diz respeito a sua aplicação como reforço de compósitos cimentícios, ligados ao tema da durabilidade (WANG; BACKER; LI, 1987; ZHENG; FELDMAN, 1995). De acordo com Johnston (1994) o problema da durabilidade da fibra de PET é complicado porque poliésteres são uma grande família de polímeros e nem todos parecem estar sujeitos a ataque de álcalis. Além disso, estudos de sua estabilidade na matriz de cimento Portland são escassos, muitas vezes duvidosos e controversos.

Neste contexto, Jamshaid *et. al.* (2017), também realizaram testes de envelhecimento acelerado de PP e PET expondo as fibras sintéticas a soluções com pH ácidos, NaOH e CaOH₂, a fim de avaliar a perda de propriedades mecânicas. Os autores concluíram que o PP pode ser considerado inerte ao ácido e ataque alcalino, porém o PET, embora possa oferecer boas propriedades mecânicas, é suscetível a hidrólise sob fortes condições alcalinas, o que indica que é suscetível a degradação quando exposto a matriz cimentícia. O PET perde peso quando as cadeias poliméricas quebram e se dissolvem no banho alcalino. O ataque alcalino é limitado à superfície do material, assim, o diâmetro dos filamentos diminuem com a perda de polímero na superfície, porém o peso molecular e a tenacidade dos filamentos diluídos permanecem essencialmente inalterados.

Confirmando essa questão, Pelisser *et al.* (2012) verificaram que aos 150 dias, não era mais possível verificar a melhoria na resistência à flexão e ao impacto do concreto reforçado com fibras devido à degradação das fibras de PET no ambiente alcalino do concreto, conforme visualizado nas microscopias (Figura 7).

Figura 7 - MEV mostrando as fibras PET em processo de degradação após 150 dias no ambiente alcalino do concreto: ampliação de: a) 250x e b) 1500x



Fonte: Pelisser *et. al.* (2012, p. 684).

Desta maneira, de acordo com Yan, Kasal e Huang (2016), para não haver uma degradação rápida do tecido nos compósitos cimentícios, usa-se duas estratégias: tratamento do tecido e da matriz. Outra estratégia, de acordo com Amin *et al.* (2017), é a utilização de fibras sintéticas, resistentes à ataque alcalino.

2.2.4 Tratamento do Tecido

O tratamento dos tecidos visa melhorar a adesão interfacial entre a fibra e a matriz cimentícia. Além disso, evita a penetração dos produtos de hidratação do cimento entre os filamentos do feixe, de forma a proteger os filamentos do núcleo contra os ataques químicos, o que resulta na manutenção da durabilidade e resistência à tração do compósito cimentício (COHEN; PELED, 2010; YAN; KASAL; HUANG, 2016).

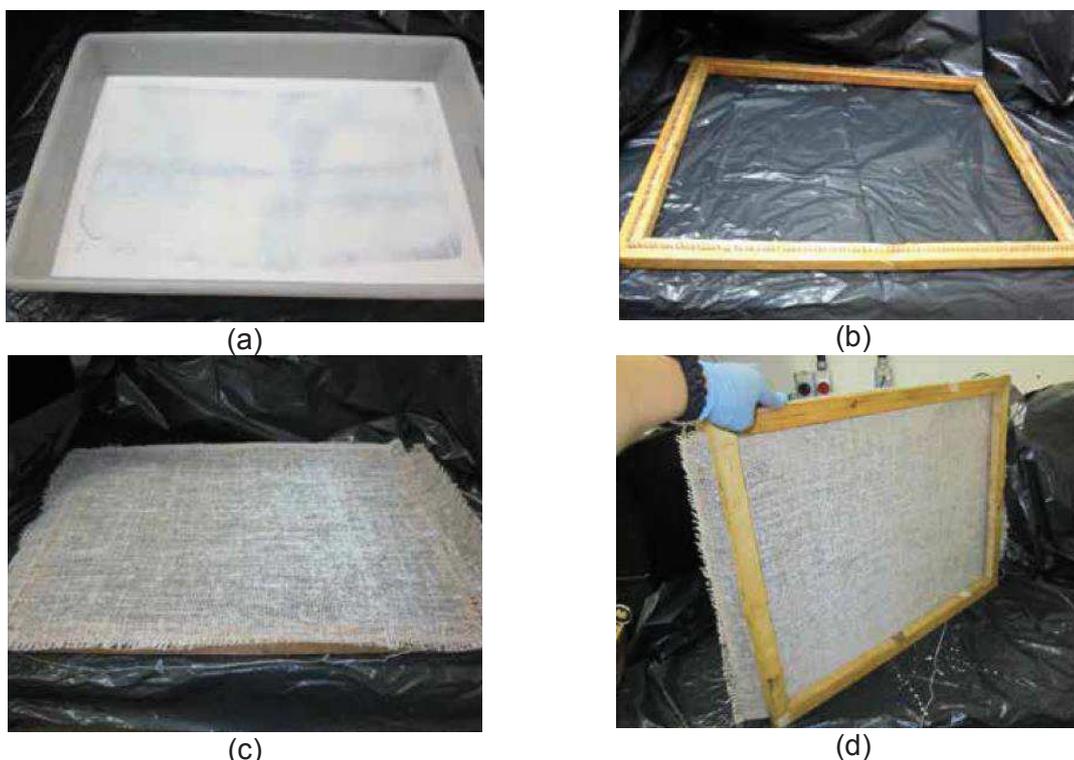
O tratamento das fibras por impregnação de soluções poliméricas promove a união dos filamentos através de adesivo e produz uma seção transversal homogênea (HEGGER; VOSS, 2008). O que ocorre é a ativação dos filamentos internos, ou seja, o adesivo polimérico tem a capacidade de penetrar nas fibras, o que resulta fisicamente na ligação e forte interação entre os filamentos do têxtil e consequentemente no ganho mecânico de resistência do compósito cimentício reforçado (RAUPACH *et al.*, 2006).

Rempel, Kulas e Hegger (2015) relatam resultados positivos nas propriedades mecânicas dos elementos reforçados com tecidos impregnados com resina epóxi e com estireno butadieno em relação às peças reforçados com tecidos sem tratamento.

Outras pesquisas também realizaram a impregnação de polímero estireno butadieno em tecido de juta utilizado como reforço de compósito cimentício (FIDELIS, 2014; FIDELIS *et al.*, 2019) e observaram os benefícios do tratamento.

Para definir o tempo de impregnação, Fidelis (2014) realizou ensaio de absorção do tecido no polímero e verificou que após 50 min de exposição, não há ganho de massa expressivo do tecido. O processo de impregnação utilizado consistiu em imergir as fibras no polímero estireno butadieno por 50 minutos e na sequência, esticá-los num quadro de madeira com pregos, onde ficaram para secar por 24h em ambiente com temperatura controlada (38 ± 2 °C) (Figura 8).

Figura 8 - Tratamento do tecido de juta por impregnação: (a) imersão do tecido no polímero; (b) quadro de madeira com pregos para fixação do tecido impregnado; (c) fixação do tecido no quadro de madeira e (d) posição do quadro para secagem



Fonte: Fidelis (2014, p. 123).

Outra técnica que pode ser utilizada é a imersão da fibra em suspensão de sílica ativa antes de adicioná-lo à mistura cimentícia. Este processo aumenta a rigidez da fibra e diminui a absorção de umidade. Dessa maneira, usando esse tratamento, dois problemas que causam a degradação da fibra podem ser resolvidos: ataque químico da fibra pelo ambiente alcalino da matriz cimentícia e o crescimento dos produtos de hidratação, principalmente hidróxido de cálcio, em torno dos filamentos nos fios. Durante a imersão na pasta de sílica, os espaços entre os filamentos do têxtil são preenchidos com partículas de microssílica, local onde é mais necessário eliminar de forma eficiente o crescimento de hidróxido de cálcio (TOLÊDO FILHO *et al.*, 2003; YAN; KASAL; HUANG, 2016).

Portanto pode-se concluir que a incorporação direta de sílica ativa nos fios do têxtil antes da incorporação deste no compósito à base de cimento foram considerados um meio eficaz para a obtenção de um compósito de durabilidade melhorada, uma vez que cria uma zona de interface de baixa alcalinidade entre a fibra e a matriz. Os compósitos preparados após esse tratamento não perderam resistência

à flexão durante um período de envelhecimento acelerado (BENTUR; DIAMOND, 1987; TOLÊDO FILHO *et al.*, 2003).

2.3 Matriz Cimentícia Leve

A Norma Brasileira NBR 8953 (ABNT, 2015) caracteriza como leve o concreto que apresenta massa específica seca inferior a 2000 kg/m^3 , enquanto o concreto convencional apresenta valor em torno de 2200 kg/m^3 e 2600 kg/m^3 .

Existem três tipos de concreto leve em que a redução da massa específica com a introdução de ar em substituição de materiais sólidos ocorre de diferentes maneiras: o concreto celular, o concreto sem finos e o concreto com emprego de agregado leve (NEVILLE, 2016).

O Concreto celular é uma argamassa com agregado miúdo com diâmetro reduzido, geralmente máximo de $100 \mu\text{m}$, expandida por algum agente aerador que formam bolhas de ar. Já o concreto sem finos, possui somente aglomerante e agregado graúdo, e é constituído por vazios na mistura pela falta de finos. Finalmente o concreto com agregados leves, resulta da substituição parcial ou total da brita basáltica por agregados leves, sendo que os vazios são inseridos através do próprio agregado (NEVILLE, 2016; WONGKEO; CHAIPANICH, 2010).

O uso do concreto leve pode ser observado desde em estruturas de grande porte como pontes, edificações de múltiplos pavimentos e plataformas petrolíferas, como no emprego da fabricação de painéis pré-fabricados, blocos para vedações e mobiliários. Na grande maioria dos casos, a utilização deste material ocorre principalmente por questões de sobrecargas, como em obras de reparos, ou por exigências do projeto em que é mais apropriado usar um concreto com densidade inferior ao habitual (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011; SATISH, LEIF, 2002; SILVA, 2007).

Portanto este tipo de concreto é utilizado em vedações, divisórias e preenchimento de lajes, pois contribui para reduzir o carregamento da estrutura e conseqüentemente as dimensões dos elementos estruturais. Além disso, é facilmente manejado pelos usuários e instalado no caso do segmento mobiliário (NEVILLE, 2016; SATISH; LEIF, 2002; SILVA, 2007).

A baixa massa específica destaca-se como sendo a principal vantagem dos concretos leves, porém esta redução do peso próprio alcançada vai além de ser

efetiva no que diz respeito somente à leveza, possui ótimos desempenhos de isolamento térmico, acústico e de resistência ao fogo (FERREIRA, 1987).

Para reduzir a perda de calor e diminuir o consumo de energia, os materiais com menor condutividade térmica, devem ser preferidos. A baixa condutividade térmica do ar aprisionado na estrutura porosa do concreto leve é a principal razão para a capacidade de isolamento térmico mais elevado (REAL, 2016; TASDEMIR; SENGUL; TASDEMIR, 2017).

De acordo com Neville (2016), o concreto leve pode ser classificado de acordo com a massa específica. Há três categorias de concreto leve e agregados específicos indicados para cada uma dessas aplicações. Por exemplo, a argila expandida, o folhelho e a ardósia, podem ser destinados ao uso em concreto estrutural com massa específica entre 1350 e 1900 kg/m³ e resistência mínima de 17 MPa. Já a escória expandida de alto forno e a pedra-pomes são indicadas para concreto de moderada resistência à compressão, entre 7 e 17 MPa e propriedades de isolamento térmico intermediárias em relação aos demais tipos. Por último, a vermiculita e a perlita geram um concreto de resistência muito baixa, com alta retração, mas com excelente isolante térmico. Portanto trata-se de um concreto com baixa massa específica, valores entre 300 e 800 kg/m³, utilizado para fins não estruturais, principalmente para isolamento térmico.

Se as propriedades no estado endurecido do concreto leve são diferentes em relação ao concreto convencional, algumas propriedades no estado fresco também se distinguem. Por conta da alta absorção dos agregados leves, a trabalhabilidade, por exemplo é prejudicada. Além disso, a demanda de água nos traços de concreto leve é superior devido ao alto índice de vazios e absorção de água dos agregados leves (CLARKE, 2005).

Portanto, para a dosagem do concreto leve, deve-se conhecer a absorção dos agregados que serão utilizados. Para isso, deve-se imergi-lo por 24 horas em água e analisar sua absorção. Se o agregado possuir uma taxa de absorção maior que 10% recomendam-se uma pré-saturação (ROSSIGNOLO, 2003).

2.3.1 Concreto com Agregado Leve de Vermiculita Expandida

De acordo com Rashad (2016) a vermiculita expandida (VE) na matriz cimentícia exhibe algumas vantagens como a diminuição da massa específica,

aumento do isolamento acústico, isolamento térmico e resistência ao fogo, bem como algumas desvantagens como a diminuição da resistência mecânica, aumento da porosidade e da absorção de água.

Essa diminuição da massa específica e da resistência à compressão, também foi verificada por Mo *et al.* (2018). De acordo com os autores, devido à natureza leve do agregado, a presença de vermiculita expandida como substituto parcial da areia, resultou no decréscimo dessas propriedades.

Kumar *et al.* (2019), ao estudarem blocos leves de concreto de vermiculita, também obteve valores baixos de 1800 kg/m^3 como densidade dos blocos e resistência à compressão média de 5 MPa.

No entanto, conforme Rashad (2016), as desvantagens do uso da vermiculita, como a baixa resistência, podem ser mitigadas com adições minerais e de fibras. Koksall, Gencel e Kaya (2015), por exemplo, estudaram o efeito da sílica ativa (SA) nas propriedades de argamassas leves com diferentes percentuais de vermiculita em relação a massa de cimento, e a pesquisa concluiu que as resistências das argamassas variaram entre 3,9 MPa e 16,4 MPa dependendo da composição. O desenvolvimento das resistências das argamassas diminuiu com o aumento da VE, porém aumentou com o incremento da porcentagem de SA.

Em relação as adições minerais na matriz cimentícia, um efeito negativo, está relacionado a trabalhabilidade no estado fresco, porém essa propriedade pode ser compensada com o uso de aditivo superplastificante. Koksall, Gencel e Kaya (2015), observaram essa desvantagem com o uso de SA na matriz à base de vermiculita, devido à superfície específica dessa pozolana ser muito elevada.

Quanto a porosidade das argamassas, de acordo com Koksall, Gencel e Kaya (2015), houve um aumento considerável com o aumento do teor de vermiculita, porém uma diminuição com a adição de sílica ativa, devido ao efeito filler da SA. Já em relação à absorção de água, mais de um estudo, observou que há um aumento proporcional ao aumento do teor de vermiculita, o que está correlacionado com a alta capacidade de retenção de água e porosidade dos agregados de vermiculita (KOKSALL; GENCEL; KAYA, 2015; MO *et al.*, 2018).

Em relação as diferentes adições de fibras em matrizes VE, autores verificaram o efeito em algumas propriedades. Abdeen e Hodhod (2010), por exemplo, observaram que 0,4% de fibras de linho, aumentou o módulo de elasticidade e resistência ao impacto, porém diminuiu a resistência à compressão e à tração. Gencel

et al. (2013), ao incorporar 1% de fibra sintética de polipropileno, constatou maior resistência à compressão e à flexão em relação à matriz de gesso de referência. Já Köksal *et al.* (2015) ao adicionar 0,5% e 1,5% de fibras de aço na argamassa cimentícia, averiguaram o aumento da resistência à compressão antes e depois da reação ao fogo.

De forma geral, o aumento de vermiculita, de acordo com Koksai, Gencel e Kaya (2015), resulta na redução do teor de cimento e conseqüentemente, diminuição da massa específica da argamassa endurecida, o que significa um incremento no desempenho térmico da argamassa. Ou seja, uma alta porosidade e baixa massa específica estão relacionados à condutividade térmica.

Portanto, pode-se concluir que a VE é adequada para muitas aplicações, como agregado para concreto leve, argamassa leve, tijolo refratário, placa decorativa, preenchimento de piso, forro isolante e para melhor acústica em auditórios, teatros e hospitais, por exemplo (RASHAD, 2016).

2.3.2 Tratamento da Matriz Cimentícia

Yan, Kasal e Huang (2016) relatam que para obter maior durabilidade da fibra ou tecido no compósito reforçado, deve-se buscar um concreto de baixa alcalinidade, através da adição de pozolanas como cinza de casca de arroz, escória de alto forno, metacaulim, cinza volante, sílica ativa ou argilas calcinadas, em percentuais de substituição ao cimento Portland.

As pozolanas fazem com que a reação seja completada durante o processo de hidratação entre o hidróxido de cálcio e a sílica amorfa, produzindo o sal de silicato de cálcio hidratado estável, que promove a transformação de portlandita em gel C-S-H. Portanto, os materiais cimentícios suplementares (MCS) trabalham na mitigação da degradação dos compósitos à base de cimento reforçados com fibras, devido ao ciclo de secagem a úmido, a redução do hidróxido de cálcio e a estabilização do conteúdo alcalino (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015; MOHR; BIERNACKI; KURTIS, 2007).

Yan, Kasal e Huang (2016) comentam diversas pesquisas com a substituição parcial do cimento Portland por MCS na matriz. Um exemplo é o uso de sílica ativa e escória de alto-forno (10% e 40% em relação a massa de cimento Portland). Já Peled (2018) analisou matrizes com substituições parciais de 25% de cinza volante e 7% de

sílica ativa em relação a massa de cimento. Há ainda estudos que indicam o uso de metacaulim para substituir 50% do cimento na matriz, de forma a melhorar a durabilidade do compósito têxtil (FIDELIS *et al.*, 2016; FIDELIS *et al.*, 2019).

Portanto os principais materiais que devem constituir a matriz, capazes de proporcionar as propriedades esperadas, segundo Vogel (2014), são o cimento, pozolanas como a sílica ativa e cinza volante, agregados miúdos, aditivos e água. Além disso para uma melhor aderência entre a matriz e o reforço, os materiais constituintes devem possuir dimensões adequadas para a geometria do tecido e a mistura deve apresentar elevada fluidez no estado fresco, para que envolva totalmente o têxtil (SHAMS *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2016).

2.4 Métodos de Avaliação dos Compósitos Têxteis

A seguir serão identificados os principais métodos de avaliação dos compósitos têxteis, bem como aplicá-los. Serão elencados nesta revisão bibliográfica, métodos que serão utilizados nesta pesquisa, tais como para caracterizar o reforço têxtil, como avaliar a atividade pozolânica da matriz, as propriedades mecânicas de tração direta, tração na flexão e impacto, bem como analisar a microestrutura do compósito têxtil.

2.4.1 Identificação e Caracterização dos Tecidos

Ao estudar compósitos têxteis, é de suma importância conhecer a geometria e a resistência à tração direta do tecido que está sendo empregado como reforço. A fim de elucidar as influências da geometria dos tecidos isolados, quando solicitados às ações de tração direta, diversos autores realizaram este ensaio em suas pesquisas e apresentaram os dados nos seus estudos (MESTICOU *et al.*, 2017; PARK *et al.*, 2017; VERVLOET *et al.*, 2018).

Quanto à caracterização química, de acordo com Kajiwara e Ohta (2009), os tecidos podem ser identificados através de análise de espectroscopia de infravermelho. A Tabela 3 resume as bandas de absorção espectroscópica de infravermelho para diferentes fibras sintéticas e naturais.

Tabela 3 - Bandas de absorção espectroscópicas de infravermelho de fibras

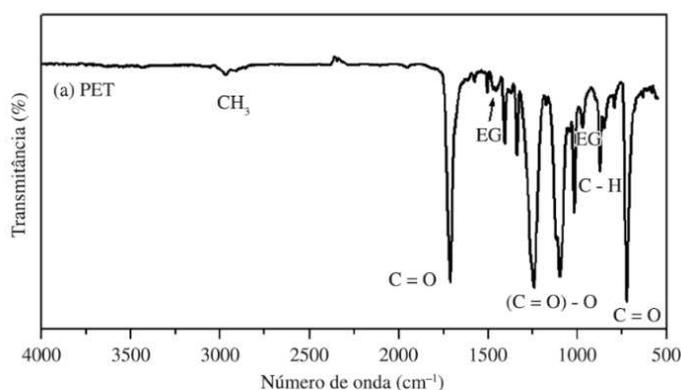
Fibra	Bandas de absorbância características (cm ⁻¹)
Poliétileno (PE)	2900 2850 1470 1460 1370 740 720
Polipropileno (PP)	2970–2940 2850 1450 1370 1160 990 970 840
Nylon 6	3300 3050 2950 2850 1630 1530 1450 1250 680 570
Nylon 46	3300–2950 2850 1630 1530 1470 1270 930 680 570
Poliéster (PET)	1730–1410 1340 1250 1120 1100 1020–870 730
Algodão	3450–3250 2900 1630 1430 1370 1100–970 550
Lã	3400–3250 2900 1720–1600 1500 1220
Seda	3300 2950 1710–1630 1530–1500 1440 1220 610 540

Fonte: Kajiwara e Ohta (2009, p. 87).

Vanini *et al.* (2013), também caracterizaram o PET através de ensaio de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), e verificaram que a amostra apresenta deformações típicas nas regiões de 2900 cm⁻¹ para o grupo CH₃; 1715 e 730 cm⁻¹ para o grupo C=O; 1460 e 977 cm⁻¹ para o EG; e 1250 cm⁻¹ para o grupo (C=O)-O.

Na Figura 9 é apresentada a espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) típico do poliéster com as deformações descritas por Vanini *et al.* (2013).

Figura 9 - Espectro de FTIR esperado para o polímero PET

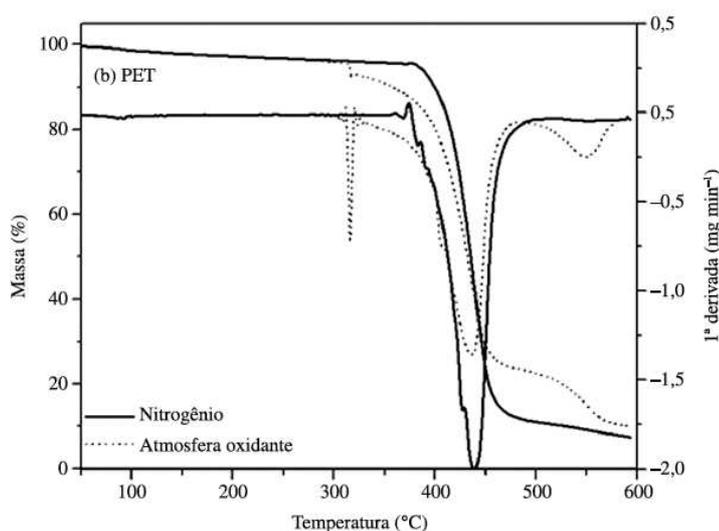


Fonte: Vanini *et al.* (2013, p. 429).

Outra técnica empregada para caracterizar tecidos, é a termogravimetria (TG), que realiza análise térmica. No ensaio, o equipamento registra a variação de massa da amostra ao sofrer transformação física (sublimação, evaporação ou condensação) ou química (degradação, decomposição ou oxidação) quando é submetida a um aquecimento gradativo. Assim é gerada a curva termogravimétrica no gráfico (eixo x correspondente a temperatura e o eixo y a variação de massa) e a derivada da TG (DTG). A área dos picos da DTG é proporcional ao total de massa perdida pela amostra (MOTHÉ; AZEVEDO, 2009).

Conforme Vanini *et al.* (2013), o PET apresenta boa estabilidade térmica, 310-600°C em atmosfera oxidante e 370-500°C em atmosfera inerte. Em atmosfera oxidante, apresenta três episódios de perda de massa: um a 310°C, devido a presença de co-mônômeros comodietilenoglicol, DEG, ou aditivos químicos; outro a 350°C, conseqüente da presença de EG na cadeia do PET; e finalmente a última perda de massa a 490°C, correspondente aos grupos aromáticos. A Figura 10, mostra os resultados de TG/DTG do PET.

Figura 10 - Gráfico de TG/DTG em atmosfera inerte e oxidante para PET



Fonte: Vanini *et al.* (2013, p. 428).

Outros autores, como Ohta e Kajiwara (2009), também utilizaram da TG/DTG para avaliar a resistência ao calor das fibras. Yan, Kasal e Huang (2016), por exemplo, caracterizaram as fibras em pesquisas sobre a estabilidade térmica do tecido de cânhamo como reforço de compósitos cimentícios. A técnica foi estudada em função da perda de massa em relação a temperatura (uma taxa de aquecimento de 10°C/min de 25 a 1000°C) em atmosfera de argônio.

2.4.2 Avaliação da Atividade Pozolânica da Matriz Cimentícia

O estudo da atividade pozolânica das matrizes cimentícias com baixo teor de hidróxido de cálcio já foi amplamente utilizado por diversos autores através de ensaio de termogravimetria (MELO FILHO, 2012; BALDUSCO *et al.*, 2017; TIRONI *et al.*, 2017; ZÁLESKÁ *et al.*, 2018).

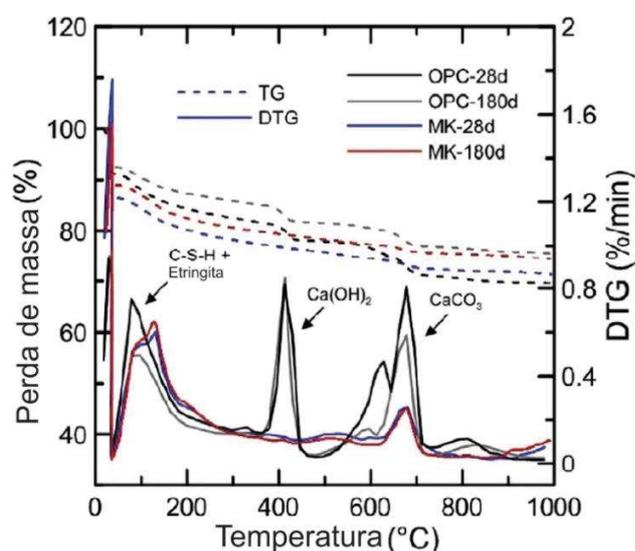
A perda de massa decorrente da desidroxilação do hidróxido de cálcio é computada no ensaio, de forma a permitir a quantificação de compostos químicos como $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e CaCO_3 . Portanto ao realizar a adição mineral na pasta, com o ensaio de TG/DTG é possível quantificar o consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durante a hidratação, e determinar a pozolanicidade do material (DWECK *et al.*, 2009).

Para obter uma matriz cimentícia com baixo teor de hidróxido de cálcio em compósitos reforçados com têxteis, Fidelis (2014) testou cinco traços (40MK 10CV; 30MK 20CV; 25MK 25CV; 20MK 30CV; 10MK 40CV) com substituição parcial do cimento (50%) por metacaulim (MK) e cinza volante (CV) através de ensaios de termogravimetria (TG/DTG) em pasta aos 28 dias de cura. O equipamento operou com uma taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ da temperatura ambiente até 1000°C , em atmosfera de nitrogênio e fluxo do registrador de $100 \text{ mL}/\text{min}$. A matriz que consumiu maior teor de hidróxido de cálcio (CH) foi a 40MK 10CV (0,69% de CH).

Fidelis *et al.* (2016), também utilizaram o ensaio de termogravimetria aos 28 e 180 dias para explicar o fato do melhor desempenho dos compósitos reforçados com têxteis em matrizes em que há substituição da massa de cimento por metacaulim (MK) se comparados aos sem substituição (OPC), principalmente na questão da durabilidade ao gerar matrizes com menor alcalinidade.

Devido a reação pozolânica, observa-se que a quantidade de hidróxido de cálcio é muito pequena após 28 dias de cura (menor que 0,5%) e que o CH foi totalmente consumido após os 180 dias de idade (Figura 11).

Figura 11 - Análise de TG e DTG realizada nas matrizes PC e MK aos 28 e 180 dias



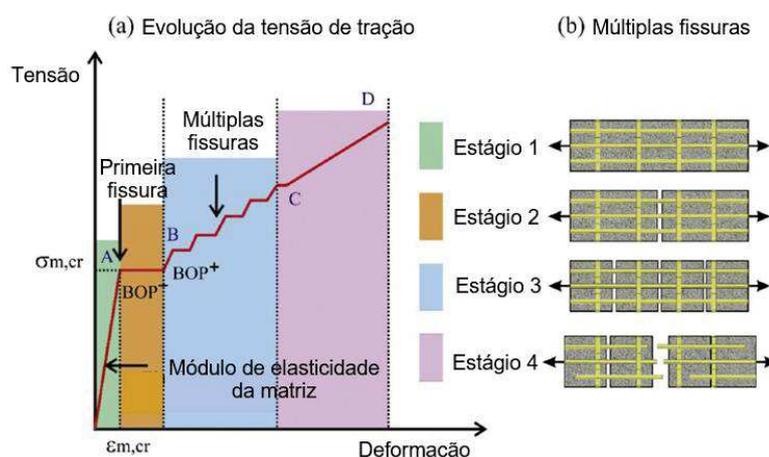
Fonte: Fidelis *et al.* (2016, p. 12).

2.4.3 Propriedades Mecânicas do Compósito Têxtil

De acordo com Butler, Mechtcherine e Hempel (2009), a principal característica do compósito reforçado com têxtil é a sua resistência à alta tensão e o seu comportamento pseudo-dúctil, isto é, a tolerância deste material a grandes deformações. Neste sentido, são importantes abordagens que relacionem o compósito têxtil quanto as propriedades à tração e flexão (MOBASHER, 2016).

Quatro distintos estágios são identificados na curva de tensão x deformação de compósitos têxteis, conforme Figura 12. No estágio 1 o elemento ainda não está fissurado, corresponde a faixa elástico-linear em que a matriz e a fibra contribuem ao compósito. Este estágio termina quando ocorre a primeira fissura e a resistência à ruptura da matriz é atingida. O estágio 2 representa a primeira fissura e sua propagação por toda a largura da amostra. Pode-se observar nesse estágio que o comportamento da curva exibe crescimento do deslocamento com pouca variação da carga. Já no estágio 3, a rigidez diminui gradualmente devido a formação de múltiplas fissuras distribuídas em intervalos regulares, porém a capacidade de carga do compósito fissurado continua aumentando. Após a conclusão das múltiplas fissuras, no estágio 4, ocorre apenas a sollicitação do reforço (YAO *et al.*, 2015).

Figura 12 - Comportamento à tração do compósito têxtil, incluindo (a) evolução da tensão de tração, (b) mecanismo de fissuração múltipla

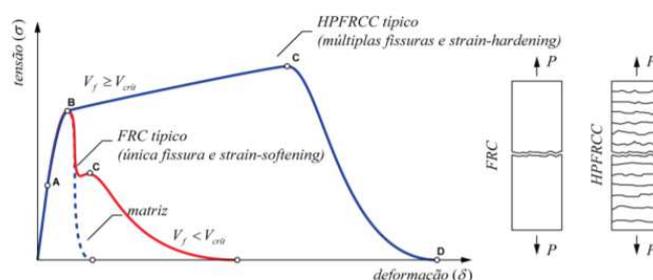


Fonte: Yao et al. (2015, p. 50).

A geração de múltiplas fissuras, bem como a capacidade de distribuir essas tensões ao longo do reforço, de forma a acarretar deformação sem aumentar a abertura das fissuras, pode ser considerada a principal característica do compósito têxtil de acordo com Peled, Bentur e Mobasher (2017).

Já Pereira (2017) ao analisar diversos dados, verificou que os corpos de prova formados por materiais cimentícios quando submetidos à tração direta, podem apresentar comportamentos de strain-softening, concretos reforçados com fibras (FRCs) em que a amostra apresenta uma única fissura, e após a tensão decresce, ou de strain-hardening, compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados com fibras (HPFRCC) que possuem resistência pós-fissuração maior que a observada à primeira fissura (Figura 13).

Figura 13 - Comportamento típico dos FRCs e HPFRCCs sob tração direta



Fonte: Pereira (2017, p. 67).

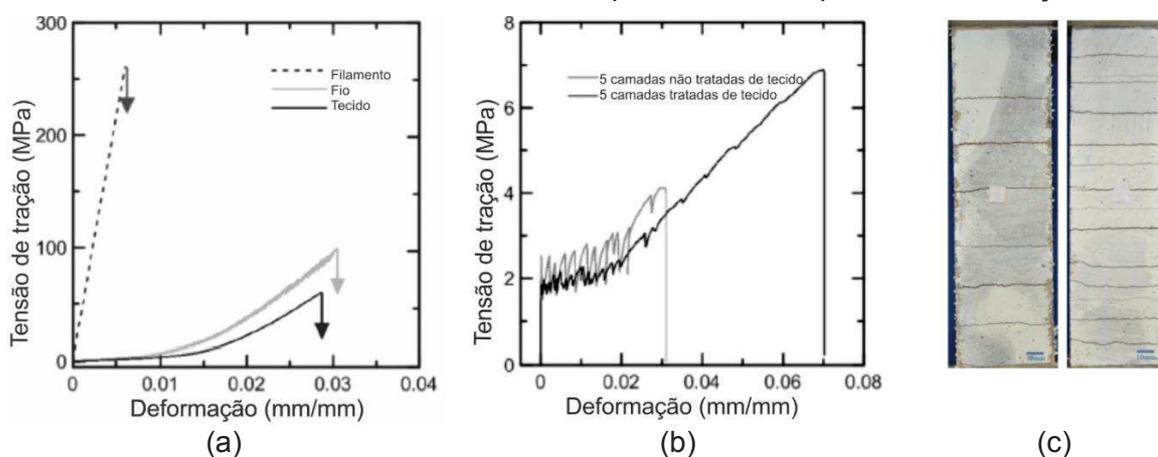
Outro fato que é observado por Hegger e Voss (2008), é que as fibras isoladas possuem resistência à tração superior ao compósito reforçado com a mesma fibra, o que é chamado de fator de eficiência.

Portanto, pode-se concluir que uma das principais análises em relação ao comportamento mecânico de um compósito têxtil, é a resistência de tensão uniaxial pela resistência à tração direta, pois para Peled, Bentur e Mobasher (2017) aborda os efeitos decorrentes do tipo e geometria do tecido, traço da matriz e parâmetros de dimensionamento.

O procedimento recomendado para este ensaio é apresentado por Peled *et al.* (2016) e TC 232-TDT (RILEM, 2016). O comprimento mínimo da amostra deve ser de 500 mm e a largura não deve ser inferior a 60 mm. A relação comprimento/largura deve ser de pelo menos 5:1 e a espessura não deve ser inferior a 6 mm. Já a determinação das tensões está relacionada à seção transversal da amostra, e, se necessário, pode ser relacionada à seção transversal do reforço têxtil.

Fidelis *et al.* (2019) estudou o comportamento de tração direta do têxtil e do compósito reforçado com 5 camadas de tecido de juta não tratadas e tratadas com polímero estireno butadieno (Figura 14). O estudo concluiu que o tratamento melhora a resistência mecânica do compósito e resulta num espaçamento menor das trincas.

Figura 14 - Tensão x deformação de (a) filamento, fio e tecido de juta, (b) compósitos reforçados com 5 camadas de tecido de juta não tratado e tratado e (c) compósitos têxteis com fibras não tratadas e tratadas respectivamente, após testes de tração



Fonte: Fidelis *et al.* (2019, p. 252).

Outras pesquisas realizaram ensaios de tração direta com diversos teores e número de camadas de tecidos nos compósitos reforçados com têxteis e verificaram que há um aumento do número de fissuras com o aumento da quantidade de fibras (MELO FILHO, 2012; FIDELIS, 2014).

Para os compósitos com 1, 3 e 5 camadas de tecido de juta sem tratamento com polímero, Fidelis (2014) observou que com o aumento do número de camadas, os compósitos apresentaram maior capacidade de deformação, e com uma camada houve menor quantidade de fissuras. Nos compósitos com tecido tratado houve aumento da resistência em comparação aos sem tratamento.

É importante salientar também que os resultados dos ensaios de tração direta podem variar de acordo com fatores como dimensões e forma dos corpos de prova, controle, método e equipamento de ensaio, graus de liberdade dados às extremidades dos corpos de prova, bem como se ocorrem uma única ou múltiplas fissuras (MIER, 2013; ACI 544.4R, 1988).

Neste sentido, os ensaios de tração direta podem ser realizados em amostras com outros formatos, como por exemplo corpos de prova com forma de “osso de cachorro” ou dog bone shaped.

Em estudos em concreto com fibras curtas este método é largamente difundido, como no estudo realizado por Pereira (2017) em que foi investigado o comportamento mecânico de um concreto autoadensável reforçado com fibras de aço. Japan Society of Civil Engineers (2008) também prescreve recomendações e diretrizes para ensaios

de tração direta em amostras do tipo dog bone para compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados com fibras (HPFRCC).

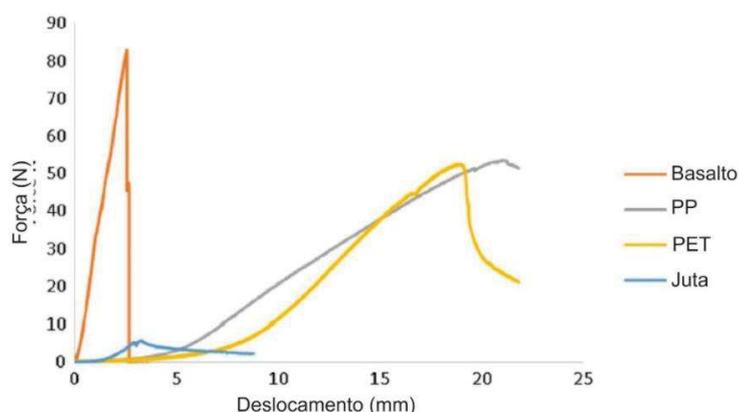
Quanto a tração na flexão, Kamani, Dolatabadi e Jeddi (2017) comentam que a evolução do ensaio pode ser dividida em três estágios. No estágio 1 o concreto suporta a tensão, portanto não há fissuras e sim a influência do regime elástico do material. No estágio 2 as fissuras já ocorrem. Num primeiro momento pode ocorrer a multiplicação das fissuras, num segundo momento apenas o aumento da abertura das existentes e a carga é transferida diretamente para o tecido. A redução da carga e a falha do sistema ocorre no estágio 3.

A análise do comportamento da tração na flexão pelo método dos quatro pontos é normatizada pela ASTM C947-3 (2016) que prescreve procedimentos de ensaio para verificação do comportamento à flexão em elementos de concreto reforçados com fibra.

Pesquisas como a de Sivaraja *et al.* (2010) e Claramut *et al.* (2017) realizaram ensaios de tração à flexão em compósitos reforçados com fibras sintéticas e celulósicas. Claramut *et al.* (2017) analisaram o efeito do número de camadas e tratamento dos não tecidos de linho e observou que há um aumento na tensão de flexão e energia de fratura com o aumento do número de camadas. Por outro lado, para o mesmo número de camadas, os compósitos com não tecidos tratados apresentaram uma maior resistência à flexão que os não tratados.

Jamshaid *et al.* (2017) estudaram as características de ligação entre a estrutura de fios de poliéster e matriz de cimento através de teste de arrancamento dos fios em compósito cimentício reforçado com têxtil. As curvas de força/deslocamento para todos os fios estudados estão mostradas em Figura 15.

Figura 15 - Força x deslocamento para fios em matriz cimentícia



Fonte: Jamshaid *et al.* (2017, p. 6).

O arrancamento ocorre em 3 estágios: no caso de falha de extração, o comportamento da ligação antes do pico é regido por área crescente que é seguida por descolagem do fio da matriz através da propagação de fissuras interfaciais. Por fim, ocorre a força de extração restante, ou seja, a força da "cauda" é baseada no atrito, isto é, interação de atrito entre a fibra e a matriz. De acordo com Jamshaid *et al.* (2017), no caso do PET, a adesão não é boa e pode ser visto por alto deslocamento/deformação. Fibras de baixo módulo, como PP e PET, aumentam principalmente a ductilidade dos compósitos, mas não a sua força em um comportamento por deformação.

Para finalizar, uma importante propriedade mecânica dos materiais compósitos reforçados com têxteis a ser verificada, é a influência dos impactos. Pelisser *et al* (2012) e Nili e Afroughsa (2009) realizaram este tipo de ensaio em amostras cilíndricas de 150 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura, de acordo com a ACI-544. (American Concrete Institute (ACI), 1989). Esse ensaio consiste em aplicar na amostra golpes com uma esfera de aço (6,35 cm de diâmetro) a partir de um martelo a uma altura de 457 mm e observar a o número de golpes necessários para causar a primeira rachadura visível e a falha final da amostra.

De acordo Pelisser *et al.* (2012), com um teor de fração de volume mais elevado de fibras recicladas de PET (0,18% e 0,30%), houve o aumento significativo da resistência ao impacto das amostras de concreto reforçado com fibras em relação à referência aos 28 dias. No entanto, aos 150 dias, o comportamento do concreto reforçado com PET era semelhante ao concreto de referência da mesma idade, o que indica a degradação das fibras no meio alcalino do concreto.

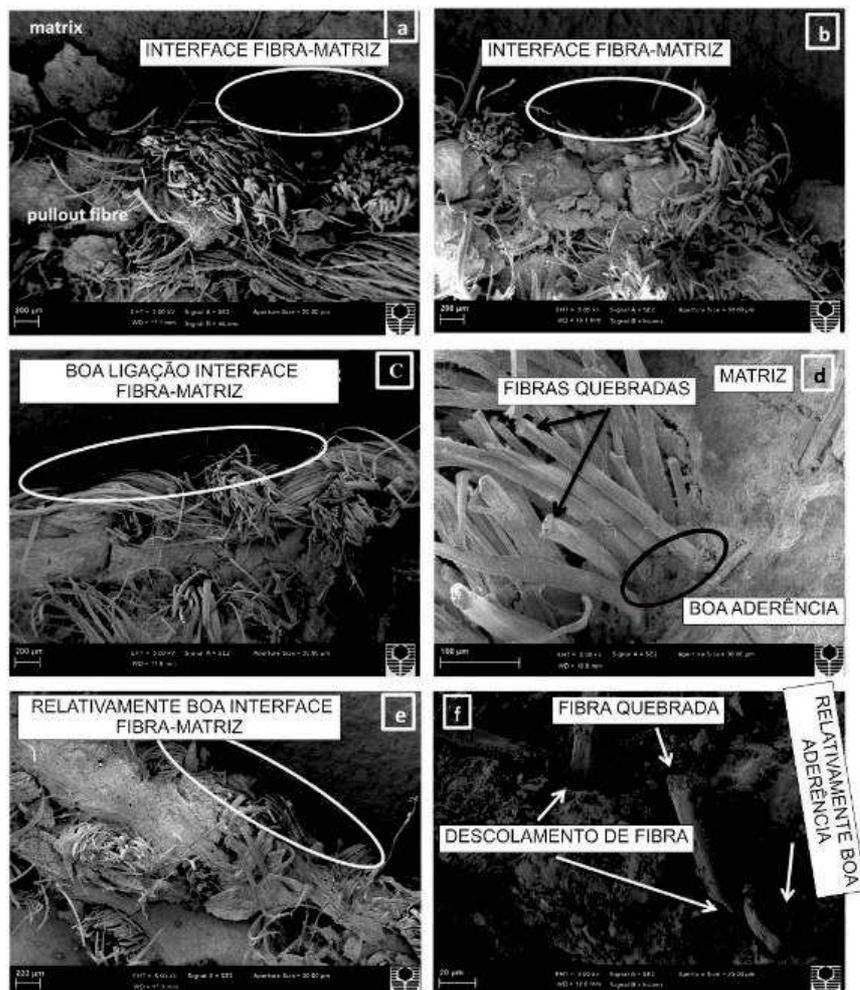
Nili e Afroughsa (2009) reforçam que vários métodos de ensaio para avaliar a resistência ao impacto do concreto já foram utilizados, no entanto, nenhum desses métodos já foram padronizados. De acordo com Silva (2004), não existem normas específicas para compósitos não convencionais e na literatura há uma grande variedade de procedimentos e geometrias de corpos de prova que podem ser empregados. A NBR 11675 (ABNT, 2016), por exemplo, regulamenta ensaio de corpo duro para divisórias leves.

2.4.4 Identificação de Falhas na Microestrutura Através de MEV

Ao pesquisar na bibliografia, pode-se observar diversas pesquisas que utilizam microscópio eletrônico de varredura (MEV) para analisar a microestrutura de compósitos reforçados com têxteis, principalmente para verificar questões de aderência entre a fibra e a matriz, bem como possíveis falhas ocorridas (ARDANUY *et al.*, 2011; ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015; ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016; FIDELIS *et al.*, 2016; FIDELIS *et al.*, 2019).

De acordo com Yan, Kasal e Huang (2016), nos compósitos reforçados com têxteis, as falhas na microestrutura são: descolagem interfacial entre fibra e matriz, bem como ruptura de fibra e fratura da matriz de cimento. Usa-se as micrografias do microscópio eletrônico de varredura (MEV) para identificar essas falhas (Figura 16).

Figura 16 - Micrografias de MEV: (a) e (b) Compósito cimentícios reforçado com tecido de cânhamo, (c) e (d) nanocompósito reforçado com cânhamo e 1% de nanoargila, (e) e (f) nanocompósito reforçado com cânhamo e 3% de nanoargila



Fonte: Yan, Kasal e Huang (2016, p. 111).

No estudo de Hakamy, Shaikh e Low (2013), com tecidos de cânhamo como reforço de compósitos cimentícios, as micrografias de MEV também foram utilizadas para identificar falhas na microestrutura. Nas micrografias pode-se visualizar a interface entre a fibra e a matriz contendo 1 e 3% em massa de nanoargila após os ensaios de tenacidade a fratura.

A análise da microestrutura de nanocompósitos reforçados com cânhamo contendo 1% em peso de nanoargila mostra uma boa interface entre a fibra e a matriz bem como a presença de produtos de hidratação na superfície da fibra indicando uma melhor ligação da interface (Figura 17a). Por outro lado, pobre interface fibra/matriz, descolamento de fibra e microtrincas são observados nos nanocompósitos reforçados com cânhamo contendo 3% em massa de nanoargila (Figura 17b), o que revela uma matriz fraca (HAKAMY; SHAIKH; LOW, 2013).

Figura 17 - Imagens de MEV após ensaio de tenacidade à fratura:

- (a) nanocompósito reforçado com cânhamo contendo 1% em massa de nanoargila
- (b) nanocompósito reforçado com cânhamo contendo 3% em massa de nanoargila



Fonte: Hakamy, Shaikh e Low (2013, p. 1684).

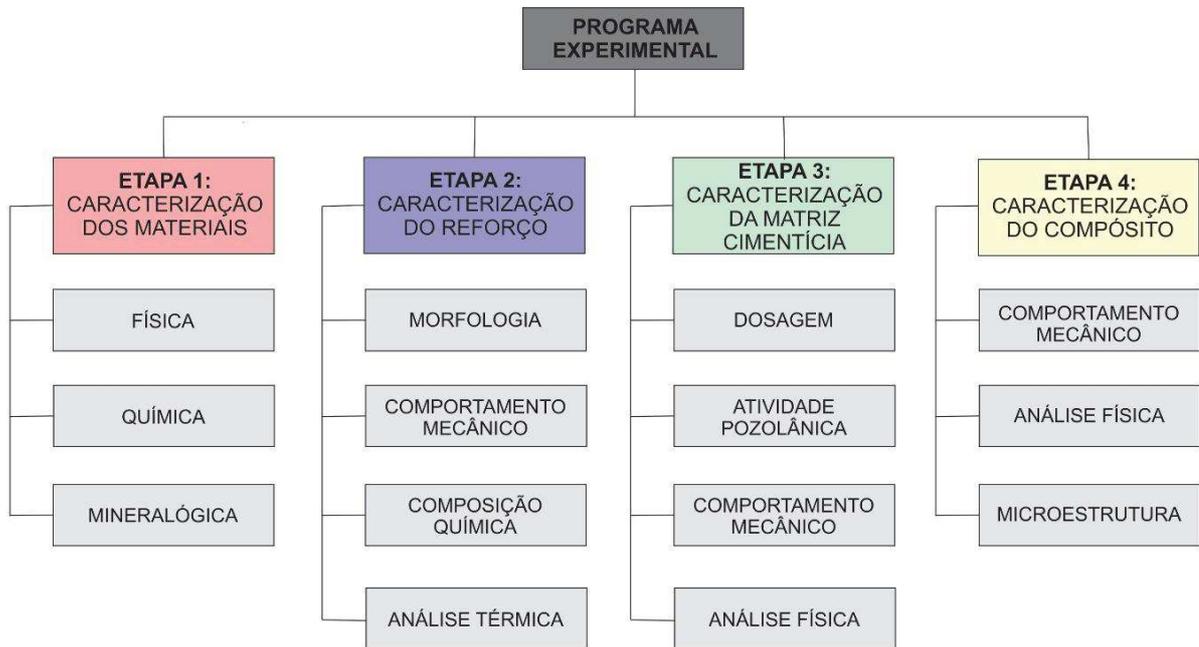
Hughes *et al.* (2013) apresentaram um estudo exploratório sobre o biodeterioração mecânica de fibras sintéticas que reforçam concreto marinho. A pesquisa utilizou MEV em amostras para observar a colonização na interface com a matriz bem como a degradação do compósito.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta o programa experimental desenvolvido para alcançar os objetivos propostos na pesquisa. O programa experimental foi dividido em quatro etapas, sendo que cada uma é ramificada e constituída por diferentes processos de ensaios e análises (Figura 18).

A primeira etapa consiste basicamente na caracterização física, química e mineralógica dos materiais. A segunda etapa contempla a caracterização específica do reforço a ser utilizado no compósito cimentício, ou seja, do resíduo de tecido de poliéster com e sem tratamento por impregnação. Na terceira etapa, foi caracterizada a matriz cimentícia tanto no estado fresco como no endurecido. A quarta e última etapa consiste na caracterização do compósito cimentício têxtil reforçado com resíduo de vestuário. Os ensaios verificaram o comportamento mecânico e a microestrutura dos compósitos reforçados com o tecido de poliéster impregnado e sem impregnação.

Figura 18 - Organograma geral das etapas do programa experimental



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

3.1 Planejamento Experimental

Tendo em vista a amplitude de variáveis e a metodologia utilizada, apresenta-se nos tópicos subsequentes o planejamento do programa experimental.

As definições das variáveis são determinadas de maneira a alcançar os objetivos propostos pela pesquisa. Foram estabelecidos fatores fixos e de controle, tendo em vista, a possibilidade de mensurar a influência que exercem sobre as variáveis de resposta estabelecidas.

3.1.1 Fatores de Controle com um Nível Fixo de Estudo

Os fatores fixos são:

- a) Tipo de cimento - adotou-se um único tipo de cimento, o CP II-F-40;
- b) Teor de aditivos e agente desincorporador de ar em relação à massa de cimento - após a dosagem adotou-se 0,30% de superplastificante; 0,20% de modificador de viscosidade; e 0,20% de desincorporador de ar;
- c) Idades de ensaios - com exceção dos ensaios de resistência à compressão axial, as análises por termogravimetria das pastas; e os ensaios de tração direta, tração na flexão e impacto nos compósitos foram realizados aos 91 dias;
- d) Traço - empregou-se um único proporcionamento de aglomerante: agregado: água/aglomerante igual a 1:0,55:0,4.

3.1.2 Fatores de Controle com Multiníveis de Estudo

Os fatores de controle variáveis são:

- a) Teores de substituição do cimento CP II por cinza volante, em dois níveis, sem CV (0%) e com CV (25%);
- b) Reforço - em quatro níveis, sendo eles sem reforço; reforço com tecido; reforço com tecido + SBR; reforço com tecido + SBR + SA;
- c) Idade dos ensaios de resistência à compressão axial - 3, 7 e 91 dias.

3.1.3 Variáveis de Resposta

A influência dos fatores de controle foi estudada nas seguintes variáveis de resposta:

- a) Massa específica (matriz cimentícia/compósito);
- b) Teor de hidróxido de cálcio (TG da matriz cimentícia);
- c) Resistência à compressão axial (matriz cimentícia);
- d) Tração direta (compósito);
- e) Tração na flexão (compósito);
- f) Impacto (compósito).

3.2 Materiais

Os materiais que foram empregados nesta pesquisa são descritos na sequência.

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado para a produção da matriz do compósito foi o CP II-F-40, cimento Portland composto com fíler, conforme a norma NBR 12653 (ABNT, 1991). Conforme revisão bibliográfica pesquisada, o CP II-F foi utilizado em diversas pesquisas de compósitos cimentícios reforçados com fibras (MELO FILHO, 2012; FIDELIS, 2014; FIDELIS *et al.*, 2016; FERREIRA *et al.*, 2017). O CP II-F-40, é o cimento Portland composto com fíler que apresenta maior grau de finura e que proporciona maiores resistências em todas as idades. Indicado tanto para aplicações que exigem desforma rápida, como para elementos pré-fabricados.

3.2.2 Cinza Volante

A cinza volante, empregada em substituição parcial ao cimento na produção da matriz aglomerante do compósito, utilizada é proveniente da queima de carvão mineral na termoelétrica de Candiota/RS, no Rio Grande do Sul, que é comumente utilizada por concreteiras da região. Não foi realizado beneficiamento da CV através de moagem, o material foi utilizado conforme recebido da central dosadora que realizou a doação.

3.2.3 Sílica Ativa

A sílica ativa (SA) é um coproduto gerado durante o processo de fundição nas plantas de processamento de silício metálico e ferrosilício. Em geral possui um diâmetro médio da ordem de 0,1 μm e área superficial específica entre 15 e 25 m^2/kg . Por possuir partículas extremamente finas, ser reativa e ter na sua composição sílica amorfa, a SA foi empregada no tratamento do resíduo têxtil, buscando melhorar a zona de transição pasta-fibra.

3.2.4 Agregado

Com o intuito de produzir um concreto com baixa massa específica, nesta pesquisa foi empregada a vermiculita expandida (VE) super fina como agregado leve para a produção dos compósitos cimentícios. Uma vez que para a produção de concreto têxtil o agregado adequado a ser empregado deve ser miúdo, a VE mostrou-se o agregado leve com possibilidade de aquisição na região com menor granulometria encontrada.

A vermiculita é um mineral formado pela superposição de finíssimas lamínulas, que submetidas a altas temperaturas (650-950°C), sofrem expansão do volume original, de forma a constituir o produto industrializado vermiculita expandida. Essa expansão volumétrica da VE confere ao material característica como leveza (baixa densidade aparente de 80-120 kg/m^3), isolamento térmico (baixa condutividade térmica de 0,04-0,12 W/mK), absorção acústica (coeficiente de absorção na faixa de 0,7-0,8 a uma frequência de 1 kHz) e ponto de fusão relativamente alto (1240–1430°C) (NEVILLE, 2016; RASHAD, 2016).

3.2.5 Aditivos e Agente Desincorporador de Ar

Com o intuito de corrigir a consistência das misturas cimentícias foi utilizado o superplastificante a base de policarboxilatos TEC-FLOW 8000, fabricante GCP, por ser um aditivo indicado para pré-fabricados e quando se busca concretos fluidos (auto-adensáveis).

Para aumentar a viscosidade do concreto, manter seu espalhamento e evitar a segregação, foi empregado o aditivo modificador de viscosidade V-MAR 3 também indicado para concreto auto adensável do fabricante GCP.

Já o DENSIL 10, foi utilizado com o objetivo de proporcionar um bom acabamento das peças de concreto, uma vez que é um material capaz de remover espumas e bolhas aprisionadas na massa cimentícia, de forma a evitar o excesso de poros na superfície. De acordo com o fabricante Grace, trata-se de um material desincorporador de ar, um produto auxiliar, e não de um aditivo, portanto não há um controle do teor de sólidos mediante sua base química por não se enquadrar na norma NBR 11768 (ABNT, 2019).

Na tabela 4 são apresentadas as caracterizações dos aditivos e agente desincorporador de ar.

Tabela 4 - Propriedades físico/químicas dos aditivos e agente desincorporador de ar

Denominação	Produto		
	TEC-FLOW 8000	V-MAR 3	DENSIL 1
Função	Aditivo superplastificante redutor de água	Aditivo modificador de viscosidade retentor de água	Agente desincorporador de ar
Cor	Laranja	Levemente amarelado e cinza	Líquido branco
pH (25°C)	4,50 - 6,50	6,50 - 8,50	0,98 - 1,02
Massa específica (25°C) (g/cm ³)	1,08 – 1,12	0,99 - 1,03	-
Teor de sólidos (%)	44,35 – 49,01	2,00 - 6,00	-

Fonte: Fabricante (2020).

3.2.6 Resíduo de Vestuário

O resíduo de tecido utilizado foi o poliéster, fibra sintética orgânica, coletado na Valentys Uniformes Profissionais, empresa do ramo de confecções localizada em Sapucaia do Sul/RS. A empresa realiza o descarte dos retalhos provenientes dos cortes dos moldes dos vestuários que produz e costuma destinar esses resíduos para central de reciclagem que realiza a incineração.

O poliéster foi escolhido por ser o tecido mais consumido pelas confecções de vestuário, portanto um dos que mais gera quantidade de resíduo. A empresa que fez a doação dos resíduos gera retalhos de poliéster com diferentes tramas: em malha

(fios entrelaçados como se fosse um *tricô*) ou tecido de teares composto por dois fios entrelaçados em ângulos retos uns aos outros (urdiduras e tramas). Optou-se para esta pesquisa pelo poliéster em trama de teares por possuir uma morfologia interessante que poderia ajudar na tração do compósito.

Com o intuito de minimizar a variabilidade para a pesquisa, os retalhos de tecido foram coletados e passaram por triagem que selecionou o tipo de tecido, cor, sentido da trama e dimensões (Figura 19).

Figura 19 – (a) Resíduo de poliéster coletado na confecção e (b) padrão de tecido selecionado na triagem



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

3.2.7 Polímero Estireno Butadieno

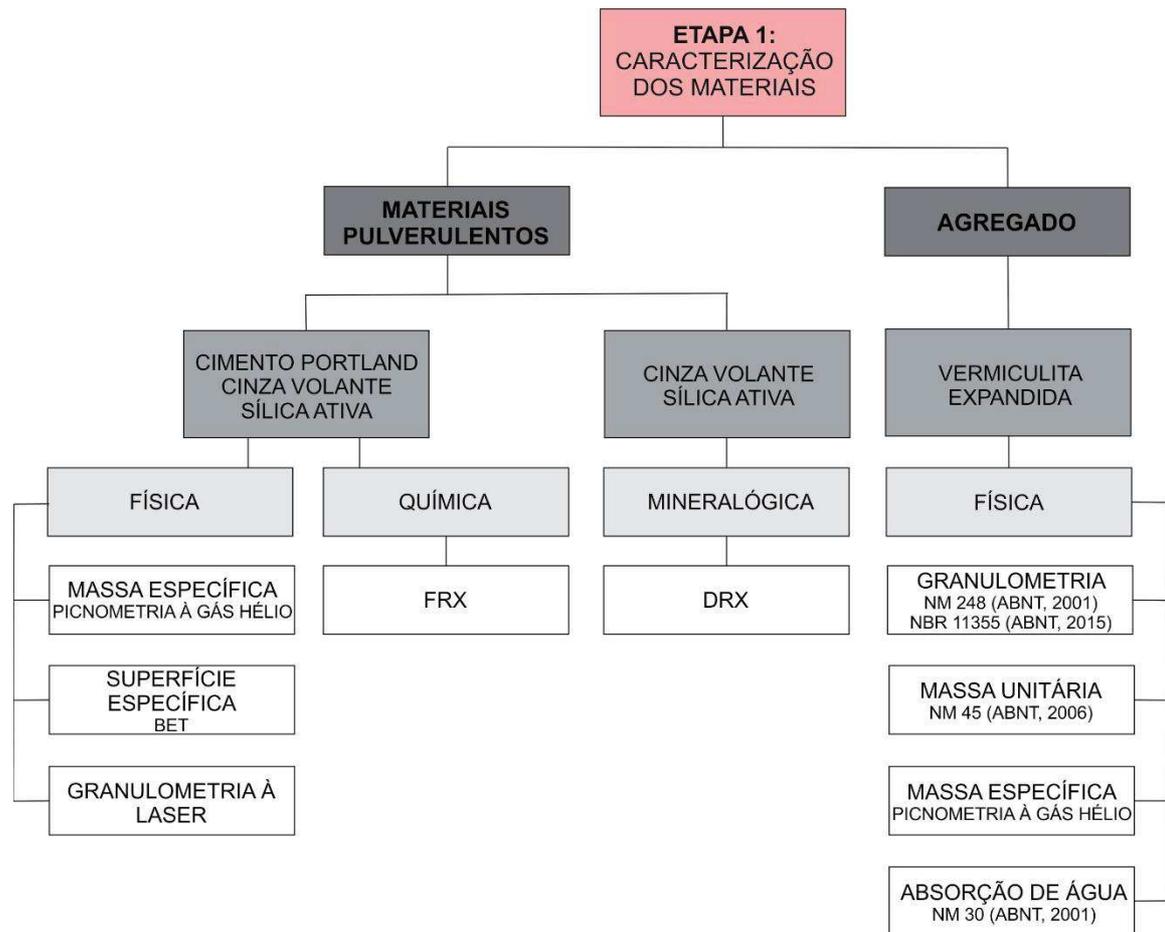
Para o tratamento do tecido de poliéster por impregnação, empregou-se o adesivo chapix SBR, produto quartzolit do fabricante Weber Saint-Gobain. Trata-se de uma emulsão de polímero estireno butadieno, denominado SBR, e aditivos especiais. De acordo com o fabricante, o produto possui um pH alcalino e massa específica de $1,050 \text{ kg/dm}^3$. O objetivo desse tratamento é evitar a degradação do tecido na matriz cimentícia e melhorar a aderência interface fibra/pasta.

3.3 Etapa 1 - Caracterização dos Materiais

A seguir serão apresentados os ensaios da etapa 1, ou seja, os ensaios de caracterização dos materiais. Foram avaliados nesta etapa os materiais pulverulentos (os aglomerantes empregados na matriz cimentícia - cimento e cinza volante; a sílica ativa utilizada como tratamento do reforço) e o agregado leve (vermiculita expandida).

Para um maior entendimento desta etapa, segue organograma (Figura 20) que ilustra os ensaios físicos, químicos e mineralógico realizados nos materiais.

Figura 20 - Organograma de ensaios da Etapa 1 de caracterização dos materiais



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

3.3.1 Caracterização dos Materiais Pulverulentos

Foram realizadas a caracterização química, física, e mineralógica dos mesmos. A caracterização física compreendeu massa específica, área superficial e granulometria a laser. A massa específica foi determinada por picnometria a gás hélio pelo equipamento Picnômetro modelo AccuPyc II 1340 da Micromeritics®. A área superficial específica por adsorção de nitrogênio (BET) foi determinada com o auxílio do equipamento TriStar II Plus da marca Micromeritics®. Já a determinação da dimensão das partículas pelo ensaio de granulometria por difração de luz laser Microtac modelo S3500. As amostras foram submetidas à dispersão por ultrassom de baixa potência. Todos os materiais foram ensaiados em via úmida. Todas as análises físicas foram realizadas no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) da Unisinos.

A caracterização química foi determinada por Fluorescência de raios X (FRX) no Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais (LCVMat) da Unisinos, com auxílio do equipamento EDX-720 SHIMADZU. A análise realizada por FRX do cimento e da cinza volante foi quantitativa, já da sílica ativa qualitativa.

A caracterização mineralógica foi realizada por Difração de Raios X (DRX) para a identificação dos compostos mineralógicos e presença de fase amorfa da cinza volante e da sílica ativa. A preparação dos materiais consistiu em moagem da amostra no gral de ágata na textura de talco.

Os materiais foram analisados no Laboratório de Difractometria de Raios X (IGEO) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em um difratômetro de raios X marca Siemens (BRUKER AXS) (Alemanha) modelo D-5000 com monocromador curvado de grafite no feixe secundário operando a 40kV/25mA (radiação Cu K α = 1,54178 Å). O intervalo angular analisado foi de 5° a 27° 2 θ . As amostras foram analisadas a 0,05°/1s com fendas de divergência e anti-espalhamento de 1° e fenda de recepção de 0,2 mm. Foi utilizada a base de dados e ficha catalográfica ICSD - 027833 e ICSD - 023867.

3.3.2 Caracterização do Agregado

A vermiculita expandida foi caracterizada quanto a granulometria, massa unitária, massa específica e absorção de água. A composição granulométrica da vermiculita expandida foi realizada conforme a NM 248 (ABNT, 2003). Para análise da curva granulométrica, a norma utilizada foi a NBR 11355 (ABNT, 2015). A massa unitária dos agregados leves, foi determinada através da NM 45 (ABNT, 2006) e a massa específica foi verificada através de picnometria a gás hélio utilizando o equipamento picnômetro modelo AccuPyc II 1340 da Micromeritics® no LVCmat. Já para a determinação da absorção de água do agregado miúdo, foi utilizada a NM 30 (ABNT, 2001).

3.4 Etapa 2 – Beneficiamento e Caracterização do Resíduo Têxtil

3.4.1 Triagem do Resíduo

A triagem e classificação dos resíduos teve por objetivo minimizar a variabilidade do resíduo e, por consequência, a variabilidade dos resultados.

Antes de realizar o tratamento do reforço, buscou-se separar entre os resíduos de tecidos coletados, retalhos com um mesmo padrão, ou seja, resíduo de tecido de poliéster composto morfologicamente por dois fios entrelaçados em ângulos retos uns aos outros (urdiduras e picaretas da trama).

Além do tipo de tecido e morfologia, os resíduos também foram classificados por cor e tamanho. Foi também de suma importância classificar os retalhos em dois grupos: os que possuíam fios com maior comprimento no sentido da picareta da trama e os que possuíam fios mais compridos no sentido da urdidura.

Ao realizar todas essas classificações, percebeu-se que a maior quantidade de resíduo de tecido de poliéster era na cor preta, portanto este foi o utilizado para o tratamento de impregnação.

3.4.2 Tratamento do Resíduo de Vestuário por Impregnação

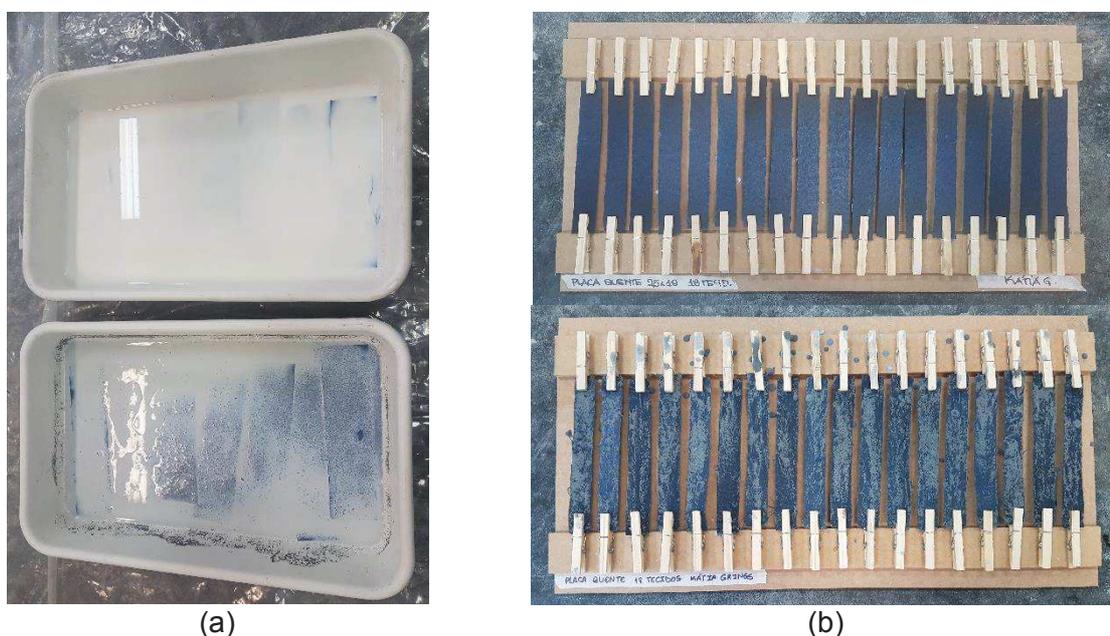
O processo de tratamento do resíduo de poliéster antecedeu ainda à caracterização do reforço. A finalidade do tratamento é, além de aperfeiçoar a adesão interfacial entre fibra e matriz, formar uma barreira física para proteger a fibra do contato com os produtos de hidratação da matriz cimentícia, como alternativa de melhoria da durabilidade do compósito têxtil.

Nesta pesquisa foi utilizado o tratamento do têxtil de impregnação com polímero estireno butadieno (SBR), tratamento já utilizado em outras pesquisas apresentadas na revisão bibliográfica (FIDELIS *et al.*, 2016; FIDELIS *et al.*, 2019), e a impregnação com mistura de SBR mais sílica ativa, que tem como objetivo preencher os espaços entre os filamentos do têxtil com partículas de sílica, local onde é mais necessário eliminar de forma eficiente o crescimento de hidróxido de cálcio. A impregnação do tecido em pasta de sílica foi citada nas pesquisas de Tolêdo Filho *et al.* (2003) e Yan, Kasal e Huang (2016).

O tratamento por impregnação consistiu nas seguintes etapas (Figura 21):

- a) Os tecidos foram cortados no sentido pré-definido (trama ou urdidura) e em tiras conforme dimensões pré-estabelecidas para cada ensaio (50 mm de largura e 200 mm de comprimento para ensaio de tração direta do tecido isolado; 25 mm de largura e comprimento 10 mm menor que o tamanho de cada amostra de concreto têxtil);
- b) Foram deixados submersos por 50 min (tempo que observa-se a absorção máxima do polímero no tecido) em travessa contendo somente estireno butadieno para os tecidos em que foi empregado este tipo de tratamento e em travessa contendo mistura de SBR mais sílica ativa na proporção 1:1 (em massa) para os tecidos que foram impregnados com este outro tipo de tratamento. O SBR e a sílica ativa foram misturados manualmente até a homogeneização dos dois materiais;
- c) Posteriormente os retalhos foram esticados em varais confeccionados exclusivamente para esta pesquisa e deixados para secar por 24 h.

Figura 21 - Tratamento do tecido de poliéster por impregnação: (a) imersão do tecido no polímero ou mistura de SBR mais sílica ativa; (b) colocação do tecido impregnado no varal para secagem



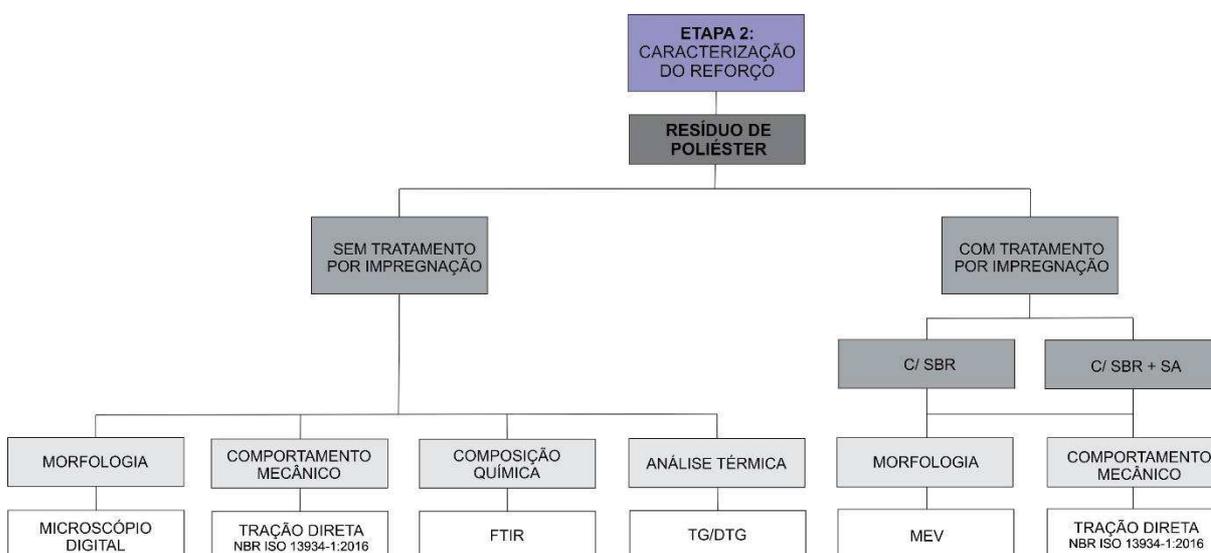
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

3.4.3 Caracterização do Reforço

A seguir serão apresentados os ensaios de caracterização do reforço de resíduo de fibra de vestuário com e sem tratamento (Figura 22).

As premissas dos tratamentos de impregnação com SBR e SBR + SA são aderência e zona de transição. O intuito da utilização do SBR é recobrir a fibra e dar adesão com a SA para que a SA reaja com o cimento.

Figura 22 - Organograma de ensaios da Etapa 2 de caracterização do reforço têxtil



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

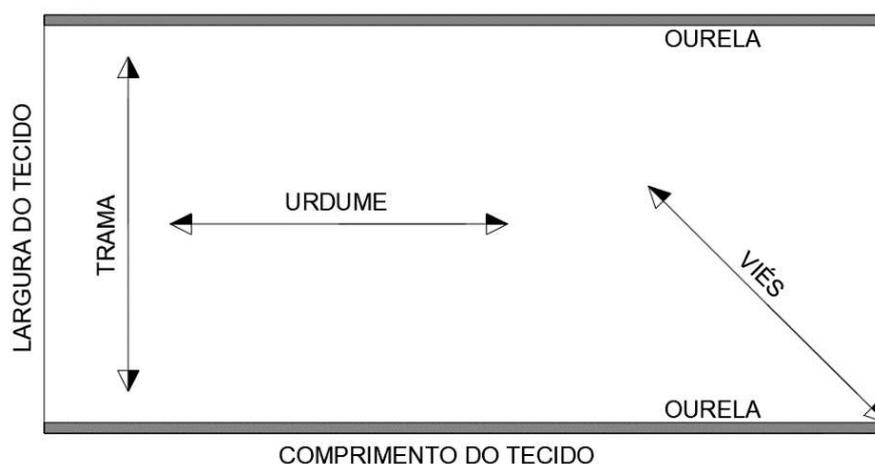
3.4.4 Morfologia do Tecido e Tratamentos

Para análise da morfologia do tecido e de sua trama, uma amostra de tecido de poliéster sem tratamento por impregnação foi analisada em microscópio digital marca Zeiss Smart Zoom. Já as amostras de tecido tratados com impregnação de SBR e com impregnação de SBR + SA foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) no equipamento Zeiss - Evo LS15. Metalizadora - Quorum, Q150R, metalização realizada com Ouro. As imagens da microestrutura foram realizadas no Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional (Itt Fuse).

3.4.5 Resistência à Tração Direta do Tecido de Poliéster

Nesta etapa, o tecido sem impregnação e com os tratamentos, foram caracterizados quanto ao seu comportamento mecânico de resistência à tração direta. Como o tecido utilizado é do tipo plano, o ensaio foi realizado para ambas as direções, urdidura e trama, que foram identificados conforme Figura 23.

Figura 23 - Estrutura do tecido



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A caracterização mecânica dos tecidos, quanto a resistência à tração e ao alongamento foram realizadas conforme procedimento apresentado pela norma NBR ISO 13934-1:2016 cujo método prescreve o ensaio para determinação da resistência à tração de materiais têxteis.

O procedimento de ensaio foi realizado no laboratório do Itt Performance em uma prensa universal EMIC-INSTRON, modelo 5 kN. As dimensões das amostras foram de 50 mm de largura e 200 mm de comprimento, os quais foram submetidos ao esforço de tração com taxa de deslocamento de 10 mm/min. Foram ensaiadas 10 amostras sem tratamento e 10 amostras de cada tipo de impregnação: 5 no sentido da trama e outras 5 no sentido do urdume.

A Figura 24 apresenta a amostra do tecido em estrutura de ensaio. Este procedimento é recomendado por Portal *et al.* (2016) em seu estudo de determinação do comportamento mecânico do reforço de fibra de vidro AR.

Figura 24 - Ensaio de Tração direta em Tecido de Poliéster



Fonte: Elaborada pela autora (2020)

3.4.6 Caracterização Química do Resíduo de Tecido

Para a caracterização química do resíduo de tecido de poliéster sem impregnação, foi realizada uma espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier no equipamento FTIR Cary 630, marca Agilent, existente no Laboratório de Biologia Molecular e Microbiologia da Unisinos. A espectroscopia FTIR é considerada uma das mais importantes técnicas experimentais para a caracterização de polímeros, em termos de identificação e determinação de características estruturais. Além dessas informações qualitativas, a análise por FTIR permite a determinação semiquantitativa de componentes de uma amostra. O equipamento trabalha no modo de reflectância total atenuada (ATR), método que introduz luz na amostra para adquirir informações estruturais e de composição, não necessitando de preparo da amostra.

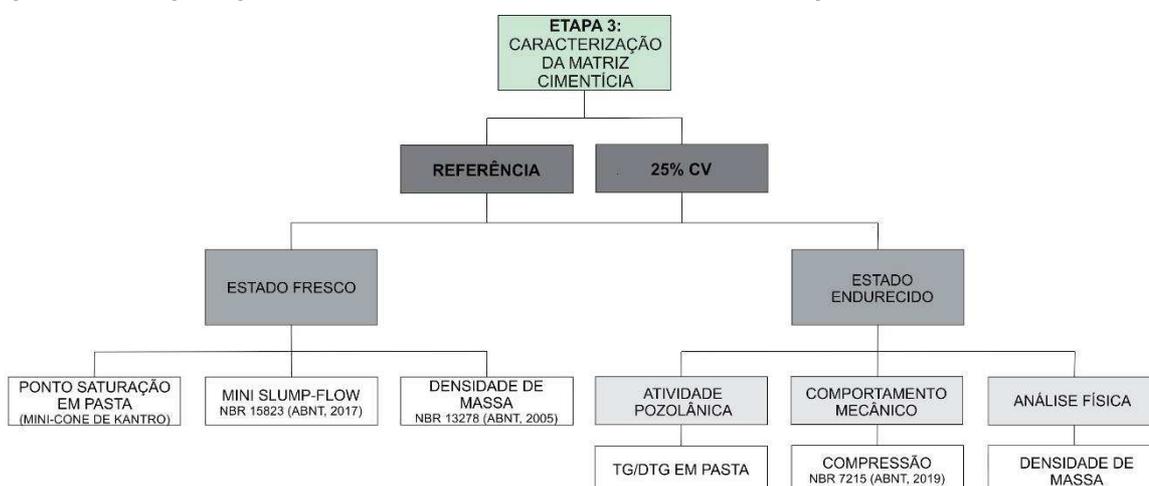
3.4.7 Análise Térmica

Foi realizado a caracterização de uma amostra de resíduo de tecido no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) da Unisinos, através de análise termogravimétrica, TG/DTG. A amostra (10 mg) foi analisada com taxa de aquecimento de 10°C/min, em um intervalo de temperatura de 30 a 450°C utilizando-se cadinho de alumina em ambiente de N₂.

3.5 Etapa 3 - Caracterização da Matriz Cimentícia

A terceira etapa consistiu na caracterização da matriz cimentícia (Figura 25) em que foram avaliados traço de referência e com substituição da massa do cimento por 25% de cinza volante. No estado fresco, foram realizados ensaios de mini-cone de Kantro, mini slump-flow e densidade de massa. No estado endurecido, foram incluídos os seguintes ensaios: análise da hidratação através de ensaio de TG/DTG, comportamento mecânico de resistência à compressão e análise física através da densidade de massa.

Figura 25 - Organograma de ensaios da Etapa 3 de caracterização da matriz cimentícia



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

3.5.1 Dosagem e Caracterização da Matriz no Estado Fresco

A relação água/aglomerante foi fixada em 0,40 e a consistência da pasta com e sem CV foi ajustada com o uso de aditivos através de ensaio de mini-cone de Kantro. O objetivo do uso dos aditivos é obter um concreto autoadensável, evitar ao máximo a exsudação e manter a coesão da mistura

Primeiramente, foi verificado o ponto de saturação e o teor ótimo de aditivo superplastificante. Foram avaliados os teores de 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 e 0,5% de superplastificante, com o intuito de verificar a mistura mais fluida, sem problemas de exsudação e segregação. Para verificar o efeito do aditivo ao longo do tempo, o ensaio de mini-cone de Kantro foi verificado aos 0, 5 e 15 minutos após realizada a mistura.

As misturas das pastas foram realizadas no mixer conforme NBR 16606 (ABNT 2018). Após a mistura, a pasta foi adicionada no mini-cone de Kantro, foram aplicados cinco golpes com bastão e o excesso de pasta da parte superior do cone foi retirado. Em seguida, o cone foi levantado e foram realizadas duas medidas do espalhamento para calcular a média (Figura 26).

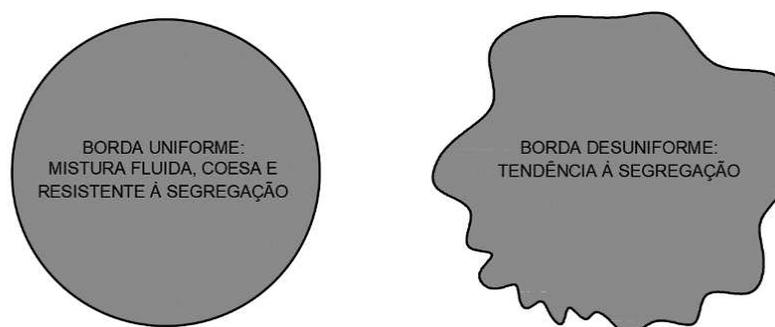
Figura 26 - Mini-slump em pasta



Fonte: Registrada pela autora (2019).

Após fixado o teor do aditivo superplastificante, repetiu-se o ensaio do mini-cone de Kantro em pastas com e sem CV e teores de 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 e 0,5% de aditivo modificador de viscosidade (AMV). Foram verificados os espalhamentos aos 0, 5 e 15 min após realizada a mistura das pastas. Para determinar o melhor teor de AMV observou-se, ao realizar os espalhamentos, a ocorrência ou não da diminuição da fluidez da mistura e a análise visual das bordas da pasta (Figura 27).

Figura 27 - Análise visual da borda da pasta ensaiada no mini-cone de Kantro



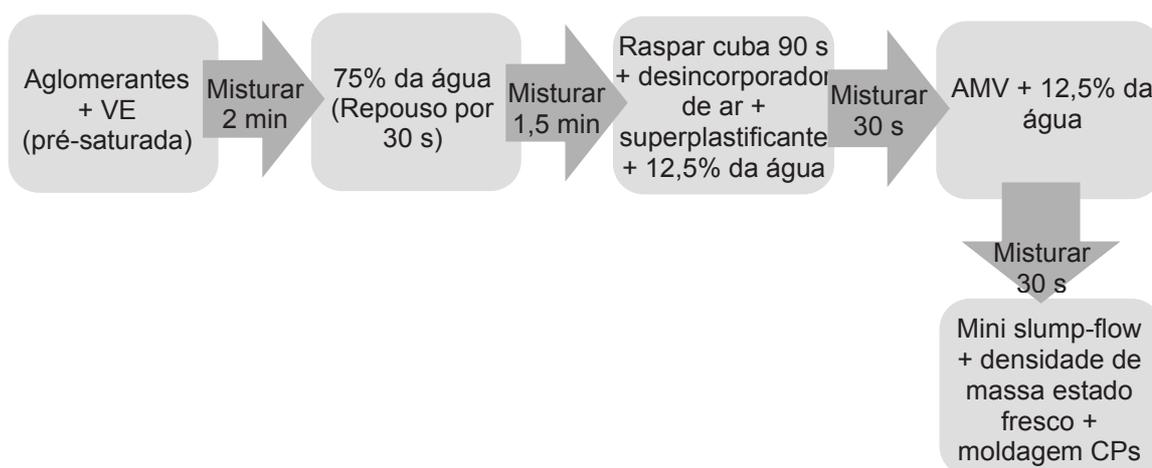
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Com os teores de aditivo superplastificante e aditivo modificador de viscosidade fixados nos ensaios anteriores, realizou-se, conforme adaptação da NBR 15823 (ABNT, 2017), norma para concreto autoadensável, ensaio de mini slump-flow para determinação do teor ótimo de agregado leve.

Foi verificada a classe de espalhamento (SF), classe de viscosidade plástica aparente (t_{250}) e índice de estabilidade visual (IEV) em misturas com e sem CV e teores de 55%, 60%, 65%, 70% e 75% de vermiculita expandida (VE) em relação a massa de aglomerante. Foi realizada a pré-saturação da VE por 30 min antes de realizar a mistura com a quantidade de água determinada em ensaio de absorção do agregado leve, uma vez que a VE absorve água durante a mistura e isso pode reduzir a trabalhabilidade e o slump. Foi também realizado em todas as misturas ensaio de densidade de massa conforme método da NBR 13278 (ABNT, 2005).

As misturas foram realizadas em sala com temperatura e umidade controlada na argamassadeira de 5L conforme Figura 28, no entanto, nessa etapa de determinação do teor de VE ideal, não foi adicionado o desincorporador de ar.

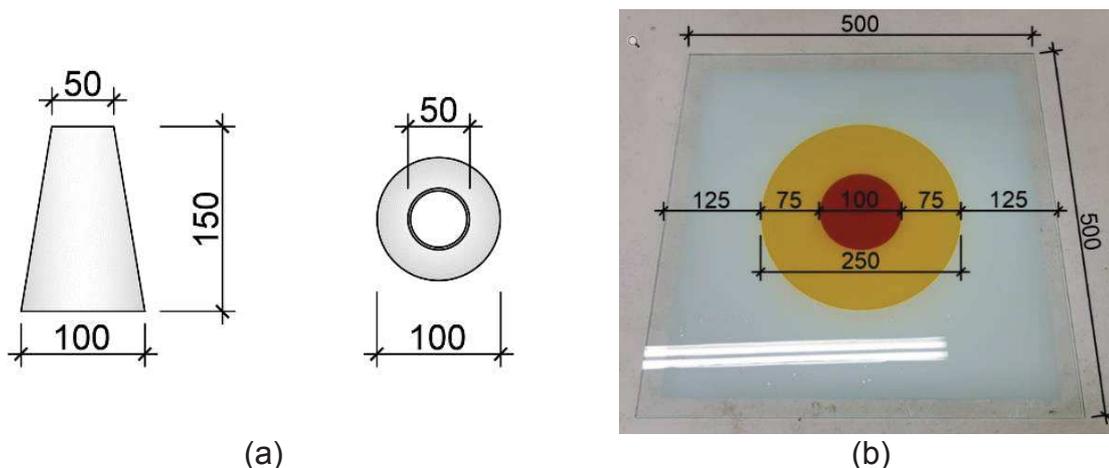
Figura 28 - Fluxograma do método de mistura do concreto leve



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Após realizar a mistura, executou-se o ensaio de mini slump-flow, conforme adaptação da NBR 15823 (ABNT, 2017). A Figura 29 ilustra a adaptação realizada nas dimensões estipuladas pela norma.

Figura 29 - Aparelhagem para ensaio de mini slump-flow: (a) cone de Abrams e (b) placa base



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Como parâmetro para escolha do traço ideal, estipulou-se para essa pesquisa, um SF entre 330 mm a 379 mm, denominada SF2, adequada para estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura que requerem curta distância de espalhamento horizontal. O t_{250} foi determinado como ideal VS1, quando o tempo cronometrado para a mistura atingir a marca de 250 cm foi ≤ 2 s; e o índice de estabilidade visual da mistura IEV 0 quando não houve evidência de segregação/exsudação da mistura.

Após verificados todos esses parâmetros, fixou-se o percentual ideal de vermiculita e prosseguiu-se para a última etapa da dosagem do concreto, a determinação do teor de material desincorporador de ar a ser utilizado.

Para isso, repetiu-se ensaio de mini slump-flow de misturas com o traço ideal de vermiculita, bem como os teores ideais de superplastificante e AMV, com e sem CV. Foram realizadas misturas com teores de 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70; 0,80; 0,90 e 1,00% de material desincorporador de ar.

A realização da mistura seguiu conforme Figura 28 com o produto desincorporador de ar adicionado antes dos demais aditivos. Os mesmos parâmetros descritos anteriormente como ideais para o mini slump-flow foram considerados para estipular o teor ótimo de desincorporador de ar no estado fresco.

Foi realizado em todas as misturas com desincorporador de ar, ensaio de densidade de massa conforme método da NBR 13278 (ABNT, 2005).

3.5.2 Caracterização da Matriz no Estado Endurecido

Como complemento para identificação do teor ótimo de material desincorporador de ar, foram moldados corpos de prova cilíndricos (diâmetro 5 cm e altura 10 cm) de cada mistura com o intuito de verificar visualmente qual teor proporcionou melhor acabamento no estado endurecido. Foi também calculada a densidade de massa de cada uma dessas amostras no estado endurecido. A densidade de massa foi calculada dividindo a massa em gramas pelo volume expresso em centímetros cúbicos, do corpo de prova cilíndrico.

A atividade pozolânica (teor de hidróxido de cálcio) da matriz foi avaliada através de termogravimetria (TG/DTG). Foi produzida pasta de referência e pasta com 25% de CV. Os tempos de mistura seguiram o mesmo processo que o realizado no mixer para o ensaio de mini-cone de Kantro. Foram empregados na pasta os 2 tipos de aditivo (superplastificante e modificador de viscosidade) e o agente desincorporador de ar conforme teor fixado em ensaios anteriormente definidos e fator água/material cimentício 0,40. Os ensaios de TG/DTG foram realizados aos 91 dias.

A hidratação das pastas foi interrompida pelo método “troca de solventes”, conforme descrito por Deschner *et al.* (2012) e Schöler *et al.* (2015). Primeiramente, a amostra foi moída em Almofariz de Ágata, e após colocada em imersão em álcool isopropílico por 15min. Em seguida foi removido a parte líquida e realizada uma rápida lavagem com éter etílico. Para finalizar, a amostra foi colocada em estufa à 40°C para secagem por volta de 10 minutos.

As amostras foram levadas imediatamente após a interrupção da hidratação para realização do ensaio de TG/DTG, uma vez que o cimento é extremamente suscetível a carbonatação, o que pode acarretar mudança das formas da curva TG/DTG (IPAVEC *et al.*, 2011).

As análises termogravimétricas das amostras de pasta foram ensaiadas no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) da Unisinos. O equipamento operou com taxa de aquecimento de 10°C/min da temperatura ambiente até aproximadamente 1000°C, em atmosfera de nitrogênio e fluxo do registrador de 100mL/min. Os ensaios foram realizados em cadinhos de platina. As amostras inicialmente foram mantidas em isoterma de 35°C por 1 h no interior do equipamento para a liberação da água livre.

A pozolanicidade foi determinada através da perda de massa ($PM_{Ca(OH)_2}$) devido a evaporação de água da portlandita. Para determinar o teor de $Ca(OH)_2$ presente nas pastas de cimento, foram determinados a área do pico endotérmico referente ao composto químico através do software Origin. A perda de massa em porcentual corresponde a área entre a curva DTG e a secante do início e fim do pico do específico composto químico (VILLAGRÁN-ZACCARDI *et al.*, 2017).

Em seguida, os valores das áreas foram aplicados na seguinte equação, a fim de quantificar a portlandita presente na amostra através da massa molecular do $Ca(OH)_2$ (74g/mol) e da água (18g/mol):

$$Ca(OH)_{2,medido} = \frac{PM_{Ca(OH)_2} * 74}{18} \quad \text{(Equação 1)}$$

Por fim, como o peso da amostra da fração sólida varia durante a hidratação, os resultados foram reescalados para 100 gramas de cimento anidro, conforme a seguinte equação (LOTHENBACH; DURDZINSKI; DE WEERDT, 2016):

$$Ca(OH)_{2,anidro} = \frac{Ca(OH)_{2,medido}}{\text{peso em } 480^{\circ}C} \quad \text{(Equação 2)}$$

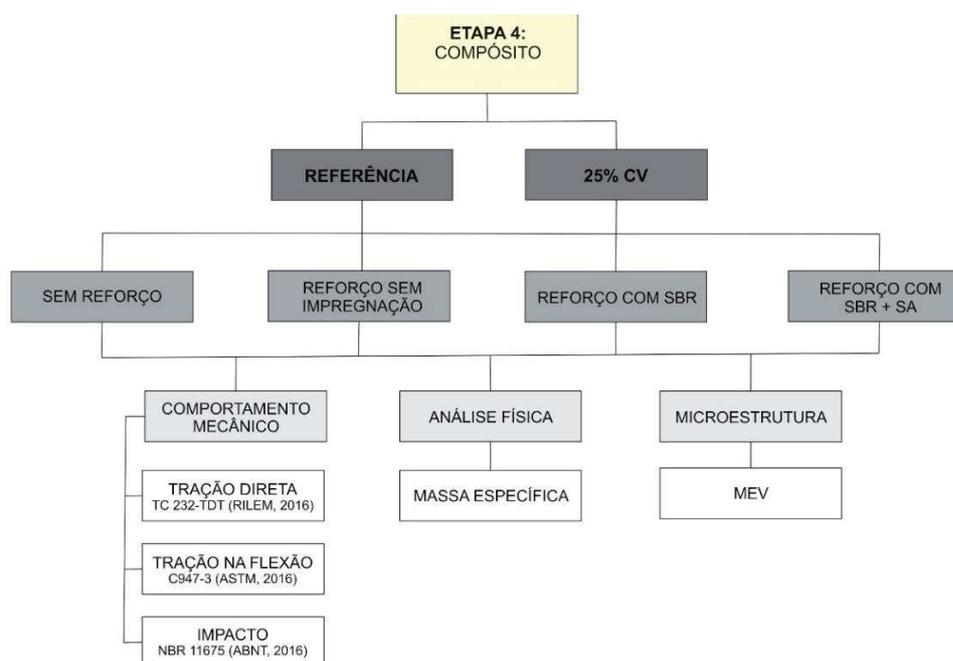
Assim, a atividade pozolânica é medida através do teor de hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento referência, em relação a pasta de cimento com material cimentício suplementar.

Para avaliar o comportamento mecânico da matriz cimentícia leve conforme traço com vermiculita definido em dosagem, foi realizado ensaio de resistência à compressão de amostras de referência e com 25% de CV de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019). O ensaio foi realizado em corpos de prova aos 3, 7 e 91 dias. O ensaio não foi realizado aos 28 dias devido ao fechamento dos laboratórios pela pandemia de COVID-19. Foram moldados CPs cilíndricos 50 x 100 mm, que foram embalados em sacos e colocados dentro de caixa plástica para evitar a perda de umidade. A caixa possuía uma lâmina de água e foi colocada em sala com temperatura e umidade controlada.

3.6 Etapa 4 - Compósito

Foram moldados compósitos cimentícios sem o reforço e reforçados com resíduo de tecido de vestuário (poliéster). Nas amostras reforçadas, foram submetidos a testes compósitos com o tecido sem tratamento e com tratamento por impregnação do polímero estireno butadieno (SBR), bem como com SBR mais sílica ativa. Os traços utilizados compreenderam compósito de referência sem substituição e com substituição da massa de cimento por cinza volante (25%), teores de aditivos e agregado leve de vermiculita conforme ensaios de dosagem, e fator a/c 0,40. Os compósitos foram testados quanto à propriedade mecânica de tração direta, tração na flexão e impacto. Foi verificada a massa específica e a análise da microestrutura através de MEV das diferentes combinações (Figura 30).

Figura 30 - Organograma de ensaios da Etapa 4 de caracterização do compósito



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

3.6.1 Produção do Compósito

As misturas foram realizadas em betoneira planetária de eixo vertical (Figura 32 (a)) (dimensões da cuba: diâmetro 78 cm e altura 32 cm) localizada no anexo do LMC, conforme já mencionado no item 3.5.1 e Figura 28. A mistura então foi lançada sobre molde metálico respectivo de cada ensaio confeccionado para esta pesquisa

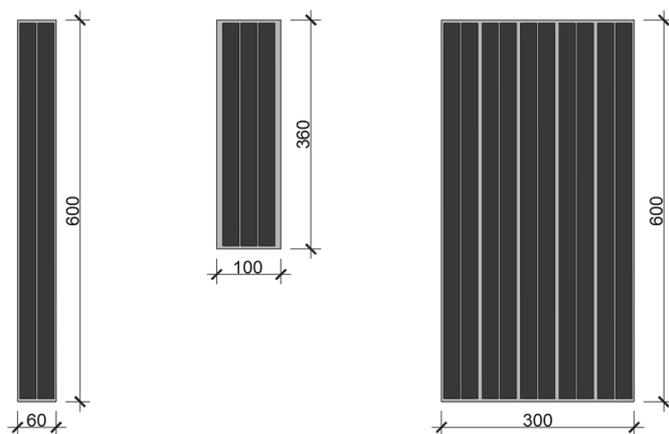
(Figura 32 (b)). Primeiramente foi colocado uma camada de concreto leve, depois as tiras de tecido de poliéster e posteriormente mais uma camada de concreto leve, de forma a resultar duas camadas externas de concreto leve reforçada com tecido de poliéster na parte central (conforme Figura 32 (c) e (d)). As formas possuíam marcação do nível da primeira camada para garantir que as duas camadas tivessem a mesma espessura. Após realizada a moldagem as formas foram tampadas com vidro na parte superior (Figura 32 (e) e (f)). A espessura total do compósito foi de 18 mm. O compósito não foi vibrado uma vez que se trata de concreto autoadensável. Nas formas foi passado o desmoldante Primatec 100, que, segundo o fabricante, impede a formação de bolhas na superfície. Na Figura 31 são apresentados esquema das camadas do compósito em 3d, bem como as dimensões e posicionamento do reforço têxtil em cada corpo de prova de concreto leve respectivo para cada ensaio.

Figura 31 - (a) Esquema das camadas do compósito em 3d, (b) dimensões e posicionamento do reforço têxtil no corpo de prova de concreto leve para cada ensaio



(a)

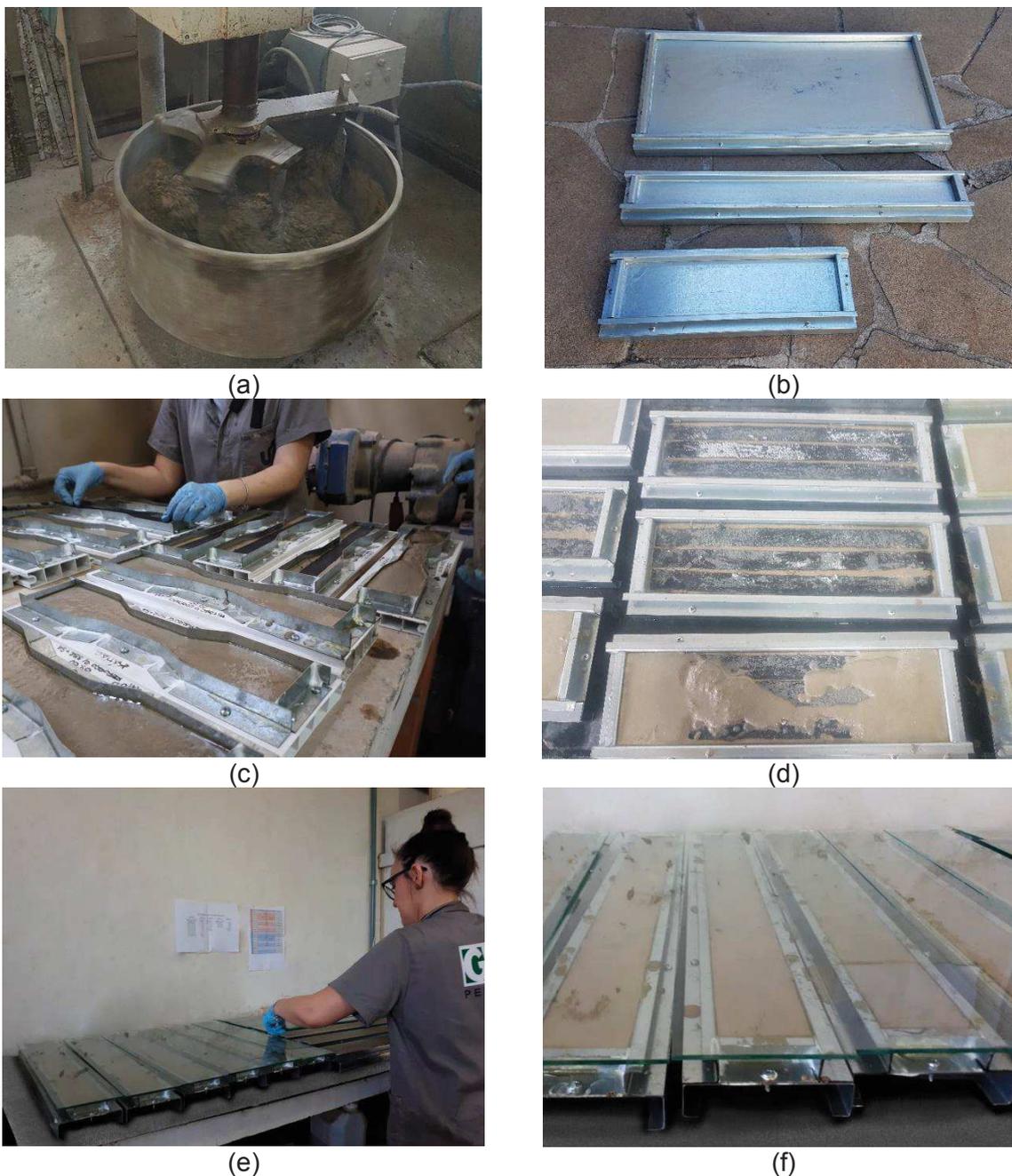
TRAÇÃO DIRETA	TRAÇÃO NA FLEXÃO	IMPACTO
CP RETANGULAR: 2 TIRAS DE TECIDO 25x590mm	3 TIRAS DE TECIDO 25x350mm	10 TIRAS DE TECIDO 25x590mm



(b)

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 32 - Moldagens dos compósitos têxteis: (a) Mistura realizada em betoneira de eixo vertical; (b) formas metálicas de resistência ao impacto, tração direta e tração na flexão; (c) e (d) camada inferior de concreto leve conforme nível demarcado na forma, posicionamento das tiras de tecido de poliéster e preenchimento da camada de concreto leve superior; (e) e (f) fechamento da forma com vidro



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

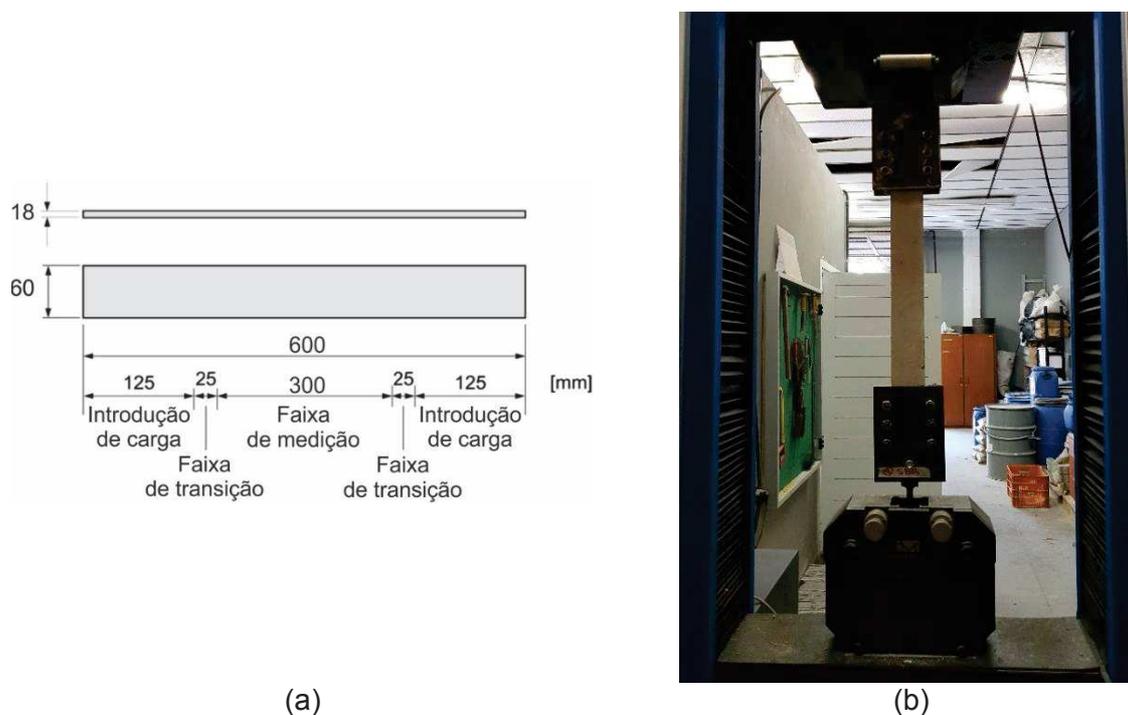
Após 72 horas da moldagem, as amostras foram desmoldadas, embaladas com plástico filme e armazenadas em caixas plásticas com tampa e lâmina de água na parte inferior. As amostras permaneceram nessa condição até 24 horas antes da data dos ensaios quando foi retirada a lâmina de água e o plástico filme que envolvia as amostras.

3.6.2 Tração Direta

Para o ensaio de tração direta, as amostras possuíam dimensões 600x60x18mm (comprimento x largura x espessura), e foram avaliadas conforme recomendações da TC 232-TDT (RILEM, 2016) para testes de tração em compósitos cimentícios têxteis (Figura 33).

O procedimento de ensaio foi realizado na prensa universal EMIC/Instron, modelo 300 kN, do laboratório Itt Performance e taxa de carregamento controlada de 1,0mm/min. Foram ensaiadas quatro amostras de cada combinação aos 91 dias de idade, sendo que o cálculo das médias foi realizado entre três amostras.

Figura 33 - (a) Dimensões do corpo de prova retangular e (b) configuração da amostra na prensa universal para realização de ensaio de tração direta

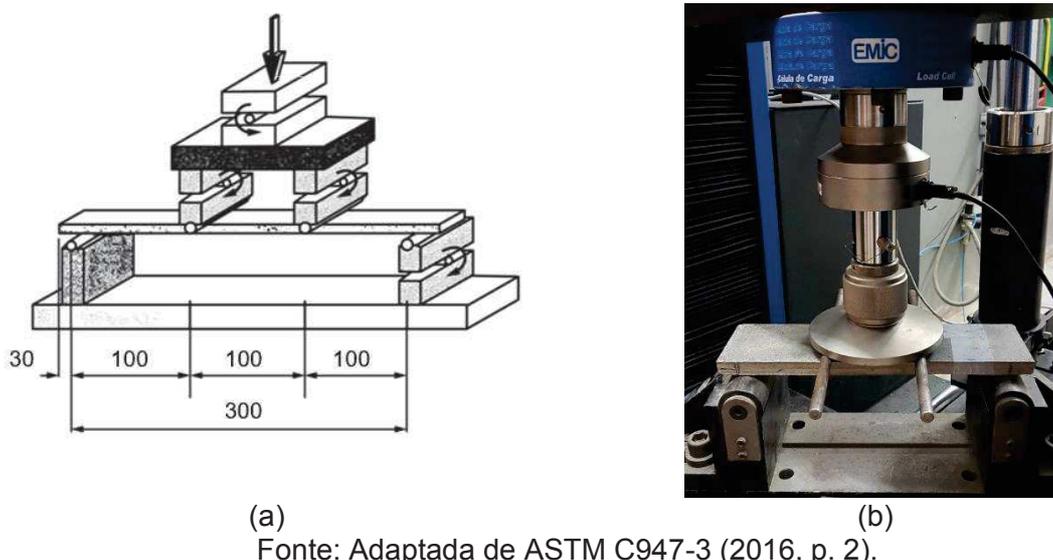


Fonte: Adaptada de Rilem (2016, p. 4925).

3.6.3 Tração na Flexão

Os ensaios de resistência à flexão foram realizados conforme método dos 4 pontos em corpos de prova com dimensões de 100 mm de largura, 360 mm de comprimento e espessura adaptada para 18 mm, como recomendado por Vlach *et al.* (2018). A Figura 34 apresenta a configuração do ensaio.

Figura 34 - (a) Configuração do ensaio de tração na flexão e (b) realização do ensaio na prensa universal



O procedimento de ensaio seguiu a norma ASTM C947-3: 2016, sendo realizado na prensa universal EMIC/Instron, modelo 300 kN, do laboratório Itt Performance e taxa de carregamento controlada de 2,0 mm/min. Foram ensaiadas quatro amostras de cada combinação aos 91 dias de idade, sendo que o cálculo das médias foi realizado entre três amostras.

3.6.4 Impacto

O ensaio de impacto de corpo duro foi realizado através de adaptação da NBR 11675 (ABNT, 2016) e seguiu os passos da Figura 35. Foram ensaiados corpos de prova 600x300x18 mm (comprimento x largura x espessura) aos 91 dias.

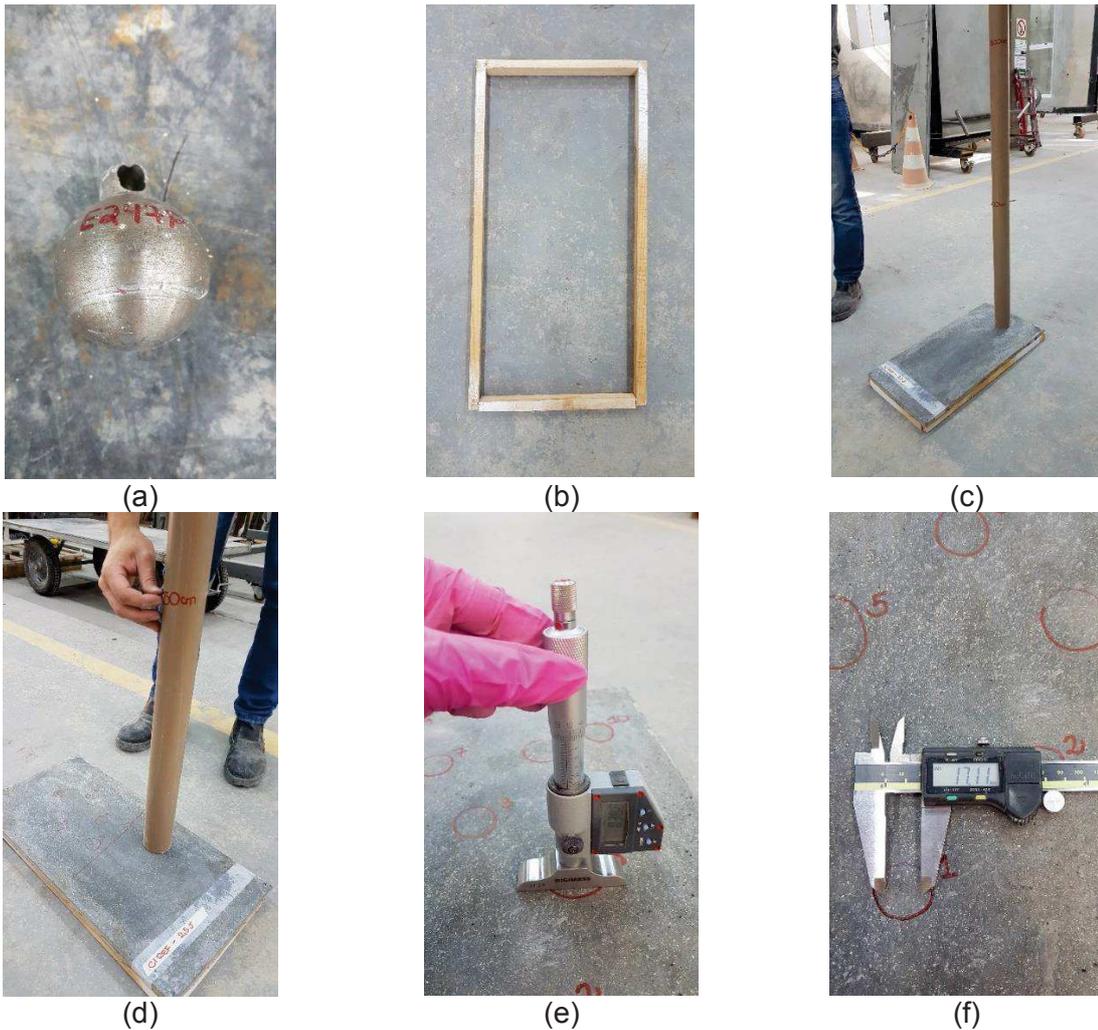
Para a realização do ensaio a amostra foi colocada na posição horizontal em cima de um quadro de madeira 600x300 mm e foram aplicados aleatoriamente os impactos em uma das faces do corpo de prova de forma a atingir diferentes pontos.

Com o intuito de direcionar corretamente as alturas de impacto em relação a superfície do corpo de prova, o centro de massa da esfera foi localizado em um cano de PCV nas distâncias de 50 cm e 100 cm (correspondente as energias de 2,5J e 5,0J respectivamente). A esfera de aço utilizada possui 5 cm de diâmetro e 500 g.

Foram produzidos 10 impactos a cada altura, sendo que foram utilizadas amostras distintas para cada traço e energia de impacto. Após foi realizado a medição da profundidade e diâmetro das mostras, bem como a identificação visual de fissuras

a uma distância de 50 cm. A análise de fissuração foi dada a partir de registro fotográfico da placa após os impactos. As imagens foram avaliadas a fim de determinar o comprimento real, a espessura, e a área da fissura calculadas no programa AutoCad 2018.

Figura 35 - (a) esfera de aço para aplicação dos impactos, (b) quadro de madeira para apoiar a amostra no momento do ensaio, (c) configuração do ensaio com as delimitações das alturas para as diferentes energias de impacto, (d) momento do lançamento da esfera



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

3.6.5 Massa Específica

Para determinação da massa específica no estado endurecido baseou-se nos parâmetros da NBR 9778 (ABNT, 2005). Foram realizadas as médias de 3 amostras de cada combinação.

3.6.6 Microestrutura

Foram analisadas a microestrutura de cada tipo de compósito têxtil, com os diferentes tipos de tratamento do tecido de poliéster, através de micrografias no microscópio eletrônico de varredura (MEV), equipamento Zeiss - Evo LS15. Metalizadora - Quorum, Q150R, metalização realizada com Ouro.

A preparação de cada amostra consistiu no corte da mesma em dimensões de 5,0x5,0x5,0 mm no Laboratório de Laminação Petrográfica da Unisinos. Após foram deixadas submersas por 15 min em álcool isopropílico e deixadas para secar em estufa 40°C. Após a secagem total das amostras, o ensaio de MEV foi realizado no Itt Fossil (Unisinos).

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste item são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos na execução do programa experimental.

4.1 Caracterização dos Materiais

Os resultados apresentados na sequência foram obtidos na Etapa 1 do programa experimental.

4.1.1 Caracterização Física

Fisicamente os materiais pulverulentos foram caracterizados quanto a massa específica, superfície específica e granulometria. A Tabela 5 apresenta os resultados de massa específica realizada por picnometria a gás hélio, superfície específica realizada por BET e granulometria a laser.

Tabela 5 - Caracterização física dos materiais pulverulentos

Ensaio	Cimento	CV	SA
Massa específica (g/cm ³)	2,99	2,59	2,21
Superfície específica (m ² /g)	1,55	2,43	17,77
Granulometria	D10 (µm)	5,91	1,73
	D50 (µm)	13,59	6,35
	D95 (µm)	34,80	14,66
	Dmédio (µm)	15,13	6,70

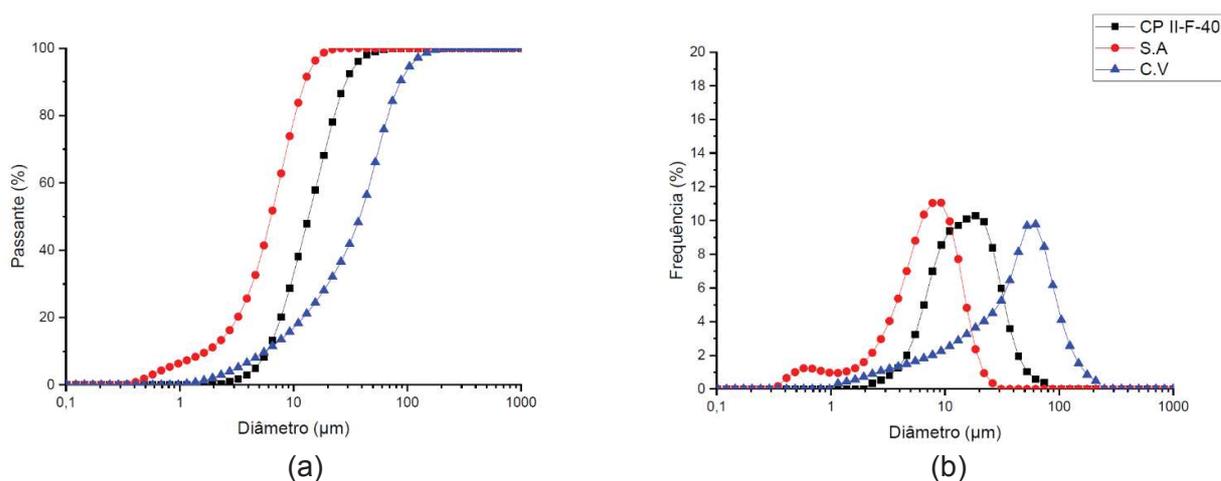
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na análise dos dados apresentados na Tabela 5, destaca-se a maior dimensão das partículas da CV quando comparado com os demais materiais, o que, entre outros fatores, pode influenciar negativamente na reatividade da pozolana (KAWAMARA; TAKEMOTO, 1988; RECENA, 2011). Essa maior dimensão das partículas origina menor área de superfície específica, que influenciará diretamente na taxa de dissolução quando exposta à solução alcalina dos poros, diminuindo a velocidade, e, conseqüentemente, tornando mais lenta a reação pozolânica. Esse aspecto pode ter comprometido o desenvolvimento das propriedades mecânicas do compósito cimentício.

Em relação à área superficial, destaca-se que a CV apresenta valor baixo se comparado à SA, porém mais elevado que o cimento. A CV apresenta partículas lisas e esféricas. Já a SA possui dimensões menores de partículas, com forma esférica similar a um esporo (o que justifica a maior superfície específica deste material podendo apresentar aglomerações, como sugere a configuração da curva apresentada na 36 (b)). Destaca-se também a tendência de comportamento das pozolanas de que quanto menor a partícula, maior a área superficial. No caso a SA possui uma finura bastante reduzida e uma área superficial mais elevada se comparada à CV, o que a torna adequada ao propósito do seu emprego.

A Figura 36 apresenta o gráfico das curvas de distribuição granulométricas e os histogramas do cimento e adições.

Figura 36 – Granulometria do cimento e adições: (a) Curvas acumuladas e (b) Curvas de distribuição granulométrica



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O comportamento de distribuição da sílica ativa é típico deste material, que possui partículas aparentemente aglomeradas, mas que na verdade, conforme Diamon e Sahu (2006), acredita-se estarem fundidas, de forma a compor cadeias que não são unidas somente por tensão superficial.

Quanto à caracterização física do agregado, foram realizados os ensaios de granulometria, massa unitária, massa específica e absorção de água. Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios com a vermiculita.

Tabela 6 - Caracterização física do agregado

Ensaio	Vermiculita
Massa unitária (g/cm ³)	0,14
Massa específica (g/cm ³)	1,14
Absorção de água (%)	231,00

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Ao realizar o ensaio de massa unitária, a vermiculita obteve um valor de 0,14 g/cm³, valor bastante próximo aos determinados por Neville (2016). Cabe salientar também, que ao analisar os valores descritos por Santos *et al.* (2018), a vermiculita utilizada ocupa um volume 4,5 vezes maior que a argila expandida e 10,3 vezes maior que a areia, o que influencia diretamente no traço a ser utilizado.

Para a vermiculita o resultado encontrado para massa específica encontra-se dentro da faixa de 0,8 g/cm³ a 1,15 g/cm³, limites fornecidos pelo fabricante. Quanto à absorção de água, este agregado absorveu 231% em relação a sua massa. A vermiculita é um agregado leve que possui elevada capacidade de absorção, pode absorver até cinco vezes o próprio peso em água (FILGUEIRA, 2000).

A determinação da composição granulométrica da vermiculita apresenta-se na Tabela 7 e a curva granulométrica com inserção dos limites da NBR 11355 (ABNT, 2015) na Figura 37.

A vermiculita expandida é classificada granulometricamente de acordo com a NBR 11355 (ABNT, 2015) como médio, fino, superfino e micron. Conforme o resultado obtido, a vermiculita do presente estudo classifica-se como superfina, com até 45% do material retido na peneira 1,2 mm, de 70% a 95% na 0,6 mm, de 85% a 100% na 0,3 mm e de 95% a 100% na 0,15 mm. Já de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), o agregado utilizado é denominado como agregado miúdo, uma vez que todos os grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,8 mm.

Tabela 7 - Granulometria da vermiculita

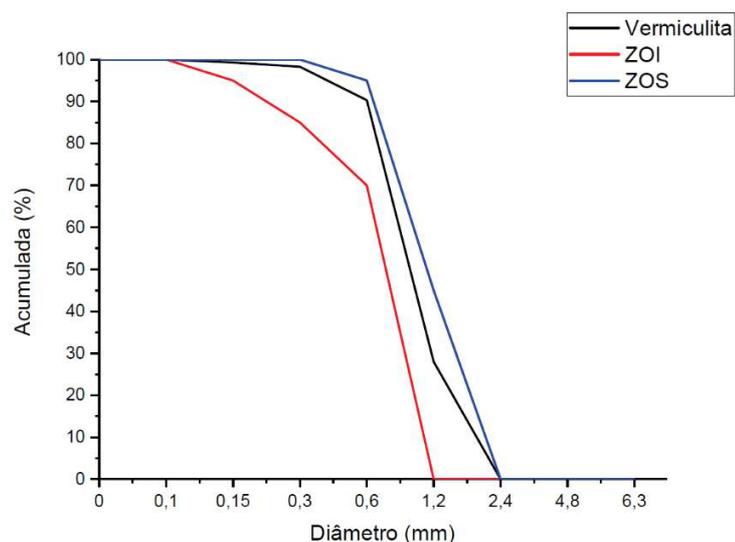
Peneira	Massa Retida (%)	Massa Acumulada (%)
6,3	0	0
4,8	0	0
2,4	0	0
1,2	28	28
0,6	62	90
0,3	8	98
0,15	1	99
>0,15	1	100

Módulo de finura = 3,16

Dimensão máxima característica = 1,2 mm

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 37 - Curva granulométrica da vermiculita com limites da norma NBR 11355 (ABNT, 2015)



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

4.1.2 Caracterização Química

A Tabela 8 apresenta a composição química, em óxidos mais estáveis, do cimento (CP II-F-40) e da cinza volante (CV), determinada através de FRX, por meio de análise quantitativa.

Tabela 8 - Composição química do cimento e cinza volante

Composto Químico	Teores (%)	
	CP II-F-40	CV
SiO ₂	18,178	48,884
Al ₂ O ₃	4,307	16,229
Fe ₂ O ₃	2,270	6,352
CaO	54,792	2,208
Na ₂ O	0,339	ND
TiO ₂	0,212	0,824
K ₂ O	0,773	1,493
MgO	1,360	1,146
P ₂ O ₅	0,111	0,176
SO ₃	2,480	0,645
Cr ₂ O ₃	0,008	-
MnO	0,035	-
SrO	0,230	-
ZnO	0,003	-
P.F.	5,082	0,179

ND = não detectado

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A NBR 12653 (ABNT, 2014) determina os requisitos químicos mínimos para as pozolanas. No caso da cinza volante utilizada nesta pesquisa, pertencente a classe

C, o somatório dos óxidos de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ é de 71,465%, de forma que atende aos parâmetros mínimos da norma de 70%.

Em relação ao teor de SO_3 a mesma norma estabelece o valor máximo de 5%. A CV atende a esta exigência, com presença de 0,645% deste óxido. Quanto à perda ao fogo, o estipulado em norma é um valor igual ou menor que 6% para pozolanas de classe C, a CV utilizada atende este requisito ao apresentar 0,179%.

A Tabela 9 apresenta a composição química determinada através de FRX, por meio de análise qualitativa, da sílica ativa (SA).

Tabela 9 - Composição química da sílica ativa

Material	Elementos majoritários (>50%)	Menor quantidade (5%<x<50%)	Elementos Traços (<5%)
Sílica Ativa	Si	-	K, Ca, Al, Fe, P, Mn, S, Cu, Rb, Zn, Sr

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Identifica-se na Tabela 9, que a sílica ativa é composta basicamente por sílica e alguns elementos traços. Por se tratar de uma análise qualitativa do material não foi possível identificar o teor exato de sílica e a porcentagem de equivalente alcalino.

O equivalente alcalino do cimento e da CV foi calculado a partir dos resultados de FRX através da Equação 4, proposta por Veronelli (1978). Os valores utilizados para o cálculo são em porcentagem. Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 10.

$$Na_2O_{equivalente} = Na_2O + 0,658.K_2O \quad (\text{Equação 4})$$

Tabela 10 - Equivalente alcalino do cimento e da CV

Material	Eq. Alcalino (%)
CP II-F-40	0,85
CV	0,98

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

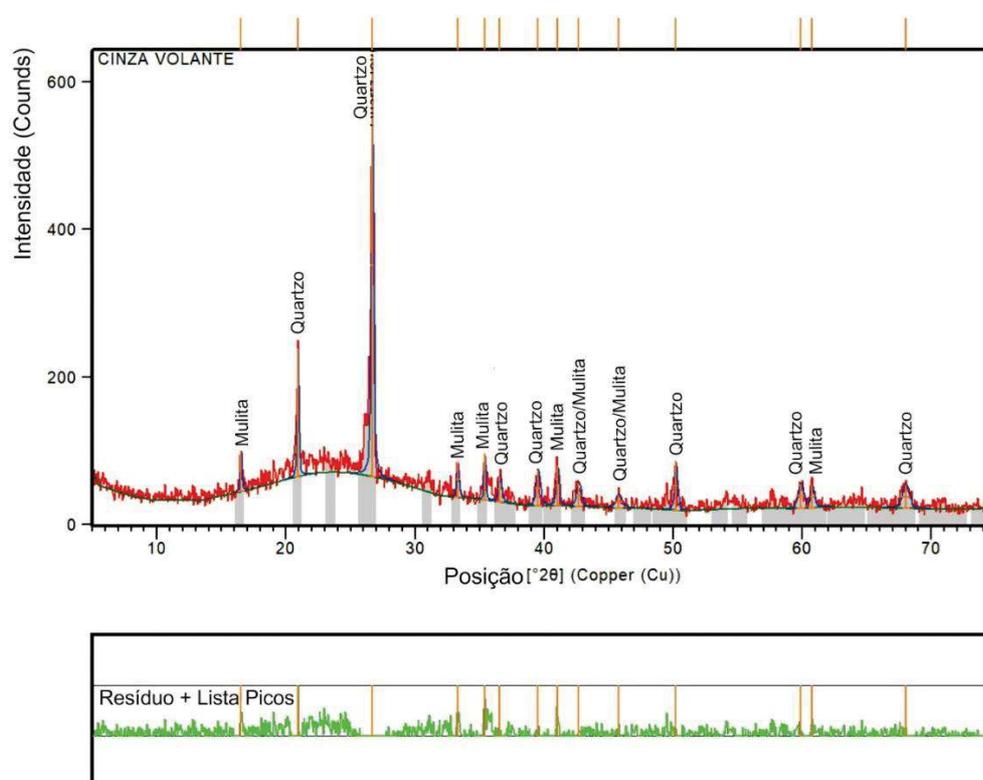
Apesar do cimento CP II-F-40 atender todos os parâmetros exigidos pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018), observa-se que apresentou equivalente alcalino de 0,85%, valor superior aos 0,6% recomendados pela ASTM C-150 (2019). De acordo com esta norma, "cimentos com baixo teor de álcalis", o que seria recomendado para manter a integridade da fibra, devem possuir equivalente alcalino inferior a 0,6%.

Já a CV apresentou valor de equivalente alcalino em conformidade com a NBR 12653 (ABNT, 2014) que estabelece valor em porcentagem menor ou igual a 1,5% para pozolanas da classe C.

4.1.3 Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica da cinza volante apresenta-se no difratograma representado na Figura 38.

Figura 38 - Difratograma da cinza volante



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

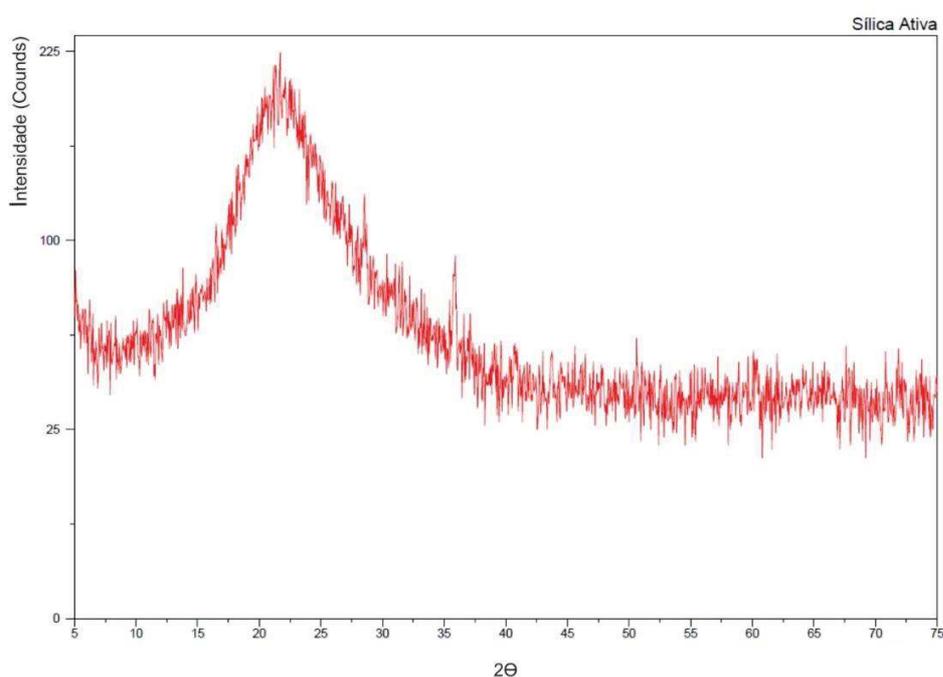
No difratograma da cinza volante, observa-se picos cristalinos de sílica na forma de quartzo (SiO_2) e mulita ($\text{Al}_{2.4}\text{Si}_{0.6}\text{O}_{4.8}$). O halo amorfo, característico do material e indicativo da sua reatividade, também está presente na CV, na posição entre os ângulos 16 e 31. Foi utilizada a base de dados e ficha catalográfica ICSD - 027833 para identificar a fase do Quartzo e a ICSD - 023867 para a Mulita.

Chama-se a atenção para a não identificação da hematita (Fe_2O_3), que apesar de em menor quantidade (5,68%) costuma ser identificada em diversas pesquisas como a de Hoppe Filho (2008) e Guillante (2018), o que pode sugerir que isso ocorreu devido ao passo determinado para realizar a análise que foi de $0,05^\circ/1s$.

O passo angular utilizado por Guillante (2018) foi de $0,01^\circ$ e tempo de 50s, enquanto Hoppe Filho (2008) utilizou $0,02^\circ$ e tempo por passo de 10s. Até mesmo pelos autores terem realizado Rietveld, o ensaio de DRX foi realizado com leitura angular dos picos mais lenta, passo menor, o que gera difratogramas mais limpos.

A caracterização mineralógica da sílica ativa apresenta-se no difratograma representado na Figura 39.

Figura 39 - Difratograma da sílica ativa



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

No difratograma da sílica ativa, observa-se as características de um material amorfo: ausência de picos, descolamento da linha de base e a presença do halo amorfo nos ângulos iniciais.

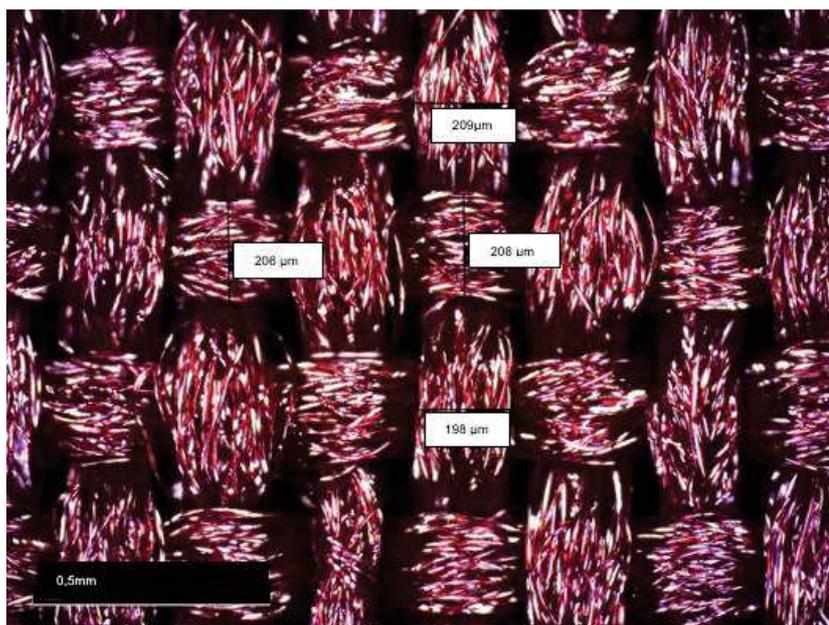
4.2 Caracterização do Reforço

Os resultados apresentados na sequência foram obtidos na Etapa 2 do programa experimental.

4.2.1 Morfologia

A Figura 40 mostra a microestrutura da fibra estudada. Nas imagens obtidas através do microscópio digital, observa-se a morfologia típica do tecido de poliéster sem impregnação.

Figura 40 - Morfologia do tecido de poliéster



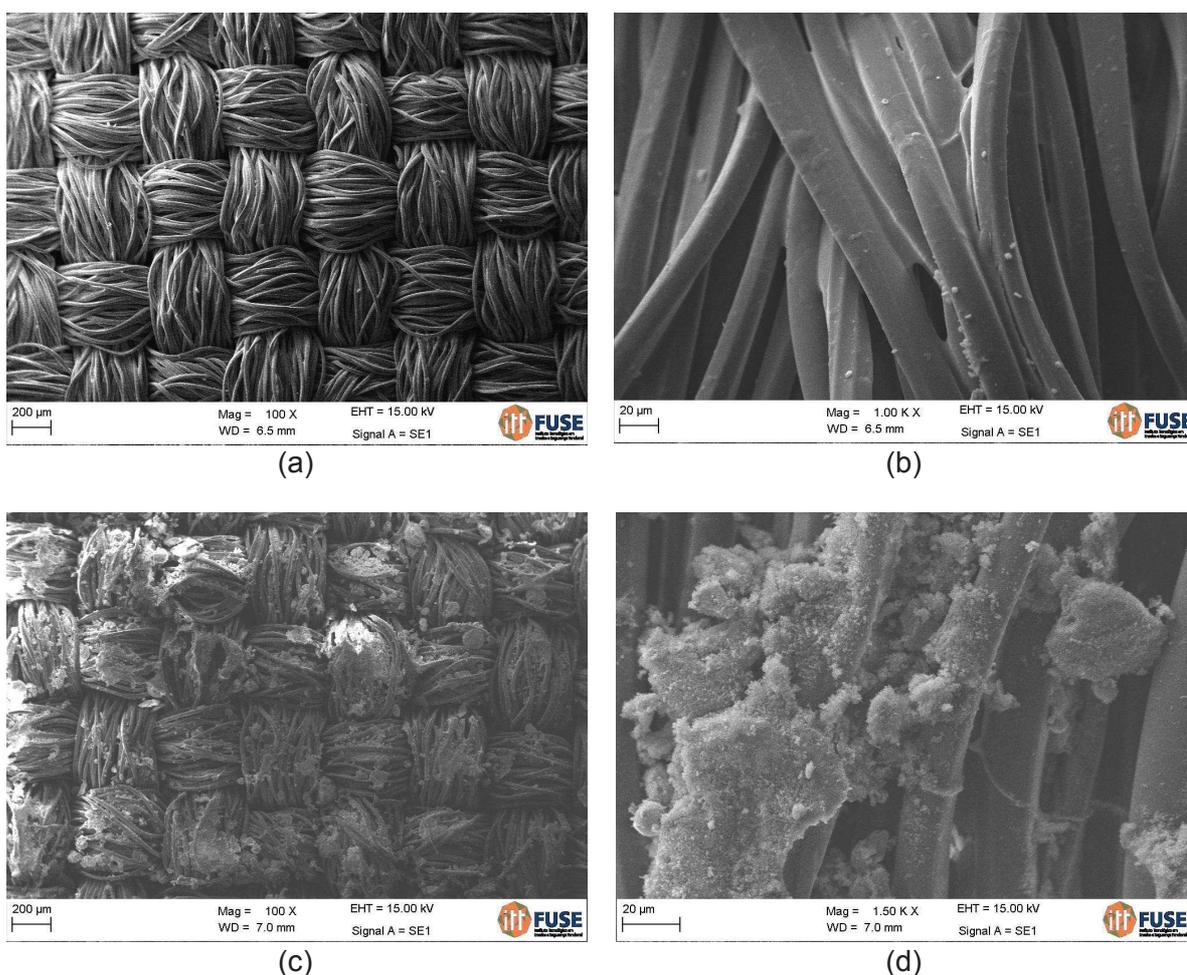
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O poliéster analisado trata-se de um tecido plano 2D, fabricado com dois conjuntos de fios entrelaçados perpendicularmente ($0^\circ/90^\circ$) entre si, cruzando-se um sobre o outro de maneira alternada.

Os fios são compostos por um grupo de fibras longas chamadas de filamentos, que quando compõem o fio de forma agrupada em feixes como verifica-se na imagem do tecido estudado, são chamados de multifilamentos. O tecido analisado possui massa específica de $1,38 \text{ g/cm}^3$ e seus fios espessura na ordem de $200 \text{ } \mu\text{m}$ ($0,2 \text{ mm}$). Para calcular a área da seção transversal e denominar a resistência à tração direta do poliéster, foi utilizado o valor de $0,2 \text{ mm}$ tanto para os tecidos não tratados como para os tratados, uma vez que não é observada um aumento da espessura nos tecidos impregnados, somente uma melhor união dos filamentos. O cálculo da área da seção do tecido de poliéster encontra-se no Apêndice A.

Na Figura 41 (a) e (b) apresenta-se amostra de tecido de poliéster com impregnação de SBR e na Figura 41 (c) e (d) apresenta-se amostra impregnada com SBR + SA, realizadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Figura 41 - Imagens de MEV do tecido de poliéster (a) e (b) impregnado com SBR, (c) e (d) impregnado com SBR + SA



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A expectativa de que o tratamento da superfície das fibras por impregnação de soluções poliméricas fosse capaz de produzir uma seção transversal homogênea, promovida pela união dos filamentos pela ação do adesivo, conforme o apresentado por Hegger e Voss (2008), não foi completamente atendida. Contudo, ao comparar as imagens das fibras com impregnação (Figura 41) com as fibras sem impregnação (Figura 40), verifica-se que os fios com tratamento resultam em uma melhor ligação dos filamentos internos, com o destaque para o tratamento com SBR + SA que parece ter uma melhor união entre os multifilamentos.

Verificou-se também através de análise visual, que a impregnação dos tecidos reduz a flexibilidade do tecido, principalmente no tratamento com SBR + SA.

4.2.2 Comportamento Mecânico

O resíduo de tecido empregado foi caracterizado, quanto a seu comportamento mecânico de resistência à tração direta para ambas as direções, urdidura e trama, conforme NBR ISO 13934-1:2016.

Na Tabela 11 são apresentados os resultados das médias das amostras para o ensaio de tração direta do tecido de poliéster. Os valores em parênteses correspondem ao desvio padrão. Os valores obtidos para cada amostra individualmente estão disponíveis no Apêndice A.

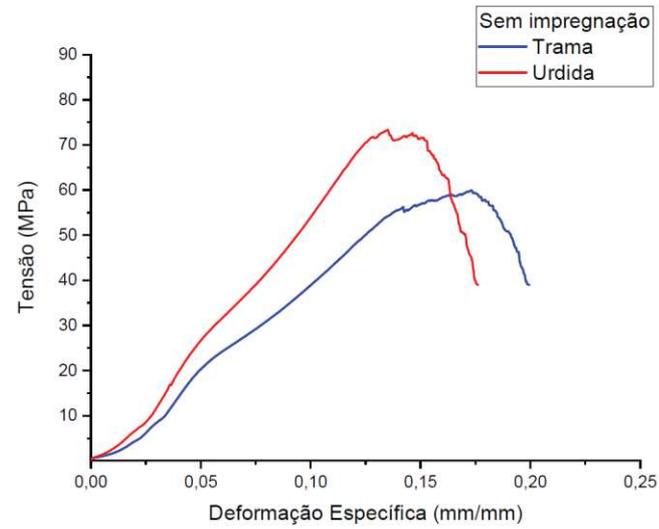
Tabela 11 - Resultados do ensaio de tração direta do tecido de poliéster sem tratamento e com tratamento por impregnação

Amostra		Tensão Máx (MPa)	Deformação Máx. (%)
S/ impregnação	Trama	61,67 (5,58)	17,26 (1,95)
	Urdidura	75,66 (3,82)	14,60 (1,09)
C/ impregnação SBR	Trama	70,32 (2,24)	16,20 (0,66)
	Urdidura	79,79 (1,88)	16,19 (0,50)
C/ impregnação SBR + SA	Trama	83,84 (9,54)	19,69 (2,22)
	Urdidura	82,72 (6,94)	21,70 (1,37)

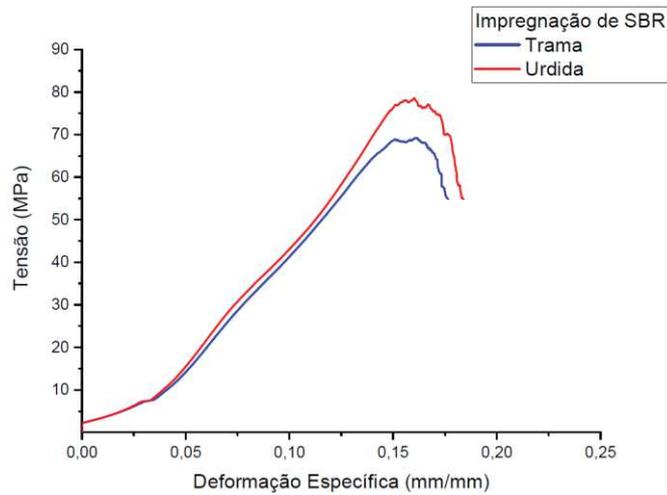
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Figura 42 observa-se as curvas de tensão-deformação do tecido de poliéster analisado com e sem tratamento por impregnação.

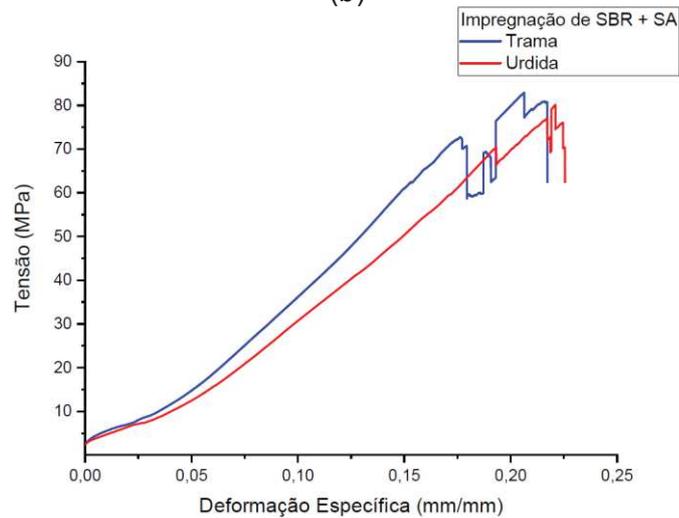
Figura 42 - Curvas tensão x deformação da trama e urdidura do tecido de poliéster: (a) sem impregnação, (b) com impregnação de SBR e (c) com impregnação de SBR + SA



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

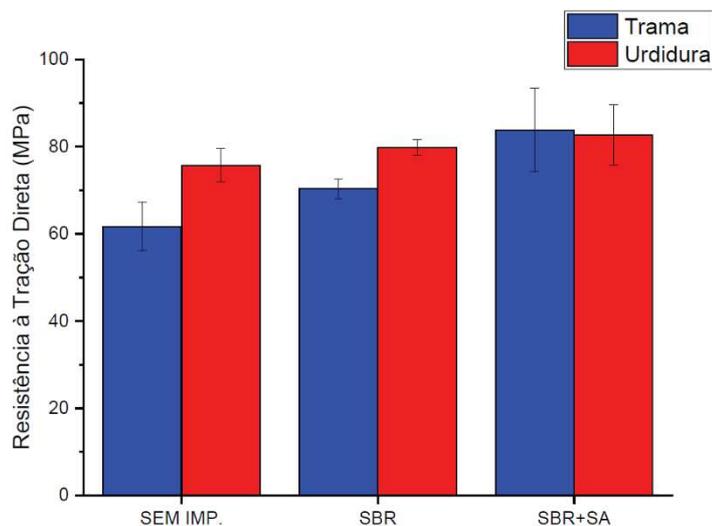
São três os tipos de comportamento tensão-deformação dos materiais poliméricos: polímero frágil que sofre fratura enquanto se deforma elasticamente e ocorre sem a observação da deformação inicial do material; polímero dúctil, cuja deformação inicial é elástica, seguida por escoamento e uma região de deformação plástica; e finalmente deformação totalmente elástica cujas grandes deformações (mesmo sob pequenos níveis de tensão) são recuperáveis (RIANDE *et al.*, 1999; CALLIESTER, 2000).

O tipo de fratura observada nas amostras de poliéster sem tratamento por impregnação é claramente como as apresentadas em materiais dúcteis, uma vez que apresenta grande deformação até o momento do rompimento. Os tecidos impregnados somente com SBR apresentaram comportamento semelhante, extensa área de deformação elástica inicial, seguida por escoamento e uma região de deformação plástica.

Já o comportamento do poliéster com impregnação de SBR + SA ocorreu de forma diferente. A deformação elástica ocorreu e a ruptura foi de forma súbita, uma vez que o escoamento não foi seguido de deformação plástica como nos demais tipos de amostras, apontando para ser classificado como material frágil. A fratura do tipo frágil normalmente ocorre em materiais poliméricos com maior rigidez tais como fibras de vidro e carbono (RIANDE *et al.*, 1999). Observa-se que ao realizar o tratamento por impregnação com SBR + SA, o poliéster fica claramente mais rígido.

A Figura 43 apresenta as tensões máximas encontrados para o tecido de poliéster com diferentes tipos de impregnação utilizados no ensaio de tração direta. São valores médios de 5 amostras selecionadas no sentido da trama e 5 amostras no sentido da urdidura.

Figura 43 - Tração direta da trama e da urdidura do tecido de poliéster com e sem tratamento por impregnação



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Ao realizar o ensaio de tração direta, verificou-se que o tecido sem impregnação utilizado nesta pesquisa obteve uma média de resistência de 61,67 MPa no sentido da trama e 75,66 MPa no sentido da urdidura, valores dentro da faixa de 48,3 MPa a 72,4 MPa, descrita por Callister (2002). No entanto, é significativamente inferior à tração da fibra de vidro AR que é de 2500 MPa, caracterizada por Peled, Bentur e Mobasher (2017), fibra tradicionalmente empregada como reforço em compósitos cimentícios.

Observou-se uma contribuição dos tratamentos na resistência à tração direta dos tecidos. No sentido da trama, o aumento foi de 14,03% para o tecido impregnado somente com SBR e de 35,95% para o tecido impregnado com SBR + SA. Já no sentido da urdidura, o aumento foi de 5,47% para o têxtil com tratamento de SBR e 9,33% para os com SBR + SA. Porém, a variabilidade observada nos resultados faz com que se tome com cautela os incrementos observados no comportamento mecânico. No entanto, a literatura aponta benefícios desse tipo de tratamento. Por exemplo, Fidelis (2014) observou resultados até 24% melhores para as amostras de tecido de juta impregnadas com SBR em relação às não tratadas. Da mesma forma, Triantafillou (2016), também descreve, que o tratamento por impregnação das fibras resulta em uma melhor ativação e união dos filamentos internos em comparação aos fios sem tratamento, o que acarreta maior resistência.

Quanto ao sentido das tramas, as médias de tensões máximas da urdidura apresentaram um desempenho mais satisfatório tanto nos tecidos sem impregnação

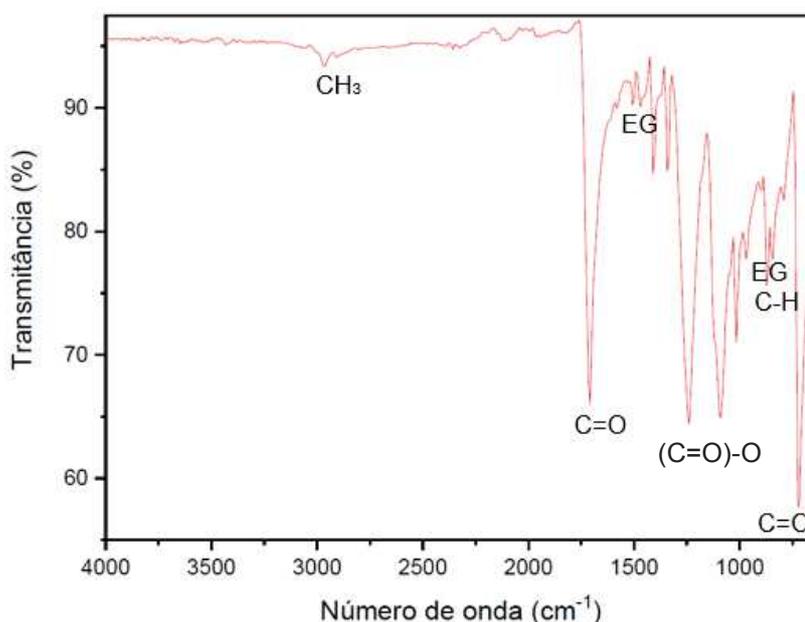
(valor 22,69% maior de resistência à tração direta), como nos tecidos impregnados com SBR (valor 13,48% mais elevado). Haik, Sasi e Peled (2017) analisaram o comportamento mecânico de tecidos planos quanto à tração e observaram que na direção da urdidura os tecidos manifestaram melhor desempenho à tração, em relação à direção da trama. Segundo os autores, este fato ocorre pelo motivo de que o urdume está enlaçado pelos fios da trama, resultando em um maior atrito entre os filamentos, enquanto os filamentos no fio de trama estão livres e desta forma são solicitados separadamente.

No entanto, chama a atenção, que nos tecidos impregnados com SBR + SA, a resistência à tração no sentido da urdidura em relação ao sentido da trama se equivalem, o que pode ser considerado benéfico ao trabalhar com resíduo de tecido proveniente de confecções, que na maioria das vezes possuem variados tamanhos e formatos, impossibilitando muitas vezes a identificação do sentido da trama ou urdidura do retalho.

4.2.3 Composição Química

A fim de caracterizar a composição química, a Figura 44 apresenta a Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) para a amostra de tecido de poliéster (PET) sem impregnação.

Figura 44 - Espectro de FTIR do tecido de poliéster



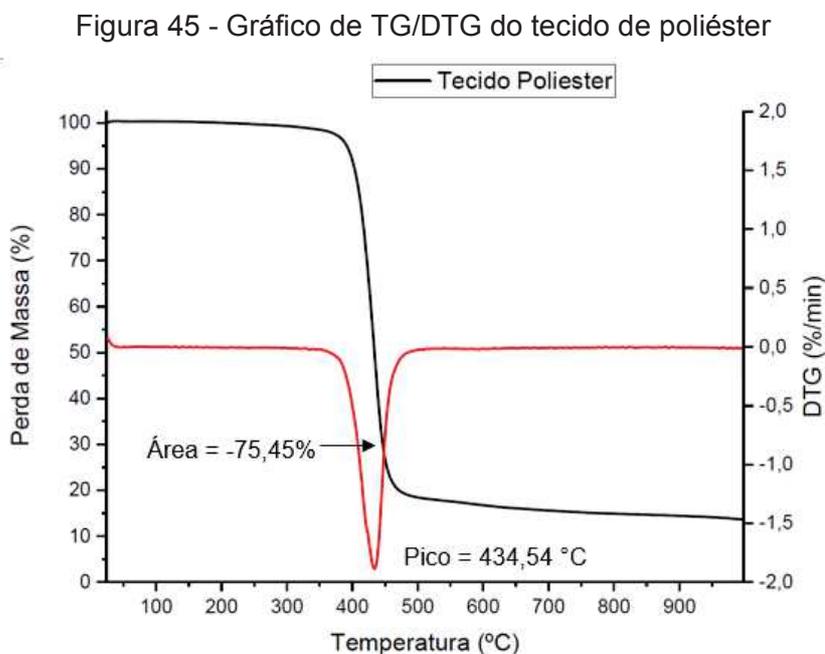
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A amostra apresenta deformações típicas de um polímero PET nas regiões de 2900cm^{-1} para CH_3 ; 1715 e 730cm^{-1} para o grupo $\text{C}=\text{O}$; 1460 e 977cm^{-1} para o Etileno glicol (EG); e 1250cm^{-1} para o grupo $(\text{C}=\text{O})-\text{O}$.

Vanini *et al.*, (2013) encontraram as mesmas bandas de deformações axiais nas regiões citadas para uma amostra de PET, confirmando que o tecido analisado se trata de um poliéster.

4.2.4 Análise Térmica

A Figura 45 apresenta o gráfico de TG/DTG obtidos no ensaio em atmosfera inerte de N_2 para o tecido de poliéster.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Verifica-se que a amostra apresenta perda de massa de 75,45% entre 370°C e 500°C , com o pico em $434,54^{\circ}\text{C}$, estando em acordo com os dados apresentados por Vanini *et al.* (2013) para amostra de PET.

Estudos de Mendes e Pereira (2011) também demonstraram que a degradação da amostra PET estudada ocorreu entre $375-465^{\circ}\text{C}$ com o pico da perda de massa em 436°C , com 88% da amostra degradada. Segundo Vanini *et al.* (2013), os grupos Dietileno Glicol (DEG) e Etileno glicol (EG) encontrados na cadeira do PET e identificados no ensaio de FTIR da amostra, são poucos estáveis quimicamente e mais susceptíveis à degradação. Por fim ocorre a degradação dos grupos aromáticos.

Esse é um aspecto a ser considerado quando pretende-se inserir o PET como reforço em compósitos destinados à materiais de construção. Nesse estudo, fez-se ensaios de resistência ao fogo, no entanto, o resíduo do desmoldante empregado tornou combustível mesmo as amostras sem reforços. Novos estudos nesse sentido se fazem necessários.

4.3 Caracterização da Matriz Cimentícia

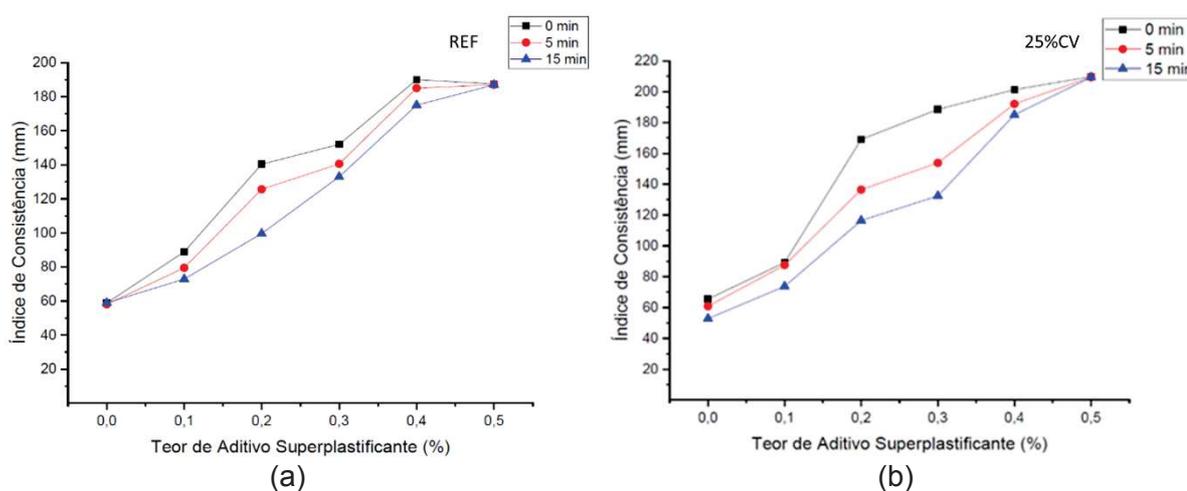
Os resultados apresentados na sequência foram obtidos na Etapa 3 do programa experimental.

4.3.1 Dosagem e Caracterização da Matriz no Estado Fresco

Para o estado fresco, foram realizados ensaios de mini-cone de Kantro em pastas, classificação do concreto autoadensável (método do cone de Abrams) conforme adaptação da NBR 15823 (ABNT, 2017) e ensaio de densidade de massa no estado fresco conforme método da NBR 13278 (ABNT, 2005).

Na Figura 46 e Apêndice B são apresentados os resultados dos ensaios de mini-cone de Kantro em pastas com os diferentes teores de aditivo superplastificante.

Figura 46 - Ponto de saturação em pasta do aditivo superplastificante: (a) referência e (b) com substituição da massa de cimento por 25% de CV



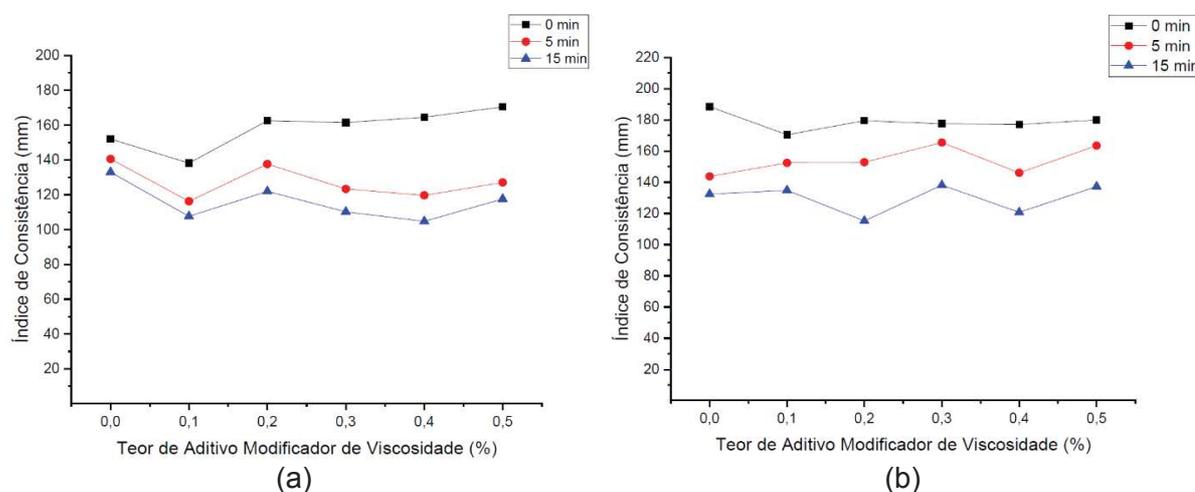
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O teor ótimo de aditivo superplastificante foi considerado 0,30%. O ponto de saturação ocorre aos 0,40%, ou seja, com este teor de aditivo ocorre a fluidez máxima da mistura sem evidências de maior espalhamento com o uso de 0,50% de

superplastificante. No entanto, com 0,40% de aditivo observa-se grandes problemas de exsudação e segregação da mistura, de forma que se definiu 0,30% como o ideal para a dosagem de concreto leve com e sem substituição da massa de cimento por 25% de CV.

Os resultados do mini-cone de Kantro com aditivo superplastificante fixado em 0,30% e diferentes teores de aditivo modificador de viscosidade (AMV) são apresentados na Figura 47 e no Apêndice C.

Figura 47 - Mini-cone de Kantro em pasta com aditivo superplastificante e teores de AMV: (a) referência e (b) com 25% de CV

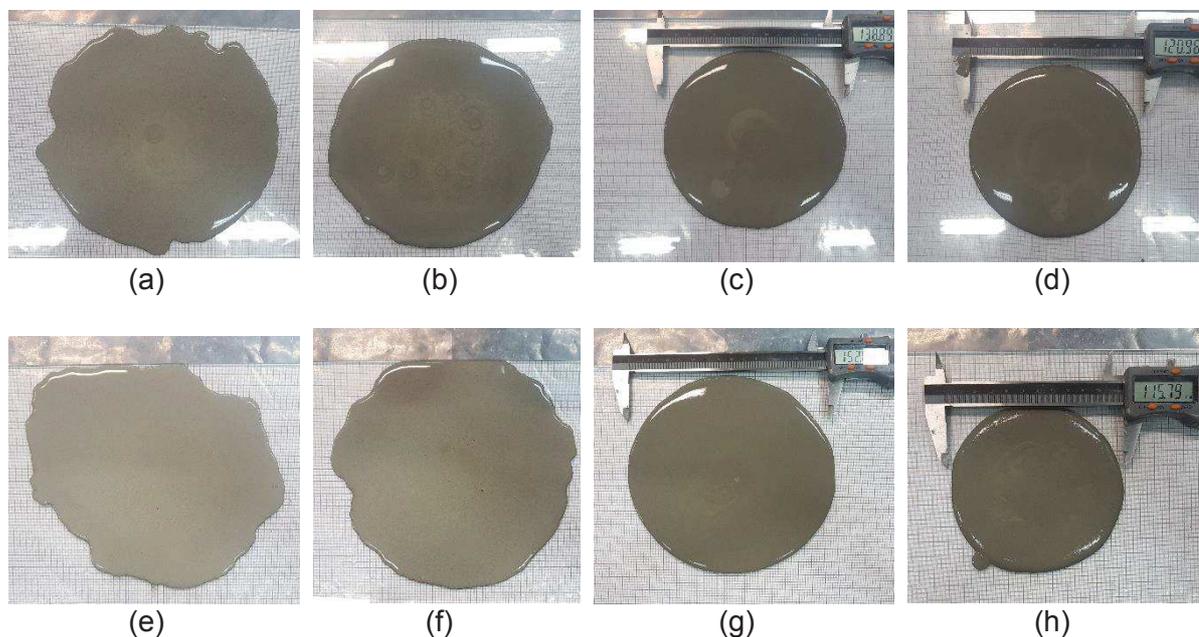


Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Verifica-se que tanto para as pastas de referência, quanto para as com CV, a partir de 0,20% de AMV há uma tendência de manutenção do espalhamento.

Desta forma, optou-se por fixar o AMV em 0,20%, uma vez que além de não haver diminuição do espalhamento com este teor aos 0 min após a mistura, observa-se claramente que o AMV melhorou aspectos da reologia da pasta através da sua viscosidade em relação a amostra somente com superplastificante (Figura 48). Não houve a diminuição da fluidez aos 0 min mas ajudou a tornar a pasta mais coesa e com bordas melhores definidas.

Figura 48 – Espalhamento pelo Mini-cone de Kantro: (a) pasta de cimento com 0,30% de superplastificante; pasta de cimento com 0,30% de superplastificante e 0,20% AMV medidas em (b) 0 min, (c) 5 min e (d) 15 min após a mistura; (e) pasta de cimento com 25% CV e 0,30% de superplastificante; pasta de cimento com 25% CV, 0,30% de superplastificante e 0,20% AMV medidas em (f) 0 min, (g) 5 min e (h) 15 min após a mistura



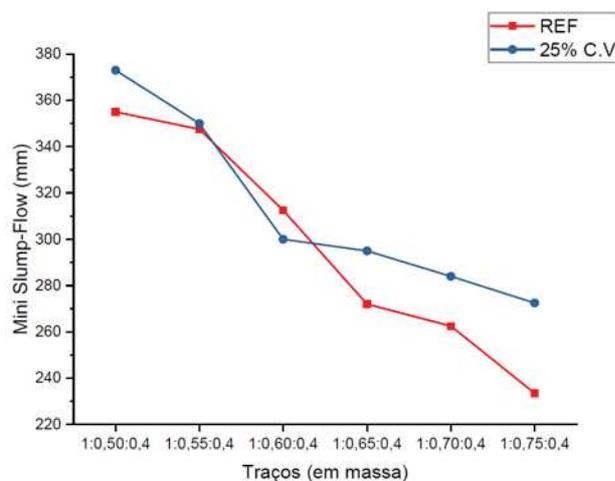
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Observa-se ainda na Figura 48 uma perda de espalhamento relativamente rápida, quando se compara as aberturas das pastas ao longo do tempo.

Fixado o teor ideal dos aditivos superplastificante em 0,30% e do aditivo modificador de viscosidade em 0,20% para misturas com e sem CV, o próximo passo foi determinar o percentual ideal de vermiculita.

Na Figura 49 são apresentados os resultados do mini slump-flow das misturas com e sem substituição da massa de cimento por 25% de CV e diferentes percentuais de vermiculita. Na Tabela 12, em analogia, são apresentadas as classes para concreto autoadensável em que cada mistura se enquadra. No Apêndice D estão descritos todos os resultados compilados do ensaio.

Figura 49 - Mini slump-flow para diferentes porcentagens de vermiculita em misturas sem CV (REF) e com substituição da massa de cimento por 25% de CV



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 12 - Determinação do espalhamento, tempo de escoamento (t_{250}) e do índice de estabilidade visual (IEV) de variações do traço de vermiculita em misturas com e sem substituição da massa de cimento por 25% de CV

Concreto autoadensável						
Mistura	Traço em massa (agl:v:a/agl)	Mini slump-flow		Viscosidade plástica aparente		Índice de estabilidade visual (IEV)
		SF médio (mm)	Classe	T_{250} (s)	Classe	
REF	1:0,50:0,40	355,00	SF 2	$\leq 2s$	VS 1	IEV 1 (Estável)
	1:0,55:0,40	347,50	SF 2	$\leq 2s$	VS 1	IEV 0 (Altamente Estável)
	1:0,60:0,40	312,50	SF 1	$> 2s$	VS 2	IEV 2 (Instável)
	1:0,65:0,40	272,00	SF 1	$> 2s$	VS 2	IEV 2 (Instável)
	1:0,70:0,40	262,50	SF 1	$> 2s$	VS 2	IEV 2 (Instável)
	1:0,75:0,40	233,50	SF 1	-	-	IEV 2 (Instável)
25%CV	1:0,50:0,40	373,00	SF 2	$\leq 2s$	VS 1	IEV 1 (Estável)
	1:0,55:0,40	350,00	SF 2	$\leq 2s$	VS 1	IEV 0 (Altamente Estável)
	1:0,60:0,40	300,00	SF 1	$> 2s$	VS 2	IEV 2 (Instável)
	1:0,65:0,40	295,00	SF 1	$> 2s$	VS 2	IEV 2 (Instável)
	1:0,70:0,40	284,00	SF 1	$> 2s$	VS 2	IEV 2 (Instável)
	1:0,75:0,40	272,50	SF 1	$> 2s$	VS 2	IEV 2 (Instável)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

É possível verificar que a inclusão de cinza volante na mistura vem a acarretar mudanças no estado fresco, como maior plasticidade e fluidez, uma vez que as amostras com CV de modo geral possuem diâmetros de espalhamento maiores que as amostras de referência.

Autores afirmam que o aumento da fluidez proporcionado pela CV nos concretos está vinculado ao formato esférico das partículas dessa pozolana que faz com que haja maior movimento das partículas (GÜNEYSI *et al.*, 2015; HEMALATHA; RAMASWAMY, 2017).

Observa-se também que quanto maior o teor de vermiculita, tanto nas amostras de referência como nas com CV, menor é o diâmetro de espalhamento, assim como são alterados negativamente, outros parâmetros, como o t_{250} e o IEV, o que não é desejável quando se deseja um concreto fluido.

Verifica-se que ocorre um aumento do t_{250} , tempo entre o início e o final do escoamento do concreto a partir do diâmetro do mini cone de Abrams até a marca circular de 250mm da placa base, para teores de vermiculita acima de 60% em relação a massa de cimento. Para o traço 1:0,75:0,40 somente com cimento, o espalhamento foi menor que 250mm, de forma que não foi possível classificar o t_{250} . Ainda na análise dos traços com teores mais elevados de vermiculita, também é verificado que ocorre instabilidade do IEV, com presença de pequena auréola de pasta e/ou acúmulo de agregado no centro da amostra. Este comportamento é exemplificado na Figura 50, na qual apresenta-se espalhamento do traço com 0,70 de vermiculita, indicando um excesso de agregado leve na mistura.

Figura 50 - Mini slump-flow do traço 1:0,70:0,4 sem CV: (a) vista superior e (b) perfil.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Uma vez que o intuito é a dosagem de uma mistura fluida com boa superfície de acabamento no estado endurecido, para divisórias leves e/ou mobiliários, determinou-se que a classe de espalhamento escolhida para a presente pesquisa seria SF2. As duas misturas que apresentaram esta classificação foram as de traço 1:0,50:0,40 e 1:0,55:0,40.

Para o traço com 50% de vermiculita em relação a massa de cimento, a mistura apresenta-se fluida com $t_{250} \leq 2s$ e IEV estável, sem presença de segregação e leve

exsudação, indícios de que pode ser acrescentada uma pequena parcela a mais de agregado.

Neste sentido, a mistura com 55% de vermiculita, apresentou-se a mais satisfatória e com maior percentual de agregado que pode ser utilizado sem prejuízos visíveis no estado fresco. O traço 1:0,55:0,40, tanto em misturas com substituição de 25% de CV como nas misturas somente com cimento, apresenta IEV altamente estável e $t_{250} \leq 2s$, não foram evidenciados problemas de segregação, exsudação ou empilhamento de agregado e possui características de fluidez como pode ser verificado na Figura 51, o que fez com que esse fosse o traço adotado.

Figura 51 - Mini slump-flow do traço 1:0,55:0,4 com 25% de CV: (a) vista superior e (b) perfil

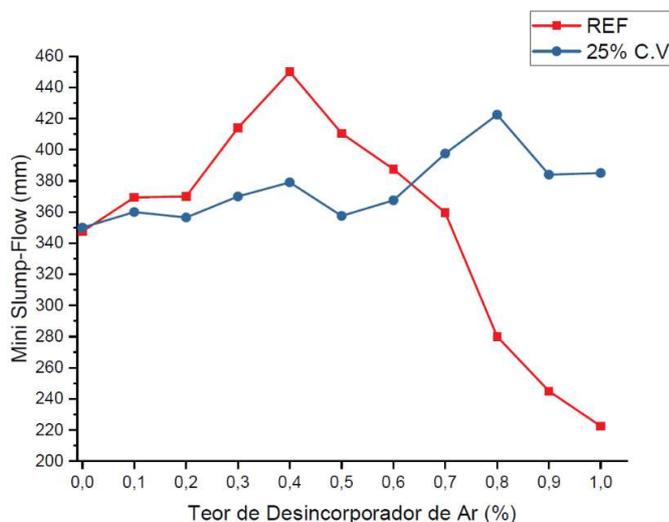


Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A densidade de massa de todas as misturas no estado fresco, ficaram abaixo de 2000 kg/m^3 , valor estipulado pela NBR 8953 (ABNT, 2015) para a mistura ser considerada leve. Para o traço adotado, a mistura composta com cimento obteve o resultado de $1248,72 \text{ kg/m}^3$, e para a mistura com substituição da massa de cimento por 25% de CV obteve-se $1196,27 \text{ kg/m}^3$.

Empregou-se, ainda, para fins de acabamento, material desincorporador de ar. Na Figura 52 pode-se observar os resultados do mini slump-flow das misturas com e sem substituição da massa de cimento por 25% de CV e diferentes teores de desincorporador de ar.

Figura 52 - Mini slump-flow com teores de agente desincorporador de ar em misturas sem CV (REF) e com substituição da massa de cimento por 25% de CV



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Nas misturas de referência, observa-se que o comportamento do teor de 0,10% e 0,20% de desincorporador de ar foi semelhante e dentro dos requisitos desejados. A partir de 0,30% até 0,60% houve um aumento no espalhamento (classe SF3) com presença de exsudação. Nos teores mais elevados desse produto (0,80-1,00%) houve uma diminuição do espalhamento (classe SF1) e aglomeração de agregado no centro do concreto.

O comportamento observado do produto nas misturas com CV foi menos variável, o que indica uma menor interferência do desincorporador de ar na reologia. Os espalhamentos até o teor de 0,60% de desincorporador de ar obtiveram características semelhantes, de forma que foi verificado somente uma mudança de classe para SF3 a partir de 0,70%, além de misturas com leve exsudação a partir desse percentual.

Desta maneira, os indicativos no estado fresco apontam para a utilização de teores mais baixos do desincorporador de ar, 0,10% ou 0,20%, uma vez que com estes teores observou-se as características necessárias e previamente estipuladas.

As mesmas características não foram observadas com teores mais elevados quanto ao uso do material desincorporador de ar nas misturas de referência. Já nas misturas com 25% de CV, apesar de terem sido verificadas estas características previamente estipuladas, não há maiores ganhos em usos mais elevados do produto, de forma a ser uma atitude insustentável e desnecessária o uso de teores maiores que 0,20%.

A classificação das misturas estudadas conforme parâmetros reológicos, em analogia ao concreto autoadensável está compilada na Tabela 13. Os resultados na íntegra encontram-se no Apêndice E. Com base nessas análises, o teor adotado de desincorporador de ar foi o de 0,2%.

Tabela 13 - Determinação do espalhamento, tempo de escoamento (t_{250}) e do índice de estabilidade visual (IEV) em misturas com e sem substituição da massa de cimento por 25% de CV e teores de material desincorporador de ar

Concreto autoadensável						
Mistura	Desincorporado de ar (%)	Mini slump-flow		Viscosidade plástica aparente		Índice de estabilidade visual (IEV)
		SF média (mm)	Classe	T_{250} (s)	Classe	
REF	0,00	347,50	SF 2	$\leq 2s$	VS 1	IEV 0 (Altamente Estável)
	0,10	369,40	SF 2	$\leq 2s$	VS 1	IEV 0 (Altamente Estável)
	0,20	370,00	SF 2	$\leq 2s$	VS 1	IEV 0 (Altamente Estável)
	0,30	414,00	SF 3	$\leq 2s$	VS 1	IEV 1 (Estável)
	0,40	450,00	-	$\leq 2s$	VS 1	IEV 1 (Estável)
	0,50	410,50	SF 3	$\leq 2s$	VS 1	IEV 1 (Estável)
	0,60	387,50	SF 3	$\leq 2s$	VS 1	IEV 1 (Estável)
	0,70	359,50	SF 2	$\leq 2s$	VS 1	IEV 0 (Altamente Estável)
	0,80	280,00	SF 1	$> 2s$	VS 2	IEV 2 (Instável)
	0,90	245,00	SF 1	$> 2s$	VS 2	IEV 2 (Instável)
	1,00	222,50	-	-	-	IEV 2 (Instável)
25% CV	0,00	350,00	SF 2	$\leq 2s$	VS 1	IEV 0 (Altamente Estável)
	0,10	360,00	SF 2	$\leq 2s$	VS 1	IEV 0 (Altamente Estável)
	0,20	356,50	SF 2	$\leq 2s$	VS 1	IEV 0 (Altamente Estável)
	0,30	370,00	SF 2	$\leq 2s$	VS 1	IEV 0 (Altamente Estável)
	0,40	379,00	SF2	$\leq 2s$	VS 1	IEV 0 (Altamente Estável)
	0,50	357,50	SF 2	$\leq 2s$	VS 1	IEV 0 (Altamente Estável)
	0,60	367,50	SF 2	$\leq 2s$	VS 1	IEV 0 (Altamente Estável)
	0,70	397,50	SF 3	$\leq 2s$	VS 1	IEV 1 (Estável)
	0,80	422,50	SF 3	$\leq 2s$	VS 1	IEV 1 (Estável)
	0,90	384,00	SF 3	$\leq 2s$	VS 1	IEV 1 (Estável)
	1,00	385,00	SF 3	$\leq 2s$	VS 1	IEV 1 (Estável)

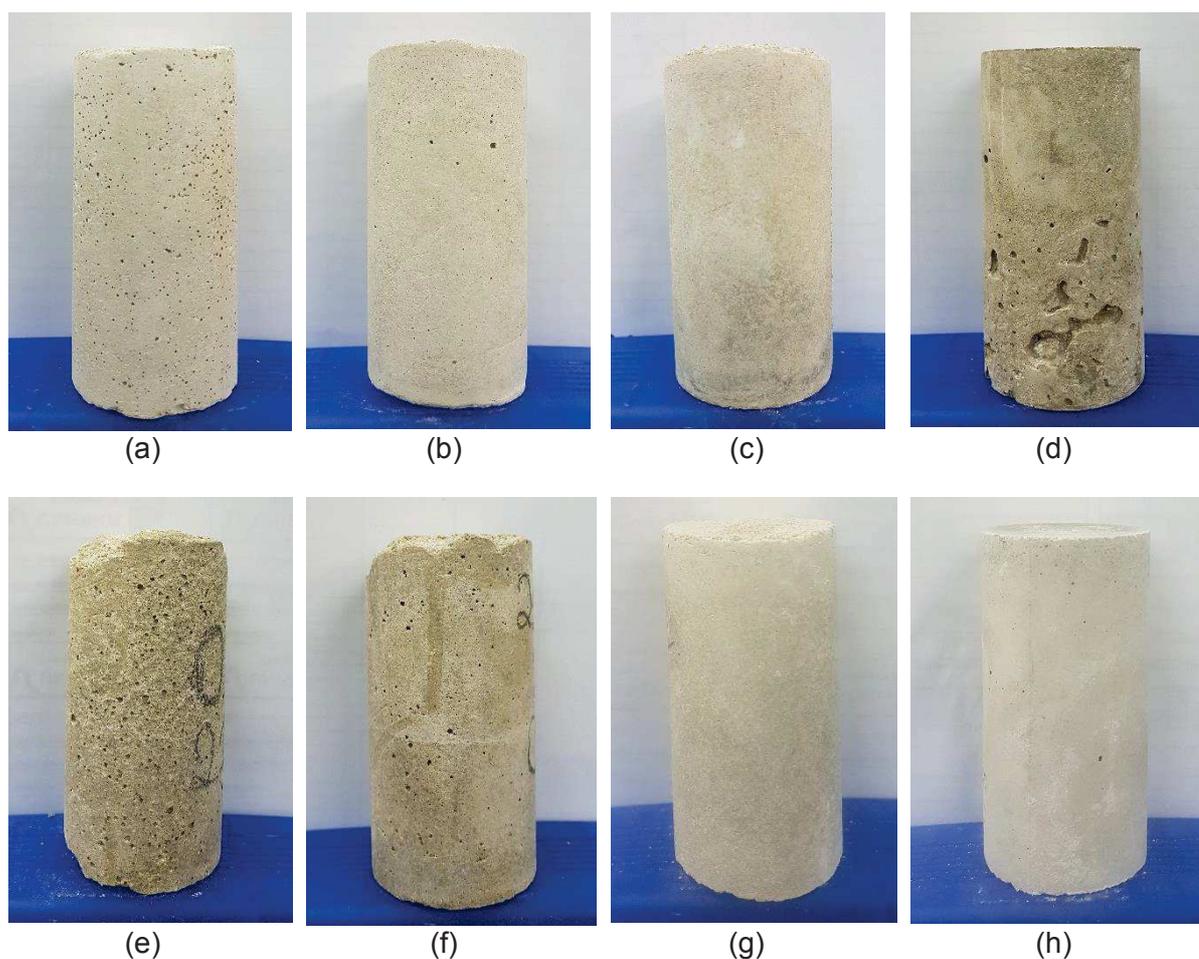
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Em relação à densidade de massa no estado fresco, todas as misturas com desincorporador de ar permaneceram abaixo de 2000 kg/m^3 , valor estipulado por norma para ser considerada leve. A densidade no estado fresco do traço 1:0,55:0,40 com 0,20% de desincorporador de ar, foi de 1264 kg/m^3 quando produzido somente com cimento, reduzindo para 1209 kg/m^3 com a substituição da massa de cimento por 25% de CV. Apesar deste produto trabalhar retirando o ar da mistura, o seu emprego incorreu em um aumento menor que 2% da densidade de massa em relação ao mesmo traço sem a utilização do desincorporador de ar, o que não é considerado relevante.

4.3.2 Estado Endurecido

A eficiência do desincorporador de ar em promover um o acabamento superficial livre de bolhas foi analisada visualmente em corpos de prova cilíndricos e os resultados podem ser observados na Figura 53.

Figura 53 - Amostras com diferentes teores de desincorporador de ar em misturas sem substituição da massa de cimento (a) 0,00%, (b) 0,10%, (c) 0,20% e (d)1,00%; e misturas com 25% CV (e) 0,00%, (f) 0,10%, (g) 0,20% e (h)1,00%



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Ao analisar as imagens da Figura 53, é claramente perceptível que nas amostras em que não foi utilizado desincorporador de ar, a superfície é repleta de poros aparentes. Ao adicionar 0,10% deste produto nas misturas com e sem CV, o número de poros na superfície diminui, e ao adicionar 0,20% de material desincorporador de ar, percebe-se visualmente que o acabamento superficial é ainda melhor, não se identificando falhas significativas.

Ainda, nas amostras com CV, o emprego de teores mais elevados do material desincorporador de ar, não agrega maiores benefícios no acabamento da superfície da amostra se comparado com o teor 0,20%, ou seja, visualmente o acabamento é similar.

No estado endurecido, como esperado em função dos resultados obtidos no estado fresco, a densidade de massa medida, com o emprego de 0,20% de desincorporador de ar, foi de 1012 kg/m³ e 1132 kg/m³ respectivamente para as amostras sem e com CV. Apesar de apresentarem valores inferiores a 2000 kg/m³, o desincorporador de ar aumenta a densidade de massa das misturas, uma vez que as amostras que não o contém tiveram valores de 956 kg/m³ para a mistura sem CV e 915 kg/m³ nas misturas com CV. Ou seja, ao adicionar o desincorporador de ar, houve um aumento da densidade de massa de 6% para a amostra sem CV e 24% para a amostra com CV.

A partir da análise desses dados, considerou-se ideal, o teor de 0,20% de material desincorporador de ar tanto em misturas somente com cimento como nas misturas com CV.

Definido a partir de ensaios já descritos, o traço considerado o mais satisfatório foi o 1:0,55:0,40 (aglomerante:agregado:água/aglomerante), 0,30% de aditivo superplastificante, 0,20% de aditivo modificador de viscosidade e 0,20% de material desincorporador de ar. Na Tabela 14 estão descritos o consumo dos materiais em Kg por m³ de concreto para o traço de referência e para o traço com substituição da massa de cimento por 25% CV a ser utilizado no programa experimental.

Tabela 14 - Consumo dos materiais em Kg/m³ de concreto

Material (Kg/m ³)	Traço	
	(Ci:VE:a/c) 1:0,55:0,40	(Ci:CV:VE:a/c) 0,75:0,25:0,55:0,40
Cimento	519	436
Vermiculita Expandida	285,45	319,55
Cinza Volante	-	145
Água	207,60	232,40

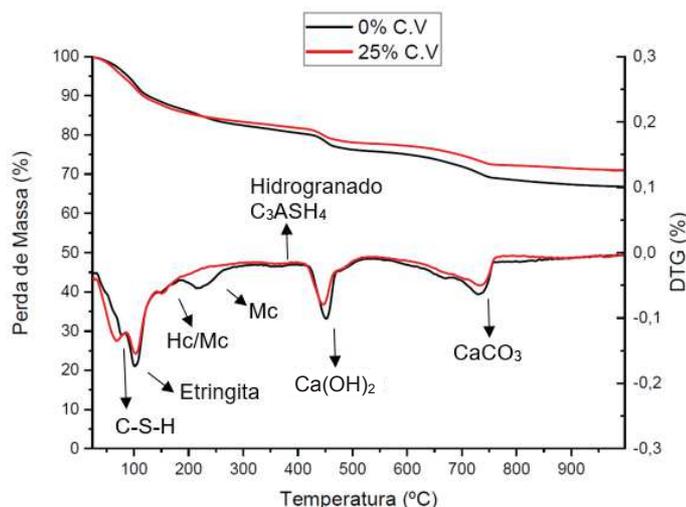
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Rossignolo e Agnesini, (2011) comentam sobre o alto consumo de cimento dos agregados leves, o uso de adições como a CV em substituição à massa de cimento são um meio de diminuir esse alto consumo.

Após definido o traço, caracterizou-se a matriz cimentícia no estado endurecido com o intuito de avaliar com o ensaio de TG/DTG a atividade pozolânica, bem como o comportamento mecânico de resistência à compressão.

A Figura 54 apresenta o gráfico com a curva de TG/DTG das pastas com e sem substituição da massa de cimento por CV aos 91 dias.

Figura 54 - Gráfico de TG/DTG das pastas de cimento aos 91 dias



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O pico decorrente da desidroxilação do hidróxido de cálcio ocorreu no intervalo de temperatura entre 400 e 480°C para todas as pastas, com áreas distintas para os eventos térmicos relacionados a perda de massa da portlandita evidenciados na DTG. É possível notar que a pasta com 25% CV resultou em menor pico de perda de massa, nesse intervalo de temperatura, portanto com menor área. Esse comportamento está relacionado com a capacidade das pozolana em consumir hidróxido de cálcio e no fato da CV gerar menor teor de CH do que a pasta de referência, uma vez que é produzida com menor consumo de cimento, e portanto, com menor disponibilidade de produtos hidratados.

A Tabela 15 apresenta a quantificação do teor de hidróxido de cálcio presente nas pastas aos 91 dias. A pasta referência (0% CV) apresentou maior teor de portlandita que a pasta com CV.

Tabela 15 - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ medido nas pastas de cimento aos 91 dias

Idade	0%CV (Referência) (%)	25% CV (%)
91 dias	11,01	9,06

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Em relação ao consumo de hidróxido de cálcio, a pasta com CV removeu 17,71% de CH em relação a pasta de referência, no entanto, a pasta com CV contém 25% menos de cimento, ou seja, aproximadamente 25% menos de CH, o que demonstra a baixa reatividade da CV empregada na pesquisa.

Na Tabela 16 são apresentadas as médias dos resultados de resistência à compressão para as misturas, aos 3, 7 e 91¹ dias de idade.

Tabela 16 - Resistência à compressão da argamassa

Mistura	Resistência (MPa)		
	3 dias	7 dias	91 dias
REF	0,44	1,01	6,98
25% CV	0,41	0,70	5,06

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A resistência dos corpos de prova aumenta de acordo com a idade e as amostras com CV apresentam valores inferiores às amostras de referência nas idades iniciais, porém não são diferenças tecnicamente significativas.

Contudo, a resistência mais baixa aos 91 dias das amostras com CV em relação à referência, pode ser explicada por ter sido utilizada uma pozolana pouco reativa, como apontam os diversos ensaios realizados. A menor reatividade da CV é justificada pelo tamanho da partícula, que é grande e cuja dissolução é mais lenta, o que retarda a reação pozolânica. O efeito da CV está diretamente relacionado com a sua composição química e área superficial, que influenciam na capacidade de consumo de CH existente e desta forma interferem no índice de pozolonicidade (KAWAMARA; TAKEMOTO, 1988; RECENA, 2011).

De forma geral, no entanto, o principal fator para o baixo valor de resistência à compressão está ligado ao fato da mistura enquadrar-se como leve. De acordo com Neville (2016), o concreto produzido com vermiculita possui resistência muito baixa e esta tem relação direta com a massa específica. O concreto com vermiculita é classificado como concreto de baixa massa específica, utilizado para fins não estruturais, com resistência abaixo de 7MPa.

Outros autores pesquisaram o uso da vermiculita expandida para a produção de painéis, e relatam que embora ocorra ganho na resistência térmica, concretos com este agregado apresentam baixa resistência mecânica, em torno de 2 a 3 MPa. Por

¹ As amostras não foram ensaiadas aos 28 dias devido à pandemia de COVID-19, que acarretou o fechamento dos laboratórios.

esta razão, a vermiculita expandida tem aplicações em vedações e não em peças estruturais (OLIVEIRA *et. al*, 2005; ARAÚJO; CÂNDIDO, 2015).

4.4 Caracterização do Compósito

Os resultados apresentados na sequência foram obtidos na Etapa 4 do programa experimental.

4.4.1 Tração Direta

Na Tabela 17 são apresentadas as médias dos resultados do ensaio de tração direta das amostras com e sem CV, bem como sem reforço e com o reforço com os diferentes tratamentos empregados. No Apêndice F estão descritos os resultados de todas os corpos de prova. Os ensaios foram realizados aos 91 dias. Não foi possível realizar o ensaio com o compósito sem reforço e 25% CV.

Tabela 17 - Resultados do ensaio de tração direta do compósito de referência e com 25% de CV (valores em parêntese correspondem ao desvio padrão)

Amostra	Tensão 1ª fissura (MPa)	Def. 1ª fissura (%)	Tensão Máx. (MPa)	Deformação Máx. (%)	
REF	S/ reforço	0,26 (0,03)	0,04	0,28 (0,02)	0,07 (0,03)
	C/ reforço	0,22 (0,02)	0,04	0,31 (0,13)	0,26 (0,15)
	Reforço c/ SBR	0,37 (0,10)	0,06	0,43 (0,06)	1,03 (1,49)
	Reforço c/ SBR + SA	0,42 (0,04)	0,10	0,46 (0,02)	0,20 (0,13)
25% CV	S/ reforço	-	-	-	-
	C/ reforço	0,23 (0,11)	0,05	0,33 (0,02)	1,53 (1,29)
	Reforço c/ SBR	0,34 (0,20)	0,07	0,40 (0,24)	1,12 (0,81)
	Reforço c/ SBR + SA	0,18 (0,02)	0,05	0,26 (0,05)	1,47 (0,20)

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

No ensaio de tração direta, o comportamento do compósito têxtil caracteriza-se pela formação de múltiplas fissuras (Figura 55), diferentemente do compósito sem reforço têxtil em que ocorre a ruptura do corpo de prova sem a formação de múltiplas fissuras. Concomitante a isso, há a indicação do benefício do tratamento de

impregnação no reforço quanto às propriedades mecânicas do compósito, uma vez que se observa comportamento inferior do compósito com reforço sem tratamento se comparado ao tratado com SBR.

A indicação desse comportamento inferior do corpo de prova reforçado com poliéster sem tratamento é comprovada pela formação de número menor de fissuras, fissuras essas que possuem maior espessura de abertura quando comparadas ao corpo de prova com reforço tratado com impregnação. Verifica-se na Figura 55 (a), correspondente ao compósito com têxtil sem tratamento, corpo de prova com a formação de 5 fissuras, enquanto que na Figura 55 (b), correspondente ao compósito com reforço tratado com SBR, observa-se corpo de prova com a formação de 9 fissuras e na Figura 55 (c), correspondente ao compósito com reforço tratado com SBR + SA, observa-se corpo de prova com a formação de 7 fissuras.

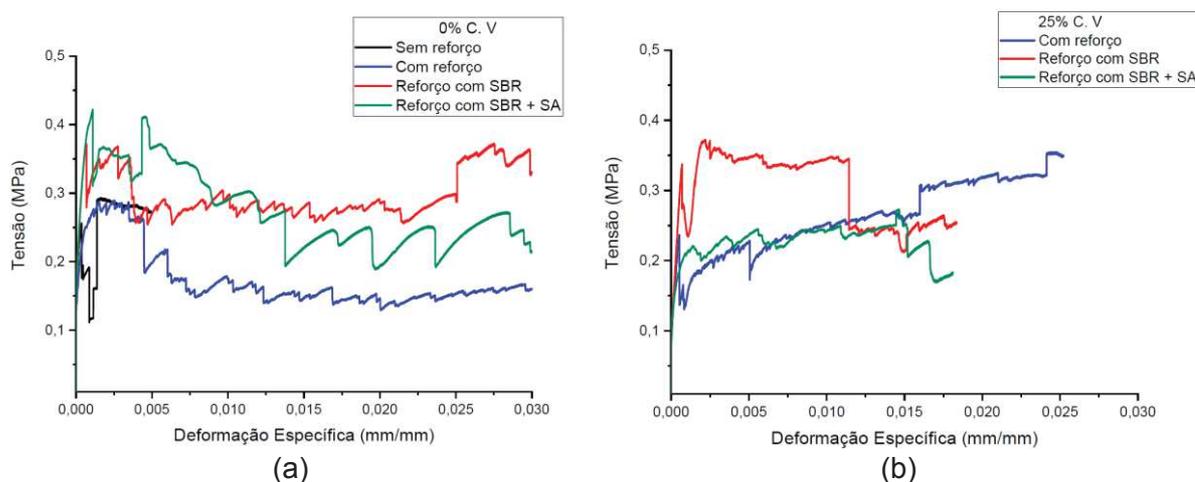
Figura 55 - Múltiplas fissuras nas amostras com (a) reforço sem tratamento, (b) reforço tratado com SBR e (c) reforço impregnado com SBR + SA



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Figura 56 são apresentados os gráficos de tensão versus deformação do compósito sem e com CV, bem como com os diferentes tratamentos no reforço.

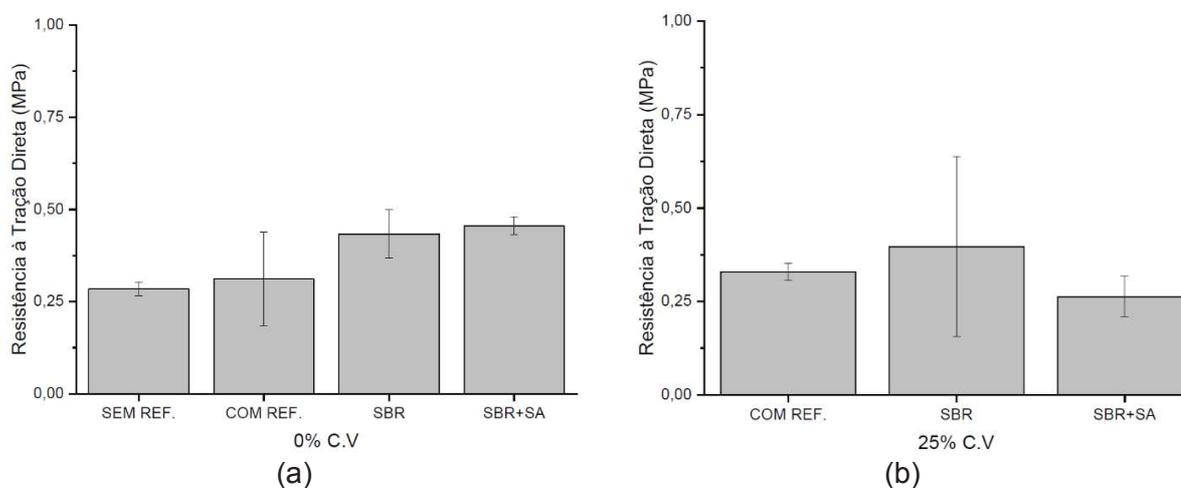
Figura 56 – Gráficos tensão x deformação do compósito (a) sem CV e (b) com 25% de CV



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Figura 57 são apresentados os gráficos com as médias das resistências à tração máximas de cada compósito.

Figura 57 - Médias das resistências máximas das amostras (a) sem CV e (b) com CV no ensaio de tração direta



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Nas amostras de referência, sem CV, é possível observar um incremento nas tensões máximas suportadas pelos compósitos reforçados com tecido de poliéster em relação aos sem reforço. O efeito mais significativo pode ser verificado nas amostras em que o tecido recebeu tratamento, observando-se um aumento de até 53,57% nas amostras em que o reforço foi impregnado com SBR, e um incremento de 64,28% nas amostras com poliéster tratado com SBR + SA em relação às amostras sem reforço têxtil.

Nili e Afrouhsabet (2009) também verificaram que a introdução de fibra sintética melhora a resistência à tração das amostras. A resistência à tração, aos 28 dias de idade, nas misturas com uso de 0,2%, 0,3% e 0,5% de SA na matriz cimentícia, aumentaram em 15%, 20% e 27%, respectivamente, para uma relação água/cimento de 0,46, e 15%, 16% e 23% para uma relação água/cimento de 0,36.

Quanto às amostras reforçadas com tecido de poliéster sem tratamento, observou-se um aumento de 10,71% em relação àquelas sem tecido. Ao comparar essas amostras com as que foram empregados poliéster tratado, o aumento no valor de tensão foi de até 48,39% para as amostras impregnadas com SBR + SA.

No entanto, o desvio padrão das amostras reforçadas sem impregnação ficou bastante elevado e dificulta a afirmação de que houve um incremento em relação às amostras sem reforço, bem como das tratadas em relação às sem tratamento. De acordo com a bibliografia, o aumento significativo nos valores de tensão ao comparar os compósitos reforçados com tecido com e sem tratamento, é esperado. Fidelis (2014) relata um aumento de 46,7% do compósito com 5 camadas de tecido de juta impregnado com SBR por 50 min, em relação ao compósito reforçado com 5 camadas sem tratamento.

Nos corpos de prova em que foi empregada CV, não foi possível avaliar as amostras sem reforço, uma vez que quebraram ao colocar no dispositivo de fixação da máquina de ensaio. Nos ensaios dessas matrizes reforçadas, foi registrado um aumento de até 21,21% quando o tecido foi impregnado com SBR em relação às amostras em que o tecido não foi tratado, no entanto observa-se um desvio padrão elevado neste caso. Por fim, nas amostras em que o tecido foi tratado também com SA não foi verificado um aumento no valor de tração direta em relação às demais amostras, o que pode indicar que há uma concorrência entre as pozolanas. Portanto, ao empregar CV na matriz cimentícia, não é possível afirmar que o tratamento do tecido retorne contribuições positivas para a resistência à tração direta do compósito.

Os ensaios de tração direta também foram realizados em amostras com forma de “osso de cachorro” ou dog bone shaped, conforme recomendações da Japan Society of Civil Engineers (2008). No entanto, o método muito utilizado para investigar o comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras curtas, não se mostrou apropriado para concreto reforçado com têxtil. Os cálculos e detalhes deste ensaio estão no Apêndice G.

4.4.2 Tração na Flexão

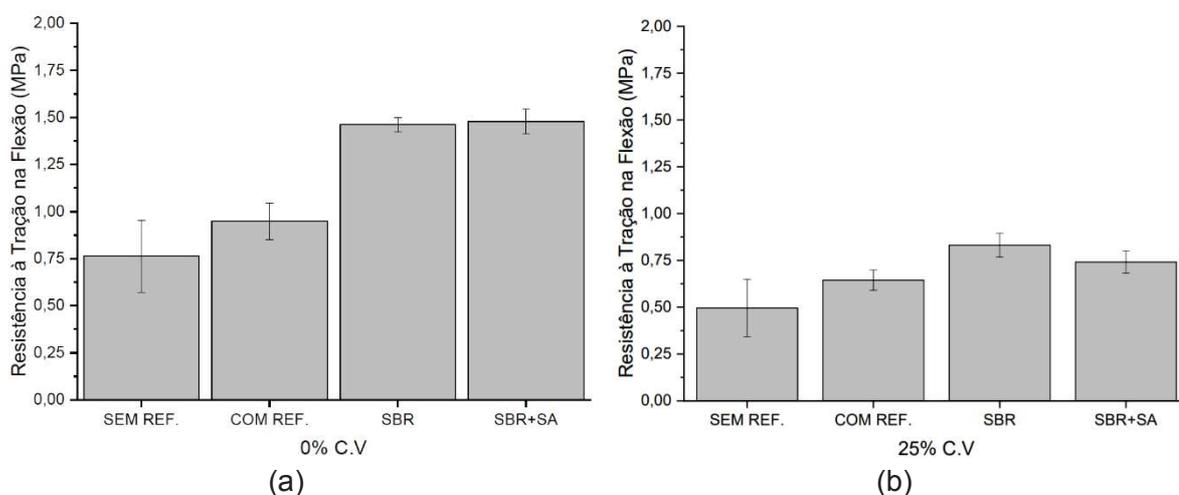
As médias de resistência à tração na flexão dos compósitos estudados são apresentados na Tabela 18 e na Figura 58. No Apêndice H estão listados os resultados de todos os corpos de prova ensaiados.

Tabela 18 - Resultados do ensaio de tração na flexão das amostras sem e com CV

Amostra		Tensão Máx. (MPa)	Desvio Padrão
REF	S/ reforço	0,76	0,19
	C/ reforço	0,95	0,10
	Reforço c/ SBR	1,46	0,04
	Reforço c/ SBR + SA	1,48	0,07
25% CV	S/ reforço	0,50	0,15
	C/ reforço	0,64	0,05
	Reforço c/ SBR	0,83	0,06
	Reforço c/ SBR + SA	0,74	0,06

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 58 - Resistência à tração na flexão das (a) amostras sem CV e (b) com CV



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Por ser um concreto leve para fins não estruturais, o resultado da média de resistência à tração na flexão para as amostras sem CV já era esperado, uma vez que o concreto com agregado leve de vermiculita expandida possui resistência à compressão abaixo de 7 MPa e a resistência à tração costuma corresponder na ordem de 10% da resistência à compressão.

Concomitante a isso, quanto aos corpos de prova sem CV, observa-se um aumento na resistência à tração na flexão nas amostras REF. com reforço impregnado com SBR e com SBR + SA de 92,10% e 94,73%, respectivamente, em relação à amostra

sem reforço, bem como 53,68% e 55,78% em relação às amostras reforçadas sem impregnação.

Nili e Afroughsabet (2009), relatam que a resistência à flexão da amostra com fibra sintética aumenta em comparação com a amostra de referência, sem fibras. No entanto, a taxa de aumento é ainda maior em amostras com SA e fibras. Toledo filho *et al* (2003) destacam que a imersão de fibras em pasta de sílica ativa antes de sua incorporação em matriz cimentícia representa um método eficaz para melhorar a resistência do compósito ao longo do tempo.

Portanto, este comportamento benéfico do tratamento têxtil reforça os resultados encontrados na bibliografia. Zhou, Fang e Jiang (2016) observaram resultados positivos que indicaram que o emprego consorciado de fibra de poliéster e SBR em concreto repercute em melhorias na resistência à flexão, uma vez que a ligação entre a fibra e a pasta de cimento é beneficiada com o uso de estireno butadieno em relação ao concreto de referência, sem SBR. Além disso, conforme o estudo, o filme de polímero tem excelentes propriedades de resistência à água, o que pode além de melhorar a aderência, proteger a fibra da degradação.

Xu *et al.* (2014) também pesquisaram o uso conjunto de fibras de poliéster e SBR reforçando o concreto e verificaram que, com 0,14% de fibra de poliéster em volume, a resistência à flexão aumentou até 21,4% em relação às amostras sem fibra. Os resultados mostraram ainda que o uso do SBR influenciou de forma positiva com o aumento da resistência à flexão em até 47,3%, uma vez que beneficia a zona de transição da interface entre fibra e matriz cimentícia, de forma a fortalecer o papel da fibra em relação à resistência mecânica e à resistência à fissuração.

Quanto ao concreto reforçado com têxtil sem impregnação, foi observado o aumento de 25% em relação à amostra sem reforço, no entanto o desvio padrão elevado da amostra de referência não permite afirmar que este aumento pode ser considerado efetivo na presente pesquisa. Pelisser *et al.* (2012), destaca que esse aumento da amostra reforçada em relação à sem reforço é esperado, uma vez que verificou um incremento da resistência à flexão em concretos reforçados com fibra de PET em relação à amostra de referência de até 19,2% aos 28 dias.

Em relação aos corpos de prova com CV, destaca-se que o comportamento observado a partir dos resultados obtidos para resistência à tração na flexão dos compósitos indicam que a pozolana é pouco reativa, uma vez que essas amostras apresentaram resultados muito aquém do esperado, mesmo em idades mais

avançadas. Essa tendência já havia sido observada na resistência à compressão da matriz cimentícia e no ensaio de tração direta do compósito têxtil.

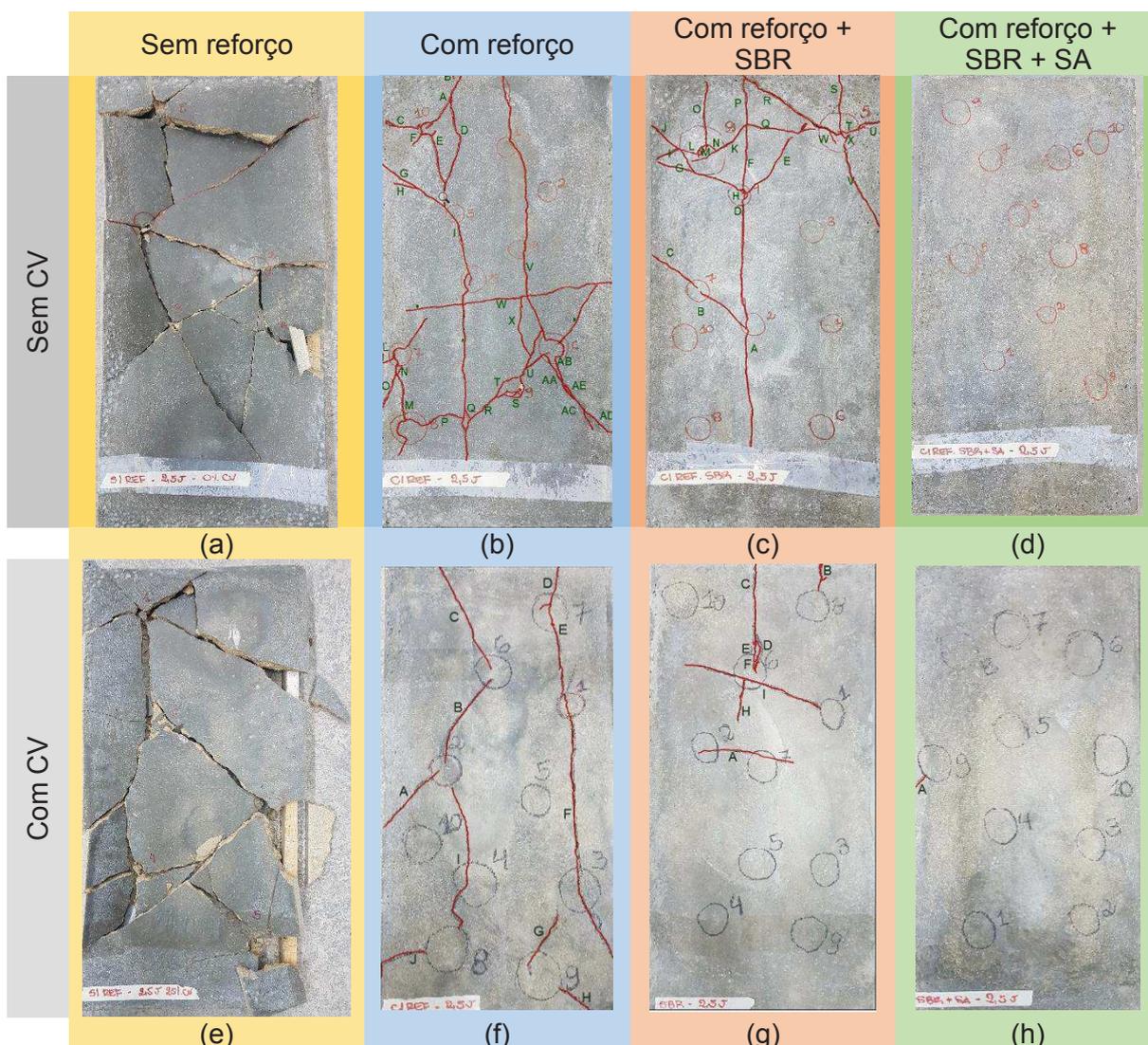
Nesse caso, o compósito com CV reforçado com poliéster tratado com SBR desempenhou o melhor resultado, 66% a mais que a média das amostras sem têxtil e 29,68% melhor que a reforçada com tecido sem impregnação. Aqui observa-se um decréscimo de 10,84% da resistência à flexão da amostra tratada com SA em relação a somente com SBR, comportamento similar ao que ocorreu no ensaio de tração direta, reforçando a hipótese de que há uma interação de concorrência entre as pozolanas no compósito cimentício.

No entanto, as amostras com SA apresentaram um desempenho mais satisfatório 48% em relação as sem reforço e 15,62% em relação a média das amostras com poliéster sem impregnação. Quanto as amostras com reforço sem tratamento, mais uma vez não é possível afirmar o acréscimo de resistência em relação as amostras sem reforço pelo elevado desvio padrão das amostras de referência.

4.4.3 Resistência ao Impacto

Na Figura 59 são apresentados de forma visual como ficaram as placas com e sem CV, bem como com o reforço e seus diferentes tratamentos de impregnação, após os impactos a uma altura de 50 cm (energia de 2,5J) em relação a superfície da amostra. No Apêndice I estão registrados todos os detalhes dos resultados deste ensaio para as diferentes amostras.

Figura 59 – Aspecto das amostras após impactos com energia de 2,5J: (a), (b), (c) e (d) sem CV e respectivamente sem reforço, com reforço, com reforço SBR e com reforço com SBR + SA; e (e), (f), (g) e (h) amostras com CV



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A seguir são apresentados, na Tabela 19, as médias das profundidades, diâmetros das mossa e cálculo das áreas fissuradas registrados no ensaio de impacto de 2,5J.

Tabela 19 - Resultados das médias das profundidades, médias dos diâmetros das mossas e áreas fissuradas das amostras (energia de impacto de 2,5J)

	Amostra	Média P (mm)	Média D (mm)	Área fissurada (mm ²)	Percentual fissurado (%)
COM CV	S/ reforço	-	-	-	-
	C/ reforço	2,18	15,73	2054,87	1,14
	Reforço c/ SBR	2,03	16,64	954,12	0,53
	Reforço c/ SBR + SA	0,84	15,70	0,00	0,00
SEM CV	S/ reforço	-	-	-	-
	C/ reforço	2,98	16,54	601,82	0,33
	Reforço c/ SBR	1,10	14,02	341,72	0,19
	Reforço c/ SBR + SA	1,36	15,65	11,86	0,007

P = profundidade das mossas; D = diâmetros das mossas

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

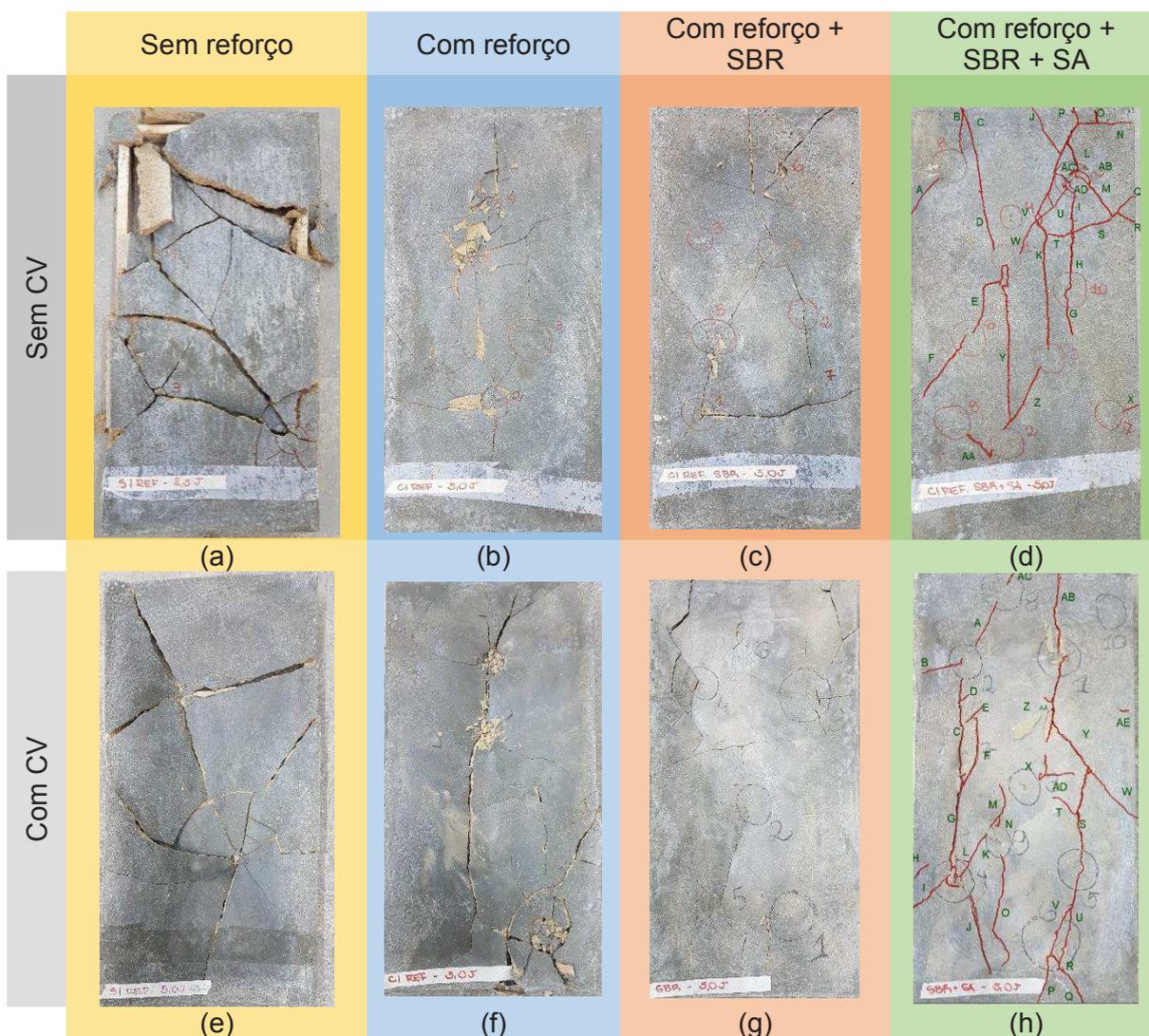
É possível analisar que tanto as amostras sem CV, como com CV, sem reforço não suportaram os 10 impactos. Foram aplicados somente 5 impactos pois as amostras romperam e, por este motivo, não foram registradas as profundidades e diâmetros das mossas, nem a área de fissuração para a energia de 2,5J. Isso evidencia a eficiência em aumentar a resistência ao impacto das amostras com reforço têxtil pois essas apresentaram somente fissuras e mossas após serem aplicados os 10 impactos de 2,5J.

Em relação às amostras reforçadas com têxtil, chama a atenção que as placas em que o tecido de poliéster não foi tratado por impregnação, apresentaram mais fissuras que as com tecido tratado com SBR, ou seja, 46,49% a mais de área fissurada para a amostra de referência e 57,57% para a amostra com CV.

É possível verificar visualmente também que as amostras que apresentaram melhor desempenho, foram as com tecido tratado por impregnação com SBR + SA. Essas placas não apresentaram fissuras visíveis a olho nu numa distância de 50 cm. Com exceção de uma pequena fissura na placa com CV, os impactos geraram apenas mossas na superfície da amostra.

Na Figura 60 são apresentados de forma visual como ficaram as placas após os impactos a uma altura de 100 cm (energia de 5,0J) em relação à superfície da amostra.

Figura 60 - Aspecto das amostras após impactos com energia de 5,0J: (a), (b), (c) e (d) sem CV e respectivamente sem reforço, com reforço, com reforço SBR e com reforço com SBR + SA; e (e), (f), (g) e (h) amostras com CV



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Para a energia de 5,0J somente foi possível registrar os dados de diâmetro e profundidade das mossas para as placas com tecido impregnado com SBR mais sílica ativa. Isso ocorreu, pelo fato de que a amostra de referência e com 25% CV reforçada com têxtil com este tipo de tratamento apresentaram somente fissuras e mossas, possibilitando as medições, no entanto as amostras sem reforço, as reforçadas com tecido sem impregnação e com tecido impregnado com SBR romperam completamente após 5 impactos.

Na Tabela 20 são apresentadas as médias das profundidades e diâmetros das mossas registrados no ensaio para a energia de impacto de 5,0J na placa com tecido impregnado com SBR mais sílica ativa.

Tabela 20 - Resultados das médias das profundidades e diâmetros das moças geradas nas amostras pela energia de impacto de 5,0J

	Amostra	Média P (mm)	Média D (mm)	Área fissurada (mm ²)	Percentual fissurado (%)
SEM CV	Reforço c/ SBR + SA	3,55	21,26	1658,54	0,92
COM CV	Reforço c/ SBR + SA	4,06	21,27	1826,00	1,01

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Pode-se verificar, que de forma geral, as amostras reforçadas com têxtil de poliéster, em especial a que o tecido recebeu tratamento por impregnação com SBR + SA, apresentaram maior tenacidade, melhor comportamento em relação ao impacto, tanto na energia de 2,5J como na energia de 5,0J.

O aumento da resistência ao impacto utilizando fibras sintéticas em relação a amostra de referência foi verificado por outros autores, como Pelisser *et al.* (2012), que pesquisaram concretos reforçados com fibra de PET, e Nili e Afroughsabet (2009) que estudaram concreto reforçado com fibra de polipropileno. De acordo com esta última pesquisa, o número de golpes para gerar a primeira fissura é aumentado em 31%, 100% e 360% adicionando 0,2%, 0,3% e 0,5% fibra de polipropileno, respectivamente, ou seja, a adição de fibras ao concreto aumenta a capacidade de absorção de energia do concreto e fornece uma resistência mais dúctil.

O benefício do tratamento na propriedade de resistência ao impacto também foi estudado por outros autores. Relacionado ao uso de SBR, Xu *et al.* (2014) verificaram que as amostras com fibras de poliéster e SBR apresentaram desempenhos 42,0% a 87,3% melhores que as amostras de referência, sem SBR.

Quanto ao melhor desempenho das amostras tratadas com SA, pode ser explicada, pelo fato de que a SA pode fortalecer a zona de transição e assim reduzir a iniciação de fissuras. De acordo com Nili e Afroughsabet (2009), quando a SA é introduzida, o número de golpes para causar a primeira fissura, aumenta de 6 a 8,5 vezes, o que comprova que a adição de SA melhora as propriedades de resistência, particularmente a resistência ao impacto dos concretos.

4.4.4 Massa Específica

Na Tabela 21 são apresentadas as médias da massa específica referente a três amostras de concreto no estado endurecido com e sem substituição da massa de

cimento por 25% CV. O cálculo também foi realizado para as amostras com reforço têxtil sem impregnação, com poliéster tratado com SBR e SBR + SA.

Tabela 21 - Resultados das médias das massas específicas dos compósitos têxteis

Amostras		Massa Específica (Kg/m ³)
REF (0% CV)	S/ reforço	1162,19
	C/ reforço	1180,00
	Reforço c/ SBR	1200,15
	Reforço c/ SBR + SA	1212,50
25% CV	S/ reforço	1180,40
	C/ reforço	1204,78
	Reforço c/ SBR	1208,64
	Reforço c/ SBR + SA	1213,58

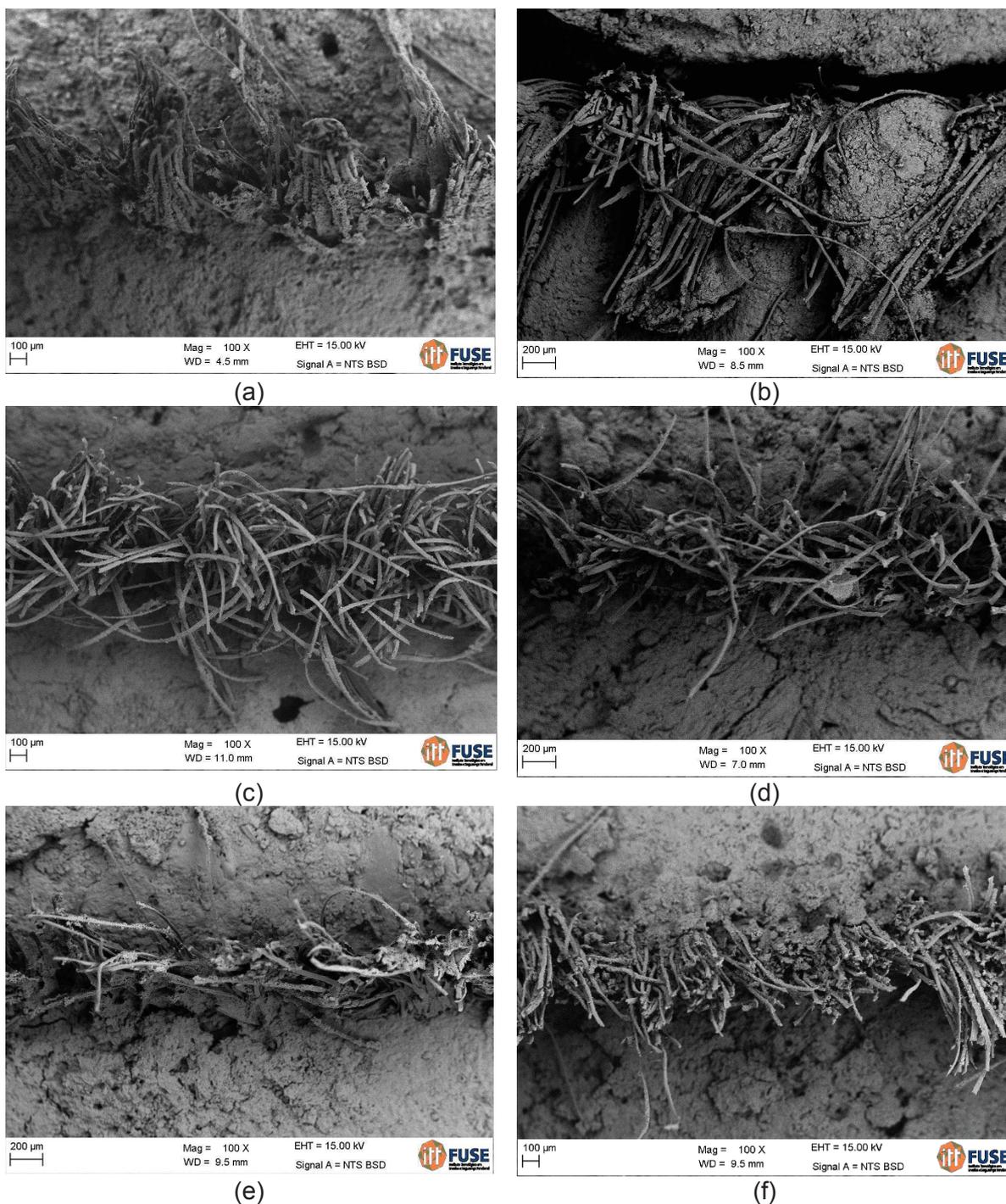
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Não houve uma grande variação (menor que 5%) entre a massa específica dos diferentes tipos de amostras, o que já era esperado, visto que possuem o mesmo traço, com diferenças na questão do reforço e com a substituição ou não da massa de cimento por CV. Todas as amostras se enquadram de acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015) como concreto leve, uma vez que apresentam massa específica seca inferior a 2000 kg/m³.

4.4.5 Microestrutura

Na Figura 61 são apresentadas as micrografias, obtidas por microscópio eletrônico de varredura (MEV), da microestrutura dos compósitos têxteis.

Figura 61 - Micrografias de MEV do compósito cimentício sem e com CV, respectivamente, reforçado com tecido de poliéster: (a) e (b) têxtil sem tratamento, (c) e (d) têxtil impregnado com SBR, (e) e (f) têxtil impregnado com SBR + SA



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A falha de descolagem na microestrutura da interface entre a fibra e a matriz cimentícia é observada com bastante clareza na Figura 61b, correspondente ao compósito reforçado com têxtil sem tratamento por impregnação. É possível identificar

um grande vazio entre o têxtil e a matriz cimentícia que caracteriza a falta de aderência entre as partes do compósito.

No compósito com fibra tratada com SBR + SA (Figura 61(e) e (f)), apesar de observar-se alguns vazios na matriz próximos ao têxtil, a matriz parece ter penetrado por entre os filamentos do tecido com maior efetividade. Já no compósito com fibra tratada por impregnação com SBR, os fios aparentam estar bem aderidos à matriz.

É observada, portanto, uma melhor aderência entre o têxtil e a matriz cimentícia nos compósitos que o poliéster recebeu tratamento por impregnação. O tratamento mostra desencadear uma relação de conexão mais estreita entre a fibra de poliéster e a pasta de cimento, de forma a aliviar os defeitos macro e micro da interface zona de transição entre têxtil e matriz cimentícia, assim aumentando a tenacidade e a resistência a rachaduras.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais com base nos resultados obtidos no programa experimental, bem como serão exibidas as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Considerações Finais

Quanto a resistência à tração direta do têxtil isolado, os valores de tensão máxima ficaram dentro do esperado para um poliéster, porém, a variabilidade observada nos resultados faz com que se tome com cautela os incrementos observados no comportamento mecânico dos tecidos tratados por impregnação em relação ao sem tratamento.

No que diz respeito ao sentido da trama, as médias de tensão máxima da urdidura apresentaram um desempenho mais satisfatório tanto nos tecidos sem impregnação, como nos tecidos impregnados com SBR. Já nos tecidos impregnados com SBR + SA, a tensão máxima suportada pelo material no sentido da urdidura e trama se equivalem, o que pode ser considerado benéfico ao trabalhar com resíduo de tecido em que é difícil a identificação dos sentidos da trama do retalho.

O método de dosagem adotado com a utilização de vermiculita expandida atingiu o objetivo de alcançar um concreto com baixa massa específica, caracterizado como leve tanto no estado fresco como no endurecido. No entanto, a resistência à compressão axial da matriz cimentícia aos 91 dias, inferior nas amostras com CV em relação às sem CV, bem como o baixo consumo de CH verificado no ensaio de TG/DTG na amostra de pasta com CV quando comparada a sem CV, indica ter sido empregada uma pozolana pouco reativa. A baixa reatividade da CV é justificada pelo tamanho da partícula, que é grande e cuja dissolução é mais lenta, o que retarda a reação pozolânica.

Quanto a caracterização do compósito têxtil, observou-se no ensaio de tração direta, a indicação do benefício do tratamento dos reforços, principalmente o impregnado com SBR, uma vez que apresentaram um maior número de fissuras e fissuras com menor espessura de abertura quando comparados aos corpos de prova em que o poliéster não recebeu tratamento. Em relação as tensões máximas de tração direta suportadas pelas amostras sem CV, é possível observar um incremento nos

valores dos compósitos reforçados com tecido de poliéster impregnado em relação aos sem reforço de até 64,28%. Já ao empregar CV na matriz cimentícia, não é possível afirmar que o tratamento do tecido agrega nos valores de tração direta do compósito.

Quanto à resistência à tração na flexão, nas amostras sem CV com reforço impregnado com SBR e com SBR + SA, houve um aumento de 92,10% e 94,73% respectivamente, em relação a amostra sem reforço, bem 53,68% e 55,78% se comparadas com as amostras reforçadas sem impregnação.

Em relação as amostras com CV, chama a atenção novamente a indicação de que a pozolana é pouco reativa, uma vez que estes compósitos apresentaram resultados inferiores, o que já havia sido observado nos demais ensaios mecânicos. No entanto, é possível afirmar novamente, assim como nas amostras sem CV, o benefício do tratamento do poliéster, com o incremento nos valores das amostras impregnadas em relação as sem tecido e as sem tratamento.

Quanto ao ensaio de impacto, pode-se verificar, que de forma geral, as amostras reforçadas com têxtil de poliéster, em especial a que o tecido recebeu tratamento por impregnação com SBR + SA, apresentaram maior tenacidade, tanto na energia de 2,5J como na energia de 5,0J, o que aponta, mais uma vez, para o benefício do tratamento.

De encontro a isso, as análises das microestruturas dos compósitos têxteis confirmam a melhor aderência entre o tecido e a matriz cimentícia nos compósitos que o poliéster recebeu tratamento. A impregnação do poliéster demonstra fortalecer a zona de transição têxtil/matriz cimentícia, assim aumentando a tenacidade e a resistência a fissuras.

Portanto, é possível concluir que o resíduo de vestuário de poliéster como reforço em compósitos cimentícios sem função estrutural contribuiu significativamente para o desempenho do compósito quanto às propriedades avaliadas, principalmente o reforço composto pelo resíduo tratado com SBR + SA, destacando-se a resistência ao impacto. No entanto, em função da CV ter sido empregada sem beneficiamento, até a idade final de ensaios não se observou benefícios no seu emprego nas condições da pesquisa.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir dos resultados obtidos, observou-se que alguns aspectos ainda ficaram em aberto e podem ser sugeridos:

- a) beneficiar a CV por moagem para diminuir o tamanho de partícula e aumentar a sua reatividade;
- b) desenvolver traços com outros agregados leves e/ou substituições parciais da areia por agregado leve a fim de aumentar a resistência mecânica da matriz cimentícia;
- c) realizar cura com carbonatação acelerada;
- d) realizar ensaio de absorção de água da matriz cimentícia leve;
- e) verificar a retração da matriz cimentícia leve no estado endurecido;
- f) verificar a durabilidade do poliéster em contato com a matriz cimentícia através de ensaio de envelhecimento acelerado, ensaios mecânicos e MEV;
- g) realizar ensaio de resistência ao fogo do compósito têxtil de poliéster;
- h) realizar ensaio de condutividade térmica do compósito leve.

REFERÊNCIA

ABDEEN, M.A.M.; HODHOD, H. Experimental investigation and development of artificial neural network model for the properties of locally produced light weight aggregate concrete. **Engineering**, [s. l.], v. 2, p. 408-419, Fev. 2010.

ALANI A.M; BECKETT D., Mechanical properties of a large scale synthetic fibre reinforced concrete ground slab. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 41, p. 335–344, 2013.

AMARAL, M.C. *et al.* Industrial textile recycling and reuse in Brazil: case study and considerations concerning the circular economy. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 25, p. 431-443, 2018.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 544.4R**: Design considerations for steel fiber reinforced concrete. United States: ACI, 1988.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI-544.2R**: Measurement of properties of fiber reinforced concrete. Detroit: ACI Committee; 1989.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). Anual Book of ASTM Standards. **ASTM C150**: Standard Specification for Portland Cement. Philadelphia: ASTM, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). Anual Book of ASTM Standards. **ASTM C618**: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Philadelphia: ASTM, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). Anual Book of ASTM Standards. **ASTM C947-03**: Standard Test Method for Flexural Properties of Thin-Section Glass-Fiber-Reinforced Concrete (Using Simple Beam With Third-Point Loading). Philadelphia: ASTM, 2016.

AMIN, A. *et al.* Material characterisation of macro synthetic fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 84, p. 124-133, Nov. 2017.

ARAÚJO, D.L.; CÂNDIDO, E.S. Painel pré-moldado de argamassa armada com vermiculita expandida e reforçado com fibra de vidro. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [s. l.], v. 10, p 1-18, Nov. 2015.

ARDANUY, M. *et al.* Fiber-matrix interactions in cemente mortar composites reinforced with cellulosic fibers. **Cellulose**, [s. l.], v. 18, p. 281–289, 2011.

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. D. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 79, p. 115–128, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO (ABIT). **O setor têxtil e de confecção e os desafios da sustentabilidade**. Brasília: ABIT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11355**: Vermiculita expandida - Análise granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11675**: Divisórias leves internas moduladas - Verificação da resistência aos impactos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823**: Concreto autoadensável. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16606**: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211**: Agregados para concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

BALDUSCO, R., *et al.* Reatividade e resistência mecânica de pastas reidratadas de cimento de alto forno. **Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos de Construção (ENARC)**, 2017.

BENTUR, A.; DIAMOND, S. Direct incorporation of silica fume into glass fibre strands as a means for developing GFRC composites of improved durability. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, [s. l.], v. 9, p. 127-135, Aug. 1987.

BINICI, H. *et al.* An environmentally friendly thermal insulation material from sunflower stalk, textile waste and stubble fibres. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 51, p. 24–33, 2014.

BÖSCHE, A. *et al.* Textile-reinforced concrete for flexural strengthening of RC-structures-Part 1: structural behavior and design model. **American Concrete Institute Special Publication**, [s. l.], v. 251, p. 19-40, Mar. 2008.

BRAMESHUBER, W. Introduction. **Seventh International Symposium of the Fiber: Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS)**, p. 1–3, 2006.

BRIGA-SÁ, A. *et al.* Textile waste as an alternative thermal insulation building material solution. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 38, p. 155–160, 2013.

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

CALLISTER, W.D. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC S.A., 2002.

CLARAMUNT, J. *et al.* Tensile and flexural properties of cement composites reinforced with flax nonwoven fabrics. **Materials**, [s. l.], v. 10, n. 2, Feb. 2017.

CLARKE, J. L. **Structural lightweight aggregate concrete**. 1. ed. New York: CRC Press, 2005.

COHEN, Z.; PELED, A. Controlled telescopic reinforcement system of fabric-cement composites - Durability concerns. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 40, n. 10, p. 1495–1506, Jun. 2010.

CONSOLIDAÇÃO DAS LEIS DO TRABALHO. **Decreto-Lei nº 5.452, de 1º de maio de 1943, Art. 198/199**. Brasil, 1943.

DESCHNER, F. *et al.* Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 42, p. 1389-1400, Jun. 2012.

DIAMOND, S.; SAHU, S. Densified silica fume: particle sizes and dispersion in concrete. **Materials and Structures**, United States, v. 39, p. 849-859, Aug. 2006.

DWECK, J. *et al.* Thermogravimetric on calcined mass basis – Hydrated cement phases and pozzolanic activity quantitative analysis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [s. l.], V. 97, p. 85-89, 2009.

FERREIRA, O. A. R. **Concreto celulares espumosos**. Boletim Técnico do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade São Paulo, v. BT - PCC 1, p. 20, 1987.

FERREIRA, S. R. *et al.* Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jut and curauá fiber cement based composite systems. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v.139. p. 551-561, 2017.

FIDELIS, M. E. A. **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

FIDELIS, M. E. A. *et al.* Interface characteristics of jute fiber systems in a cementitious matrix. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 116, p. 252–265, Jan. 2019.

FIDELIS, M. E. A. *et al.* The effect of accelerated aging on the interface of jute textile reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 74, p. 7–15, Sep. 2016.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo Manual de Olericultura: Agrotecnologia Moderna na Produção e Comercialização de Hortaliças**. Fernando Antônio Reis Filgueira – Viçosa: UFV, 2000. p. 189.

FRATERNALI, F. *et al.*, Effects of recycled PET fibres on the mechanical properties and seawatercuring of Portland cement-based concretes. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 61, p. 293-302, Apr. 2014.

GENCEL, O. *et al.* Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: numerical and experimental results. **Energy and Buildings**, [s.l.], v. 70, p. 135–144, Nov. 2013.

GUILLANTE, P. **Avaliação de parâmetros químicos e mineralógicos de materiais cimentícios suplementares na mitigação da reação alcali agregado**. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2018.

GÜNEYSI, E. *et al.* Fresh and Rheological Behavior of Nano-Silica and Fly Ash Blended Self-Compacting Concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 95, p. 29-44, 2015.

HAIK, R.; SASI, A.E.; PELED, A. Influence of three-dimensional (3D) fabric orientation on flexural properties of cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 80, p. 1–9, Feb. 2017.

HAKAMY, A.; SHAIKH, F. U. A.; LOW, I. M. Thermal and mechanical properties of hemp fabric-reinforced nanoclay-cement nanocomposites. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 49, n. 4, p. 1684-1694, Nov. 2013.

HEGGER, J. *et al.* Load-bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete. **Materials and Structures**, v. 39, p. 765–776, Jul. 2006.

HEGGER, J.; VOSS, S. Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 30, p. 2050-2056, Mar. 2008.

HEMALATHA, T.; RAMASWAMY, A. A review on fly ash characteristicseTowards promoting high volumeutilization in developing sustainable concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 147, p. 546-559, Jan. 2017.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2018.

HUGHES, P. *et al.* Microscopic examination of a new mechanism for accelerated degradation of synthetic fibre reinforced marine concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 41, p. 498–504, Jan. 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **NBR 13934-1: Textiles - Tensile properties of fabrics - Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method**. Switzerland: ISO, 2016.

IPAVEC, A. *et al.* Carboaluminate phases Formation During the hydration of calcite-containing Portland cement. **Journal American Ceramic**, [s. l.], V. 94, pg, 1238-1242, Apr. 2011.

JAMSHAD, H., *et al.* Interfacial performance and durability of textile reinforced concrete. **The Journal of The Textile Institute**, [s. l.], v. 109, p. 1-12, Sep. 2017.

JAPAN SOCIETY OG CIVIL ENGINEERS. **Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)**. Japan, 2008.

JAWAID, M. H. P. S.; KHALIL, A. Cellulosic/ synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 86, p. 1–18, Apr. 2011.
Johnston, C. D. Fibre-reinforced cement and concrete. **Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials**, [s. l.], STP169, p. 547-561, Aug. 1994.

KAJIWARA, K.; OHTA, Y. **Synthetic textile fibers: structure, characteristics and identification**. In: Houck, M. M. Identification of textile fibers. EUA, CRC Press, 2009.

KAMANI, R.; DOLATABADI, M.K.; JEDDI, A. A. A. Flexural design of textile-reinforced concrete (TRC) using warp-knitted fabric with improving fiber performance index (FPI). **Journal of the Textile Institute**, v. 109, p. 492–500, Aug. 2017.

KAWAMURA M.; TAKEMOTO, K. Correlation between pore solution composition and alkali silica expansion in mortars containing various fly ashes and blastfurnace slags. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, United Kingdom, p. 215-223, Nov. 1988.

KAZMIERCZAK, C. S. *et al.* Cap. 5: **Resíduos de contrafortes termoplásticos provenientes da indústria coureiro-calçadista**. In: Utilização de resíduos na construção habitacional; Coletânea Habitar. v. 4, Porto Alegre, 2003.

KOKSAL, F. *et al.* Combined effect of steel fibre and expanded vermiculite on properties of lightweight mortar at elevated temperatures. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 48, p. 2083-2092, Mar. 2014.

KOKSAL, F.; GENCEL, O.; KAYA, M. Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, Turquia, v. 88, p. 175-187, Apr. 2015.

KUMAR, K. N. *et al.* An experimental investigation on light-weight concrete blocks using vermiculite. **Materials Today: Proceedings**, Chennai, v. 22, p. 987-991, Dec. 2019.

LOTHENBACH, B.; DURDZINKI, P.; DE WEERDT, K. **Thermogravimetric Analysis**. In A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials. Scrivener, K. Chapter 5. P. 178-208, 2016.

MECHTCHERINE, V. Novel cement-based composites for the strengthening and repair of concrete structures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 41, p. 365–373, Jan. 2013.

MECHTCHERINE, V.; SCHNEIDER, K.; BRAMESHUBER, W. Mineral-based matrices for textile-reinforced concrete. **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. Germany, p. 25-43, 2016.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto, 2014.

MELO FILHO, J. A. **Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

MENDES, L.C.; PEREIRA P.S.C. Optical Microscopy as a Tool to Correlate Morphology and Thermal Properties of Extruded PET/PC Reactive Blends **Materials Sciences and Application**, [s. l.], v. 2, 1033-1040, Aug. 2011.

MESTICOU, Z. *et al.* Experimental investigation of tensile fatigue behaviour of Textile-Reinforced Concrete (TRC): Effect of fatigue load and strain rate. **Composite Structures**, [s. l.], v. 160, p. 1136-1146, 2017.

MEZAS MOBILIÁRIO CONTEMPORÂNEO LTDA ME. **Catálogo 2018**. Porto Alegre, 2018.

MIER, J.G.M.V. **Concrete Fracture: A Multiscale Approach**. 1ª. ed. London: Taylor & Fancis Group, 2013.

MO, K. H. *et al.* Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 179, p. 302-306, May. 2018.

MOBASHER, B. Textile fiber composites: Testing and mechanical behavior. **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**, Arizona, p. 105-154, 2016.

MOHR, B. J.; BIERNACKI, J. J.; KURTIS, K. E. Supplementary cementitious materials for mitigating degradation of kraft pulp fiber-cement composites. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 37, p. 1531-1543, Aug. 2007.

MOTHÉ, G.; AZEVEDO, A. D. **Análise térmica de materiais**. Editora Artliber, 2009.

MUELLER, U. *et al.* Reactive powder concrete for façade elements - A sustainable approach. **Journal of Facade Design and Engineering**, [s. l.], v. 4, p. 53-66, Sep. 2016.

NAKRANI, H. M.; NATHANI, B. B. Performance Evaluation of Textile Reinforced Concrete. **International Research Journal of Engineering and Technology**, [s. l.], v. 3, p. 2281-2284, Apr. 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª ed. São Paulo: PINI, 2016.

NILI, M.; AFROUGHSABET, V. The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, Iran, v. 24, p. 927-933, Dec. 2009.

NORMA REGULAMENTADORA Nº 17, de 08 de junho de 1978. **Ergonomia**. Disponível em: <http://portal.mte.gov.br>

OFFICIAL JOURNAL OF THE EUROPEAN UNION. **Directive 2006/12/EC of the European Parliament and of the council of 5 April 2006 on waste.**

Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/legislation/a.htm>

OFFICIAL JOURNAL OF THE EUROPEAN UNION. **Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives.**

Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/legislation/a.htm>

OLIVEIRA, T.H. *et al.* Painel Sanduíche com Núcleo em Vermiculita Expandida: Análise da eficiência do conector tipo treliça. **1º encontro nacional de pesquisa-projeto-produção em concreto pré-moldado**, Goiás, p 1-12, 2005.

ONUAGULUCHI, O.; BANTHIA, N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 68, p. 96-108, Feb. 2016.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 25, p. 575-581, 2011.

PARK, J. *et al.* Flexural Strength of Alkali Resistant Glass Textile Reinforced Concrete Beam with Prestressing. **International Journal of Civil and Environmental Engineering**, [s. l.], v. 11, p. 988–992, 2017.

PELED, A. Bonds in textile reinforced concrete composites. In: TRIANTAFILLOU, T. C. (Ed.). **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. [s.l.]. p. 63–99, 2016.

PELED, A. Material Design of TRC and TRC Impact Resistance. In: **RILEM Bookseries -Strain-Hardening Cement-Based Composites**. [s.l.]. p. 351–358., 2018.

PELED, A. *et al.* Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete: Uniaxial tensile test: test method to determine the load bearing behavior of tensile specimens made of textile reinforced concrete. **Materials and Structures**, v. 49, n. 12, p. 4923–4927, 2016.

PELED, A.; BENTUR, A.; MOBASHER, B. **Textile Reinforced Concrete**. CRC Press, Florida, EUA, 2017.

PELISSER, F. *et al.* Mechanical Properties of Recycled PET Fibers in Concrete. **Materials Research**, [s. l.], v. 15, p. 679-686, May. 2012.

PEREIRA, E.V. **Influência de Fibras de Aço no Comportamento Mecânico e nos Mecanismos de Fissuração de Concretos Autoadensáveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2017.

PIRES, G.O. **Comportamento mecânico dos efeitos da substituição parcial do cimento por sílica ativa em Eco Concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto de Tecnologia. Universidade Federal do Pará. Belém, 2016.

PIZZOL, V. D. *et al.* Effect of accelerated carbonation on the microstructure and physical properties of hybrid fiber-cement composites. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 59, p. 101–106, 2014.

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

RAI, A.; JOSHI, Y. P. Applications and properties of fibre reinforced concrete. **Journal of Engineering Research and Applications**, [s. l.], v. 4, n. 5, p. 123–131, May. 2014.

RASHAD, A.M. Vermiculite as a construction material - A short guide for Civil Engineer. **Construction and Building Materials**, Cairo, v. 125, p. 53-62, Aug. 2016.

RAUPACH, M. *et al.* Epoxy-Impregnated Textiles in Concrete - Load Bearing Capacity and Durability. **1st International Conference Textile Reinforced Concrete (ICTRC)**, [s. l.], p. 77 - 88, 2006.

REAL, S. *et al.* Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 121, p. 460-470, Jun. 2016.

RECENA, F.A.P. **Método de Dosagem de Concreto pelo Volume de Pasta Com Emprego de Cinza Volante**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil).- Escola de Engenharia. Porto Alegre, 2011.

REINHARDT, H. *et al.* Composite Materials. **Textile Reinforced Concrete-State-of-the-art Report**, p. 83-187, 2006.

REMPEL, S.; KULAS, C.; HEGGER, J. Bearing Behavior of Impregnated Textile. **11th International Symposium on Ferrocement and 3rd ICTRC - International Conference on Textile Reinforced Concrete**, n. 1, p. 71–78, 2015.

RIANDE, E. *et al.* C. **Polymer viscoelasticity: stress and strain in practice**. New York: Marcel Dekker, 1999.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. **TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete**. Germany: RILEM, 2016.

ROSSIGNOLO, J.A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos - dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C. **Concreto: ciência e tecnologia**. 1ª edição. São Paulo: Ibracon, 2011.

SANTOS, F.F. *et al.* Estudo da variação granulométrica de agregado sintético para fabricação de placas pré-moldadas de concreto não estrutural. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v.23, 2018.

SATISH C; LEIF B. **Lightweight Aggregate Concrete Science, Technology, and Applications**. Nova York: Noyes Publications, 2002.

SCHEERER, S.; SCHLADITZ, F.; CURBACH, M. Textile reinforced concrete - from the idea to a high performance material. **11th International Symposium on Textile Reinforced Concrete 3rd ICTRC**, [s. l.], p. 15–34, 2015.

SCHÖLER, A. *et al.* Hydration of quaternary Portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 55, p. 374–382, 2015.

SHAMS, A. *et al.* Innovative sandwich structures made of high performance concrete and foamed polyurethane. **Composite Structures**, [s. l.], v. 121, p. 271-279, 2015.

SIDDIQUE, R.; KHAN, M.I. **Supplementary Cementing Materials**. Springer: New York, 2011.

SILVA, B.M.M. **Betão leve estrutural com agregados de argila expandida**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Portugal, 2007.

SILVA, F.A. **Tenacidade de materiais compósitos não convencionais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2004.

SIVARAJA, M. *et al.* Study on durability of natural fibre concrete composites using mechanical strength and microstructural properties. **Bulletin of Materials Science**, India, v. 33, p. 719–729, Dec. 2010.

TASDEMIR, C.; SENGUL, O.; TASDEMIR, M.A.A. Comparative study on the thermal conductivities and mechanical properties of lightweight concretes. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 151, p. 469-475, Jul. 2017.

TEXTILE EXCHANGE. **Preferred Fiber Market Report**. P. 103, 2020.

TIRONI, A. *et al.* Pozzolanic activity calcined halloysite-rich kaolinitic clays. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 147, p. 11-18, Jul. 2017.

TOLÊDO FILHO, R.D. *et al.* Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 25, p. 185-196, 2003.

TOLÊDO FILHO, R.D. *et al.* Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 22, p. 127–143, 2000.

TONOLI, G.H.D. *et al.* Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 24, p. 193-201, 2010.

TRIANAFILLOU, T.C. **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. United Kingdom: Elsevier, 2016.

UCAR, M.; WANG, Y. Utilization of recycled post consumer carpet waste fibers as reinforcement in lightweight cementitious composites. **International Journal of Clothing Science and Technology**, [s. l.], v. 23, no. 4, pp. 242–248, 2011.

VANINI, G. *et al.* Despolimerização química de PET grau garrafa pós-consumo na presença de um Catalisador Catiônico, o brometo de hexadecil-trimetilamônio (CTAB). **Revista Polímeros**, [s. l.], v. 23, p. 425-431, Maio, 2013.

VERONELLI, D.D. Durabilidad de los hormigones: Reacción árido-álcalis. **Materiales de Construcción**, España, v. 28, p. 5-33, 1978.

VERVLOET, J. *et al.* Buckling Behaviour of Structural Insulating Sandwich Walls with Textile Reinforced Cement Faces. **RILEM Bookseries -Strain-Hardening Cement-Based Composites**, [s.l:], p. 535–543, 2018.

VILAGRÁN-ZACCARDI, Y. A. *et al.* Calibrated quantitative thermogravimetric analysis for the determination of portlandite and calcite content in hydrated cementitious systems. **Materials and Structures**, [s.l:], v.50, p. 1-10, May. 2017.

VLACH, T. *et al.* Soft Insert for Support Modeling of Slightly Textile Reinforced Concrete. **Key Engineering Materials**, [s.l:], v.760, p. 158-163, 2018.

VOGEL, F. Production and Use of the Textile Reinforced Concrete. **Advanced Materials Research**, [s.l:], v. 982, p. 59-62, 2014.

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

WANG, B.Y.; WU, H.C.; LI, V.C. Concrete reinforcement with recycled fibers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s.l:], v.12, p. 314–319, Nov. 2000.

WANG, Y. Fiber and textile waste Utilization. **Waste and Biomass Valorization**, [s.l:], v. 1, p. 135-143, 2010.

WANG, Y. **Recycling in textiles**. 1^a ed. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC: England, 2006.

WANG, Y.; BACKER, S.; LI, V.C. An experimental study of synthetic fibre reinforced cementitious composites. **Journal of Materials Science**, [s.l:], v. 22, p. 4281-4291, 1987.

WEILAND, S. *et al.* Textile Reinforced Concrete for Flexural Strengthening of RC-Structures - Part 2: Application on a Concrete Shell. **Design & Applications of**

Textile-Reinforced Concrete. Proceedings of the ACI Fall Convention, [s.l.], p. 33-49, 2007.

WONGKEO, W.; CHAIPANICH, A. Compressive strength, microstructure and thermal analysis of autoclaved and air cured structural lightweight concrete made with coal bottom ash and silica fume. **Materials Science and Engineering**, [s.l.], v. 527, p. 3676-3684, 2010.

Xu, F. *et al.* Mechanical performance evaluation of polyester fiber and SBR latex compound-modified cement concrete road overlay material. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 63, p. 142-149, Apr. 2014.

YAN, L.; CHOUW, N.; YUAN, X. Improving the mechanical properties of natural fibre fabric reinforced epoxy composites by alkali treatment. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, [s. l.], v. 31, p. 425–437, 2012.

YAN, L.; KASAL, B.; HUANG, L. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 92, p. 94–132, Feb. 2016.

YAO, Y. *et al.* Tension stiffening in textile-reinforced concrete under high speed tensile loads. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 64, p. 49–61, 2015.

YIN, S. *et al.*, Use of macro plastic fibres in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 93, p. 180–188, May. 2015.

ZÁLESKA, M. *et al.* Physical and chemical characterization of technogenic pozzolans for the application in blended cements. **Construction and buildings Materials**, [s. l.], v.160 p. 106-116, 2018.

ZHENG, Z.; FELDMAN, D. Synthetic fibres fibre-reinforced concrete. **Pergamon**, [s.l.], v. 20, p. 185-210, 1995.

ZHOU, M.M.; FANG, D.; JIANG, A. Research on the Fracture Properties and Modification Mechanism of Polyester Fiber and SBR Latex Modified Cement Concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 2016, p. 1-8, Apr. 2016.

ANEXO A - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA DO POLIÉSTER

Na Tabela 22 são apresentados os resultados de resistência à tração direta das amostras de tecido de poliéster de acordo com a NBR ISO 13934-1:2016 e na Tabela 23 as dimensões dos corpos de prova têxteis. A espessura do tecido foi obtida através de imagem em microscópio digital apresentada no capítulo 4.

Tabela 22 - Dimensões das amostras de tecido

Resíduo de tecido de poliéster			
Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Seção Transversal (mm ²)
0,2	50	200	10

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 23 - Resultados do ensaio de resistência à tração do tecido de poliéster

Tipo de tratamento do tecido	Amostra	Força (N)	Desl. (mm)	Tensão Elasticidade. (MPa)	Def. Elasticidade (%)	Tensão Máx. (MPa)	Def. Máx. (%)	
Sem impregnação	T1	598,45	27,83	59,54	14,22	59,84	13,92	
	T2	691,64	34,88	61,18		69,16	17,43	
	T3	605,88	35,47	54,34		60,59	17,73	
	T4	645,39	36,87	56,05		64,54	18,43	
	T5	542,19	37,60	50,10		54,22	18,80	
	Impregnação com SBR	U1	777,96	29,27	72,46	12,85	77,80	14,63
		U2	762,44	31,20	73,13		76,24	15,60
		U3	694,51	30,87	65,88		69,45	15,43
		U4	795,24	25,67	79,47		79,52	12,83
		U5	753,07	29,07	68,04		75,31	14,53
Impregnação com SBR + SA		SBR_T1	723,20	32,28	71,57	15,12	72,32	16,14
		SBR_T2	715,40	33,59	67,13		71,54	16,80
		SBR_T3	669,59	33,12	65,67		66,96	16,56
		SBR_T4	716,82	32,79	71,03		71,68	16,40
		SBR_T5	690,97	30,21	68,95		69,10	15,11
	Impregnação com SBR + SA	SBR_U1	818,45	31,21	80,37	15,12	81,84	15,60
		SBR_U2	800,31	33,37	77,60		80,03	16,68
		SBR_U3	767,85	31,74	76,37		76,78	15,87
		SBR_U4	796,17	33,48	75,37		79,62	16,74
		SBR_U5	806,99	32,15	75,54		80,70	16,08
Impregnação com SBR + SA		SBR+SA_T1	904,64	34,87	89,57	17,62	90,46	17,43
		SBR+SA_T2	712,32	34,32	70,99		71,23	17,16
		SBR+SA_T3	936,19	42,92	74,75		93,62	21,46
		SBR+SA_T4	873,39	43,50	66,98		87,34	21,75
		SBR+SA_T5	765,55	41,27	61,24		76,55	20,64
	Impregnação com SBR + SA	SBR+SA_U1	738,43	38,63	73,84	19,32	73,84	19,32
		SBR+SA_U2	882,32	44,90	72,64		88,23	22,45
		SBR+SA_U3	905,42	44,19	74,28		90,54	22,10
		SBR+SA_U4	830,17	45,50	65,31		83,02	22,75
		SBR+SA_U5	779,88	43,72	66,07		77,99	21,86

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

APÊNDICE B - PONTO DE SATURAÇÃO EM PASTA

Para o estado fresco, foram realizados ensaios de mini-cone de Kantro em pastas, com e sem substituição da massa de cimento por 25% de cinza volante, e teores de superplastificante de 0,00; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40 e 0,50%. Estes resultados serão apresentados na Tabela 24. O teor de 0,40% de superplastificante foi considerado o ponto de saturação em pasta e 0,30% o ideal para ser utilizado nas dosagens de concreto leve.

Tabela 24 - Resultados dos ensaios de mini-cone de Kantro em pastas com aditivo superplastificante

Teor aditivo (%)	Mistura	Tempo do ensaio após a mistura											
		0min				5min				15min			
		D1 (mm)	D2 (mm)	Média D (mm)	Área (mm ²)	D1 (mm)	D2 (mm)	Média D (mm)	Área (mm ²)	D1 (mm)	D2 (mm)	Média D (mm)	Área (mm ²)
0,00	REF	58,65	59,08	58,87	2721,41	57,05	59,08	58,07	2647,94	57,05	60,86	58,96	2729,74
	25% CV	65,91	65,26	65,59	3378,22	60,56	61,27	60,92	2914,26	50,29	55,52	52,91	2198,23
0,10	REF	91,74	86,05	88,90	6206,32	78,95	80,15	79,55	4970,04	73,04	72,74	72,89	4172,68
	25% CV	89,22	89,22	89,22	6251,78	88,01	87,17	87,59	6025,43	73,89	73,59	73,74	4270,57
0,20	REF	139,36	141,28	140,32	15463,88	126,88	124,35	125,62	12392,60	99,96	99,26	99,61	7792,65
	25% CV	174,00	164,00	169,00	22431,21	135,13	137,76	153,78	14621,59	115,45	117,39	116,42	10644,73
0,30	REF	148,65	155,40	152,03	18151,37	141,71	139,45	140,58	15521,24	134,35	131,56	132,96	13883,17
	25% CV	197,00	180,00	188,50	27906,28	151,49	156,06	153,78	18571,66	132,73	132,18	132,46	13778,95
0,40	REF	185,00	195,00	190,00	28352,18	184,00	186,00	185,00	26879,60	180,00	170,00	175,00	25446,28
	25% CV	221,60	181,00	201,30	31824,88	190,00	194,00	192,00	28952,21	185,00	185,00	185,00	26879,60
0,50	REF	195,00	180,00	187,50	27610,98	186,00	188,00	187,00	27463,92	187,00	187,00	187,00	27463,92
	25% CV	223,50	196,00	209,75	34552,80	221,80	197,00	209,40	34437,58	221,60	197,00	209,30	34404,70

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

APÊNDICE C – MINI-CONE DE KANTRO EM PASTAS COM AMV

Segue os resultados para o estado fresco de mini-cone de Kantro em pastas, com e sem substituição da massa de cimento por 25% de cinza volante, 0,3% de superplastificante e teores de aditivo modificador de viscosidade (AMV) de 0,00; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40 e 0,50% (Tabela 25). O teor de 0,20% de AMV foi considerado o ideal para ser utilizado nas dosagens de concreto leve.

Tabela 25 - Resultados dos ensaios de mini-cone de Kantro em pastas com aditivo superplastificante

Teor aditivo (%)	Mistura	Tempo do ensaio após a mistura											
		0min				5min				15min			
		D1 (mm)	D2 (mm)	Média D (mm)	Área (mm ²)	D1 (mm)	D2 (mm)	Média D (mm)	Área (mm ²)	D1 (mm)	D2 (mm)	Média D (mm)	Área (mm ²)
0,00	REF	148,65	155,40	152,03	18151,37	141,71	139,45	140,58	15521,24	134,35	131,56	132,96	13883,17
	25% CV	197,00	180,00	188,50	27906,28	141,49	146,06	143,78	16234,77	132,73	132,18	132,46	13778,95
0,10	REF	140,47	135,90	138,19	14996,89	115,40	117,07	116,24	10610,92	108,37	106,78	107,58	9088,70
	25% CV	170,00	171,00	170,50	22831,16	152,34	152,55	152,45	18251,80	133,66	135,99	134,83	14276,45
0,20	REF	165,00	160,00	162,50	20738,91	138,89	136,39	137,64	14878,82	120,96	123,03	122,00	11688,62
	25% CV	173,00	186,00	179,50	25305,11	152,87	152,87	152,87	18353,71	115,79	114,77	115,28	10437,28
0,30	REF	160,00	163,00	161,50	20484,45	125,46	121,20	123,33	11945,84	110,44	109,98	110,21	9539,41
	25% CV	178,00	177,00	177,50	24744,35	167,00	164,00	165,50	21511,73	138,50	137,85	138,18	14994,72
0,40	REF	165,00	164,00	164,50	21252,55	119,24	120,08	119,66	11245,46	104,32	105,14	104,73	8614,33
	25% CV	181,00	173,00	177,00	24605,14	147,33	144,80	146,07	16756,05	121,91	119,66	120,79	11457,91
0,50	REF	170,00	171,00	170,50	22831,16	127,21	126,90	127,06	12678,35	117,60	117,64	117,62	10865,30
	25% CV	184,00	176,00	180,00	25446,28	164,00	163,00	163,50	20994,95	135,52	138,99	137,26	14795,70

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

APÊNDICE D - MINI SLUMP-FLOW E DENSIDADE DE MASSA PARA DIFERENTES PERCENTUAIS DE VERMICULITA

Segue na Tabela 26 os resultados de espalhamentos do mini slump-flow (adaptação da NBR 15823 (ABNT, 2017)) e densidade de massa no estado fresco (NBR 13278 (ABNT, 2005)) para misturas com e sem substituição da massa de cimento por 25% de CV e diferentes percentuais de vermiculita. O traço 1:0,55:0,40 com e sem CV foi considerado o ideal.

Tabela 26 - Mini slump-flow para diferentes porcentagens de vermiculita em misturas com somente cimento e com substituição da massa de cimento por 25% de CV

Mistura	Traço em massa (aglomerante:agregado:água/aglomerante)	SF1 (mm)	SF2 (mm)	Média SF (mm)	Área SF (mm ²)	Peso (g) (v=429cm ³)	Densidade de massa (kg/m ³)
REF	1:0,50:0,40	380,00	330,00	355,00	98977,39	507,10	1182,05
	1:0,55:0,40	350,00	345,00	347,50	94839,42	535,70	1248,72
	1:0,60:0,40	320,00	305,00	312,50	76697,17	526,10	1226,34
	1:0,65:0,40	284,00	260,00	272,00	58105,48	492,40	1147,79
	1:0,70:0,40	258,00	267,00	262,50	54117,52	519,60	1211,19
	1:0,75:0,40	227,00	240,00	233,50	42820,63	510,00	1188,81
25% CV	1:0,50:0,40	378,00	368,00	373,00	109268,99	519,30	1210,49
	1:0,55:0,40	360,00	340,00	350,00	96208,93	513,20	1196,27
	1:0,60:0,40	300,00	300,00	300,00	70684,11	494,10	1151,75
	1:0,65:0,40	300,00	290,00	295,00	68347,61	505,40	1178,09
	1:0,70:0,40	290,00	278,00	284,00	63345,53	522,70	1218,41
	1:0,75:0,40	275,00	270,00	272,50	58319,30	522,80	1218,65

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

APÊNDICE E - MINI SLUMP-FLOW E DENSIDADE DE MASSA PARA PERCENTUAIS DE DESINCORPORADOR DE AR

Na Tabela 27 são apresentados os resultados do mini slump-flow, densidade de massa no estado fresco e no estado endurecido para misturas com e sem substituição da massa de cimento por 25% de cinza volante e com diferentes percentuais de material desincorporador de ar para o traço 1:0,55:0,40. O percentual de 0,20% desse produto em relação a massa de cimento foi considerado o ideal.

Tabela 27 - Mini slump-flow, densidade de massa no estado fresco e massa específica no estado endurecido para diferentes porcentagens de aditivo desincorporador de ar em misturas com e sem CV

Mistura	Material desincorporado de ar (%)	SF1 (mm)	SF2 (mm)	Média SF (mm)	Área SF (mm ²)	Estado fresco		Estado endurecido	
						Peso (g) (v=429cm ³)	Densidade de massa (kg/m ³)	Peso (g) (v=196,34cm ³)	Densidade de massa (kg/m ³)
REF	0,00	350,00	345,00	347,50	94839,42	535,70	1248,72	187,70	955,97
	0,10	368,80	370,00	369,40	107169,96	535,00	1247,09	219,40	1117,42
	0,20	390,00	350,00	370,00	107518,39	542,20	1263,87	198,60	1011,49
	0,30	415,00	413,00	414,00	134610,82	528,10	1231,00	213,00	1084,83
	0,40	450,00	450,00	450,00	159039,25	562,80	1311,89	198,40	1010,47
	0,50	413,00	408,00	410,50	132344,41	536,40	1250,35	207,20	1055,29
	0,60	390,00	385,00	387,50	117929,57	535,40	1248,02	221,20	1126,59
	0,70	365,00	354,00	359,50	101502,58	537,90	1253,85	213,60	1087,88
	0,80	270,00	290,00	280,00	61573,71	552,10	1286,95	223,10	1136,27
	0,90	240,00	250,00	245,00	47142,37	552,60	1288,11	220,10	1120,99
	1,00	220,00	225,00	222,50	94839,42	548,80	1279,25	205,00	1044,08
25% CV	0,00	360,00	340,00	350,00	96208,93	513,20	1196,27	179,70	915,23
	0,10	360,00	360,00	360,00	101785,12	528,30	1231,47	217,50	1107,75
	0,20	358,00	355,00	356,50	99815,58	518,60	1208,86	222,20	1131,68
	0,30	375,00	365,00	370,00	107518,39	530,20	1235,90	225,30	1147,47
	0,40	368,00	390,00	379,00	112812,62	523,30	1219,81	206,20	1050,19
	0,50	355,00	360,00	357,50	100376,34	517,90	1207,23	239,20	1218,27
	0,60	355,00	380,00	367,50	106070,34	540,00	1258,74	211,10	1075,15
	0,70	400,00	395,00	397,50	124094,79	537,90	1253,85	219,50	1117,93
	0,80	415,00	430,00	422,50	140195,06	529,60	1234,50	230,30	1172,94
	0,90	370,00	398,00	384,00	115808,85	522,00	1216,78	227,50	1158,68
	1,00	390,00	380,00	385,00	116412,80	520,50	1213,29	240,40	1224,38

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

APÊNDICE F – TRAÇÃO DIRETA

Nas Tabelas 28 e 29 são apresentados os resultados de tração direta para as amostras com e sem substituição da massa de cimento por 25% de CV e reforçadas com os diferentes tipos de tratamento no tecido. Não foi possível realizar o ensaio para as amostras sem reforço e 25% de CV.

Tabela 28 - Resultados do ensaio de tração direta das amostras de referência (0% CV)

Amostra	L 1 (mm)	L 2 (mm)	L 3 (mm)	Média L (mm)	E 1 (mm)	E 2 (mm)	E 3 (mm)	Média E (mm)	Força Máx. (N)	Desl. Máx. (mm)	Tensão 1ª fissura (MPa)	Def. 1ª fissura (%)	Tensão Máx. (Mpa)	Def. Máx. (%)
S/ reforço_1	61,44	61,16	61,29	61,30	19,34	19,05	18,75	19,05	307,30	0,49	0,24	0,04	0,26	0,08
S/ reforço_2	61,81	61,15	61,44	61,47	16,02	16,69	16,96	16,56	298,80	0,62	0,24	0,04	0,29	0,10
S/ reforço_3	61,62	60,97	61,15	61,25	18,67	17,93	17,61	18,07	327,20	0,21	0,29	0,04	0,30	0,04
C/ reforço_1	61,32	61,70	61,97	61,66	15,59	15,83	15,94	15,79	445,50	2,62	0,24	0,04	0,46	0,44
C/ reforço_2	61,53	60,66	61,60	61,26	18,48	18,34	18,23	18,35	255,80	0,90	0,22	0,04	0,23	0,15
C/ reforço_3	61,75	60,95	61,10	61,27	18,86	18,64	18,61	18,70	287,50	1,19	0,20	0,04	0,25	0,20
SBR_1	61,54	61,00	61,79	61,44	16,30	16,05	15,96	16,10	368,50	16,51	0,30	0,06	0,37	2,75
SBR_2	62,18	61,28	61,77	61,74	17,30	17,56	17,56	17,47	459,80	1,65	0,32	0,06	0,43	0,27
SBR_3	62,10	61,45	61,89	61,81	16,63	16,52	15,94	16,36	507,30	0,41	0,49	0,06	0,50	0,07
SBR+SA_1	61,77	60,83	61,24	61,28	17,94	17,19	16,32	17,15	489,40	0,82	0,46	0,10	0,47	0,14
SBR+SA_2	61,66	61,03	62,29	61,66	19,60	19,54	19,52	19,55	570,40	2,06	0,37	0,10	0,47	0,34
SBR+SA_3	61,60	61,20	61,38	61,39	17,72	17,42	17,66	17,60	463,00	0,66	0,43	0,10	0,43	0,11

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 29 - Resultados do ensaio de tração direta das amostras com cinza volante (25% CV)

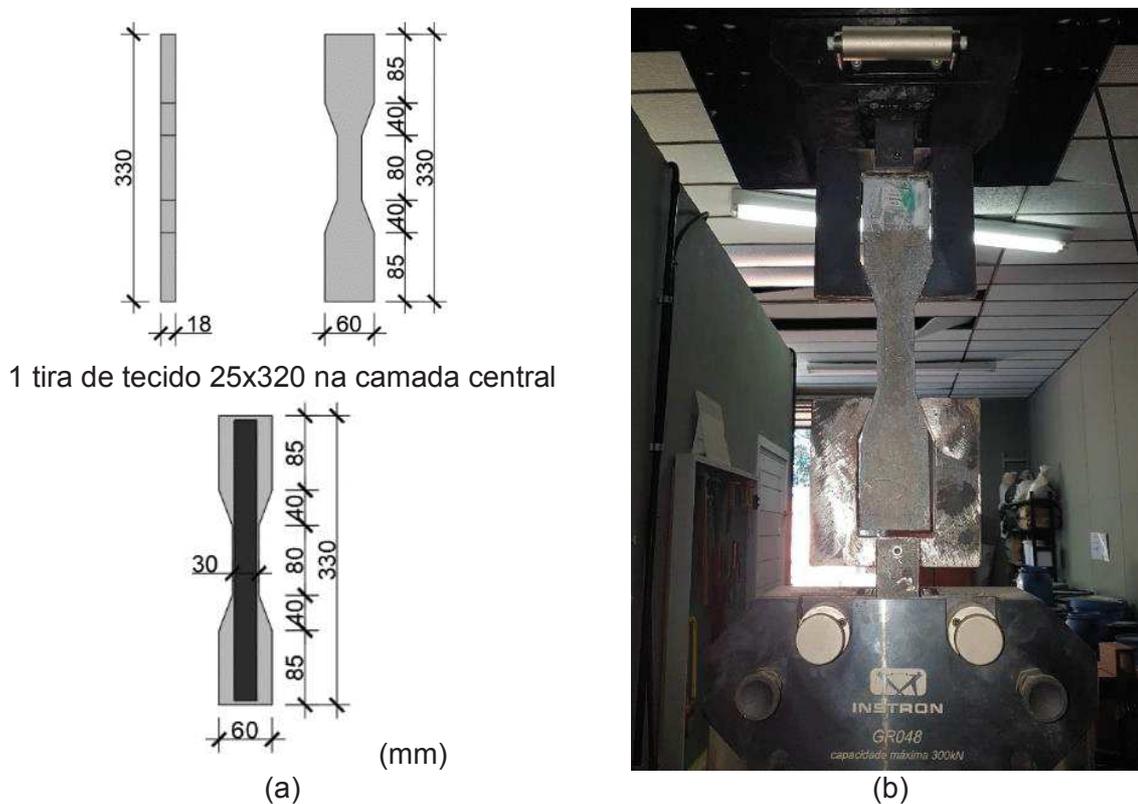
Amostra	L 1 (mm)	L 2 (mm)	L 3 (mm)	Média L (mm)	E 1 (mm)	E 2 (mm)	E 3 (mm)	Média E (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)	Tensão 1ª fissura (MPa)	Def. 1ª fissura (%)	Tensão Máx. (Mpa)	Def. Máx. (%)
C/ reforço_1	60,74	61,02	61,15	60,97	17,01	17,37	17,58	17,32	340,10	0,32	0,31	0,05	0,32	0,05
C/ reforço_2	62,11	62,32	62,73	62,39	16,18	16,37	17,50	16,68	369,30	14,66	0,28	0,05	0,35	2,44
C/ reforço_3	61,41	60,37	60,64	60,81	16,21	17,44	17,41	17,02	322,10	12,58	0,11	0,05	0,31	2,10
SBR_1	61,00	60,84	61,40	61,08	15,48	15,98	15,88	15,78	649,70	1,22	0,56	0,07	0,67	0,20
SBR_2	62,11	61,39	61,31	61,60	16,84	16,75	16,72	16,77	273,70	10,52	0,26	0,07	0,26	1,75
SBR_3	61,63	61,62	62,00	61,75	16,54	16,98	18,91	17,48	271,10	8,49	0,19	0,07	0,25	1,42
SBR+SA_1	60,91	60,79	61,32	61,01	16,81	16,80	17,80	17,14	239,30	9,90	0,16	0,05	0,23	1,65
SBR+SA_2	61,92	62,33	63,52	62,59	15,99	17,24	17,28	16,84	342,30	8,90	0,21	0,05	0,32	1,48
SBR+SA_3	62,42	61,55	60,78	61,58	17,41	17,35	16,13	16,96	244,50	7,57	0,18	0,05	0,23	1,26

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

APÊNDICE G – TRAÇÃO DIRETA DOG BONE

Como método secundário, foram ensaiados corpos de prova no formato “dog bone” de acordo com as recomendações da Japan Society of Civil Engineers (2008). Os ensaios foram realizados em prensa universal fabricada pela EMIC/Instron, no Itt Performance/Unisinos. Foi utilizada célula de carga de 300 kN e velocidade de ensaio de 1 mm/min. Foram ensaiadas quatro amostras de cada combinação aos 91 dias de idade. As dimensões da amostra bem como a configuração do ensaio estão ilustradas na Figura 62.

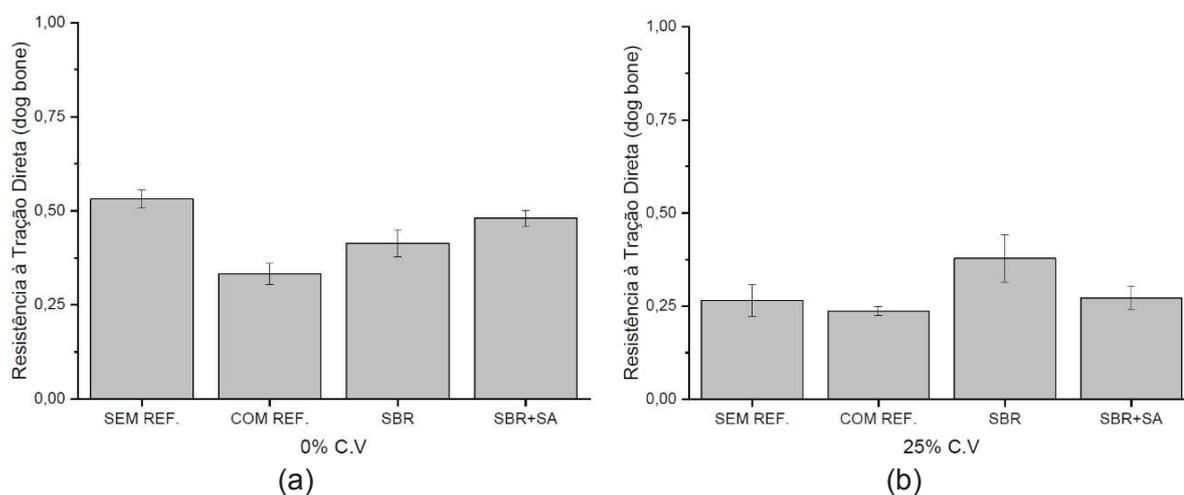
Figura 62 - (a) Dimensões do corpo de prova “dog bone” e (b) configuração da amostra na prensa universal para realização de ensaio de tração direta



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Figura 63 são apresentados os resultados das médias de resistência à tração direta referentes a três amostras.

Figura 63 - Resistência à tração direta dog bone das amostras (a) de referência e (b) com 25% de CV



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Como se pode observar no gráfico, não há uma coerência nos resultados, o que indica que o método não é apropriado quando se trata de concreto reforçado com têxtil, por essa razão não foi realizada a análise mais detalhada desses resultados.

Na Tabela 30 e 31 são apresentados os resultados para cada amostra, bem como as médias entre três corpos de prova, retirando do cálculo as amostras marcadas em vermelho, e o desvio padrão.

Tabela 30 - Resistência à tração direta dog bone das amostras sem CV

Amostra	L 1 (mm)	L 2 (mm)	L 3 (mm)	Média L (mm)	E 1 (mm)	E 2 (mm)	E 3 (mm)	Média E (mm)	Força (N)	Tensão Máx. (MPa)	Média Tensão (MPa)	Desvio Padrão
S/ reforço_1	33,4	33,4	33,3	31,71	19,17	18,66	19,53	17,98	315,6	0,55		
S/ reforço_2	33,20	33,30	33,30	33,27	19,49	20,01	19,70	19,73	263,5	0,40	0,53	0,02
S/ reforço_3	33,40	33,40	33,50	33,43	19,65	20,08	20,62	20,12	341	0,51		
S/ reforço_4	33,20	33,30	33,30	33,27	20,22	19,68	19,44	19,78	350,3	0,53		
C/ reforço_1	33,30	33,20	33,20	33,23	18,36	19,04	18,95	18,78	187,5	0,30		
C/ reforço_2	33,40	33,30	33,20	33,30	16,80	19,32	18,93	18,35	210,3	0,34	0,33	0,03
C/ reforço_3	33,20	33,30	33,30	33,27	18,22	18,65	18,21	18,36	307,1	0,50		
C/ reforço_4	33,30	33,20	33,10	33,20	17,81	16,65	18,49	17,65	206,3	0,35		
REF SBR_1	33,20	33,20	33,20	33,20	19,05	16,75	18,11	17,97	268,2	0,45		
SBR_2	33,20	33,20	33,30	33,23	19,03	16,82	18,24	18,03	94,6	0,16	0,41	0,04
SBR_3	33,10	33,20	33,20	33,17	18,15	20,06	20,95	19,72	270,9	0,41		
SBR_4	33,20	33,20	33,20	33,20	18,57	16,54	16,94	17,35	217,7	0,38		
SBR+SA_1	33,20	33,20	33,20	33,20	17,74	17,86	18,74	18,11	274,4	0,46		
SBR+SA_2	33,50	33,30	33,30	33,37	16,34	16,86	17,12	16,77	273,2	0,49	0,48	0,02
SBR+SA_3	33,30	33,30	33,30	33,30	18,59	18,94	20,41	19,31	198,7	0,31		
SBR+SA_4	33,30	33,50	33,40	33,40	20,02	19,43	19,92	19,79	327,3	0,50		

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 31 - Resistência à tração direta dog bone das amostras com 25% CV

Amostra	L 1 (mm)	L 2 (mm)	L 3 (mm)	Média L (mm)	E 1 (mm)	E 2 (mm)	E 3 (mm)	Média E (mm)	Força (N)	Tensão Máx. (MPa)	Média Tensão (MPa)	Desvio Padrão	
S/ reforço_1	31,97	31,49	31,33	31,60	17,66	18,06	18,21	17,98	95,80	0,17			
S/ reforço_2	34,35	33,53	32,32	33,40	17,97	17,95	17,98	17,97	144,10	0,24	0,27	0,04	
S/ reforço_3	34,18	33,87	33,56	33,87	18,51	18,19	18,19	18,30	194,70	0,31			
S/ reforço_4	32,34	33,46	35,60	33,80	18,21	18,62	18,99	18,61	151,90	0,24			
C/ reforço_1	34,00	33,94	34,10	34,01	17,48	17,94	17,75	17,72	140,30	0,23			
C/ reforço_2	33,72	33,52	33,59	33,61	18,22	18,29	17,82	18,11	128,80	0,21	0,24	0,01	
C/ reforço_3	30,98	30,76	30,14	30,63	18,66	18,84	19,28	18,93	132,20	0,23			
C/ reforço_4	35,68	34,40	33,11	34,40	18,26	17,82	18,57	18,22	156,50	0,25			
25% CV	SBR_1	33,62	33,71	33,98	33,77	19,36	19,16	19,40	19,31	173,90	0,27		
	SBR_2	32,00	32,22	32,35	32,19	18,31	17,60	16,67	17,53	238,20	0,42	0,38	0,06
	SBR_3	33,18	31,93	31,25	32,12	19,90	18,58	18,54	19,01	248,70	0,41		
	SBR_4	34,62	33,23	32,11	33,32	17,50	18,79	18,44	18,24	185,00	0,30		
	SBR+SA_1	34,20	35,01	35,43	34,88	16,90	17,10	17,13	17,04	120,10	0,20		
	SBR+SA_2	33,91	34,09	34,48	34,16	18,50	17,85	18,66	18,34	185,10	0,30	0,27	0,03
	SBR+SA_3	32,55	31,10	31,32	31,66	18,00	17,97	17,49	17,82	133,90	0,24		
	SBR+SA_4	32,95	32,11	32,10	32,39	17,44	17,04	17,00	17,16	157,00	0,28		

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

APÊNDICE H – TRAÇÃO NA FLEXÃO

Nas Tabelas 32 e 33 são apresentados os resultados de tração na flexão, conforme ASTM C947-3: 2016. Foram ensaiadas amostras com e sem substituição da massa de cimento por 25% de CV, bem como sem reforço e com tecido sem tratamento e com impregnação de SBR e SBR mais sílica ativa. Os ensaios foram realizados aos 91 dias.

Tabela 32 - Resistência à tração na flexão das amostras sem CV

Amostra	L 1 (mm)	L 2 (mm)	L 3 (mm)	Média L (mm)	E 1 (mm)	E 2 (mm)	E 3 (mm)	Média E (mm)	Força (N)	Tensão Máx. (MPa)	Média Tensão (MPa)	Desvio Padrão
S/ reforço_1	101,34	101,35	101,50	101,40	17,43	17,26	17,45	17,38	113,76	1,11	0,76	0,19
S/ reforço_2	101,36	100,88	101,10	101,11	18,02	18,40	18,54	18,32	64,37	0,57		
S/ reforço_3	101,10	101,25	101,31	101,22	16,17	16,79	17,33	16,76	90,38	0,95		
S/ reforço_4	101,10	101,20	101,73	101,34	17,05	17,92	18,50	17,82	81,96	0,76		
C/ reforço_1	101,28	101,03	101,58	101,30	17,91	18,28	18,35	18,18	115,69	1,04	0,95	0,10
C/ reforço_2	101,70	101,18	101,50	101,46	16,94	17,48	17,17	17,20	96,75	0,97		
C/ reforço_3	101,87	100,57	101,16	101,20	18,54	18,10	17,22	17,95	79,78	0,73		
C/ reforço_4	101,33	100,84	101,12	101,10	16,26	15,95	16,50	16,24	75,1	0,85		
REF SBR_1	101,09	101,13	102,66	101,63	19,11	19,24	18,97	19,11	175,32	1,42	1,46	0,04
SBR_2	101,80	101,13	101,09	101,34	17,51	17,45	16,92	17,29	120,86	1,20		
SBR_3	101,35	101,17	102,16	101,56	20,79	21,31	21,40	21,17	225,54	1,49		
SBR_4	101,69	101,29	101,40	101,46	17,16	16,28	16,58	16,67	139,09	1,48		
SBR+SA_1	101,40	101,33	101,62	101,45	18,85	19,27	18,97	19,03	107,09	0,87	1,48	0,07
SBR+SA_2	100,48	99,97	100,17	100,21	17,76	17,96	17,62	17,78	161,1	1,53		
SBR+SA_3	101,56	101,05	100,94	101,18	16,44	17,87	18,36	17,56	156,72	1,51		
SBR+SA_4	100,97	100,81	100,88	100,89	17,71	18,47	18,04	18,07	154,13	1,40		

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 33 - Resistência à tração na flexão das amostras com 25% CV

Amostra	L 1 (mm)	L 2 (mm)	L 3 (mm)	Média L (mm)	E 1 (mm)	E 2 (mm)	E 3 (mm)	Média E (mm)	Força (N)	Tensão Máx. (MPa)	Média Tensão (MPa)	Desvio Padrão	
S/ reforço_1	102,07	102,15	101,65	101,96	16,87	16,58	16,10	16,52	62,20	0,67	0,50	0,15	
S/ reforço_2	101,17	101,00	101,61	101,26	16,68	16,12	15,80	16,20	67,50	0,76			
S/ reforço_3	101,24	100,89	102,54	101,56	17,50	17,23	17,03	17,25	43,00	0,43			
S/ reforço_4	103,05	102,96	102,96	102,99	15,49	18,07	18,91	17,49	40,80	0,39			
C/ reforço_1	101,69	101,86	102,17	101,91	15,45	15,78	15,49	15,57	112,80	1,37	0,64	0,05	
C/ reforço_2	101,29	101,65	102,03	101,66	18,91	19,08	18,31	18,77	74,50	0,62			
C/ reforço_3	101,27	100,93	101,60	101,27	18,68	18,94	18,97	18,86	72,50	0,60			
C/ reforço_4	101,48	101,45	101,50	101,48	16,42	18,37	18,66	17,82	75,80	0,71			
25% CV	SBR_1	101,51	101,40	101,58	101,50	16,78	17,13	17,28	17,06	64,10	0,65	0,83	0,06
	SBR_2	101,47	101,39	101,38	101,41	17,11	17,00	17,30	17,14	89,80	0,90		
	SBR_3	101,64	102,04	102,05	101,91	15,80	15,97	15,52	15,76	66,80	0,79		
	SBR_4	102,48	101,97	102,29	102,25	16,78	17,27	18,16	17,40	82,40	0,80		
SBR+SA_1	101,27	101,42	101,95	101,55	14,55	17,10	18,56	16,74	74,30	0,78	0,74	0,06	
SBR+SA_2	102,34	101,78	102,36	102,16	17,80	17,24	17,77	17,60	67,90	0,64			
SBR+SA_3	101,51	101,80	101,60	101,64	19,56	18,60	18,67	18,94	81,90	0,67			
SBR+SA_4	101,84	102,19	102,27	102,10	17,48	16,81	16,01	16,77	73,30	0,77			

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

APÊNDICE I – IMPACTO

Nas Tabelas 34, 35 e 36 são apresentados os resultados referentes as medições das mossas geradas pelos impactos com energia de 2,5J e 5,0J, conforme adaptação da NBR 11675 (ABNT, 2016). As amostras sem reforço têxtil romperam completamente com os impactos, portanto não foram registradas as medições das mossas.

Tabela 34 - Resultados das medições das mossas geradas pelos impactos com energia de 2,5J nas amostras sem CV

Amostra	Energia	Impacto n°	Profundidade (mm)	Média P (mm)	Diâmetro (mm)	Média D (mm)
C/ REF	2,50	1	1,35	2,18	14,34	15,73
		2	2,29		14,94	
		3	1,89		13,07	
		4	2,25		12,85	
		5	1,38		13,29	
		6	1,61		13,37	
		7	1,14		12,76	
		8	3,09		14,77	
		9	2,76		27,72	
		10	4,01		20,15	
SBR	2,50	1	2,03	2,03	5,93	16,64
		2	3,04		16,68	
		3	1,16		15,70	
		4	3,64		14,20	
		5	3,52		28,08	
		6	1,52		17,99	
		7	0,64		12,54	
		8	0,96		15,73	
		9	2,97		25,08	
		10	0,87		14,50	
SBR + SA	2,50	1	0,90	0,84	17,11	15,70
		2	0,66		14,38	
		3	1,17		17,34	
		4	1,18		17,35	
		5	1,21		17,21	
		6	0,99		17,07	
		7	0,73		14,85	
		8	0,39		13,59	
		9	0,56		14,28	
		10	0,59		13,86	

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 35 - Resultados das medições das mossas geradas pelos impactos com energia de 2,5J nas amostras com 25% CV

Amostra	Energia	Impacto nº	Profundidade (mm)	Média P (mm)	Diâmetro (mm)	Média D (mm)
C/ REF	2,50	1	7,37	2,98	17,90	16,54
		2	1,50		15,10	
		3	5,49		15,15	
		4	1,03		15,17	
		5	1,39		13,93	
		6	1,87		17,43	
		7	3,64		17,18	
		8	1,94		17,17	
		9	2,87		19,11	
		10	2,66		17,22	
SBR	2,50	1	1,04	1,10	14,83	14,02
		2	1,04		13,90	
		3	1,08		13,29	
		4	1,11		15,05	
		5	0,71		10,25	
		6	1,15		15,04	
		7	0,70		12,43	
		8	1,61		15,25	
		9	1,49		14,23	
		10	1,06		15,95	
SBR + SA	2,50	1	1,35	1,37	14,00	15,64
		2	1,24		15,55	
		3	1,56		14,53	
		4	1,21		13,55	
		5	1,01		15,70	
		6	1,20		15,69	
		7	1,52		15,68	
		8	1,01		15,43	
		9	1,72		17,05	
		10	1,88		19,17	

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 36 - Resultados das medições das mossas geradas pelos impactos com energia de 5,0J nas amostras de referência e com 25% CV

Amostra	Energia	Impacto nº	Profundidade (mm)	Média P (mm)	Diâmetro (mm)	Média D (mm)	
REF	SBR + SA	5,00	1	2,55	3,55	20,32	21,26
			2	3,04		21,43	
			3	2,41		19,00	
			4	0,85		12,58	
			5	10,79		29,11	
			6	1,74		16,61	
			7	2,39		20,75	
			8	2,75		23,83	
			9	4,19		27,85	
			10	4,84		21,09	
25% CV	SBR + SA	5,00	1	5,72	4,06	29,18	21,27
			2	3,70		23,58	
			3	4,25		15,43	
			4	6,41		23,30	
			5	2,13		15,67	
			6	3,72		21,23	
			7	3,09		26,28	
			8	4,40		20,00	
			9	4,34		19,90	
			10	2,88		18,17	

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Nas Tabelas 37 a 43 são apresentados os resultados das medições das fissuras nas amostras com e sem substituição da massa de cimento por 25% de CV, bem como com reforço sem tratamento e com impregnação de SBR e SBR mais sílica ativa. A amostra de referência com o poliéster tratado com SBR + SA para energia de 2,5J não apresentou fissuras. As amostras sem reforço não foram calculadas pois romperam completamente nas duas energias. Na energia de 5,0J somente foram calculadas as fissuras das amostras com SBR + SA pois as demais romperam completamente com os impactos.

Tabela 37 - Resultados das medições das fissuras geradas pelos impactos com energia de 2,5J nas amostras de referência com reforço sem impregnação

0% CV - C/ REF (2,5J)			
Fissura	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Área (mm²)
A	0,53	94,16	35,88
B	0,37	10,43	3,32
C	0,97	82,42	46,29
D	0,70	171,06	72,90
E	0,50	100,04	41,92
F	0,57	22,35	8,41
G	0,57	98,94	37,66
H	0,37	31,59	8,05
I	0,57	119,64	36,53
J	0,63	262,37	95,71
K	0,53	77,77	31,61
L	0,60	132,42	44,85
M	0,40	162,09	370,65
N	0,47	23,31	6,57
O	0,30	52,89	13,91
P	0,37	85,07	28,21
Q	0,23	14,20	4,88
R	0,60	120,42	47,34
S	0,60	44,52	17,21
T	0,40	43,56	11,70
U	0,47	63,55	26,22
V	0,73	432,06	763,92
W	0,53	89,40	39,70
X	0,50	81,82	40,23
Y	0,50	117,36	46,75
Z	0,73	125,33	59,86
AA	0,50	56,61	23,35
AB	0,60	45,85	29,60
AC	0,43	71,00	30,74
AD	0,63	55,98	19,36
AE	0,67	20,29	11,54
Área total fissurada (mm ²)			2054,87
Percentual de área total fissurada (%)			1,14

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 38 - Resultados das medições das fissuras geradas pelos impactos com energia de 2,5J nas amostras de referência com reforço impregnado com SBR

0% CV - SBR (2,5J)			
Fissura	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Área (mm²)
A	0,70	329,42	164,17
B	0,67	76,24	39,12
C	0,60	76,48	31,94
D	0,40	22,29	10,04
E	0,40	108,31	51,17
F	0,57	89,91	43,99
G	0,53	122,11	58,64
H	0,30	17,23	6,49
I	0,60	31,58	18,10
J	0,70	85,70	44,21
K	0,87	94,60	44,10
L	0,40	45,58	27,34
M	0,43	32,54	28,55
N	0,73	14,04	7,17
O	0,50	85,83	33,29
R	0,27	71,50	24,92
S	1,03	117,38	52,77
T	0,63	185,45	121,77
U	0,47	84,05	35,38
V	0,57	44,22	18,22
W	0,40	36,68	19,69
X	0,37	129,06	60,72
Y	0,30	19,64	8,23
Z	0,27	6,60	4,10
Área total fissurada (mm ²)			954,12
Percentual de área total fissurada (%)			0,53

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 39 - Resultados das medições das fissuras geradas pelos impactos com energia de 2,5J nas amostras com 25% CV e reforço sem impregnação

25% CV - C/ REF (2,5J)			
Fissura	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Área (mm²)
A	0,27	106,90	21,51
B	0,20	129,87	31,79
C	0,37	155,02	70,69
D	0,30	69,48	22,21
E	0,37	107,74	37,00
F	0,67	426,59	234,96
G	0,50	84,61	35,78
H	0,60	53,31	28,19
I	0,40	210,89	87,82
J	0,40	78,82	31,87
Área total fissurada			601,82
Percentual de área total fissurada (%)			0,33

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 40 - Resultados das medições das fissuras geradas pelos impactos com energia de 2,5J nas amostras com 25% CV e reforço com impregnação SBR

25% CV - C/ SBR (2,5J)			
Fissura	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Área (mm²)
A	0,77	130,21	52,94
B	0,60	57,34	43,20
C	0,23	119,50	26,37
D	0,40	29,28	14,62
E	0,43	29,81	4,98
F	0,50	23,86	16,04
G	0,43	23,86	21,72
H	0,50	67,04	29,78
I	0,73	192,68	132,07
Área total fissurada			341,72
Percentual de área total fissurada (%)			0,19

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 41 - Resultados das medições das fissuras geradas pelos impactos com energia de 2,5J nas amostras com 25% CV e reforço com impregnação SBR + SA

25% CV - C/ SBR + SA (2,5J)			
Fissura	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Área (mm²)
A	0,37	27,46	11,86
Área total fissurada			11,86
Percentual de área total fissurada (%)			0,007

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 42 - Fissuras geradas pelos impactos com energia de 5,0J nas amostras com 0% CV e reforço com impregnação SBR + SA

0% CV - SBR + SA (5,0J)			
Fissura	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Área (mm²)
A	0,97	59,70	32,17
B	0,57	54,12	38,72
C	0,87	128,49	69,32
D	0,60	93,16	48,07
E	0,87	137,04	112,78
F	0,93	115,27	78,83
G	1,13	99,92	82,55
H	1,47	54,92	85,31
I	0,73	53,57	28,94
J	0,83	80,68	49,26
K	0,83	351,39	304,78
L	1,73	55,68	83,29
M	0,77	31,85	36,64
N	0,73	78,20	45,48
O	1,73	22,62	29,28
P	0,87	27,44	19,21
Q	0,63	44,58	31,2
R	0,53	29,03	12,97
S	0,87	66,00	64,86
T	0,47	33,02	16,53
U	0,80	69,30	29,35
V	0,57	11,58	4,70
W	0,73	55,26	26,67
X	0,60	22,89	12,09
Y	0,53	230,48	161,27
Z	0,60	92,32	48,15
AA	0,60	57,69	36,04
AB	0,50	77,53	32,1
AC	0,30	44,16	13,39
AD	0,37	41,83	16,3
AE	0,33	35,05	8,29
Área total fissurada (mm ²)			1658,54
Percentual de área total fissurada (%)			0,92

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 43 - Resultados das medições das fissuras geradas pelos impactos com energia de 5,0J nas amostras com 25% CV e reforço com impregnação SBR + SA

25% CV - SBR + SA (5,0J)			
Fissura	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Área (mm²)
A	0,37	67,87	25,87
B	0,63	66,10	30,98
C	0,53	143,85	91,53
D	0,27	16,66	6,52
E	0,47	36,13	14,85
F	1,53	113,93	126,30
G	0,80	173,08	168,35
H	0,50	30,18	16,39
I	0,60	115,67	69,36
J	1,63	109,43	144,55
K	0,67	82,50	45,02
L	0,37	8,06	2,54
M	0,70	72,28	40,78
N	1,13	18,26	11,65
O	0,77	171,99	108,4
P	0,60	99,48	43,96
Q	0,63	65,08	37,57
R	0,63	3,63	1,73
S	1,00	181,91	165,19
T	0,30	46,40	19,22
U	0,73	90,10	37,27
V	0,47	109,45	59,92
W	0,40	92,14	40,31
X	0,47	50,73	37,19
Y	0,80	122,37	106,17
Z	2,27	138,77	122,48
AA	0,43	15,17	8,33
AB	0,77	114,17	123,02
AC	0,47	20,05	100,20
AD	0,30	39,71	12,39
AE	0,50	13,76	7,96
Área total fissurada (mm ²)			1826,00
Percentual de área total fissurada (%)			1,01

Fonte: Elaborada pela autora (2020).