

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS**

MATHEUS PEREIRA RIBEIRO

**CARACTERIZAÇÃO DE TECIDO DE LINHO IMPREGNADO COM PEG COM
SiO₂ E B₄C PARA APLICAÇÃO BALÍSTICA**

**RIO DE JANEIRO
2023**

MATHEUS PEREIRA RIBEIRO

CARACTERIZAÇÃO DE TECIDO DE LINHO IMPREGNADO COM PEG
COM SiO_2 E B_4C PARA APLICAÇÃO BALÍSTICA

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciência em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador(es): Sergio Neves Monteiro, Ph.D.

Rio de Janeiro

2023

©2023

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha
Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Ribeiro, Matheus Pereira.

Caracterização de Tecido de Linho Impregnado com PEG com SiO_2 e B_4C para Aplicação Balística / Matheus Pereira Ribeiro. – Rio de Janeiro, 2023.
116 f.

Orientador(es): Sergio Neves Monteiro.

Tese (doutorado) – Instituto Militar de Engenharia, Ciência e Engenharia de Materiais, 2023.

1. fibras naturais lignocelulósicas; fluido aditivado; blindagem leve; caracterização balística. i. Monteiro, Sergio Neves (orient.) ii. Título

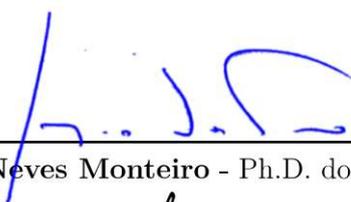
MATHEUS PEREIRA RIBEIRO

**Caracterização de Tecido de Linho Impregnado com PEG
com SiO₂ e B₄C para Aplicação Balística**

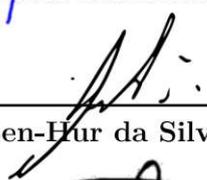
Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciência em Ciência dos Materiais.

Orientador(es): Sergio Neves Monteiro.

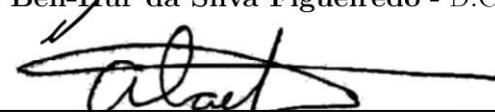
Aprovado em Rio de Janeiro, 15 de dezembro de 2023, pela seguinte banca examinadora:



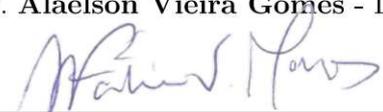
Prof. Sergio Neves Monteiro - Ph.D. do IME - Presidente



Prof. André Ben-Hur da Silva Figueiredo - D.C. do IME



Prof. Alaelson Vieira Gomes - D.C. do IME



Prof. Maria de Fátima Marques - D.C. do UFRJ



Prof. Daniele Cruz Bastos - D.C. do UERJ

Rio de Janeiro

2023

*Este trabalho é dedicado a Deus,
a família Pereira Ribeiro
e a Jonathan Mendonça (in memoriam)*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, Pai de Misericórdias, que aliviou o fardo do seu filho quando ele mais necessitava; à Virgem Maria, pela interseção e acolhimento em seu seio materno; e São Bento, cuja regra norteia minha vida.

A minha família e a minha noiva, pelos exemplos de vida, união e pelo apoio incondicional em cada passo dessa caminhada; e todos os membros da família Pereira e da família Ribeiro, pois são base da minha história até aqui.

Ao meu orientador, Prof. Sergio Neves Monteiro, que admiro imensamente, inspira-me a cada orientação e conversa, e acreditou em mim em todos os momentos. Considero um gigante que me ajuda a ver mais além.

Aos grandes amigos do IME e fora dele: Jonathan Mendonça (*in memoriam*), Leandro Cavalcanti, Thuane Teixeira, Bruno Figueira, Pedro Poubel, Naiara Le Sénéchal, Lucas Neuba, Roberto Hirsch e todo o grupo de materiais compósitos.

Aos engenheiros do Setor de Projetos da Secretaria Municipal de Saúde de Cabo Frio, em especial ao chefe Fellipe do Couto, por me apoiar em diversas ocasiões em que precisei durante a pesquisa e por me motivar a chegar até o final desta caminhada.

Aos professores da PPGCM e seus servidores pelo profissionalismo e por proporcionar um curso de qualidade, em especial ao Prof. Alaelson e ao Prof. André Ben-Hur, que me apoiaram durante a pesquisa.

Ao IPqM, que colaboraram em diversos ensaios e análises, em especial Ana Paula Silva, Maurício Lemos e Fernanda Luz.

À UERJ (UEZO), que colaboraram com análises mecânica, em especial a Profa. Daniele Bastos.

À CAPES, pelo suporte financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,
mas transformai-vos pela renovação da mente,
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

RESUMO

A evolução dos materiais empregados em blindagem está historicamente relacionada a guerras e conflitos armados. Com o desenvolvimento tecnológico das armas de fogo e, simultaneamente, dos crimes relacionados, as instituições públicas passaram a investigar o desenvolvimento de blindagens leves e individuais para uso por partes das forças de segurança, adotando cerâmicas leves, materiais poliméricos e compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras sintéticas. Diante do crescimento do apelo ecológico em decorrência de problemas ambientais relacionados a esses materiais artificiais, as fibras naturais lignocelulósicas (FNLs) passaram a ser uma alternativa devido às suas propriedades mecânicas específicas, comparáveis às dos sintéticos. Assim, considerando o longo período em que foram adotadas em inúmeras aplicações, este trabalho avalia o uso das fibras de linho, no formato de tecido, impregnado com fluidos não newtonianos de SiO_2 e B_4C para aplicações em engenharia e balística. O tecido foi estudado em combinação com fluidos compostos por 50, 55, 60 e 65% em massa de sílica e 5% em massa de carbetto de boro, por meio de análises de difração de raios X (DRX), espectroscopia do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), termogravimétrica (TGA), análise de gramatura e espessura, assim como ensaios de tração, viscosidade e balísticos. Nas análises de FTIR, observou-se a presença de grupos funcionais característicos das FNLs e dos compósitos. Além disso, por meio de DRX, foram conhecidas propriedades intrínsecas do linho, como o índice de cristalinidade, estimado em 60,7%, e da sílica, apontando características de alfa-quartzo. Analisando a gramatura, observou-se que os tecidos de linho apresentam uma densidade superficial mais elevada que a aramida. Houve um incremento de até 4 vezes na massa do compósito e de até 2,5 vezes na espessura do material, de 256,76 a 959 g/m^2 e de 0,41 a 1,02 mm, respectivamente. Nas análise de MEV notou-se a forma de distribuição do fluido pelo tecido, além de se calcular uma média de 0,562 μm e uma circularidade de cerca de 0,494 para a sílica, bem como um tamanho de 28,7 a 92,56 nm de carbetto de boro. No ensaio de TGA, notou-se que o tecido teve sua estabilidade térmica comprometida com a presença do fluido, embora tenha ocorrido menor perda de massa para os compósitos, até 36,2%, além de um acréscimo de 10 $^\circ\text{C}$ para equilíbrio térmico com a adição de carbetto de boro em relação aos grupos com sílica, somente. Na análise da viscosidade dos fluidos espessantes, notou-se que o PEG 400 teve a viscosidade aumentada em 19 vezes com a adição de partículas de 50% em massa de SiO_2 . Além disso, observou-se que o fluido 65SB apresentou a maior viscosidade, além de que o fluido 65S apresentou tendência ao espessamento a partir de 825 s^{-1} . No ensaio de tração de fios, notou-se o maior valor de atrito para as amostras L-65S, cerca de 80 N, e houve um acréscimo substancial entre 60S e 65S de cerca de 27%. Durante o arrancamento, o fio rompeu-se antes de alcançar a carga suficiente para vencer o atrito estático, indicando alta rigidez. No ensaio balístico, observou-se que os grupos 3L-60S e 3L-65S apresentaram aumento de cerca de 14% na energia absorvida e 6% na velocidade limite, com valores máximos de 17,63 J e 58,79 m/s, respectivamente. Além disso, as maiores energias absorvidas específicas (EAE) estudadas foram atingidas pelas amostras citadas.

Palavras-chave: fibras naturais lignocelulósicas; fluido aditivado; blindagem leve; caracterização balística.

ABSTRACT

The evolution of materials used in armor is historically related to wars and armed conflicts. With the technological development of firearms and, simultaneously, related crimes, public institutions began to investigate the development of lightweight and individual armors for use by security forces, adopting lightweight ceramics, polymeric materials, and polymer matrix composites reinforced with synthetic fibers. Faced with the growing ecological appeal due to environmental problems related to these artificial materials, lignocellulosic natural fibers (LNFs) became an alternative due to their specific mechanical properties, comparable to synthetic ones. Thus, considering the long period they have been adopted in numerous applications, this work evaluates the use of linen fibers, in fabric form, impregnated with non-Newtonian fluids of SiO₂ and B₄C for engineering and ballistic applications. The fabric was studied in combination with fluids composed of 50, 55, 60, and 65% by mass of silica and 5% by mass of boron carbide, through X-ray diffraction (XRD) analyses, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetric analysis (TGA), grammage and thickness analysis, as well as tensile, viscosity, and ballistic tests. In FTIR analyses, the presence of functional groups characteristic of LNFs and composites was observed. Additionally, through XRD, intrinsic properties of linen were known, such as the crystallinity index, estimated at 60.7%, and silica, indicating alpha-quartz characteristics. Analyzing the grammage, it was observed that linen fabrics have a higher surface density than aramid. There was an increase of up to 4 times in the composite mass and up to 2.5 times in material thickness, from 256.76 to 959 g/m² and from 0.41 to 1.02 mm, respectively. In SEM analysis, the distribution of the fluid through the fabric was noticed, and an average of 0.562 μm and a circularity of about 0.494 for silica were calculated, as well as a size of 28.7 to 92.56 nm for boron carbide. In the TGA test, it was noted that the fabric had its thermal stability compromised with the presence of the fluid, although there was a lower mass loss for the composites, up to 36.2%, in addition to an increase of 10 °C for thermal equilibrium with the addition of boron carbide compared to groups with silica only. In the viscosity analysis of thickening fluids, it was noticed that PEG 400 had its viscosity increased 19 times with the addition of 50% by mass of SiO₂ particles. Furthermore, it was observed that the 65SB fluid showed the highest viscosity, and the 65S fluid showed a thickening tendency from 825 s⁻¹. In the tensile test of threads, the highest friction value was observed for the L-65S samples, about 80 N, and there was a substantial increase between 60S and 65S of about 27%. During pulling, the thread broke before reaching the load sufficient to overcome static friction, indicating high rigidity. In the ballistic test, it was observed that the 3L-60S and 3L-65S groups showed an increase of about 14% in absorbed energy and 6% in the limit velocity, with maximum values of 17.63 J and 58.79 m/s, respectively. Additionally, the highest specific absorbed energies (SAEs) studied were achieved by the mentioned samples.

Keywords: natural lignocellulosic fibers; viscous fluid; soft armor; ballistic characterization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Publicações que contêm a palavra-chave "Natural Fiber" desde 1990. . .	19
Figura 1.2 – Publicações sobre blindagens leves comparadas às publicações sobre balística desde 1990.	20
Figura 2.1 – Estrutura básica de uma FNL.	23
Figura 2.2 – Esquema de uma fibrila que compõe uma FNL.	24
Figura 2.3 – Micrografia de uma fibra de cânhamo para visualização de lignina entre microfibrilas (2500 x).	25
Figura 2.4 – Imagem esquemática da distribuição da celulose, lignina e hemicelulose na célula fibrosa.	26
Figura 2.5 – Arranjos de tecido A) Simples; B) Sarja; C) Cetim; D) Cesta; E) Leno.	26
Figura 2.6 – Fibras de linho aderidas por uma lamela intermediária.	28
Figura 2.7 – Múmia encontrada no atual Egito utilizando adereços fabricados com linho.	29
Figura 2.8 – Publicações com as palavras-chave "flax fiber" e "mechanical application" de 1975 até 2023.	32
Figura 2.9 – Áreas do conhecimento com publicações relacionadas à "flax fibers" desde 1974.	32
Figura 2.10 – Curva de viscosidade por taxa de cisalhamento típicos para cada tipo de fluido.	33
Figura 2.11 – Comportamento da viscosidade de um FEC submetido à variação da taxa de cisalhamento.	34
Figura 2.12 – Variação da viscosidade aparente para fluidos aditivados de diferentes proporções de (A) carbetto de silício e (B) sílica.	37
Figura 2.13 – Influência da adição de B_4C como segunda fase do FAd de SiO_2 , à 20 °C.	37
Figura 2.14 – Comparação entre viscosidade de resinas diferentes para aplicação em FEC.	38
Figura 2.15 – Polimorfismo da sílica à temperatura ambiente.	39
Figura 2.16 – Tipos de grupos silanol e pontes de siloxano na superfície da sílica.	40
Figura 2.17 – (a) Camadas de uma HA; e (b) acoplamento da HA em uma SA.	43
Figura 2.18 – Representação esquemática de uma SA composta de diversas camadas.	44
Figura 2.19 – Mecanismos de absorção de energia em uma SA.	46
Figura 2.20 – Número de publicações por ano de trabalhos com as palavras-chave "shear thickening fluid" e "ballistic armor".	47
Figura 2.21 – Efeito do FAd no tecido de SA.	48
Figura 3.1 – Sequência metodológica do trabalho.	50
Figura 3.2 – Tecido de linho conforme obtido.	51

Figura 3.3 – Tecido de aramida conforme obtido.	51
Figura 3.4 – Sílica utilizada como recebida (1200x).	52
Figura 3.5 – Carbetto de boro utilizado como recebida (40000x).	53
Figura 3.6 – Grupos de amostras a partir da composição de partículas de SiO ₂ e B ₄ C.	55
Figura 3.7 – Representação esquemática da sequência de fabricação dos corpos de prova.	57
Figura 3.8 – Corpos de prova fabricados de acordo com o procedimento apresentado.	58
Figura 3.9 – Representação de um ensaio de tração do tipo <i>yarn pullout</i>	61
Figura 3.10–Representação esquemática da configuração do ensaio de viscosidade realizado.	62
Figura 3.11–(A) Projétil adotado no ensaio balístico e (B) instalação do corpo de prova para testes.	63
Figura 3.12–Esquema do ensaio balístico.	63
Figura 4.1 – Espectro de FTIR da fibra de linho.	66
Figura 4.2 – Espectro de FTIR do tecido de aramida.	67
Figura 4.3 – Espectro de FTIR dos compósitos em análise.	68
Figura 4.4 – Difratoograma do tecido de linho.	69
Figura 4.5 – Difratoograma para as partículas de SiO ₂ utilizadas na confecção do FEC que impregnaram o tecido de linho.	70
Figura 4.6 – Massa média e espessura média das amostras de cada grupo estudado.	71
Figura 4.7 – Morfologia das superfícies do tecido de aramida (A) e do tecido de linho (B).	72
Figura 4.8 – Micrografia dos compósitos em estudo.	74
Figura 4.9 – Comparação entre a superfície do (A) linho e da (B) aramida (500x).	75
Figura 4.10–Distribuição de tamanho de partículas de sílica utilizada no trabalho.	76
Figura 4.11–Curvas de (a) TG e (b) DTG para os tecidos impregnados com sílica.	77
Figura 4.12–Curvas de (a) TG e (b) DTG para os tecidos impregnados com sílica e carbetto de boro.	80
Figura 4.13–Comportamento viscoso dos fluidos estudados.	83
Figura 4.14–Comportamento reológico do fluido 65S.	84
Figura 4.15–Mistura de partículas de sílica e carbetto de boro (500x).	85
Figura 4.16–Resultados de ensaio de arrancamento de fios para o tecido de linho puro.	85
Figura 4.17–Curvas características observadas no ensaio de arrancamento de fios para os compósitos em estudo.	86
Figura 4.18–Aspecto superficial de uma amostra do grupo L-55SB. Setas em vermelho apresentam pontos de concentração de tensão (250x).	87
Figura 4.19–Representação gráfica dos valores médios obtidos para os compósitos em análise.	88

Figura 4.20–Resultado de yarn pullout obtidos nos trabalhos de (A) Khodadadi et al. (2018) e (B) Gürgen, Kuşhan e Li (2017).	92
Figura 4.21–(A) Vazios presentes entre os fios numa amostra L-xS e (B) vazios preenchidos com partículas de B ₄ C (60x).	93
Figura 4.22–Aspecto dos tecidos de aramida e de linho sob impacto balístico, frente (f) e verso (v).	94
Figura 4.23–Aspecto dos tecidos compósitos sob impacto balístico, frente (f) e verso (v).	95
Figura 4.24–Tecido de linho impregnado com 60% de sílica com intertravamento mecânico acionado (1000x).	96
Figura 4.25–Tecido de linho impregnado com sílica e carbeto de boro com intertravamento mecânico acionado (1000x).	97
Figura 4.26–Comparação da EAE dos compósitos estudados no trabalho e obtidos por Mahesh, Harursampath e Mahesh (2022).	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição média de algumas fibras naturais lignocelulósicas.	22
Tabela 2.2 – Composição média de algumas fibras naturais lignocelulósicas a partir da região de extração na planta.	23
Tabela 2.3 – Vantagens e desvantagens do uso das FNLs.	27
Tabela 2.4 – Propriedades de algumas fibras vegetais.	27
Tabela 2.5 – Composição química das fibras de linho de diferentes autores.	30
Tabela 2.6 – Propriedades mecânicas das fibras de linho comparadas às fibras sintéticas.	31
Tabela 2.7 – Fatores que influenciam na propriedade dos fluidos aditivados.	36
Tabela 2.8 – Trabalhos sobre impregnação de tecidos em que se adotou a sílica como uma das fases.	41
Tabela 2.9 – Fatores que influenciam na propriedade balística dos tecidos.	45
Tabela 2.10–Níveis de proteção balística.	49
Tabela 3.1 – Propriedades da Sílica, de acordo com o fornecedor.	52
Tabela 3.2 – Propriedades do Carbetto de Boro, de acordo com o fornecedor.	53
Tabela 3.3 – Propriedades do PEG 400.	54
Tabela 3.4 – Tabela de codificação dos materiais e grupos de amostras.	56
Tabela 3.5 – Tabela resumo dos ensaios propostos e das características das amostras.	58
Tabela 3.6 – Parâmetros estatísticos da ANOVA.	64
Tabela 4.1 – Massa, gramatura e espessura dos tecidos de linho impregnados nas proporções estudadas.	71
Tabela 4.2 – Análise de variância dos resultados de espessura.	73
Tabela 4.3 – Comparação das médias de espessura dos grupos a partir do Teste de Tukey.	73
Tabela 4.4 – Resumo dos principais valores e parâmetros analisados na TGA do linho e dos compósitos.	78
Tabela 4.5 – Resumo dos principais valores e parâmetros analisados na TGA do linho e dos compósitos.	81
Tabela 4.6 – Valores de viscosidade para fluidos puros.	82
Tabela 4.7 – Viscosidade máxima atingida pelos fluidos estudados sob taxa de cisalhamento de 1 a 1000 s ⁻¹	82
Tabela 4.8 – Valores médios de carga máxima de arrancamento de fios.	87
Tabela 4.9 – Análise de variância dos resultados de Yarn Pullout do grupo L-xS.	88
Tabela 4.10–Comparação das médias de Yarn Pullout dos grupos L-xS a partir do Teste de Tukey.	89
Tabela 4.11–Análise de variância dos resultados de Yarn Pullout do grupo L-xSB.	89

Tabela 4.12–Comparação das médias de Yarn Pullout dos grupos L-xSB a partir do Teste de Tukey.	90
Tabela 4.13–Análise de variância dos resultados de Yarn Pullout do grupo L-xS. . .	90
Tabela 4.14–Comparação das médias de Yarn Pullout dos grupos analisados a partir do Teste de Tukey.	90
Tabela 4.15–Comparação da carga máxima de <i>Yarn Pullout</i> em outros materiais. .	91
Tabela 4.16–Resultados de absorção de energia de impacto balístico nos grupos estudados e publicações recentes.	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
ASTM	American Society for Testing of Materials
DMS	Diferença mínima significativa
DRX	Difração de raios-X
EAE	Energia Absorvida Específica
FAd	Fluido Aditivado com Partículas
FNL	Fibra natural lignocelulósica
FEC	Fluido Espessante por Cisalhamento
FTIR	Infravermelho por Transformada de Fourier
GL	Grau de liberdade
HA	<i>Hard Armor</i>
IME	Instituto Militar de Engenharia
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
NBR	Norma Brasileira
NIJ	National Institute of Justice
QMR	Quadrado médio do resíduo
QMT	Quadrado médio dos tratamentos
SA	<i>Soft Armor</i>
SQR	Soma dos quadrados do resíduo
SQT	Soma dos quadrados dos tratamentos
SQTo	Soma dos quadrados total
TGA	Análise termogravimétrica
TL	Tecido de Linho

LISTA DE SÍMBOLOS

B_4C	Carbeto de Boro
E_{abs}	Energia absorvida
I	Intensidade
I_C	Índice de cristalinidade
m	Massa
SiO_2	Sílica
V_L	Velocidade limite
ρ_A	Densidade superficial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVA	21
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	OBJETIVOS GERAIS	21
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	FIBRAS NATURAIS LIGNOCELULÓSICAS	22
2.1.1	FIBRAS DE LINHO	28
2.2	FLUIDOS VISCOSOS	33
2.3	FASE DISPERSA	38
2.3.1	SÍLICA	38
2.3.2	CARBETO DE BORO	41
2.4	BLINDAGENS BALÍSTICAS	42
2.4.1	BLINDAGEM LEVE	43
2.4.1.1	BLINDAGEM LEVE IMPREGNADA COM FLUIDOS VISCOSOS	46
2.4.2	AVALIAÇÃO BALÍSTICA	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1	MATERIAIS	50
3.1.1	TECIDO DE LINHO	50
3.1.2	TECIDO DE ARAMIDA	51
3.2	FLUIDO ADITIVADO	52
3.2.1	FASE DISPERSA - SÍLICA	52
3.2.2	FASE DISPERSA - CARBETO DE BORO	52
3.2.3	FASE DISPERSANTE - PEG 400	53
3.3	GRUPOS ANALISADOS	54
3.4	FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	56
3.5	CARACTERIZAÇÕES PROPOSTAS	58
3.5.1	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADAS DE FOURIER (FTIR)	58
3.5.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	59
3.5.3	ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA GRAMATURA	59
3.5.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	60
3.5.5	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)	60
3.5.6	ENSAIO DE TRAÇÃO - <i>YARN PULLOUT</i>	60

3.5.7	ANÁLISE DE VISCOSIDADE	61
3.5.8	ENSAIO BALÍSTICO	62
3.5.9	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADAS DE FOURIER (FTIR)	66
4.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	68
4.3	ANÁLISE DA GRAMATURA	70
4.4	MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)	74
4.5	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)	76
4.6	ANÁLISE DE VISCOSIDADE	81
4.7	ENSAIO DE TRAÇÃO - <i>YARN PULLOUT</i>	85
4.8	ANÁLISE DE ABSORÇÃO DE IMPACTO BALÍSTICO	92
5	CONCLUSÃO	99
6	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	101
	REFERÊNCIAS	102

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história humana, os materiais de alta resistência ao impacto estão integralmente relacionados à sobrevivência do homem. No Egito antigo, os soldados já trajavam uma combinação de material vegetal e couro para proteção contra armas de impacto; os Persas e os Assírios adotavam o couro, a madeira e o ferro e bronze para se protegerem contra armas perfurantes; e os gregos e romanos utilizavam escudos de cobre e madeira, bem como vestimentas compostas predominantemente de aço. Na Idade Média, os cavaleiros passariam a adotar armaduras metálicas com conformações diferentes, como em escamas e correntes, com a intenção de se protegerem das armas perfurantes, como a espada e a lança. Desde então, até a Segunda Guerra Mundial, as blindagens eram compostas basicamente de materiais metálicos (LAIBLE, 2012).

À medida que as tecnologias de armas e munições foram se desenvolvendo, os materiais para blindagens passaram a ser maiores e mais pesados, comprometendo, em certa medida, o desempenho dos combatentes e equipamentos no campo de batalha (ABTEW; BOUSSU; BRUNIAUX, 2021). Somente a partir da Guerra das Coreias e do Vietnã, no final da década de 60, as atenções voltaram-se às blindagens individuais e leves, sendo, dessa maneira, investigados os materiais cerâmicos como a alumina e os carbetos de boro e de silício (LAIBLE, 2012).

Com a expansão do uso das armas de fogo e, gradualmente, de crimes relacionados a elas, o Instituto de Justiça Nacional dos Estados Unidos (NIJ) passou a investigar o desenvolvimento de blindagens individuais que permitiriam a utilização por tempo prolongado pelas forças de segurança. Assim, com o surgimento de materiais sintéticos com boa resistência à tração, como a fibra de aramida, polietilenos de ultra alto peso molecular (UHMWPE) e nylon balístico, além de suas combinações, comprovou-se sua eficiência balística quando combinados com cerâmicas avançadas (ABTEW; BOUSSU; BRUNIAUX, 2021; COOPER; GOTTS, 2005).

Dessa forma, recentemente, diante do aumento da produção de materiais sintéticos, bem como do forte apelo ecológico manifestado inicialmente em 1972 na Conferência da ONU em Estocolmo e endossado mundialmente na Agenda 21 em 1992, fontes energéticas como petróleo, gás natural e carvão passaram a ter seus processamentos contestados. Como alternativa aos materiais de origem do petróleo, como as fibras sintéticas, as fibras naturais passaram a ser um atrativo desde a década de 90 pela indústria e comunidade científica. Como vantagens frente aos sintéticos, este material apresenta reciclabilidade, grande disponibilidade, baixo custo, baixa demanda energética na produção (cerca de 60% a menos) e um potencial desempenho mecânico (GHOLAMPOUR; OZBAKKALOGLU, 2020; TOWNSEND, 2020; KARIMAH et al., 2021; VIGNESHWARAN et al., 2020).

Desde a época citada, a produção mundial de fibras naturais reagiu positivamente a esta tendência ecológica. Depois de grandes quedas na exploração durante os anos 80 e 90, as fibras vegetais passaram por um rápido crescimento de produção a partir dos anos 2000, indo de 2 para 7 milhões de toneladas de produção até 2018 (TOWNSEND, 2020). Além disso, pesquisas relacionadas ao desempenho mecânico das fibras naturais ou de compósitos reforçados pela fibra ganharam força desde então (GÜVEN et al., 2016; PEÇAS et al., 2018; HASAN; HORVÁTH; ALPÁR, 2020; ZHANG et al., 2020), passando de 24 artigos publicados na década de 1990 para cerca de 500 na década de 2010, com crescimento expressivo até a década de 2020, como está apresentado na Figura 1.1, para períodos de 10 anos. Dentre estas publicações, pode-se citar as que envolvem aplicações balísticas, como camada intermediária em blindagens multicamadas (BRAGA et al., 2017; GARCIA et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2019; PEREIRA et al., 2019; NASCIMENTO et al., 2019), as quais mostraram desempenho comparável aos materiais sintéticos amplamente utilizados.

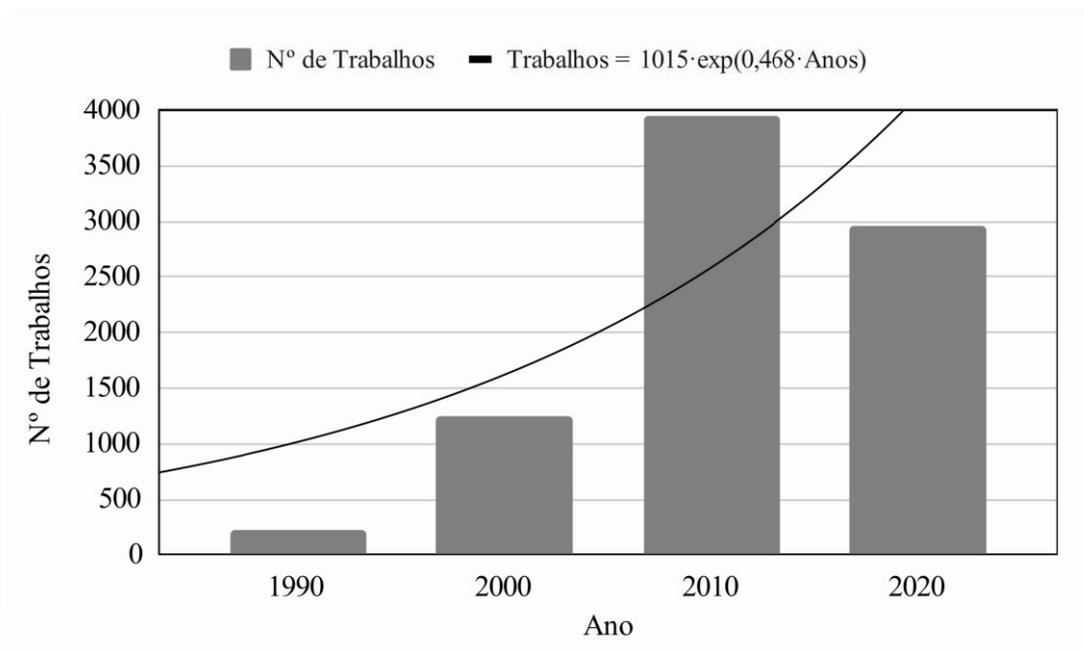


Figura 1.1 – Publicações que contêm a palavra-chave "Natural Fiber" desde 1990.

Fonte: Base de dados SCOPUS.

Ao se analisar outros formatos de blindagens balísticas, que atendem à norma NIJ 2008, como as que adotam camadas têxteis para blindagem flexível, somente dois trabalhos até 2023 trataram da utilização de fibras vegetais em substituição às fibras de aramida e de polietileno (MAHESH; HARURSAMPATH; MAHESH, 2022; FEHRENBACH et al., 2023), enquanto há um número bem maior de pesquisas acerca de blindagens leves utilizando materiais sintéticos dentre os estudos sobre balística em geral. No gráfico da Fig. 1.2 está representado este quantitativo.

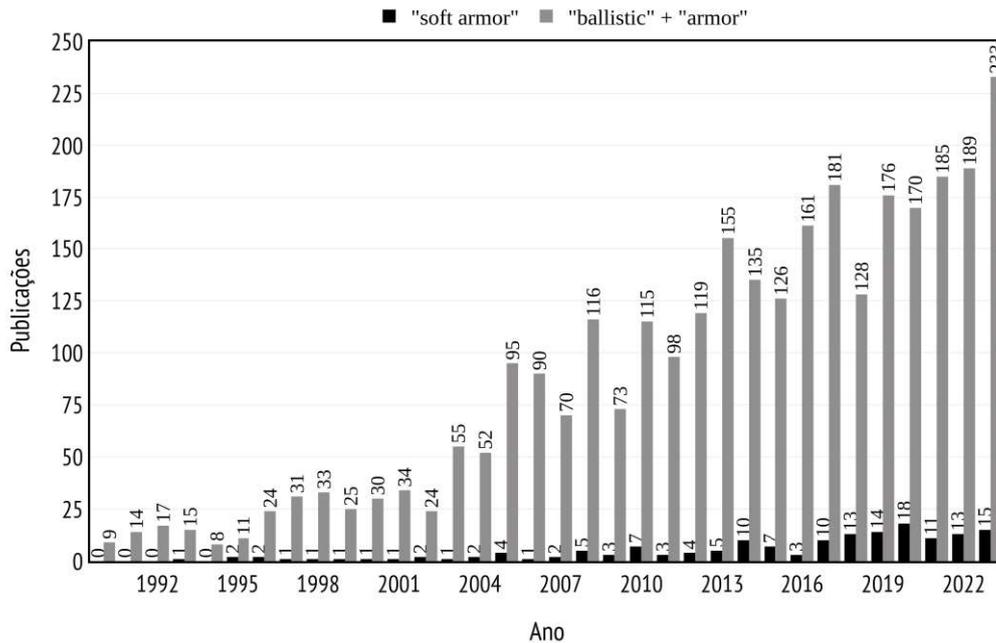


Figura 1.2 – Publicações sobre blindagens leves comparadas às publicações sobre balística desde 1990.

Fonte: Base de dados SCOPUS.

Essa discrepância observada no gráfico acima evidencia o fato de que há necessidade de ainda se explorar outros potenciais de aplicação de uma fibra vegetal nos estudos sobre balística, ainda que aliado a outros materiais, dado que o tecido natural isoladamente apresenta propriedades muito inferiores a um tecido sintético balístico (RIBEIRO et al., 2022; MAHESH; HARURSAMPATH; MAHESH, 2022). Uma das combinações de material de relativa criatividade e com resultados relevantes foi apresentada por Gates (1968) e continuada por Lee, Wetzel e Wagner (2003), os quais realizaram a impregnação de tecidos com fluidos poliméricos aditivados com partículas cerâmicas.

Em vista desse progresso no desempenho de tecidos, o presente trabalho visa explorar a substituição das fibras sintéticas pelas fibras naturais lignocelulósicas (FNLs) para aplicação em blindagens leves, aliadas a um material fluido aditivado com partículas cerâmicas (FAd). Será caracterizado e estudado o comportamento balístico, mecânico e térmico do tecido de linho impregnado com FAd composto por PEG 400, partículas de sílica (SiO_2) e adições de carbetto de boro (B_4C) em proporções estruturadas na direção de otimizar o desempenho balístico. Para isso, propõe-se estudar amostras compostas de camadas de tecido de linho sem e com impregnação por FAd composto de uma fração em massa de 50, 55, 60 e 65% SiO_2 , as quais ainda não foram estudadas até o momento, e posterior adição também inédita de 5% em massa de B_4C para análises mecânicas, térmicas e balísticas, bem como de caracterização de cada material envolvido.

1.1 Justificativa

O Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais do IME tem como foco aplicações militares para as pesquisas desenvolvidas. Nesse contexto, a justificativa desta proposta reside na investigação do tecido de linho impregnado com fluido viscoso, visando motivar a substituição de materiais sintéticos convencionalmente utilizados, com base nos estudos desenvolvidos pela linha de pesquisa de materiais compósitos e fibras naturais.

Do ponto de vista financeiro, o custo de obtenção do tecido de linho apresenta potencial para redução dos custos em comparação com materiais sintéticos como aramida e UHMWPE, o que pode ser um fator positivo para as Forças Armadas e Auxiliares. Além disso, a utilização das fibras naturais favorece o desenvolvimento de economias locais que têm a cultura vegetal como meio de subsistência. Do ponto de vista científico, a originalidade deste estudo reside na avaliação do desempenho balístico, térmico e mecânico de blindagens leves construídas com tecidos de fibras naturais impregnadas com fluidos poliméricos. Assim, o trabalho visa contribuir para o estado da arte de materiais com aplicações militares.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

O principal objetivo deste trabalho é investigar as propriedades mecânicas, físicas, morfológicas, térmicas e balísticas de tecidos de linho impregnados com PEG, em proporções de sílica e carbetto de boro ainda não exploradas. O intuito é fornecer uma alternativa ecologicamente amigável aos materiais sintéticos.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar o tecido de linho e cada fase que comporá os fluidos espessantes, bem como os fluidos produzidos e os materiais conjugados que serão formados a partir da impregnação;
2. Analisar as propriedades mecânicas e térmicas dos compósitos têxteis fabricados, variando a fração volumétrica das fases que compõem o fluido espessante;
3. Investigar o desempenho balístico dos compósitos têxteis e compará-lo ao do tecido de aramida;
4. Comparar o desempenho mecânico do compósito investigado com os sintéticos, utilizando trabalhos publicados e resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fibras Naturais Lignocelulósicas

As fibras naturais, de maneira geral, compreendem um conjunto de fibras de origem vegetal, animal e mineral. No entanto, em termos de disponibilidade e sustentabilidade, as fibras vegetais destacam-se pela maior aceitação em aplicações industriais e pesquisas científicas (CRISTALDI et al., 2010). Este tipo de fibra natural é comumente referenciado como fibras naturais lignocelulósicas (FNLs), devido à predominância de celulose, hemicelulose e lignina em sua composição, além de substâncias em menores proporções, como pectina e extrativos. Os teores de sua composição variam entre as diversas fibras existentes, como pode ser observado na Tab. 2.1 para as mais exploradas. Por exemplo, verifica-se um teor quase nulo de lignina para as fibras de algodão, enquanto as fibras de juta apresentam cerca de 11,8%.

Tabela 2.1 – Composição média de algumas fibras naturais lignocelulósicas.

Fibras Naturais	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
Coco	36,6	37,0	22,2
Picea	41,6	37,3	19,4
Palmeira	43,8	10,1	33,2
Casca Milho	45,7	35,8	4,0
Cana-de-Açúcar	46,0	24,5	19,5
Bambu	41,8	59,8	29,3
Linho	83,3	11,3	2,3
Cânhamo	55,0 – 77,0	3,7 – 13,0	14 – 22,4
Juta	45,0 – 71,5	13,6 – 21,0	12,0 – 26,0
Kenaf	56,8 – 79,3	9,7 – 13,6	7,2 – 18,3
Rami	68,6 – 91,0	5,0 – 16,7	0,6 – 0,7
Algodão	82,7 – 90,0	5,7	2,0
Sisal	41,14	41,96	10,40
Folha de Abacaxi	12,9 – 34,6	25,4 – 35,5	5,14 – 26,4

Fonte: Adaptado de Kamarudin et al. (2022).

As FNLs podem ser classificadas de acordo com a sua origem nas partes dos vegetais, como, por exemplo, do caule, da semente, da folha ou do fruto. Essas possibilidades de origens das fibras se traduzem em variação de diversos parâmetros. Por conta disso, as fibras com origem no caule são mais usadas por serem mais fáceis de extrair e por possuírem melhores propriedades mecânicas, ainda que fatores externos também contribuam para as suas características finais (VERMA et al., 2016). Para exemplificação, Khan et al. (2023)

apresentou percentualmente, na Tab. 2.2, a variação de composição das fibras de kenaf, bem como do tamanho da fibra a partir da origem de extração na estrutura da planta.

Tabela 2.2 – Composição média de algumas fibras naturais lignocelulósicas a partir da região de extração na planta.

Composição	Cerne	Casca	Cerne + Casca
Lignina (%)	19,2	14,7	21,2
Celulose (%)	49,	55,0	53,8
Holocelulose (%)	87,2	86,8	87,7
Hemicelulose (%)	25,4	19,1	51,8
Cinzas (%)	1,9	5,4	4,0

Fonte: Adaptado de Khan et al. (2023).

Estruturalmente, as FNLs são arranjadas em conjuntos de células formadas por microfibrilas de maior cristalinidade. Esse material é constituído por celulose, composto orgânico de cadeia linear, que está conectada em camadas por ligantes amorfos de lignina e hemicelulose (GHOLAMPOUR; OZBAKKALOGLU, 2020). John e Thomas (2008) classificam as fibras vegetais como um compósito em que as fibrilas de celulose ficam aderidas em uma matriz composta por lignina e hemicelulose, formando uma rede tridimensional, conforme apresentado na Figura 2.1.

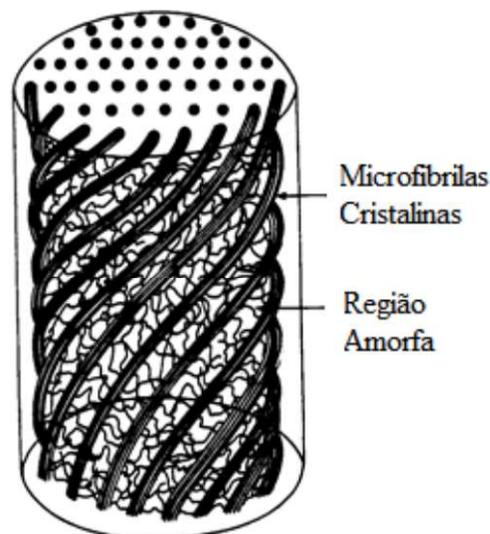


Figura 2.1 – Estrutura básica de uma FNL.

Fonte: Adaptado de Fornari-Jr (2017).

Ao se observar detalhadamente a Figura 2.2, é possível perceber que essas fibras apresentam uma estrutura complexa. O material natural é constituído de uma parede primária e três secundárias, além de microfibrilas distribuídas de forma helicoidal e do lúmen no centro para a passagem de nutrientes. A parede primária apresenta uma rede

espaçada e irregular de microfibrilas de celulose compactadas, enquanto que as paredes secundárias apresentam maior densidade de celulose em matriz hemicelulose. Estas paredes diferem entre si a partir da orientação do ângulo microfibrilar (AMF) e a razão do teor entre celulose e hemicelulose/lignina. Vale destacar que a segunda parede secundária (S2) é a camada mais espessa da microfibrila e, conseqüentemente, a mais importante para o desempenho mecânico da fibra (JOHN; THOMAS, 2008).

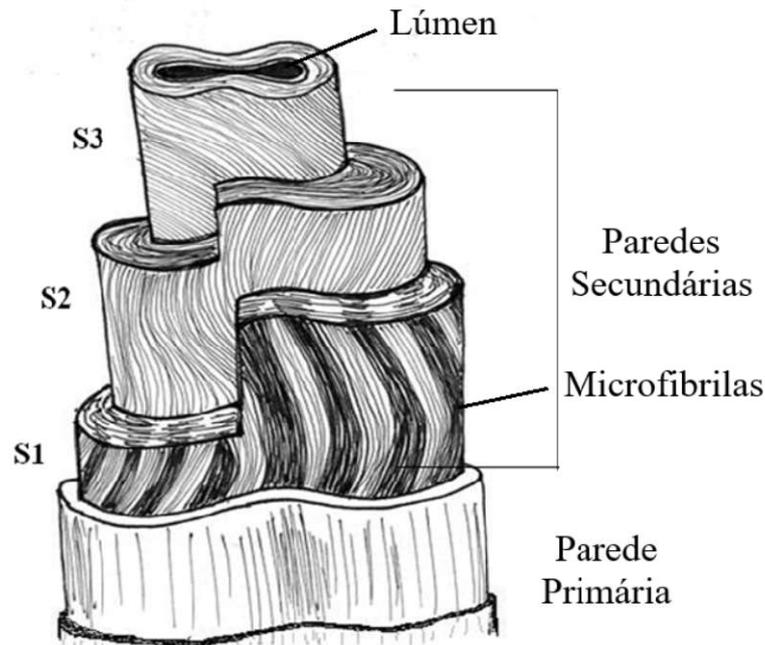


Figura 2.2 – Esquema de uma fibrila que compõe uma FNL.

Fonte: Adaptado de Han (2010).

A celulose, que compõe as cadeias de microfibrilas, é um polímero natural formado por unidades de β -glicose com ligações de β -1,4-glicosídicas, as quais contêm grupos hidroxila alcoólicos que conferem ao material a característica hidrofílica. A presença desses grupos hidroxila também proporciona a cristalinidade do material por meio de ligações de hidrogênio e forças de van der Waals que orientam quimicamente o alinhamento de suas moléculas. Embora não ocorram variações químicas entre as fibras, o grau de polimerização apresenta flutuações nos valores para cada FNL. Esse parâmetro está diretamente relacionado com a propriedade mecânica do material (LI et al., 2021; ZHAO et al., 2020).

As microfibrilas de celulose estão dispostas helicoidalmente, e sua inclinação é denominada ângulo microfibrilar (AMF), ou seja, a declividade entre a fibrila e o eixo paralelo da célula fibrosa. Este ângulo é distintivo em cada FNL e é um dos determinantes do desempenho mecânico da fibra, além de ser um parâmetro do percentual de composição da celulose, lignina e hemicelulose, e do grau de polimerização (CHOKSHI et al., 2020; PINTO; RODRIGUES; BERNARDO, 2020).

Por sua vez, a lignina, segunda em maior abundância nas fibras vegetais, é um polímero de hidrocarbonetos complexos com constituintes alifáticos e aromáticos. Sua composição está associada à celulose por ligações covalentes entre as cadeias de lignina e os constituintes da celulose e hemicelulose. O alto teor de lignina proporciona rigidez à fibra, ainda que isoladamente tenha resistência mecânica menor que a celulose pura, além de conferir caráter hidrofóbico à fibra. A lignina atua como um agente de cimentação entre as células, assegurando uma melhor transferência de tensões entre as fibrilas (CHOKSHI et al., 2020; THOMAS et al., 2011).

Na Figura 2.3 está exemplificada a presença de microfibrilas em uma fibra de cânhamo, aderidas em uma matriz amorfa de lignina e hemicelulose.

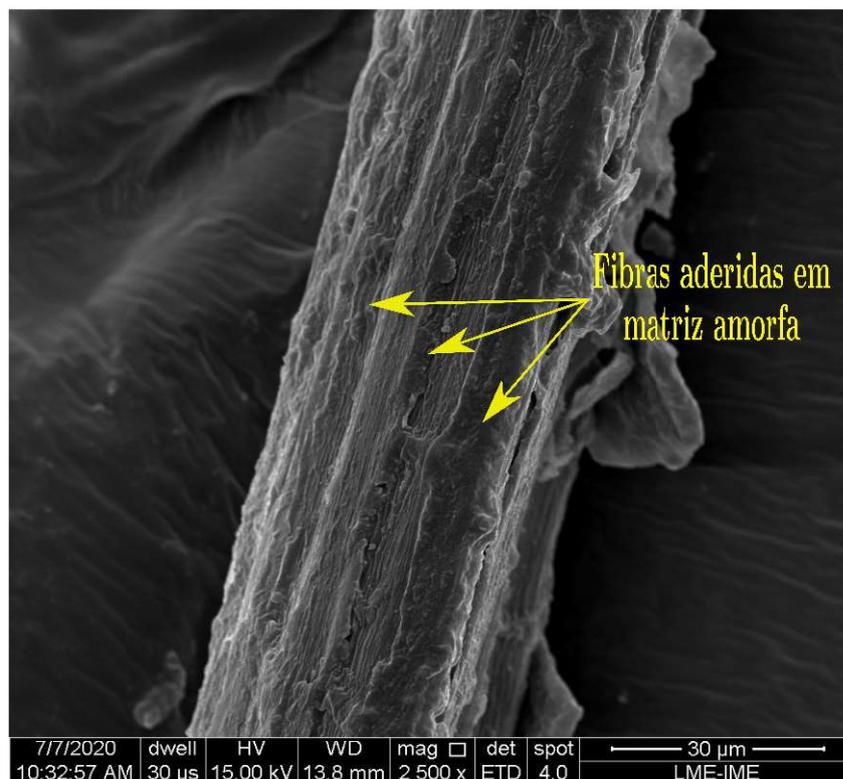


Figura 2.3 – Micrografia de uma fibra de cânhamo para visualização de lignina entre microfibrilas (2500 x).

Fonte: Próprio autor.

A hemicelulose, por sua vez, consiste em um grupo de polissacarídeos presentes na área de interação entre a celulose e a lignina. Trata-se de um composto que atua como matriz de cimentação entre as microfibrilas de celulose e mantém sua ligação com a celulose mesmo após a degradação da lignina. Apresenta ramificações nas cadeias e um grau de polimerização inferior ao encontrado na celulose, além de possuir um caráter altamente hidrofílico e ser solúvel em solução alcalina (FUQUA; HUO; ULVEN, 2012).

Na Fig. 2.4, está esquematicamente representada a distribuição da celulose, lignina e hemicelulose em uma fibra natural, de maneira semelhante a um compósito reforçado.

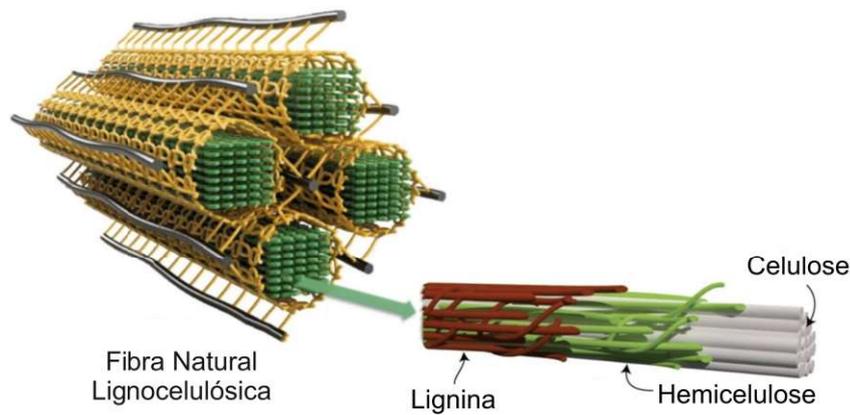


Figura 2.4 – Imagem esquemática da distribuição da celulose, lignina e hemicelulose na célula fibrosa.

Fonte: Adaptado de Jung et al. (2022).

Dada a ausência de FNLs longas e contínuas na natureza, a adoção da forma em tecido emerge como uma escolha apropriada, sobretudo à luz dos avanços nas técnicas de fiação e tecelagem. Conforme destacado por Hosur et al. (2004), os tecidos, caracterizados por uma disposição bidirecional das fibras, podem conferir a um compósito, quando adotados como reforço de uma matriz polimérica, uma resistência à fratura de aproximadamente 4 a 5 vezes superior em comparação com fibras unidirecionais. Adicionalmente, os fios da trama e do urdume podem assumir distintas formas de entrelaçamento. Os arranjos predominantes são ilustrados na Figura 2.5, sendo a forma simples (a) a adotada no presente trabalho.

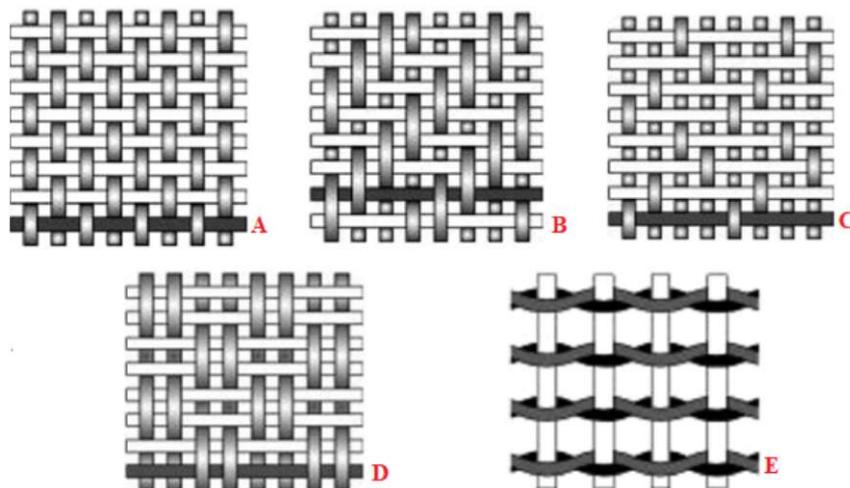


Figura 2.5 – Arranjos de tecido A) Simples; B) Sarja; C) Cetim; D) Cesta; E) Leno.

Fonte: John e Thomas (2008)

As FNLs exibem algumas vantagens e desvantagens em comparação com as fibras sintéticas, amplamente utilizadas em aplicações de engenharia e militar. A Tab. 2.3 lista

alguns pontos relevantes, destacados por Rahman, Maniruzzaman e Yeasmin (2023), especialmente para aplicações de engenharia.

Tabela 2.3 – Vantagens e desvantagens do uso das FNLs.

Vantagens das FNLs	Desvantagens das FNLs
A baixa densidade proporciona maior resistência específica e rigidez do que outros materiais sintéticos.	Baixa resistência ao impacto.
A produção é viável a partir de investimentos e custos muito baixos.	Vida útil reduzida em relação aos sintéticos
O processamento é bastante acessível, sem necessidade de uso de maquinário de alto custo.	A temperatura de processamento pode proporcionar modificações fisicoquímicas.
Estabilidade térmica relevante e propriedades acústicas isolantes.	A qualidade e as propriedades da fibra flutuam a partir do processo de colheita ou produção agrícola.
Biodegradável e <i>ecofriendly</i> .	Baixa adesão na interface fibra/matriz polimérica.

Fonte: Adaptado de Rahman, Maniruzzaman e Yeasmin (2023).

Para aplicações que demandam desempenho mecânico, foco deste trabalho, a ampla variação nos valores das propriedades mecânicas pode ser atribuída às diferenças nas estruturas das fibras, decorrentes das condições ambientais em que se desenvolveram e da região da planta em que foram extraídas. No entanto, é possível tratá-las para obter incrementos nas propriedades (FARUK et al., 2012). A Tabela 2.4 apresenta valores dos parâmetros mais relevantes para aplicações de engenharia.

Tabela 2.4 – Propriedades de algumas fibras vegetais.

Fibra	Massa Específica (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (%)
Coco	1,2–1,5	95–230	3–6	15–51
Algodão	1,5–1,6	287–800	6–13	3–10
Linho	1,53	745–1145	44–61	2,07
Cânhamo	1,48	690	70	1,6
Juta	1,3	393–773	27	1,5–1,8
Kenaf	1,4–1,5	223–930	15–53	1,5–2,7
Rami	1,5	560	25	2,5
Sisal	1,3–1,5	363–700	9–38	2,0–7,0
Aramida	1,4	3000–3150	63–67	3,3–3,7
E-glass	2,5–2,6	2000–3500	70–76	1,8–4,8

Fonte: Adaptado de Gholampour e Ozbakkaloglu (2020) e Li et al. (2020).

Uma estratégia para otimizar as propriedades e reduzir essas amplitudes consiste na degradação da parte amorfa da fibra, resultando no aumento da cristalinidade e na diminuição da densidade de defeitos. No entanto, a concentração do tratamento pode deteriorar as propriedades mecânicas, indicando a necessidade de um aprofundamento antes da aplicação na FNL (KOOHESTANI et al., 2019).

2.1.1 Fibras de Linho

As fibras de linho são um tipo de FNL extraídas do caule da planta *Linum usitatissimum*, pertencente à família das *Linaceae*. De uma única planta de linho, é possível obter entre 10 e 40 feixes de fibras do caule, dos quais podem ser extraídas de 10 a 40 fibrilas aderidas em lamelas intermediárias de pectina por meio de maceração (CHARLET et al., 2009).

Com os indícios do aumento dos problemas climáticos, diversas indústrias têm voltado cada vez mais sua atenção para as fibras naturais. Baley, Bourmaud e Davies (2021) destacam que a capacidade de se obter fibras de linho por hectare, considerando tanto fibras longas quanto curtas, saltou de cerca de 530 kg no período entre a Primeira e a Segunda Guerra Mundial para cerca de 2300 kg em 2018 em alguns países da Europa.

De acordo com as informações descritas no trabalho de Baley et al. (2020), o cultivo da planta do linho se mostra positivo para a obtenção de fibras naturais. Os autores ressaltam que, a partir de uma sementeira de 1500 a 1900 sementes/m², obtém-se cerca de 1500 e 1600 plantas/m² viáveis para a extração de fibras. Além disso, os autores relatam que a utilização de sementes certificadas proporciona um poder de germinação acima de 92% e uma série de outras vantagens que garantem a limitação de perdas no cultivo. Na

Fig. 2.6, é apresentado um esquema dos feixes de fibras de linho.

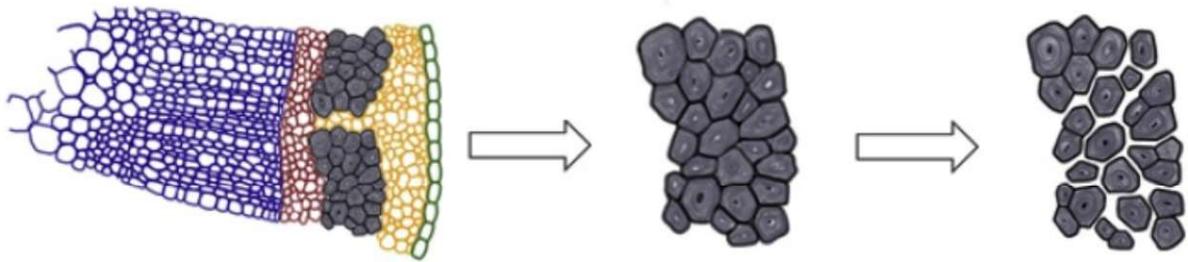


Figura 2.6 – Fibras de linho aderidas por uma lamela intermediária.

Fonte: Adaptado de Baley et al. (2020).

O linho é um dos materiais naturais comprovadamente mais antigos adotados pelo homem. Resquícios da fibra foram encontrados em cavernas na região do Cáucaso, datando de cerca de 30.000 anos, estimados do período paleolítico superior (KVAVADZE et al., 2009). Na Fig. 2.7, é apresentada uma imagem de uma múmia datada de cerca de 4.000 anos, na qual foram identificadas peças de armaduras e roupas compostas por linho.



Figura 2.7 – Múmia encontrada no atual Egito utilizando adereços fabricados com linho.

Fonte: Adaptado de Meelli et al. (2021).

Ao observar os tempos recentes, com a evolução da ciência e engenharia, nota-se que o uso do linho para fins tecnológicos já está consideravelmente consolidado, como retrata o trabalho de Baley, Bourmaud e Davies (2021). Neste trabalho, é realizado um levantamento de 80 anos de utilização do linho em materiais compósitos para diversas aplicações, incluindo em aeronaves, por exemplo. Além das aplicações têxteis e de engenharia, o linho oferece uma ampla gama de possibilidades de uso de outras partes da planta: os mesmos autores citam que a fibra e o óleo extraído da semente do linho são utilizados até mesmo na fabricação das notas de dólar americano.

O cultivo da *Linum usitatissimum* ocorre em regiões e condições variadas. Embora a planta seja predominantemente cultivada em áreas de clima temperado, como nos países ocidentais da Europa, um volume significativo de culturas de linho também é observado na China, Índia, Nova Zelândia e Rússia, no leste europeu (RICHELY et al., 2022). Nas Américas, sua produção é observada em países como Canadá, Estados Unidos da América, Argentina, bem como no Brasil, sobretudo em regiões subtropicais no sul do país (GARCIA et al., 2020). O período de extração da planta é bem definido: quando a plantação é realizada nessas regiões por volta dos meses de abril e março, a colheita geralmente ocorre entre julho e agosto. No entanto, nos países cujas temperaturas são mais elevadas, o cultivo geralmente ocorre em novembro, com a extração em março (RICHELY et al., 2022).

O processo produtivo do linho consiste nas etapas de cultivo, colheita, maceração, secagem, extração da fibra e limpeza. Richely et al. (2022) menciona as duas principais formas de extração de fibra para o linho ainda no caule, e Horne (2020), Khan et al. (2023) complementam a descrição desses processos:

- Por orvalho: Os caules são deixados espalhados na superfície, sujeitos às variações climáticas, por um período entre 2 e 8 semanas. A umidade e a variação de temperatura criarão um ambiente propício à ação de fungos e bactérias que degradarão a parte central do caule, cujos feixes envolvem. Esta forma de extração provoca menor impacto na natureza e é amplamente empregada na Europa devido às restrições ambientais. Entretanto, esse processo resulta em decréscimo na qualidade do material quando comparado com as fibras extraídas pelo processo por água.
- Por água: Os caules colhidos são deixados submersos em água corrente por 7 a 14 dias, podendo-se reduzir o tempo conforme a temperatura da água aumenta. Esse método geralmente é acompanhado da utilização de aditivos químicos. Para produção têxtil, essa metodologia proporciona materiais de qualidade superior. No entanto, como mencionado anteriormente, enfrenta resistência por parte de alguns países devido ao impacto negativo elevado no meio ambiente. Ainda é amplamente adotado em campos de extração no Egito e em países asiáticos.

Como já mencionado na Tab. 2.4, as composições das fibras lignocelulósicas apresentam amplas variações. Como descrito anteriormente, essa característica é uma consequência de fatores variados, como as condições de cultivo e colheita, o estágio de crescimento da planta, o local de extração da fibra e os processamentos utilizados. A Tab. 2.5 apresenta a proporção dos constituintes da fibra de linho, como celulose, hemicelulose, lignina e pectina.

Tabela 2.5 – Composição química das fibras de linho de diferentes autores.

Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Pectina (%)	Lignina (%)	Referências
60 - 85	14 - 20,6	1,8 - 15	1 - 3	Bourmaud et al. (2018)
86,5	8,6	-	4,9	Castellani et al. (2016)
64 ± 2	13,3 ± 1	6,1 ± 0,4	4,9 ± 1,2	Prez et al. (2019)
66,3 ± 3,5	18,8 ± 2,7	-	2,2 ± 0,1	Mondragon et al. (2014)

Fonte: Adaptado de Richely et al. (2022).

Conforme antecipado, a variabilidade na composição reflete nas propriedades mecânicas e físicas finais, critérios essenciais na escolha de materiais para reforço em compósitos. A Tab. 2.6 apresenta valores de propriedades para o linho, comparando-os com os das fibras de vidro e aramida. Observa-se uma falta de uniformidade na resistência à tração das fibras naturais, evidenciada pelo alto desvio padrão e pela amplitude dos valores. Já nos materiais sintéticos, esses intervalos são menores, mantendo-se em uma ordem de grandeza.

Tabela 2.6 – Propriedades mecânicas das fibras de linho comparadas às fibras sintéticas.

Fibra	Resistência à tração (MPa)	Mód. de Elast. (GPa)	Def. (%)	Referências
Linho	1454 ± 835	68,2 ± 35,8	2,3 ± 0,6	Yan, Chouw e Jayaraman (2014)
	345 - 1500	27,6 - 90	2,7 - 3,2	Yan, Chouw e Jayaraman (2014)
	1500	27,6	3,2	Karimah et al. (2021)
	800 - 1500	60 - 80	1,2 - 1,6	Vigneshwaran et al. (2020)
	500 - 1500	27,6	2,7 - 3,2	Khan et al. (2023)
Vidro	2000 - 3500	800 - 1400	-	Singh et al. (2017)
Aramida	3000 - 3150	2142,8 - 2250	-	Singh et al. (2017)

Fonte: Adaptado de Gholampour e Ozbakkaloglu (2020).

Embora o uso de compósitos reforçados com fibras naturais esteja em constante crescimento, as fibras de linho são objeto de estudo há bastante tempo em combinação com matrizes poliméricas. Em 1939, o pesquisador Norman De Bruyne, um dos pioneiros no estudo de compósitos reforçados com FNLs, publicou um trabalho sobre o uso de

compósitos fenólicos reforçados com fibras de linho, denominado Gordon Aerolite (BALEY; BOURMAUD; DAVIES, 2021). Este material foi concebido inicialmente para aplicação em aeronaves, após a observação das limitações das resinas fenólicas em papéis *kraft* durante a Segunda Guerra Mundial. Desde então, vários estudos têm explorado aplicações práticas do linho, incluindo o desenvolvimento de materiais para construção civil, setor automotivo, embalagens, indústria naval (OUN et al., 2022; RAJAMURUGAN et al., 2022; PANTALONI et al., 2022; RAPONI et al., 2021), e até mesmo na indústria militar para aplicações balísticas (ISMAIL et al., 2022; SARASINI et al., 2018). A Figura 2.8 apresenta as publicações relacionadas às palavras-chave "flax fiber" e "mechanical application", obtidas da base SCOPUS.

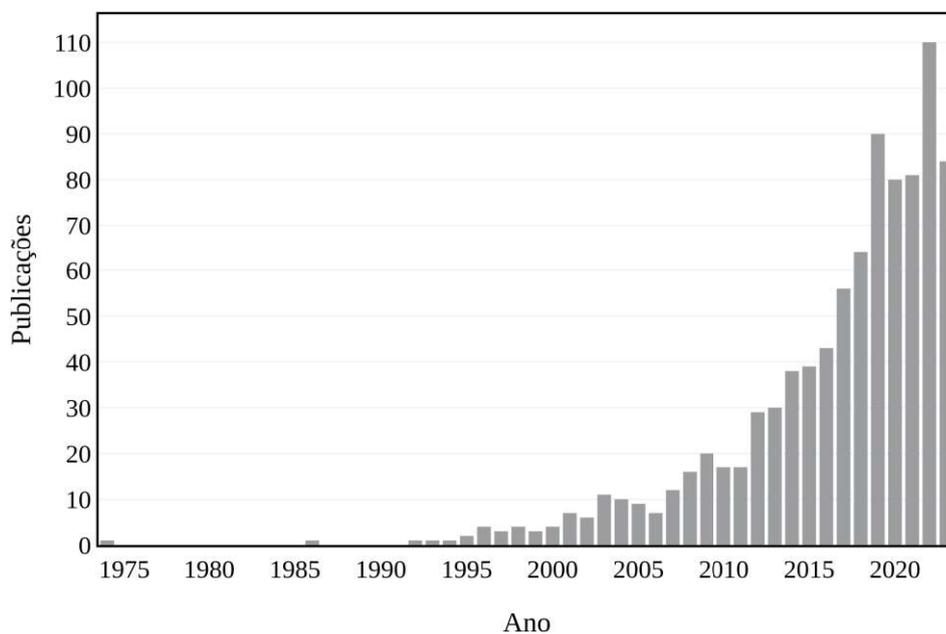


Figura 2.8 – Publicações com as palavras-chave "flax fiber" e "mechanical application" de 1975 até 2023.

Fonte: Próprio autor.

Dessas publicações, foram identificadas as áreas do conhecimento relacionadas ao termo "flax fibers" desde 1974 na base "Web of Science", apresentadas na Figura 2.9



Figura 2.9 – Áreas do conhecimento com publicações relacionadas à "flax fibers" desde 1974.

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que aproximadamente 60% dessas publicações referem-se a estudos na área de ciência dos materiais e engenharia, abrangendo temas como materiais compósitos e poliméricos. Surpreendentemente, cerca de 12% de todas as publicações estão relacionadas a tecidos, objeto do presente trabalho. Com isso, fica demonstrada a relevância do material e de seu formato, bem como a necessidade de se dar continuidade a exploração de suas qualidades.

2.2 Fluidos Viscosos

Os fluidos newtonianos são substâncias que apresentam um comportamento constante quando se analisa a viscosidade em função do gradiente de velocidade do cisalhamento. Diz-se que esses fluidos obedecem à lei de Newton, pois mantêm a linearidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento. Na Figura 2.10 é possível observar esse comportamento em relação aos demais tipos de fluidos.

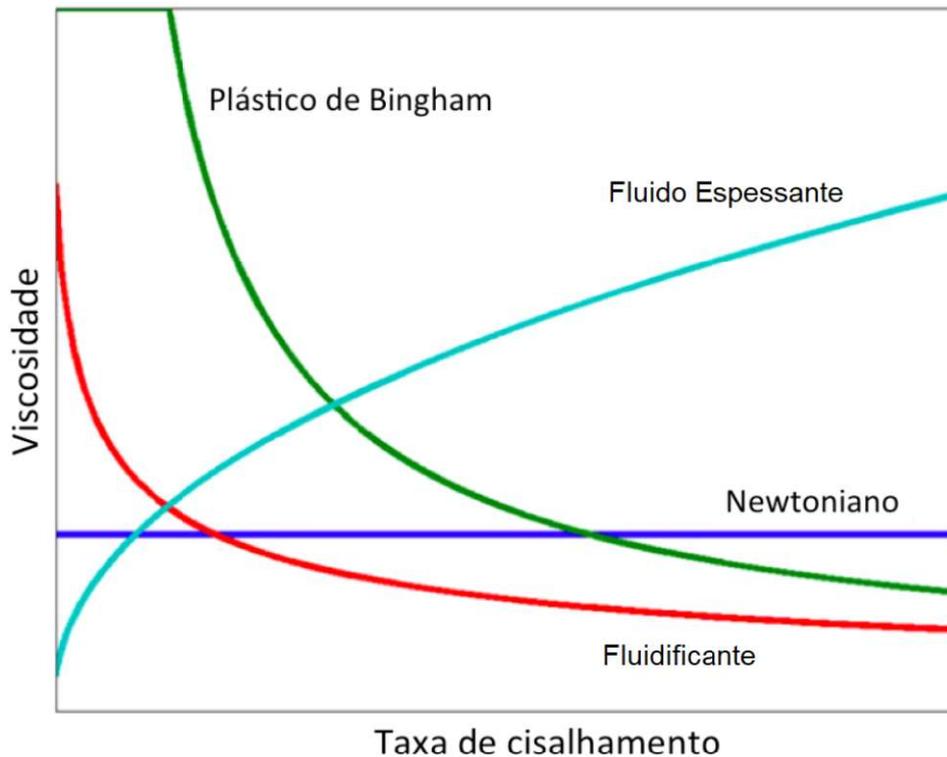


Figura 2.10 – Curva de viscosidade por taxa de cisalhamento típicos para cada tipo de fluido.

Fonte: Adaptado de Zhu et al. (2015).

Contudo, quando se discute sobre os fluidos de importância para a engenharia e ciência de materiais (polímeros fundidos, soluções de polímeros em solventes de baixo peso molecular, emulsões, suspensões e blendas), os fluidos não podem ser representados por este comportamento linear, e sim por aqueles que apresentam componentes elásticas, além de não se comportarem como puramente viscoso (CANEDO, 2018). Esses fluidos são ditos "não lineares" ou "não newtonianos" e passam a apresentar uma viscosidade aparente, ou seja, variável com o cisalhamento a que o material é submetido ao longo do tempo. Dentre os diversos comportamentos que esses fluidos podem apresentar, dois são principais: espessamento e fluidificação.

Os fluidos espessantes por cisalhamento (FEC), amplamente conhecidos pelo termo inglês *Shear Thickening Fluid* (STF), são fluidos que apresentam um aumento não linear da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento acima de um valor crítico. Por sua vez, os fluidificantes (FF) apresentam um comportamento viscoso contrário, ou seja, a viscosidade decresce com a ampliação do cisalhamento. Na Figura 2.11 está representado um esquema do comportamento viscoso de um fluido hipotético. Observa-se inicialmente que a atuação do material está intimamente relacionada à interação das duas fases que compõem um fluido não newtoniano: dispersa, geralmente partículas sólidas micrométricas (círculos coloridos na figura); e dispersante, como resinas e água (fundo branco na figura)

(MAWKHLIENG; MAJUMDAR, 2019).

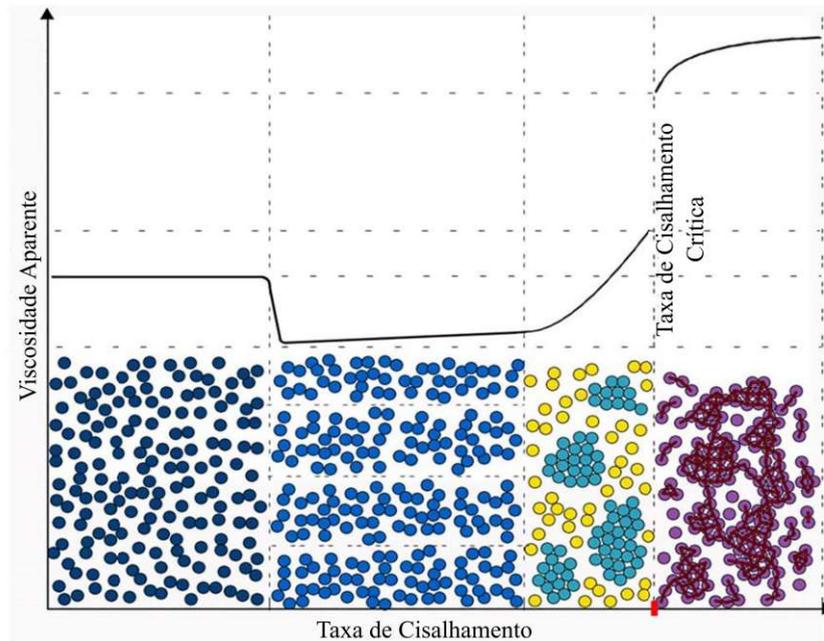


Figura 2.11 – Comportamento da viscosidade de um FEC submetido à variação da taxa de cisalhamento.

Fonte: Adaptado de Weerasinghe, Mohotti e Anderson (2020).

Observa-se que o fluido apresenta uma certa taxa de cisalhamento crítica após um período de linearidade e decréscimo na viscosidade aparente. Weerasinghe, Mohotti e Anderson (2020) explicam que, para altas taxas de cisalhamento em fluidos densos, a viscosidade pode aumentar de forma tão abrupta que pode aparentar um comportamento descontínuo. Ding et al. (2013) retratam que diversas pesquisas se dedicaram a explicar o mecanismo de espessamento, principalmente em relação a esse caráter descontínuo, que são de ampla investigação em ciência dos materiais. Dentre elas, os autores destacam a formulação da teoria do hidroaglomerado e o modelo de contato reológico, apresentados de forma resumida abaixo.

- Teoria do Hidroaglomerado: O primeiro conceito explica o aumento da viscosidade pela formação de aglomerados na suspensão com o aumento do cisalhamento, o que eleva as forças de arraste e lubrificação das partículas. Dessa forma, o aumento da compressão entre as partículas é proporcional à elevação da taxa de cisalhamento. Ainda assim, essa teoria se mostra limitada na determinação de comportamento descontínuo, o qual ocorre ao se utilizar uma proporção alta de partículas sólidas em um FEC. A viscosidade do material tende a crescer de forma tão abrupta que atribui-se a este comportamento um caráter descontínuo (MAWKHLIENG; MAJUMDAR, 2019).

- Modelo de Contato Reológico: O modelo leva em conta, além da força de lubrificação, a fricção entre as partículas sólidas. O atrito no contato é considerado a força dominante no espessamento, principalmente quando a distância entre partículas dispersas no fluido diminui a um certo valor. Quando o atrito cessa, o espessamento tende a zero. Com isso, o modelo consegue prever o comportamento descontínuo dos fluidos (MAWKHLIENG; MAJUMDAR, 2019).

Múltiplos parâmetros relacionados à fase dispersa e ao meio dispersante influenciam no comportamento não linear do material. Em trabalhos anteriores, são citados diversos possíveis fatores (GÜRGEN; KUŞHAN; LI, 2017; MAWKHLIENG; MAJUMDAR, 2019; RIBEIRO et al., 2022). Na Tabela 2.7, resumiram-se em sete aspectos significativos.

Tabela 2.7 – Fatores que influenciam na propriedade dos fluidos aditivados.

Fase	Fator	Descrição
Partícula	Percentual	O aumento na concentração de partículas (em % em peso) aumenta a viscosidade do fluido e provoca um aumento nas forças hidrodinâmicas devido à redução da distância entre as partículas, aumentando o número de hidroclusters em pequenas taxas de cisalhamento.
	Razão de Aspecto	Partículas com altas proporções são mais propícias para aumentar o intertravamento das partículas e os movimentos rotacionais no fluxo. Possuem maior possibilidade de contato com partículas próximas, desencadeando o aumento da viscosidade aparente.
	Diâmetro	Partículas menores aumentam a viscosidade das misturas devido ao aumento do número de partículas por unidade de volume em dispersões de partículas mais finas, resultando em uma maior densidade de ligação interpartículas. Entretanto, partículas de maior diâmetro proporcionam diminuição da taxa de cisalhamento crítica para o espessamento.
	Interação entre partículas	Durante o comportamento de espessamento por cisalhamento, as partículas podem permanecer neutras e se repelirem devido a interações entrópicas ou estereoscópicas.
	Dureza	Partículas mais duras levam a um comportamento de espessamento devido às suas propriedades mecânicas aprimoradas. Na interação das partículas, aquelas com baixa dureza não conseguem suportar o aumento das tensões, resultando em queda na viscosidade.
Fluido Dispersante	Peso Molecular	Fluidos de maior peso molecular exibem maior viscosidade em taxas de cisalhamento mais baixas devido a cadeias moleculares mais longas, o que torna difícil que camadas adjacentes de fluido se aproximem umas das outras.
	Temperatura	A viscosidade das suspensões diminui com o aumento da temperatura. A redução ocorre devido à redução da força da ligação de hidrogênio. Além disso, o movimento browniano é aumentado, desordenando a estrutura espessa e atrasando a taxa de cisalhamento crítica para valores mais elevados.

Fonte: Adaptado de Ribeiro et al. (2022).

Dentre os fatores listados pelos autores, destacam-se quatro dos quais o trabalho irá

avaliar: proporção volumétrica, tamanho dos grãos, adição de partículas e peso molecular do fluido dispersante. A proporção de partículas é o parâmetro principal no ajuste da propriedade reológica do fluido aditivado (WEI; LIN; SUN, 2022): em teoria, o aumento do volume de partículas na suspensão provocará aumento da viscosidade inicial e diminuição na taxa de cisalhamento crítica, na ocorrência de espessamento do fluido. Mawkhlieng e Majumdar (2019) cita que uma proporção mínima de 50% em massa de SiO_2 é consenso nas pesquisas, porém a investigação ainda é recomendada por diversos fatores como compatibilidade entre as fases do fluido. A variação de viscosidade a partir da variação de massa de partículas foi evidenciada em trabalhos anteriores, como apresentado na Fig. 2.12 (MAHESH; HARURSAMPATH; MAHESH, 2022; PETEL et al., 2015a).

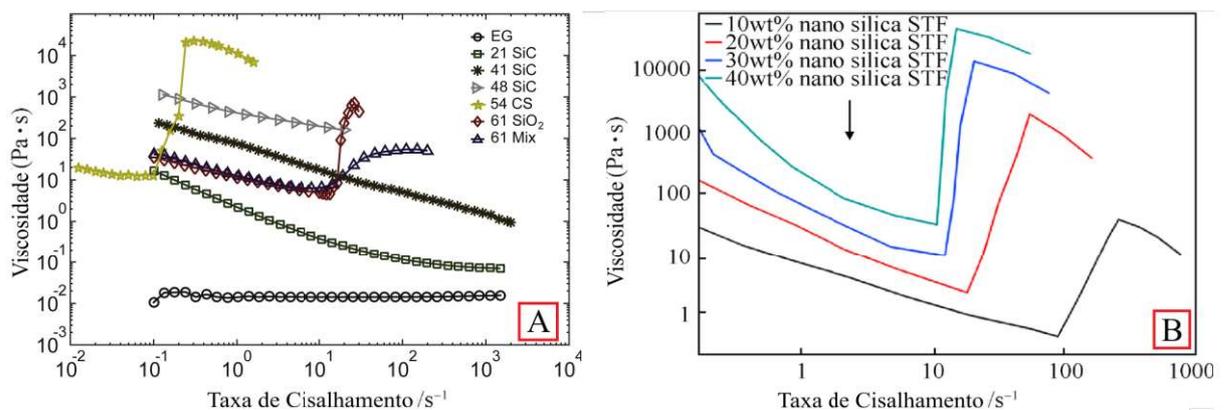


Figura 2.12 – Variação da viscosidade aparente para fluidos aditivados de diferentes proporções de (A) carbeto de silício e (B) sílica.

Fonte: Adaptado de Mahesh, Harursampath e Mahesh (2022) e Petel et al. (2015b).

O tamanho da partícula também influencia significativamente na viscosidade aparente. Diversos são os resultados já observados que relatam que tamanhos de partículas maiores proporcionaram uma redução na taxa de cisalhamento crítica para espessamento (GÜRGEN; KUŞHAN; LI, 2017). Os mesmos autores também afirmam que a adição de partículas metálicas ou cerâmicas como segunda fase de um FEC pode favorecer o espessamento, o que ficou evidente no trabalho de Gürgen (2020). O mesmo autor, em outro trabalho, evidenciou este incremento da viscosidade a partir da adição de B_4C (GÜRGEN; KUŞHAN; LI, 2017), apresentado no gráfico da Fig. 2.13, com um comportamento fluidificante, porém de elevada viscosidade.

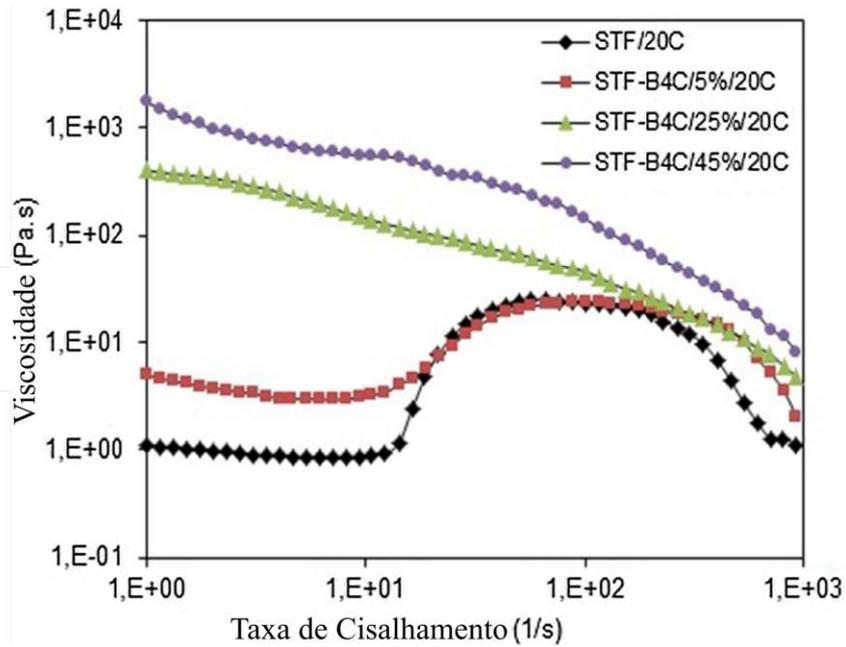


Figura 2.13 – Influência da adição de B₄C como segunda fase do FAd de SiO₂, à 20 °C.

Fonte: Adaptado de Gürgen, Li e Kuşhan (2016)

Por fim, o peso molecular pode estar diretamente relacionado com a viscosidade, porém deve-se avaliar previamente a interação entre as partículas e o meio em que estão dispersas (WEI; LIN; SUN, 2022; MAWKHLIENG; MAJUMDAR, 2019). Na Fig. 2.14 está representado um gráfico de comparação entre resinas com pesos moleculares distintos, o que acarretou em variações nas viscosidades e um comportamento espessante do fluido.

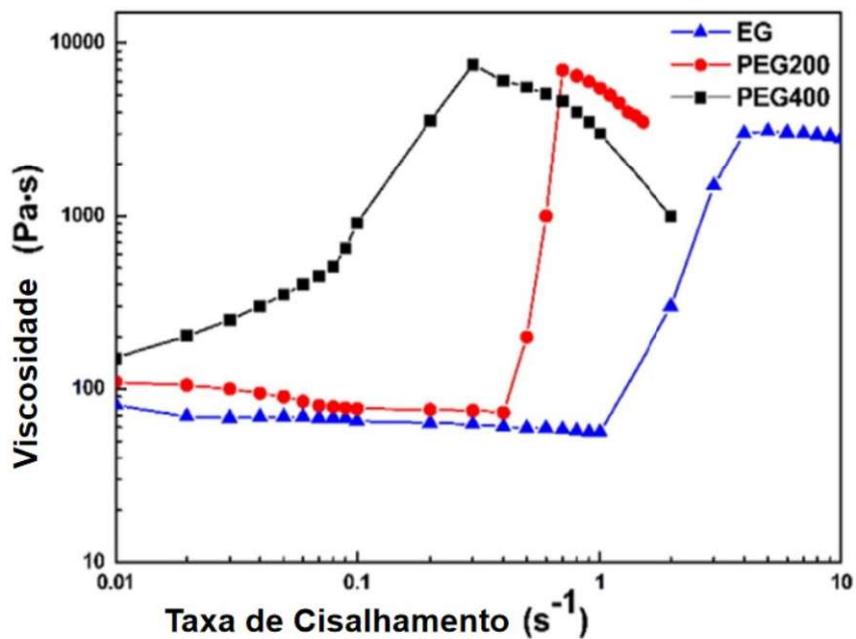


Figura 2.14 – Comparação entre viscosidade de resinas diferentes para aplicação em FEC.

Fonte: Adaptado de Wei, Lin e Sun (2022).

Quanto às aplicações, Ding et al. (2013) cita as principais observadas em trabalhos publicados. Destacam-se dispositivos com rigidez adaptativa, como amortecedores; estruturas inteligentes; e proteções balísticas, aplicação que será desenvolvida no presente trabalho e detalhada na Seção 2.4.1, na qual se expõe a combinação de materiais têxteis e FAd.

2.3 Fase Dispersa

2.3.1 Sílica

O dióxido de silício (SiO_2), também denominado de sílica, é composto naturalmente dos dois elementos mais abundantes da Terra, oxigênio e silício, e compões cerca de 60% da crosta terrestre. Também é encontrada, em quantidades menores, em plantas como arroz, bambu e cevada; e em quantidades maiores, em terras diatomáceas (SINGH et al., 2024). O material é classificado como polimorfo por existir em três formas cristalinas, ainda que em composições químicas idênticas: quartzo, tridimita e cristobalita. A Fig. 2.15 resume o polimorfismo da sílica à temperatura ambiente.

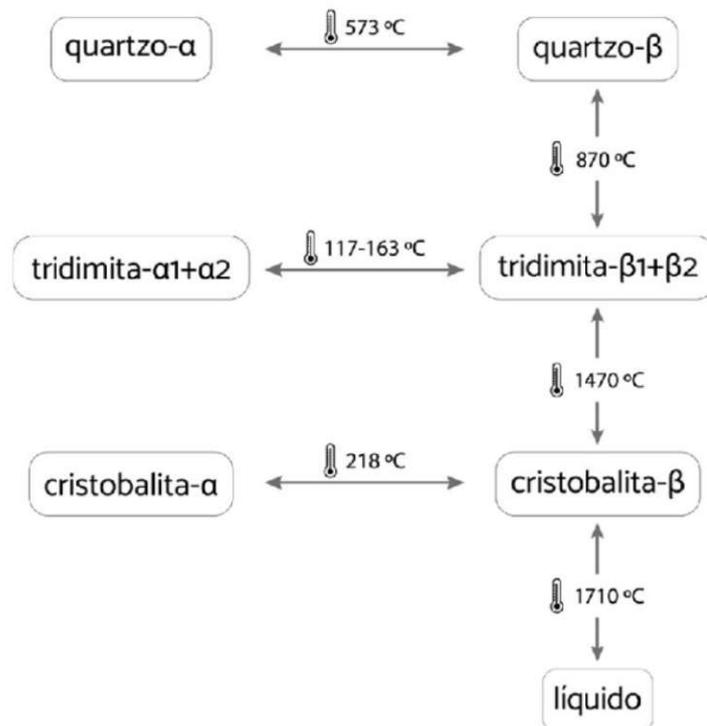


Figura 2.15 – Polimorfismo da sílica à temperatura ambiente.

Seu uso está presente na vida do homem por tempos imemoriáveis, desde a forma de sílex para ferramentas e armas até em argilas e areias utilizadas em utensílios cerâmicos cotidianos, como vidros, esmaltes e abrasivos. Pode ser encontrado em forma cristalina, como o quartzo, ou amorfa, como a sílica gel, sendo o exemplo da primeira forma a

modificação mais estável em temperatura ambiente e presente em 12% da crosta terrestre (BERGNA, 1994; MOORE, 1999).

O composto se apresenta em unidades tetraédricas SiO_4 aleatoriamente distribuídas e unidas por pontes de siloxanos em seu interior, Si-O-Si, e contém grupos silanois vicinais, Si-OH, e geminais, HO-Si-OH, dispersos na superfície (PRADO; FARIA; PADILHA, 2005). Esses grupos silanol (-Si-OH-) e siloxano (-Si-O-Si-) formados na superfície da sílica conferem uma natureza hidrofílica às partículas. A superfície da sílica apresenta terminações com três categorias de silanol: silanol livre ou isolado, silanol vinculado a hidrogênio (vicinal) e silanóis geminais. Os grupos silanol em partículas vizinhas estabelecem ligações de hidrogênio, propiciando a formação de agregados. Essas conexões mantêm as partículas de sílica agrupadas, preservando a integridade dos agregados (MORROW; MCFARLAN, 1992). Na Fig. 2.16 está ilustrado esquematicamente os grupos silanol e pontos de siloxano.

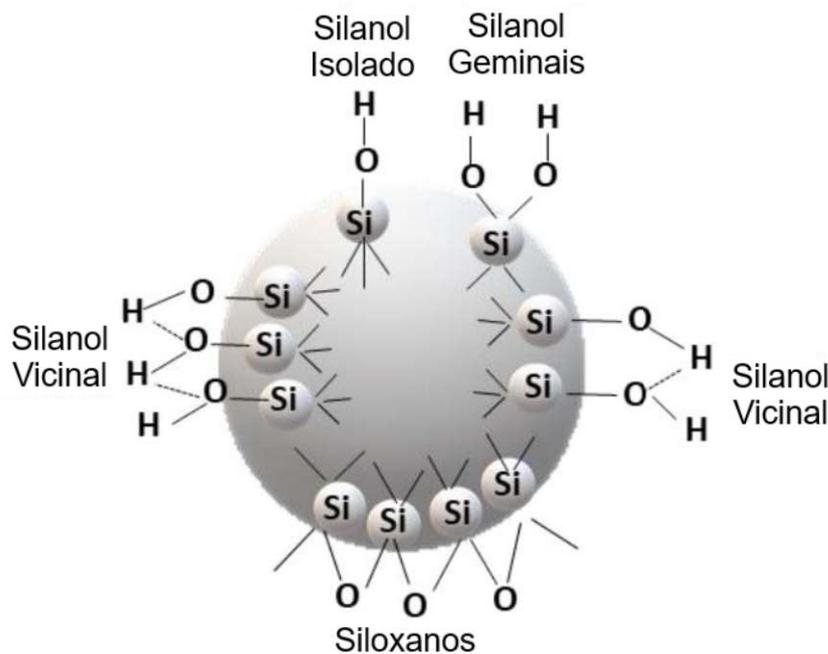


Figura 2.16 – Tipos de grupos silanol e pontes de siloxano na superfície da sílica.

Dois tipos de transformações de fase podem ocorrer na sílica: transformações reconstrutivas e martensíticas. Na reconstrutiva, a estrutura é desagregada em unidades menores que necessitam ser reconstruídas nas estruturas α . Isso ocorre pela quebra das ligações Si-O-Si, seguida pelo rearranjo do tetraedro SiO_4 . Tais transformações caracterizam-se por serem lentas e demandam considerável quantidade de energia para alterar a rede cristalina, além de não serem reversíveis. Já na transformação martensítica, as ligações de primeira coordenação permanecem intactas, ocorrendo apenas pequenas alterações na direção e no comprimento, resultando em transformações instantâneas. Essa transformação pode ser caracterizada pela baixa barreira de energia entre as fases. A sílica amorfa dividida é consideravelmente mais reativa do que a sílica cristalina.

À temperatura ambiente, o quartzo se apresenta comumente em α -quartzo até 575 °C, acima da qual pode-se observar uma transformação para uma estrutura hexagonal, chamada β -quartzo. Para temperaturas acima de 900 e 1450 °C, presencia-se a formação das formas tridimita e cristobalita. A formação deste último polimorfismo é cineticamente favorecida na desvitrificação da sílica amorfa e no aquecimento de quartzo acima de 900 °C. Quando formada, não se inverte em quartzo no resfriamento (MOORE, 1999).

Trabalhos corroboram o benefício do uso da sílica em materiais diversos. A partícula é amplamente adotada como reforço e agente melhorador de superfície de compósitos poliméricos. Além disso, a SiO_2 reduz as tensões interfaciais e diminui o tamanho das partículas do compósito. Oferece alta interação interfacial, levando a microcompósitos e nanocompósitos termicamente e quimicamente estáveis. À medida que o tamanho das nanopartículas de sílica diminui, sua capacidade de melhorar as propriedades do compósito aumenta (MEER; KAUSAR; IQBAL, 2015). Exemplos práticos podem ser citados: Chung (2010) relata que sua adição em cimentos resulta em misturas com porosidade reduzida, contribuindo para a resistência à corrosão do concreto armado. Petel et al. (2015a) comparou FECs fabricados somente com carbetto de silício com a mistura entre sílica e carbetto de silício para aplicação em blindagens fluidas. O resultado mostrou um aumento de cerca de 5 vezes no limite balístico e total absorção da energia cinética de um projétil a 200 m/s, diferentemente do FEC com carbetto de silício somente.

Na Tab. 2.8 estão apresentados trabalhos que estudaram o uso da sílica em diferentes proporções e diâmetros como uma das fases dispersas num FAd para impregnação de tecidos sintéticos, a fim de corroborar seu amplo emprego.

Tabela 2.8 – Trabalhos sobre impregnação de tecidos em que se adotou a sílica como uma das fases.

Referência	Partícula	Diâmetro	Conteúdo em Peso
Harro, Szpunar e Odeshi (2016)	SiO_2	200 - 300 nm	50%
Olszewska et al. (2017)	SiO_2	7 nm	25%
Yeh et al. (2019b)	SiO_2	15 nm	20, 30, 40 e 50%
Yeh et al. (2019a)	SiO_2	15 - 20 nm	40%
Liu et al. (2020b)	SiO_2 , GO e CNT	100 nm	20%
Chang et al. (2021)	SiO_2	10 - 30 nm	40%
Jeddi, Yazdani e Hasan-nezhad (2021)	SiO_2	12 nm	20%
Katiyar, Nandi e Prasad (2021)	SiO_2	10 nm	25%
Zhang et al. (2021a)	SiO_2	370 nm	0 e 70%
Bablu e Manimala (2022)	SiO_2	80 - 100 nm	0, 10, 30 e 40%
Hasan-nezhad, Yazdani e Jeddi (2022)	SiO_2	12 nm	30, 40, 50 e 60%
Kubit et al. (2022)	SiO_2	450 nm	5%
Mahesh, Harursampath e Mahesh (2022)	SiO_2	500 nm	10, 20, 30 e 40%
Xu, Zhang e Huang (2022)	SiO_2 e B_4C	80 nm e 1,18 e 2,45 μm	0 e 25 e 0, 5, 10 e 15%
Gürgeç, Li e Kuşhan (2016)	SiO_2 e B_4C	1,11 μm e 1,01 μm	5, 10, 15 e 20% e 5, 25 e 45%
Zhihao et al. (2022)	SiO_2	100 nm	20%
Zhang et al. (2022)	SiO_2	20, 100,300 e 650 nm	50%
Bajya et al. (2020)	SiO_2	500 nm	65%

Fonte: Adaptado de Ribeiro et al. (2022)

2.3.2 Carbetos de Boro

O composto carbeto de boro (B_4C) é um material cerâmico de elevada dureza e baixa massa específica. Na escala Mohs, o material se posiciona logo abaixo do diamante, com uma dureza de 9,5+, mesmo apresentando uma densidade de 2,4 a 2,5 g/cm³, o que favorece seu uso em materiais como blindagens. Devido à sua elevada dureza, o B_4C também exibe alta resistência abrasiva, situando-se entre 0,4 e 0,422 (VIALA et al., 1997; XIE et al., 2017).

Além de sua extrema dureza, o carbeto de boro é estável em temperaturas elevadas (DOMNICH et al., 2011). Por essas razões, é utilizado como abrasivo, material de proteção em condições adversas, em blindagens leves e em barras de controle de reatores nucleares, devido às propriedades de seu isótopo (SEZER; BRAND, 2001; SURI et al., 2010). Sua produção em larga escala é conduzida mediante a redução de B_2O_3 na presença de carbono. Thévenot (1990) descreve que o achado desse composto remonta a 1858 e os compostos B_3C e B_6C foram individualizados somente nos anos de 1883 e 1894, respectivamente. Posteriormente, a fórmula estequiométrica B_4C foi validada somente em 1934.

A estrutura cristalina do composto é descrita como romboédrica e apresenta 15 átomos na célula unitária ($B_{12}C_3$). Além disso, o material possui um alto ponto de fusão, em torno de 2500 °C, e alta resistência à oxidação atmosférica a 600 °C devido à formação de filmes de B_2O_3 . O B_4C também reage com halogênios em altas temperaturas, conferindo-lhe boa resistência química (SCHWARTZ, 2002; BALAKRISHNARAJAN; PANCHARATNA; HOFFMANN, 2007).

Os produtos de B_4C são fabricados por prensagem quente ou sinterização e têm ampla aplicação como semicondutores, em blindagens e em reatores nucleares como absorventes de nêutrons (VIALA et al., 1997; XU; ZHANG; HUANG, 2022; GÜRGEN, 2020).

2.4 Blindagens Balísticas

O poder de dano de armas de fogo, aliado à necessidade de redução de custos, estimula pesquisas e desenvolvimentos de materiais para proteção balística. Uma ampla gama de soluções e designs atende a diferentes níveis de ameaças e, ao mesmo tempo, busca proporcionar conforto ao usuário. Assim, ao buscar uma forma mais abrangente de classificação desse utensílio de segurança na literatura, nota-se que os termos mais apropriados são: blindagem flexível ou leve e blindagem rígida, mais conhecidos pelos nomes em inglês de *soft armor* (SA) e *hard armor* (HA). Por ser o foco do presente trabalho, as SA são descritas e explicitadas na Seção 2.4.1.

As HA são comumente usadas por Forças Armadas para proteção contra armas de

fogo com a capacidade de realizar disparos de mais de 500 m/s, eficazes contra ataques de revólveres, de uma variedade de rifles e contra fragmentos de explosões (ABTEW; BOUSSU; BRUNIAUX, 2021; SALEEM et al., 2022). Ou seja, é um tipo de material que apresenta desempenho geralmente classificado entre os níveis III e IV da norma do National Institute of Justice (NIJ) (NIJ, 2008), que aponta uma resistência equivalente a um impacto de calibre .30 - 06 AP com velocidade média de 868 m/s. É um tipo de blindagem desenvolvida acoplando-se à SA materiais rígidos, como chapas metálicas, cerâmicas avançadas, placas de compósito ou uma combinação de mais de um desses materiais. O objetivo desses materiais é dissipar totalmente a energia do projétil para evitar perfuração ou grande indentação que possa prejudicar o usuário (CROUCH, 2019). Na Figura 2.17a e b, estão representados um esquema do material balístico e sua forma de utilização.

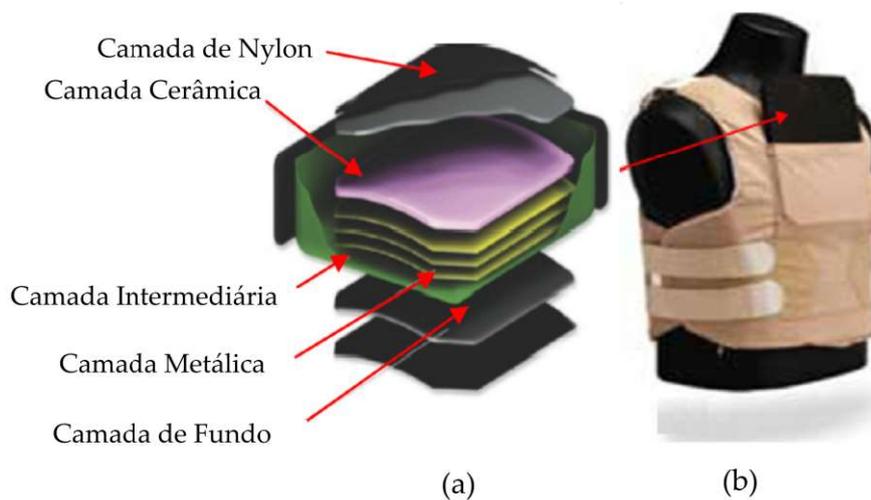


Figura 2.17 – (a) Camadas de uma HA; e (b) acoplamento da HA em uma SA.

Fonte: Adaptado de Abteu, Boussu e Bruniaux (2021).

Diversos trabalhos desenvolvidos no próprio IME buscaram o desenvolvimento de novas HAs por meio de materiais ainda pouco explorados, como as FNLs (REIS et al., 2021; BRAGA et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2021b). Ainda que os materiais sintéticos já apresentem comprovado desempenho e grande penetração no mercado, a busca pela sustentabilidade, aliada à limitação dos recursos necessários à fabricação do material artificial, propicia a exploração de materiais naturais.

2.4.1 Blindagem Leve

De forma geral, as blindagens leves, ou *soft armors*, são proteções balísticas flexíveis e de menor peso, utilizadas sozinhas ou, como mencionado anteriormente, em conjunto com as HA. São tipicamente adotadas por policiais, tropas de choque e guarda-costas em situações de menor ameaça (MAWKHLIENG; MAJUMDAR; LAHA, 2020). Na Figura

2.18 está representado um exemplo esquemático de um painel de SA composto por diversas camadas.



Figura 2.18 – Representação esquemática de uma SA composta de diversas camadas.

Fonte: Adaptado de Abteu, Boussu e Bruniaux (2021).

O nível de proteção está diretamente relacionado com o número de camadas de material têxtil flexível adotado, dispostas conforme a Figura acima. Em média, o número de camadas varia de 20 a 50, correspondendo a um peso médio de 4,5 kg (ABTEW; BOUSSU; BRUNIAUX, 2021). Dessa forma, com base na norma NIJ (2008), estima-se que as SA possam alcançar o nível IIIA de proteção balística (estimado para um calibre .44 Magnum SWC GC com velocidade média de 426 m/s), enquanto que as HA podem alcançar o nível IV (ABTEW; BOUSSU; BRUNIAUX, 2021).

Diversos fatores podem influenciar o desempenho balístico de tecidos adotados em coletes flexíveis. Dentre eles, destacam-se quatro, conforme a Tab. 2.9.

Tabela 2.9 – Fatores que influenciam na propriedade balística dos tecidos.

Fator	Descrição
Tipo de Fibra	Baixa densidade, alta resistência à tração e módulo de elasticidade são critérios importantes para resistência ao impacto em alta velocidade e aplicação de soft armors. Eles estão relacionados à alta orientação cristalina, longo comprimento de cadeia molecular e fortes ligações químicas, que levam a um melhor desempenho.
Densidade Superficial	Um tecido com baixo número de fios por unidade de dimensão pode apresentar menor absorção de energia de impacto devido ao deslizamento do fio. Por outro lado, a alta densidade de área afeta o peso final e pode aumentar a concentração de tensões no fio, o que induz à quebra da fibra. Uma gramatura moderada (entre 0,65 e 0,95) maximiza a área ativada sob o impacto, o que aumenta a absorção de energia balística.
Padrão de Tecelagem	Os padrões de trama usados em aplicações balísticas são geralmente tramas simples e em cesta. Porém, os tecidos lisos apresentam maior ondulação, resultando em uma abrasão e dissipação de energia superiores, denominadas crimpagens do fio.
Número e Orientação de Camadas	A absorção de energia aumenta com múltiplas camadas. O atrito entre as camadas inibe o movimento dos fios, resultando em uma maior resistência ao impacto. Além disso, o efeito da geometria da munição diminui à medida que o número de camadas aumenta

Fonte: Adaptado de Ribeiro et al. (2022).

Mawkhlieng e Majumdar (2019) resumem categoricamente os principais mecanismos de absorção de energia de impacto balístico de uma SA fabricada com materiais têxteis, e a Figura 2.19 ilustra esses mecanismos.

- **Arrancamento de Fios:** A energia é absorvida quando os fios (região primária), na ocorrência do impacto balístico, superam o atrito estático presente nos pontos de cruzamento com os fios perpendiculares (região secundária) e movimentam-se. Forma-se um aspecto em forma de cruz no material.
- **Ruptura dos Fios:** É posterior ao arrancamento dos fios. Quando o projétil penetra no tecido, algumas fibras podem não resistir à tensão de tração ou ao atrito estático e romper, o que auxilia na absorção de energia. A presença desse mecanismo também está relacionada com o formato do projétil.
- **Fricção e Indentação da Trama:** Tem relação com o atrito entre o projétil e o tecido, o que demanda maior densidade de fios possível por unidade de área. Através desse mecanismo, uma parte da região secundária do material, ou seja, que não atua diretamente no contato com o projétil, também é melhor ativada durante a deflexão do material na direção do impacto junto com a região primária, formando um aspecto piramidal no fundo.

- **Arqueamento dos Fios:** Quando o tecido apresenta alta gramatura e atrito entre a trama, após o impacto, há uma grande absorção de energia em torno da região de contato do projétil. A trama adjacente a essa zona se desloca de forma não ortogonal e tendem a sair do ponto de cruzamento tanto pela transição do projétil pelo material quanto pela propagação de ondas de tensão.

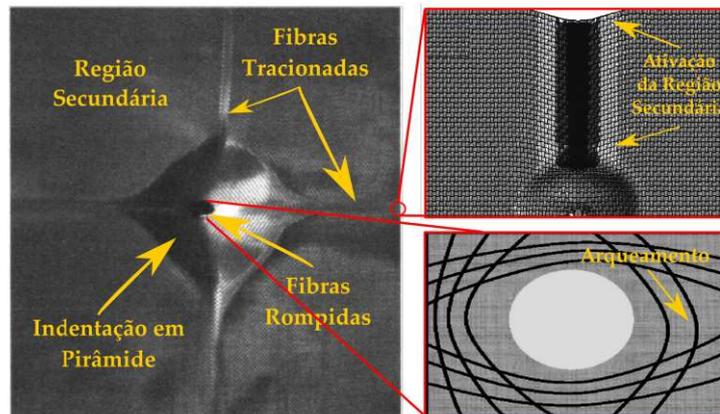


Figura 2.19 – Mecanismos de absorção de energia em uma SA.

Fonte: Adaptado de Crouch (2019).

Diante dos mecanismos de absorção de energia, nota-se que alguns parâmetros se apresentam de superior importância na confecção de uma SA. Como foi observado, a fricção e a resistência à tração dos fios produzem considerável influência no desempenho balístico da blindagem (TAPIE; GUO; SHIM, 2016), tanto na interação direta quanto indireta com o projétil. Isso fica claro quando Weerasinghe, Mohotti e Anderson (2020) e Tapie, Guo e Shim (2016) citam em seus trabalhos que o principal método para se conhecer o desempenho de um SA, além do próprio ensaio balístico, é o de arrancamento de fio (*yarn pullout test*), já que neste tipo de avaliação o atrito e a resistência dos fios são as propriedades mais estimuladas.

2.4.1.1 Blindagem Leve Impregnada com Fluidos Viscosos

Alguns tratamentos de SAs são propostos observando-se os mecanismos de absorção citados na seção anterior. Mawkhlieng, Majumdar e Laha (2020) resumem três principais medidas que trabalhos publicados apresentaram e que obtiveram resultados notáveis: revestimento com látex ou borracha, modificação das fibras do material têxtil e adição de fluido aditivado. Diante do desempenho que a última técnica tem apresentado em diversos trabalhos, pesquisas utilizando fluidos viscosos, sobretudo os FECs, cresceram nas últimas duas décadas, especialmente quando utilizado em conjunto com o tecido ou isolado como blindagens fluidas (ARORA; GHOSH, 2018). O gráfico da Figura 2.20 evidencia o número de trabalhos relacionados às palavras-chave "shear thickening fluid" e "ballistic armor".

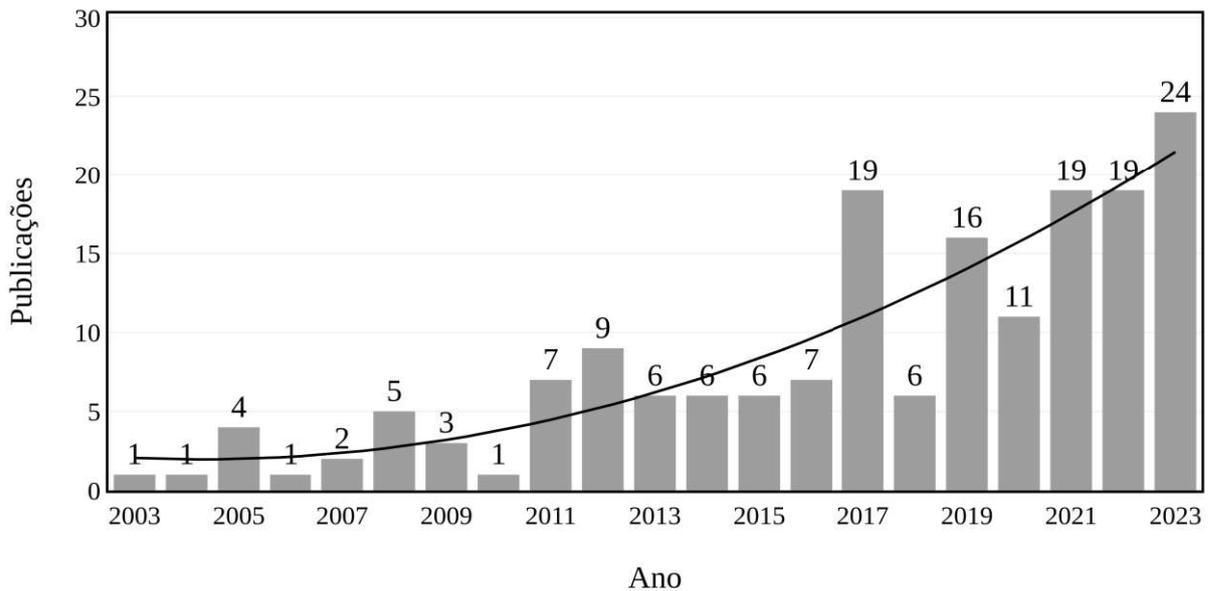


Figura 2.20 – Número de publicações por ano de trabalhos com as palavras-chave "shear thickening fluid" e "ballistic armor".

Fonte: Próprio autor.

O surgimento da combinação de fluido viscoso aditivado e SA se deu quando Lee, Wetzel e Wagner (2003) deram continuidade a estudos de Gates (1968) e publicaram o primeiro trabalho em que se avalia a aplicação de FEC em tecidos de Kevlar para aplicações balísticas (WEERASINGHE; MOHOTTI; ANDERSON, 2020). Os resultados apontaram que a impregnação do tecido elevou a sua resistência ao impacto balístico a nível de um outro tecido puro de maior densidade superficial.

Mais tarde, destacou-se que os mecanismos plausíveis de aumento de absorção de energia a partir da adição de FEC em tecidos se dão pelo mecanismo de dilatação inerente ao fluido, aumento da fricção entre os fios e melhor transferência de tensão entre fios (SRIVASTAVA; MAJUMDAR; BUTOLA, 2012). Por outro lado, Gürgen, Kuşhan e Li (2017) destacaram que o uso de FEC é benéfico somente por conta do aumento do atrito entre fibras e camadas de tecido, e não pela ação espessante do fluido, não deixando de afirmar a importância de uma investigação mais profunda dos FAd utilizados em impregnações. De todos os modos, é possível afirmar que a combinação de materiais têxteis e FAd tem permitido a utilização de uma proteção mais leve, com menor número de camadas sem comprometer o desempenho final. A Fig. 2.21 apresenta um esquema destacando a atuação do intertravamento mecânico gerado pelo fluido aditivado em uma camada de SA.

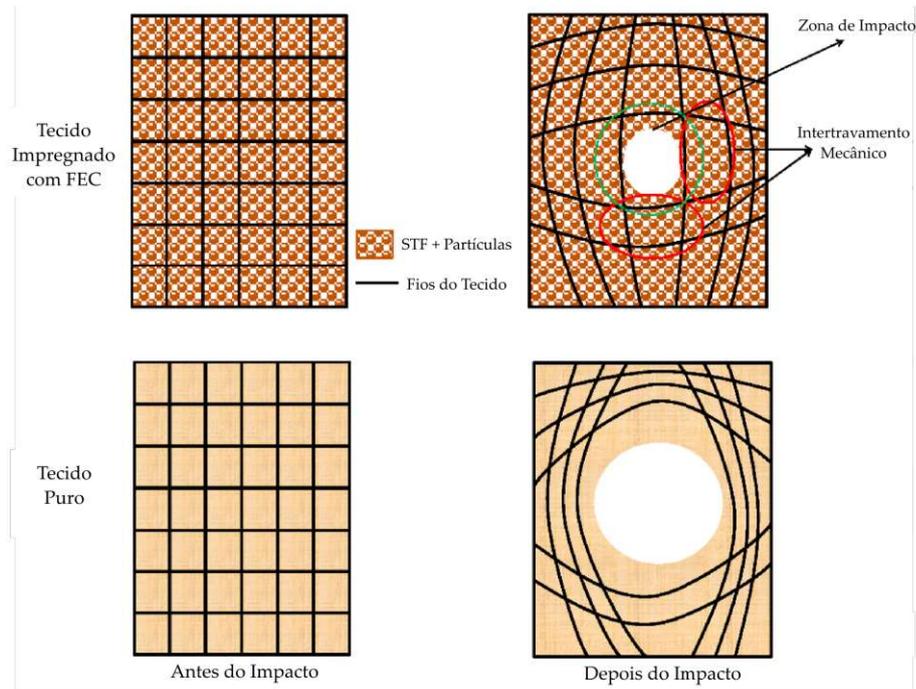


Figura 2.21 – Efeito do FAd no tecido de SA.

Fonte: Adaptado de Mahesh, Harursampath e Mahesh (2022).

Dentre os trabalhos que apresentaram melhoramento na absorção de impacto em relação ao tecido puro, pode-se citar diversos que lograram o efeito tanto por meio de testes balísticos quanto por testes de perfuração (LEE; WETZEL; WAGNER, 2003; XU; ZHANG; HUANG, 2022; QIN et al., 2020; GÜRGEN, 2020). Entretanto, ao observar o trabalho de Mahesh, Harursampath e Mahesh (2022) em específico, nota-se que houve um melhoramento do desempenho do tecido de juta quando impregnado por um fluido aditivo com comportamento de FEC com sílica nanométrica em uma aplicação inédita da FNL em SAs. Os autores mostraram que há uma semelhança nos valores de limite balístico para duas camadas de kevlar impregnadas com 15% em massa de FEC de sílica e seis camadas de tecido de juta impregnadas com 40% de FEC de sílica. Dessa forma, a sua investigação torna-se de interesse científico e militar tanto pelos materiais envolvidos quanto pelo potencial que a FNL apresenta quando processada e posta em aplicações balísticas, como já citado neste trabalho.

2.4.2 Avaliação Balística

O Exército Brasileiro segue as normas de avaliação de desempenho de proteção balística padronizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2005) e pelo Instituto de Justiça dos Estados Unidos da América (NIJ 0101.06, 2008). A Tab. 2.10 a seguir apresenta os níveis de proteção de um sistema de blindagem em relação ao impacto do projétil, conforme estabelecido pela NIJ 0101.06 (2008).

Tabela 2.10 – Níveis de proteção balística.

Nível	Calibre	Massa (g)	Velocidade (m/s)
I	.22 LRHV	2,6±0,1	320±10
	.38 Special RN	10,2±0,1	254±15
	9 mm FMJ	8,0±0,1	332±12
IIA	.357 Magnum JSP	10,2±0,1	381 ±12
	9 mm FMJ	8,0±0,1	358 ±15
II	.357 Magnum JSP	10,2±0,1	425±15
	9 mm FMJ	8,0±0,1	426±15
IIIA	.44 Magnum SWC GC	15,6±0,1	426±15
III	7,62 x 51 FMJ	9,7±0,1	838±15
IV	.30 – 06 AP	10,8±0,1	868±15

Fonte: NIJ 0101.06 (2008).

A avaliação de um sistema de blindagem se baseia em métodos probabilísticos e estatísticos. Tais métodos partem da consideração da possibilidade da ocorrência ou não da perfuração do alvo pelo projétil, utilizando como parâmetro a velocidade limite (V_L), que representa a mínima velocidade necessária para que o projétil perfure a blindagem. Um dos critérios mais empregados nesse contexto é o do limite balístico V_{50} , ou seja, a velocidade na qual a probabilidade de perfuração do alvo pelo projétil atinge 50% (ZUKAS et al., 1982).

Em situações em que não é possível calcular a V_L , como nas análises de proteção contra calibres 7,62 mm, recorre-se a princípios físicos para realizar a estimativa. Morye, Hine et al. (2000) definem a velocidade limite como a máxima velocidade na qual o alvo absorve a energia cinética do projétil sem que ocorra perfuração. Nesse caso, a estimativa de V_L baseia-se no conceito de conservação de energia, no qual a energia cinética dissipada pelo projétil durante a penetração no alvo é igual à energia absorvida pela blindagem. A Eq. 2.2 expressa a energia absorvida (E_{abs}) em função da diferença entre a velocidade de impacto do projétil (V_i), a velocidade residual (V_R) e a massa (m) do projétil.

$$E_{\text{abs}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V_I^2 - V_R^2) \quad (2.1)$$

Com isso, para o cálculo da V_L basta considerar V_R nula, ou seja, que o projétil não tenha conseguido perfurar a blindagem. O limite balístico será então calculado pela EQ. 2.2

$$V_L = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{abs}}}{m}} \quad (2.2)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho compreendeu, de maneira geral, a produção de corpos de prova e a determinação de propriedades relevantes para o comportamento ao qual se desejou submeter o material. As amostras foram fabricadas nos laboratórios do IME, e os ensaios de caracterização dos materiais e dos corpos de prova foram conduzidos tanto no próprio IME quanto em instituições parceiras. A partir dos resultados das análises e dos dados quantitativos obtidos, foram empregados estudos estatísticos e análises gráficas. Na 3.1 está apresentado um resumo da sequência metodológica do trabalho.

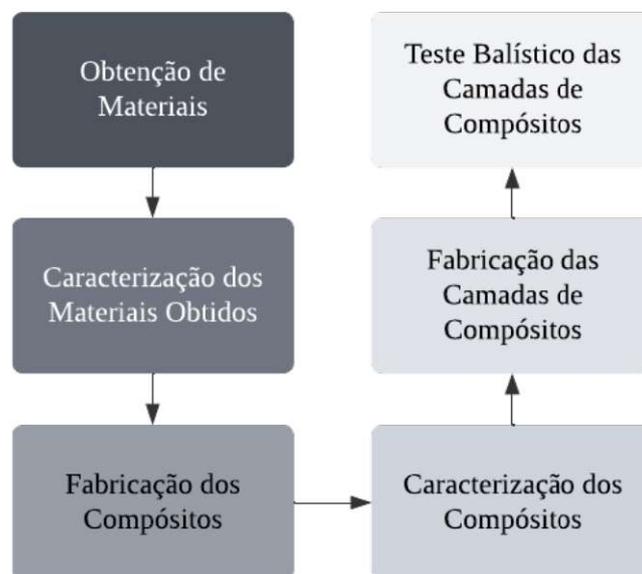


Figura 3.1 – Sequência metodológica do trabalho.

3.1 Materiais

3.1.1 Tecido de Linho

O material têxtil impregnado para avaliar as metodologias propostas no trabalho foi o tecido de linho. O tecido foi adquirido da empresa Casa Carlos Ltda., localizada no Rio de Janeiro, RJ. Foram utilizados aproximadamente 4,0 m² de material para atender às variações de tratamento propostas no trabalho, detalhadas posteriormente na Seção 3.3. Essa camada natural será composta por 100% de fibras de linho em trama simples, conforme ilustrado na Fig. 3.2 o tecido como recebido.



Figura 3.2 – Tecido de linho conforme obtido.

3.1.2 Tecido de Aramida

O tecido de aramida analisado no Laboratório de Fibras Naturais, para efeito de comparação de desempenho com os compósitos, foi o Twaron[®] CT709, fabricado pela empresa Teijin Aramid. De acordo com o fornecedor, o produto possui densidade superficial de 200 g/m² e espessura média de 0,20 mm. A Fig. 3.3 apresenta o aspecto superficial do material.



Figura 3.3 – Tecido de aramida conforme obtido.

3.2 Fluido Aditivado

3.2.1 Fase Dispersa - Sílica

O fluido foi aditivado com dois tipos de partículas, conforme detalhado na Seção 3.4. O elemento aplicado em maior proporção e em todos os corpos de prova como fase dispersa foi a sílica (SiO_2), em proporções de 50, 55, 60 e 65% em massa. O material foi obtido da empresa Sibelco, que fornece as informações sobre o produto apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades da Sílica, de acordo com o fornecedor.

Elemento	Especificação
pH	9
Dureza (Mohs)	6,5
Massa Específica	2,3 g/cm ³
Graduação	M3000
D ₅₀	17 µm
D ₉₀	40 µm

Na Fig. 3.4 apresenta-se uma micrografia da sílica utilizada no trabalho como recebida.

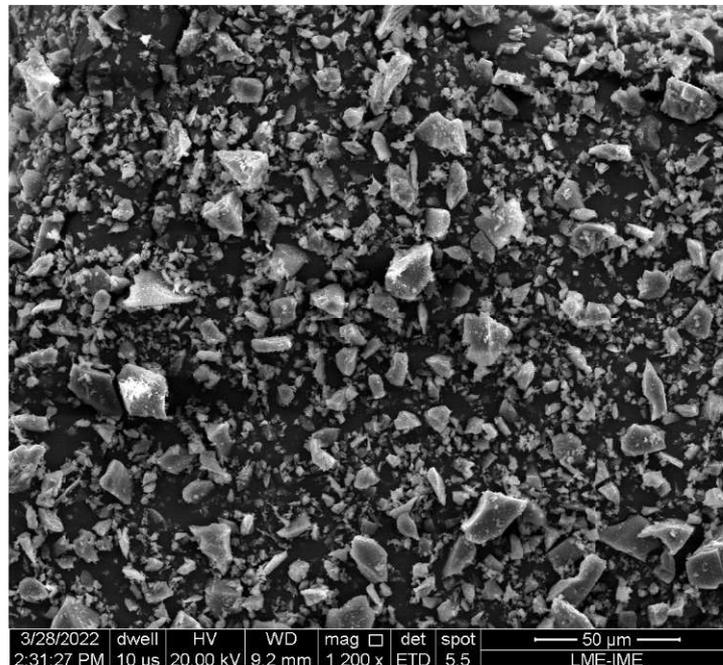


Figura 3.4 – Sílica utilizada como recebida (1200x).

3.2.2 Fase Dispersa - Carbetto de Boro

Para a posterior adição como segunda fase do fluido, o carbetto de boro foi escolhido para estudar sua influência no comportamento viscoso e mecânico do tecido compósito,

conforme já relatado anteriormente, em proporções de 5% em massa. A partícula cerâmica utilizada foi fornecida pela empresa SkySpring Nanomaterials Inc., localizada no Texas, EUA, que fornece as informações sobre o produto apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Propriedades do Carbeto de Boro, de acordo com o fornecedor.

Elemento	Especificação
Pureza	99%
Área Superficial	$> 42 \text{ m}^2/\text{g}$
Massa Específica	$2,5 \text{ g}/\text{cm}^3$
Diâmetro Médio	50 nm

Na Fig. 3.5 apresenta-se a micrografia do carbeto de boro utilizada no trabalho com medidas do diâmetro partículas visualizadas por meio de microscópio eletrônico de varredura.

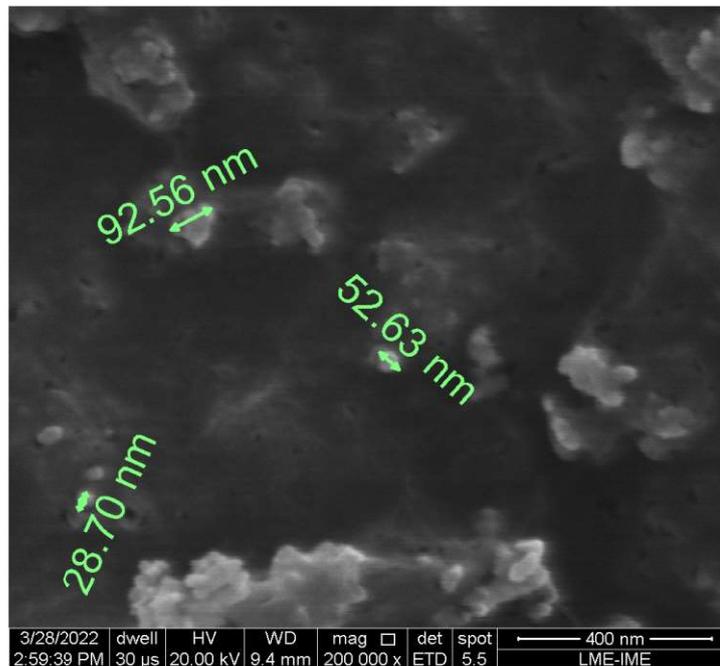


Figura 3.5 – Carbeto de boro utilizado como recebida (40000x).

3.2.3 Fase Dispersante - PEG 400

O fluido adotado como elemento de dispersão das partículas de SiO_2 , e posteriormente de B_4C , foi polietilenoglicol (PEG) 400, fabricado pela Synth.

A escolha desse material foi motivada pela estabilidade térmica e não toxicidade. Já a seleção do peso molecular dá-se por conta da viscosidade inicial mais elevada, visualizada na Seção 4.6, sobretudo em relação ao PEG 200, o qual também é adotado largamente em FECs para aplicação balística. Dada a maior irregularidade do tecido natural, com maior presença de vazios em relação ao tecido de aramida, um fluido de baixo peso molecular

pode sofrer escoamento pela trama em uma escala que torne ineficiente o processo de impregnação. Além disso, a taxa crítica de cisalhamento do FEC tende a apresentar uma diminuição à medida que o peso molecular do meio dispersante aumenta, contribuindo para o comportamento espessante. Soma-se a isso o fato de que a redução na quantidade de ligações de hidrogênio entre as partículas dispersas e o meio dispersante restringe o movimento da fase dispersa e facilita a formação de hidroaglomerados (LI et al., 2016; MANUKONDA et al., 2019).

Na Tabela 3.3 encontram-se informações específicas fornecidas pela empresa sobre o produto.

Tabela 3.3 – Propriedades do PEG 400.

Elemento	Especificação
PH Sol. 5% / 25 °C	4,5 - 4,7
Massa Molecular Média	380 - 420 g/mol
Viscosidade	6,8 - 8,0 cSt
Cor da solução	Transparente
Água	Máx. 0,2%
Etilenoglicol e Dietilenoglicol	0,25%
Metais Pesados	5 ppm
Óxido de Etileno e 1,4 Dioxano Livre	10 ppm
Resíduo de Ignição	0,1%

3.3 Grupos Analisados

As amostras de tecidos impregnados foram fabricadas variando-se a proporção de partículas no fluido. Inicialmente, foi avaliado o volume da fase dispersa no fluido para caracterizar a viscosidade. Posteriormente, foi realizada uma análise do desempenho mecânico e balístico.

Para a primeira meta, analisou-se e caracterizou-se o percentual em massa de SiO₂ com base nas informações disponíveis na literatura. Barnes (1989) considerou o percentual em massa de 50 % de sólidos como limite inferior médio para o comportamento de espessamento. Posteriormente, Bajya et al. (2020), Zhang et al. (2021a) atingiram desempenhos reológico e balístico otimizados para percentuais até 65% e 70% em massa, respectivamente. Com isso, foram apresentados neste trabalho grupos de fluidos com proporção em massa de SiO₂ variando de 50 a 65%.

Após a caracterização desses materiais, cada grupo recebeu a adição de um nível de proporção de partículas de B₄C, 5% em massa, para otimizar as propriedades estudadas com grupos de SiO₂, e novas caracterizações foram realizadas. O valor percentual citado tem como base resultados de trabalhos publicados anteriormente, nos quais mostrou-se aumento na viscosidade, na força máxima ao arrancamento, na resistência balística e na gramatura

(GÜRGEN, 2020; XU; ZHANG; HUANG, 2022; MAWKHLIENG; MAJUMDAR, 2019). Proporções superiores a esta, apesar de terem mostrado alguma influência positiva em compósitos em trabalhos anteriores (GÜRGEN; LI; KUŞHAN, 2016), tornaria a mistura de pós dificultosa, dado a alta porcentagem total em massa de SiO_2 adotada neste trabalho.

Já para a segunda meta, que tem como foco as análises mecânicas e balísticas, foi comparado o desempenho de outros compósitos já caracterizados na literatura com o de FNL impregnado. Para isso, avaliou-se grupos com 3 camadas de compósitos impregnados tanto com SiO_2 somente quanto com $\text{SiO}_2 + \text{B}_4\text{C}$ nas proporções citadas anteriormente, confrontando o desempenho com 1 camada de aramida. Vale ressaltar que o percentual em massa das partículas não variou entre as camadas que compõem cada grupo.

O esquema apresentado na Figura 3.6 ilustra os grupos de corpos de prova de acordo com os tratamentos que serão aplicados na unidade experimental.

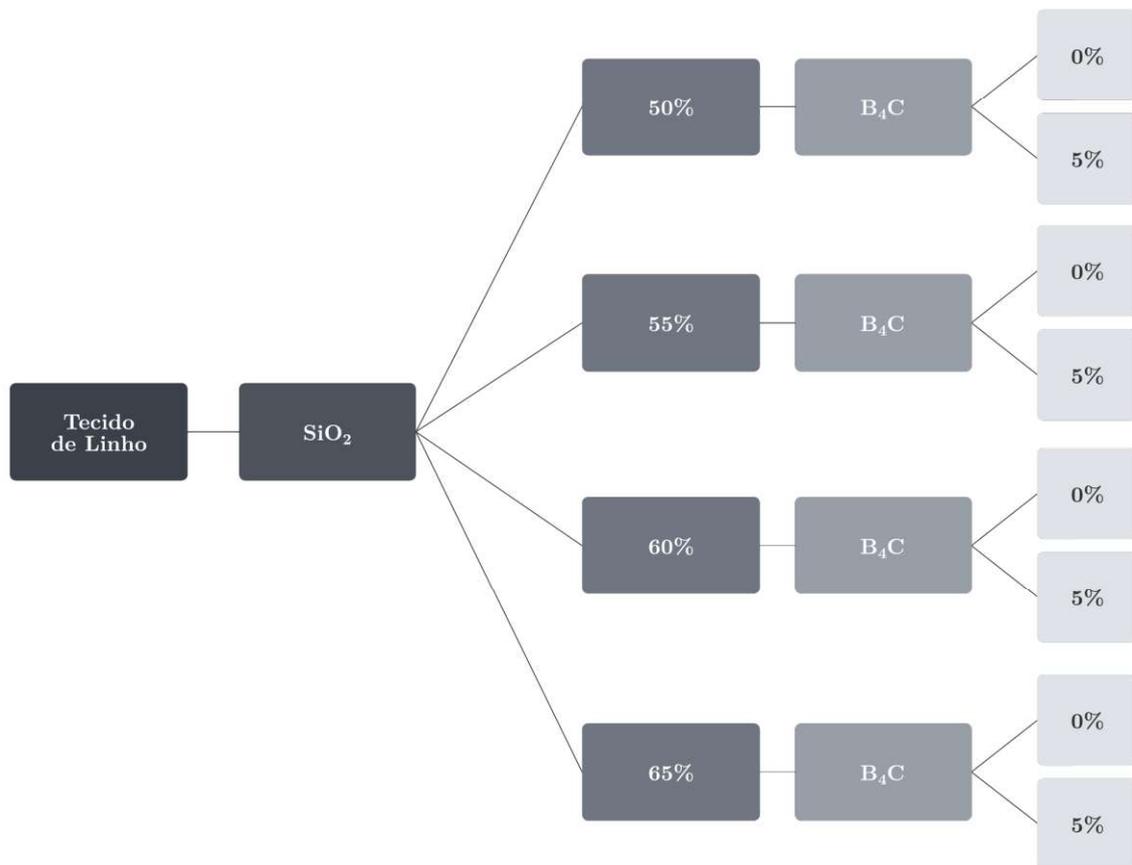


Figura 3.6 – Grupos de amostras a partir da composição de partículas de SiO_2 e B_4C .

Fonte: Próprio autor.

A Tab. 3.4 apresenta a codificação adotada para cada material e tratamento. A composição dos nomes de cada grupo de amostras corresponderá à concatenação desses códigos à medida que se emprega um tratamento ou material na unidade experimental.

Quando não houver a utilização de um dos elementos descritos, a sua designação será simplesmente omitida do nome. Além disso, a codificação do PEG será desprezada, já que o elemento está em todas as combinações, com exceção do tecido puro, cujo código é descrito como "A" para aramida e "L" para o linho.

Tabela 3.4 – Tabela de codificação dos materiais e grupos de amostras.

Grupo	SiO ₂ (wt%)	B ₄ C (wt%)
A	0	0
L	0	0
L-50S	50	0
L-55S	55	0
L-60S	60	0
L-65S	65	0
L-50SB	50	5
L-55SB	55	5
L-60SB	60	5
L-60SB	65	5

Quando se desejar representar todas as proporções de uma só vez, substituir-se-ão as porcentagens por um "x". Dessa forma, quando se encontrar referido como "L-xS", significa que o termo se refere a todos os grupos de SiO₂ (50, 55, 60 e 65% em massa) no tecido de linho de uma vez. Da mesma forma, "L-xSB" corresponderá a todas as proporções de SiO₂ e B₄C que irão impregnar o linho.

3.4 Fabricação dos Corpos de Prova

Devido ao número limitado de publicações que relatam a experiência de tecidos de FNL impregnados com fluido aditivado, o presente estudo tomará como referência o trabalho de Mahesh, Harursampath e Mahesh (2022) e Gürgen, Li e Kuşhan (2016) para a fabricação dos corpos de prova.

Os tecidos de linho, conforme recebidos, foram cortados com tesoura em placas de dimensões conforme a demanda do ensaio reportado posteriormente na Seção 3.5. Em seguida, o material foi limpo de poeiras e impurezas observáveis à olho nu manualmente e colocado em estufa a 50 °C por 24 h para remoção de umidade e outras impurezas. Para as partículas da fase dispersa, levou-se os pós à estufa a 50 °C por 24 h para remoção da umidade adsorvida, e em seguida foram peneirados com peneira de abertura de 0,063 mm (230 mesh) acoplada a um agitador de peneiras antes de serem misturados e adicionados ao fluido para a fabricação dos compósitos.

A partir da preparação das fases, a produção do fluido aditivado se deu pela mistura manual em béqueres de cerca de 10 ml de PEG 400 e uma quantidade de partículas de

SiO₂ equivalente às proporções de 50, 55, 60 e 65% em massa. Posteriormente, adicionou-se B₄C na proporção em massa de 5% e repetiu-se o mesmo procedimento de mistura. Foi vertido uma proporção de 1:2 em volume de álcool isopropílico e, por fim, a suspensão foi levada a um agitador mecânico com uma rotação estimada em 3000 rpm por cerca de 5 min. A adição do álcool teve como objetivo a diluição do material para facilitar a combinação das fases a impregnação do tecido.

Para o processo de impregnação, o FAd produzido foi vertido em formas de vidro e as placas de tecido de linho foram submergidas por cerca de 5 minutos. Posteriormente, o material têxtil embebido de FAd foi posicionado verticalmente por cerca de 10 minutos a fim de que o fluido em excesso escoasse. Por fim, o material conjugado foi levado a estufa a 50 °C por 24 h para facilitar a remoção do álcool isopropílico.

Na Figura 3.7, está representada esquematicamente a sequência de fabricação dos corpos de prova utilizados no presente trabalho.

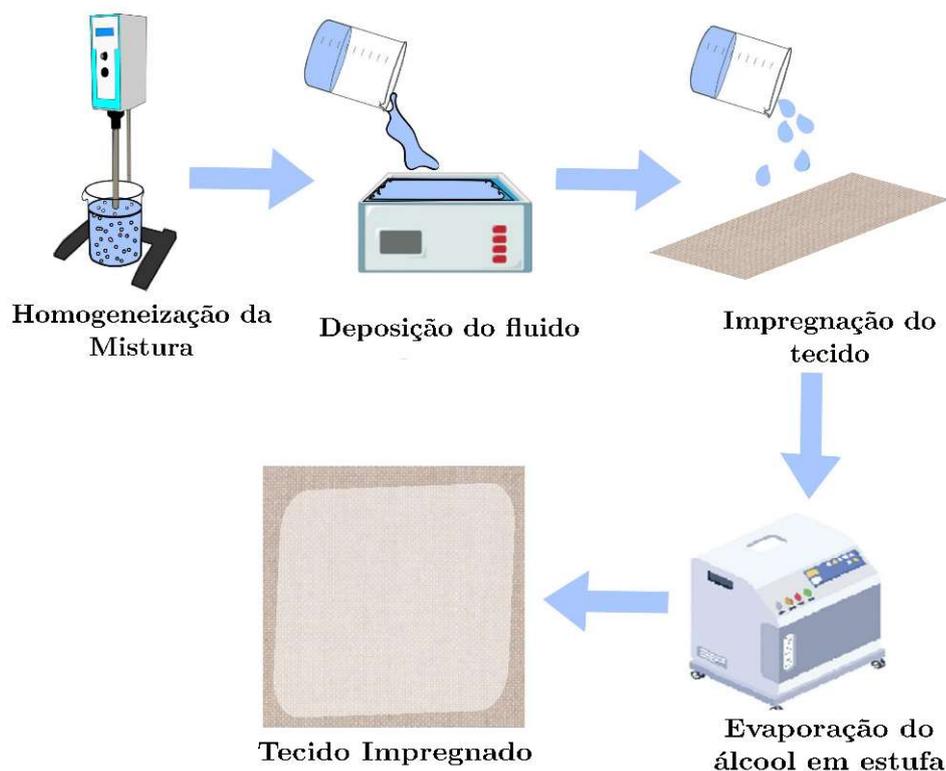


Figura 3.7 – Representação esquemática da sequência de fabricação dos corpos de prova.

Fonte: Adaptado de Ribeiro et al. (2022).

Na Fig. 3.8 estão apresentados os corpos de prova fabricados para serem submetidos a um dos ensaios propostos



Figura 3.8 – Corpos de prova fabricados de acordo com o procedimento apresentado.

3.5 Caracterizações Propostas

A Tab. 3.5 resume os ensaios propostos neste trabalho bem como as características das amostras para cada um deles.

Tabela 3.5 – Tabela resumo dos ensaios propostos e das características das amostras.

Ensaio	Grupos de Amostras	Quantidade de amostras	Dimensões
Gramatura	L, L-xS e L-xS-xB	5 CPs/grupo	10 x 10 cm
FTIR	L, S, B, L-xS e L-xSB	0,2 g/grupo (pó)	-
DRX	A, L, S e B		
TGA	L, L-xS e L-xS-xB		
Viscosidade	xS e xSB	2 ml/grupo	
<i>Yarn Pullout</i>	L, L-xS e L-xSB	6 CPs/grupo	10 x 12 cm
Análise Balística	1A, 3L, 3L-xS e 3L-xSB	2 CPs/grupo	15 x 15 cm

3.5.1 Espectroscopia no Infravermelho por Transformadas de Fourier (FTIR)

O objetivo da realização das análises de FTIR é identificar as vibrações e estiramentos das ligações efetivas das fibras, bem como avaliar a influência da impregnação nos tecidos. O ensaio foi conduzido no Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), utilizando um espectrofotômetro IR Prestige 21-FTIR-Shimadzu.

As amostras de tecido de linho impregnado pelos fluidos produzidos seguiram o mesmo padrão de fabricação citado na Seção 3.4. Após as etapas descritas, assim como os tecidos de linho puro e aramida, as amostras foram cominuídas mecanicamente.

Os dados obtidos foram processados e organizados para a geração de um gráfico de transmitância (%) em função do número de onda (cm^{-1}). Para estabelecer correlações,

foram utilizados dados da literatura.

3.5.2 Difração de Raios X (DRX)

O ensaio de difração de raios X (DRX) foi realizado com o objetivo de conhecer o índice de cristalinidade das fibras que compõem o tecido empregado nos compósitos, bem como identificar as fases e estruturas das partículas que compõem as fases dispersas. Dessa forma, foi utilizado o equipamento XPert Pro MRD System com radiação $\text{CoK}\alpha$ da PANalytics, pertencente à Seção de Ciência dos Materiais do IME. Foi aplicado um intervalo de ângulo de difração de 10 a 70° e velocidade de varredura de $2\theta/5\text{s}$.

As amostras de compósitos seguiram o mesmo padrão de fabricação citado na Seção 3.4. Após as etapas descritas, assim como os tecidos de linho puro e aramida, as amostras foram cominuídas mecanicamente. Os pós de sílica e de carbetto de boro foram levados à estufa a 50 °C por 24 h para retirada de umidade e conduzidos ao ensaio.

A partir dos dados obtidos, foi traçado o perfil de difração por meio de tratamento computacional. A partir do método descrito por Segal et al. (1959), o índice de cristalinidade (I_C) foi calculado pela equação 3.1, que relaciona as áreas de intensidades.

$$I_C = \frac{I_{\text{cristalina}} - I_{\text{amorfa}}}{I_{\text{cristalina}}} \quad (3.1)$$

O índice de cristalinidade calculado das amostras teve como objetivo fornecer uma avaliação qualitativa das quantidades de componentes celulósicos amorfos e cristalinos em uma amostra, proporcionando evidências relevantes acerca do comportamento mecânico do material para sua adoção no trabalho.

3.5.3 Ensaio de Determinação da Gramatura

A fim de caracterizar um dos fatores que influenciam o desempenho balístico de um tecido, conforme a Tab. 2.9 na Seção 2.4.1, determinou-se a densidade superficial do tecido de linho estudado. Esta propriedade também pode ser designada como massa por unidade de área do material e esclarece a massa do reforço fibroso utilizado na fabricação do compósito.

De acordo com a ABNT NBR 10591 (2008), foram obtidos no mínimo 5 corpos de prova para cada grupo estudado, conforme Tab. 3.5. Analisaram-se amostras com 180 cm² de área utilizando um gabarito metálico. Em seguida, mediu-se as massas em uma balança analítica da marca Mettler PM 460, e efetuou-se o cálculo para obtenção da gramatura do tecido em gramas por centímetro quadrado (g/cm²) para o cálculo da média aritmética.

3.5.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Tanto as amostras de tecido de aramida e de linho quanto seus compósitos e os pós foram analisados por meio do microscópio eletrônico de varredura modelo Quanta FEG250, da FEI, para a investigação da morfologia do compósito e o diâmetro dos pós. A análise permitiu examinar a distribuição do fluido na superfície do material e verificar a tendência de comportamento mecânico do fluido. As amostras foram extraídas mecanicamente dos corpos de prova produzidos, conforme Seção 3.4, e ensaiados.

Devido à baixa condutividade das FNLs, foi necessário realizar um recobrimento das superfícies para possibilitar a visualização. Dessa forma, utilizou-se um recobrimento condutor por meio do equipamento LEICA EM ACE600. Tanto este equipamento quanto o microscópio estão disponíveis no Laboratório de Microscopia do IME.

3.5.5 Análise Termogravimétrica (TGA)

As análises termogravimétricas (TGA) permitiram acompanhar a estabilidade térmica pela variação da massa da amostra em função da programação de temperatura, associando temperaturas aos níveis de degradação do material em análise. O ensaio foi conduzido em um equipamento composto por uma termobalança, possibilitando a pesagem contínua de uma amostra em função da temperatura, ou seja, à medida que ela era aquecida ou resfriada (DENARI; CAVALHEIRO, 2012).

O ensaio foi realizado no Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM) utilizando um equipamento Shimadzu DTG-60H. Foi aplicada uma atmosfera de nitrogênio em fluxo de 50 mL min⁻¹ com taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹ em um intervalo de temperatura de 30 a 600 °C.

As amostras L-xS e L-xSB seguiram o mesmo padrão de fabricação citado na Seção 3.4. Após as etapas descritas, assim como os tecidos de linho puro e aramida, as amostras foram cominuídas mecanicamente e depositadas em cadinhos de alumina para a execução do ensaio.

3.5.6 Ensaio de Tração - *Yarn Pullout*

O ensaio de arrancamento, também conhecido como *Yarn Pullout*, foi amplamente utilizado em tecidos impregnados com FAd. Conforme Tapie, Guo e Shim (2016), o ensaio foi inicialmente desenvolvido por Sebastian et al. (1986) com o propósito de investigar os efeitos de um agente amaciante nas propriedades do tecido. Posteriormente, Bazhenov (1997) estabeleceu uma correlação entre o nível de proteção balística de um tecido e os resultados do ensaio de arrancamento de fios, concluindo que há um indício entre o atrito nas fibras e o aumento da região primária do tecido durante impactos balísticos (ZHOU et al., 2019).

A importância desse ensaio passa pelo fato de que, em tecidos com baixa fricção entre fios, os fios são facilmente arrancados do plano quando impactados (MAWKHLIENG; MAJUMDAR, 2019). Além disso, a baixa fricção impede a transmissão da tensão aos fios da região secundária, isolando-os do mecanismo de absorção de energia. Assim, a compreensão e o conhecimento do nível de atrito entre as fibras do tecido constituem um parâmetro crucial que reflete o desempenho balístico de uma SA.

O ensaio, em sua essência, consistem em tracionar um fio da trama do tecido. Este mesmo fio é cortado na extremidade oposta, próxima à garra inferior do equipamento, para evitar influência na tração do fio. As placas são desfiadas cerca de 2 cm na extremidade superior para proporcionar uma altura útil que evite o escorregamento da garra superior. Uma área de 10 x 10 cm é preservada para evitar influências no parâmetro. A Figura 3.9 representa o ensaio conduzido por Qin et al. (2020), servindo como base para o ensaio a ser realizado.

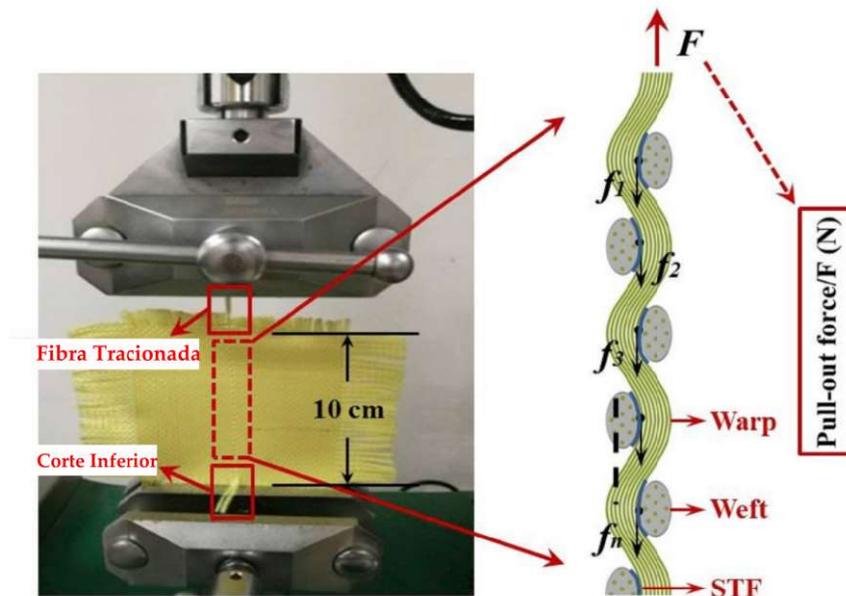


Figura 3.9 – Representação de um ensaio de tração do tipo *yarn pullout*.

Fonte: Adaptado de Qin et al. (2020)

Considerando o exposto, o ensaio de tração foi conduzido em uma máquina universal EMIC DL10000 no Laboratório de Ensaio Mecânicos da UERJ (UEZO). Foi empregada uma velocidade de ensaio de 100 mm/min. Os corpos de prova foram obtidos a partir de tecidos de linho puro e impregnados em diversas proporções, conforme descrito na Tabela 3.5 no início do capítulo.

3.5.7 Análise de Viscosidade

A partir do que foi explicitado por Ribeiro et al. (2022) na Seção 2.2, diversos fatores influenciavam as características do fluido, resultando em um comportamento newtoniano

ou não newtoniano. Uma das maneiras de compreender essa característica, considerando a delineação das propriedades dos elementos que compunham o fluido e sua influência na composição, é por meio da análise reológica do material.

Diante desse contexto, as propriedades reológicas foram avaliadas utilizando um reômetro rotacional AresG2, disponível nos laboratórios da EngeCol, UFRJ. Os testes foram conduzidos em temperatura ambiente de 25 °C, com controle de tensão e taxa de cisalhamento. Foi adotada uma taxa de cisalhamento entre 1 e 1000 s⁻¹, utilizando uma geometria de placas paralelas com 40 mm de diâmetro, espaçamento de 1 mm e aproximadamente 2 mL de fluido. A Fig. 3.10 apresenta esquematicamente a configuração do ensaio.

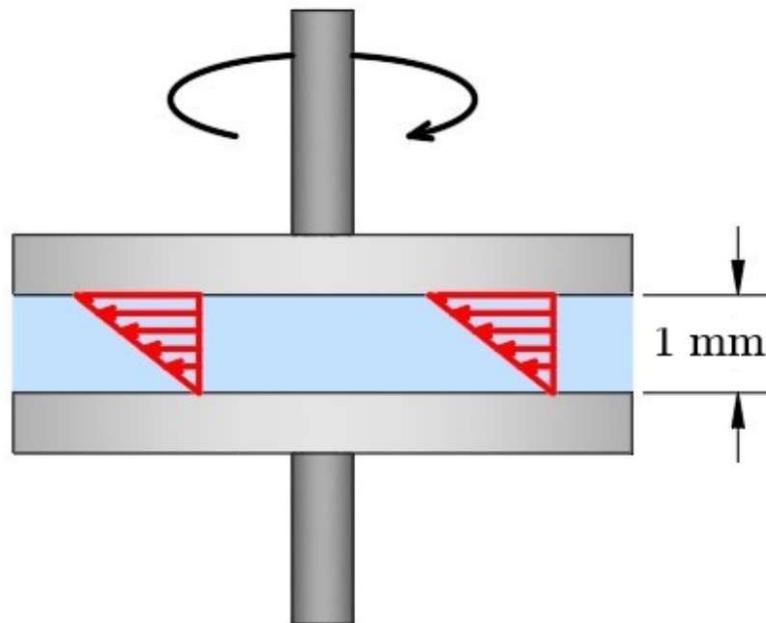


Figura 3.10 – Representação esquemática da configuração do ensaio de viscosidade realizado.

Fonte: Próprio autor.

Inicialmente, o ensaio englobou amostras de diferentes tipos de fluidos puros para determinar o material a ser adotado no trabalho. A partir dessa etapa, os fluidos foram aditivados com as variações de partículas anunciadas, e a influência das partículas no comportamento viscoso foi analisada.

3.5.8 Ensaio Balístico

O ensaio balístico foi realizado para avaliar a capacidade do material em absorver a energia cinética em alta velocidade em comparação a um tecido balístico amplamente

utilizado. O teste foi conduzido no Centro de Avaliações do Exército, utilizando munições .38 RN de 10,2 g impactando a uma velocidade subsônica de 260 m/s em trajetória perpendicular ao compósito, que estava posicionado como alvo com o auxílio de uma moldura para não interferir na dinâmica dos fios do tecido. A Fig. 3.11 apresenta o projétil utilizado (A) e o compósito testado (B).

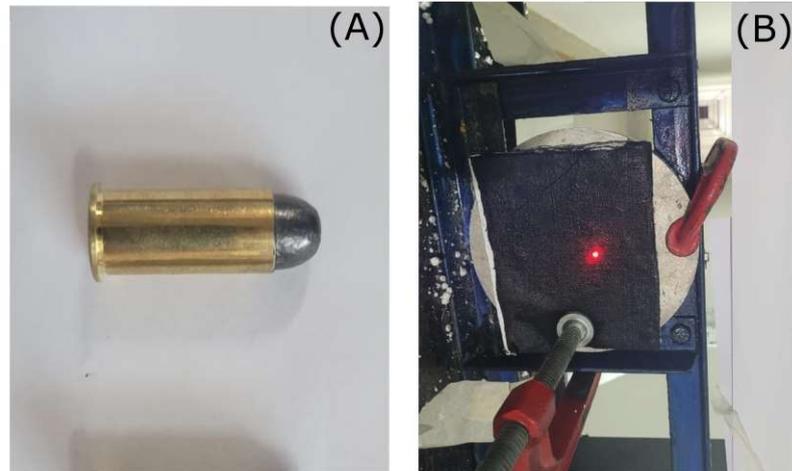


Figura 3.11 – (A) Projétil adotado no ensaio balístico e (B) instalação do corpo de prova para testes.

O provete que realizou o disparo foi posicionado a uma distância de 5 m do conjunto. A velocidade de impacto e residual do projétil foram medidas com auxílio de radar Doppler, modelo SL-520P, fabricado pela Weibel, na disposição mostrada na Figura 3.12.

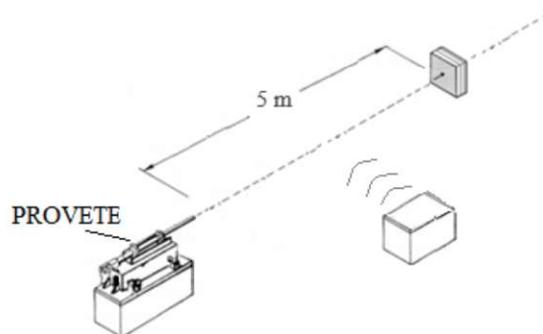


Figura 3.12 – Esquema do ensaio balístico.

Fonte: Próprio autor.

Após os testes, a partir dos resultados obtidos para gramatura, calculou-se a Energia Absorvida Específica (EAE) conforme Eq. 3.2. Este parâmetro mede a capacidade do material em absorver o impacto balístico por massa de material relacionando energia absorvida (E_{abs}) e gramatura (ρ_A).

$$EAE = \frac{E_{abs}}{\rho_A} \quad (3.2)$$

Foram analisados os grupos A, 3L, 3L-xS e 3L-xSB. Dessa forma, será feita a comparação da aramida pura com o linho impregnado. Foi utilizado um molde metálico para cortar os tecidos com uma área de 15 x 12 cm.

3.5.9 Análise de Variância (ANOVA)

A análise de variância (ANOVA) determina as diferenças entre tratamentos adotados. Aplicado posteriormente, o teste de Tukey analisa diferenças entre pares para identificar, de maneira comparativa, quais tratamentos diferiam entre si Nanda et al. (2021). Esta análise foi conduzida com um nível de confiabilidade de 95%.

A Tab. 3.6 apresenta os parâmetros estatísticos para o cálculo de F, o qual foi comparado ao $F_{crítico}$ obtido da Tabela F (5% de significância). No caso em que $F > F_{crítico}$, a hipótese nula de que as médias são iguais é rejeitada, indicando a existência de diferenças significativas entre os valores médios dos tratamentos com 95% de confiabilidade.

Tabela 3.6 – Parâmetros estatísticos da ANOVA.

Causas de Variação	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F_{calculado}	F_{crítico}
Tratamento	k-1	SQT	QMT	QMT/QMR	Tabela F
Resíduo	k(r-1)	SQR	QMR		
Total	kr-1	SQTo			

Sendo:

k: N^o de tratamentos (fração de tecido utilizado);

r: N^o de repetições do tratamento;

k(r-1): N^o de graus de liberdade do resíduo;

(kr-1): N^o de graus de liberdade total;

SQT: Soma dos quadrados dos tratamentos;

SQR: Soma dos quadrados do resíduo;

SQTo: Soma dos quadrados totais;

QMT: Quadrado médio dos tratamentos;

QMR: Quadrado médio do resíduo.

O teste de Tukey baseia-se na Diferença Mínima Significativa (DMS) para determinar se duas médias de tratamento são significativamente diferentes entre si (NANDA et al., 2021). A Eq. 3.3 a seguir representa o DMS para o teste, onde "q" representa a amplitude estudantizada em função do grau de liberdade do resíduo e do número de

tratamentos (tabelado); QMR o quadrado médio do resíduo; e "r" o número de repetições de cada tratamento.

$$DMS = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad (3.3)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Espectroscopia no Infravermelho por Transformadas de Fourier (FTIR)

A seguir, na Figura 4.1, é apresentado o espectro vibracional obtido da amostra de tecido de linho.

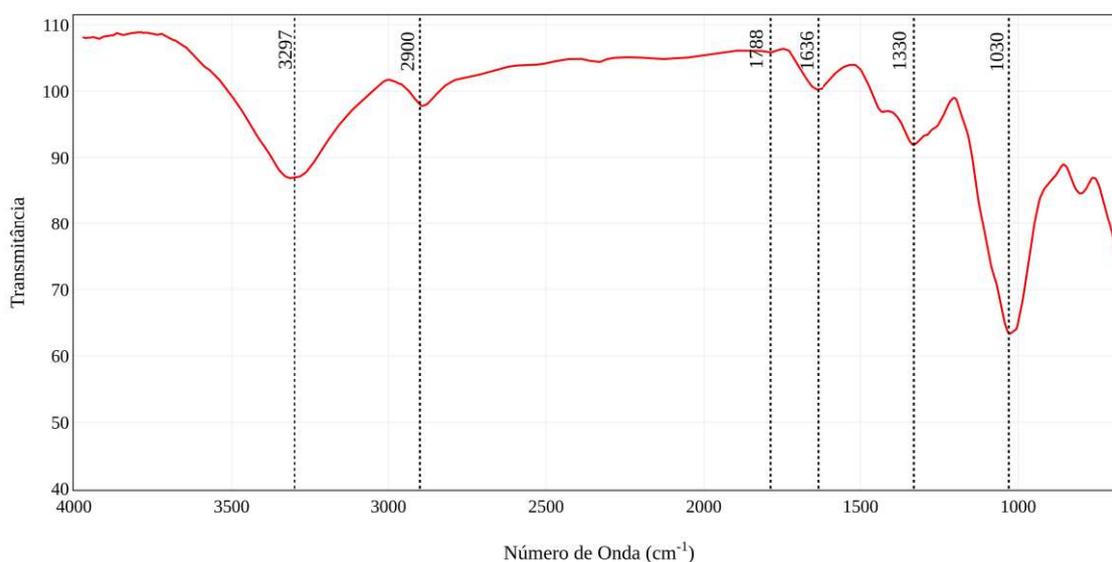


Figura 4.1 – Espectro de FTIR da fibra de linho.

No espectro se observa diversas bandas de transmitância características do linho, as quais podem ser relacionadas aos grupos funcionais da composição da fibra. A banda observada com pico próximo de 1030 cm^{-1} pode ser associada ao estiramento de C-O-C do grupo hidroxila presente na celulose e na lignina (JANDAS; MOHANTY; NAYAK, 2012; DURAND et al., 2023), ambos presentes em uma proporção de cerca de 71% e de 2,2%, respectivamente (GHOLAMPOUR; OZBAKKALOGLU, 2020). Já a banda em 1330 cm^{-1} está relacionada a vibrações de dobramento de CH_2 contido na celulose e hemicelulose (CÉLINO et al., 2014), este último presente em uma proporção de cerca de 20,6% (GHOLAMPOUR; OZBAKKALOGLU, 2020). Em 1636 cm^{-1} se observa um pico que é atribuído à vibrações de dobramento de O-H devido à presença de umidade nas estruturas de celulose (MONDRAGON et al., 2014). Em 1788 cm^{-1} , a banda é relativa a vibrações de estiramento de C=O em ácidos carboxílicos presentes na pectina ou grupos ésteres que compõem a hemicelulose (CÉLINO et al., 2014; DURAND et al., 2023). Próximo de 2900 cm^{-1} , a banda representa estiramento de CH em grupos alquila presente

em ligações na celulose, lignina e hemicelulose. Por fim, entre 3000 e 3500 cm^{-1} , com pico em 3326 cm^{-1} , a banda está relacionada ao estiramento de grupos OH presente na celulose (XIA et al., 2016).

A seguir, na Figura 4.2, é representado o espectro obtido da amostra de tecido de aramida adotado no trabalho como grupo de referência.

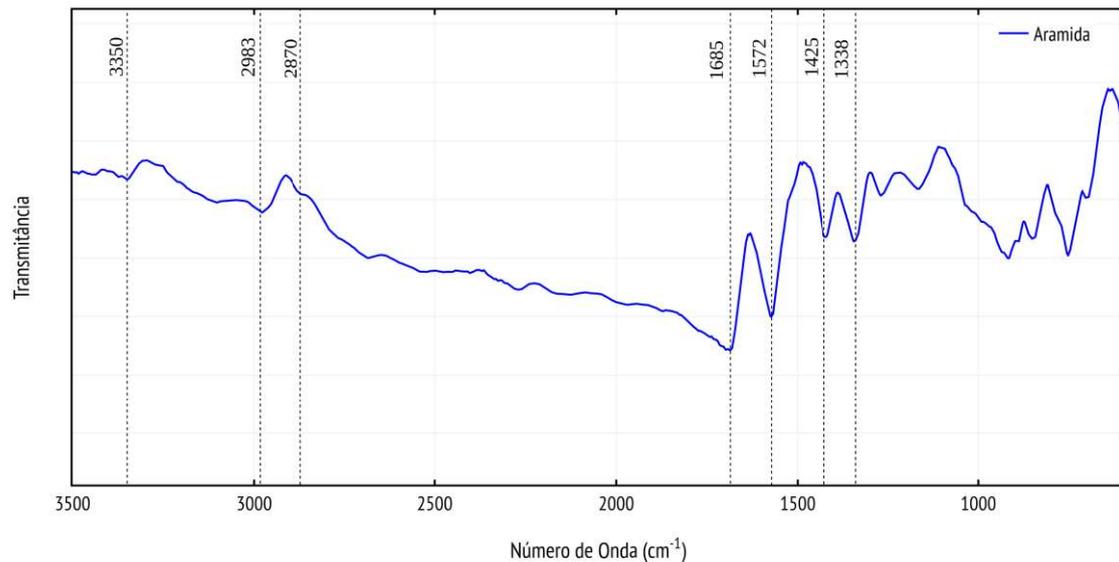


Figura 4.2 – Espectro de FTIR do tecido de aramida.

A partir do espectro, é possível notar algumas bandas características da aramida. Os picos representativos em 1685 , 1572 e 1338 cm^{-1} foram associados às bandas de amida I (vibração de dobramento de $\text{C}=\text{O}$), amida II (vibração de estiramento de CN e de dobramento de NH), e amida III (acoplamento de vibração de C-N , N-H e C-C), respectivamente (CHEN et al., 2023; LI et al., 2016). Já na banda presente em 1425 cm^{-1} , nota-se a presença de vibração de estiramento de C-N . Em 3350 cm^{-1} observa-se uma banda atribuída grupo N-H , e em 2983 e 2870 cm^{-1} nota-se picos discretos relacionados às vibrações de estiramento de grupo metileno e metil, respectivamente.

A seguir, na Fig. 4.3 é representado o espectro obtido da amostra de tecido de linho impregnado com sílica e sílica com carbetto de boro.

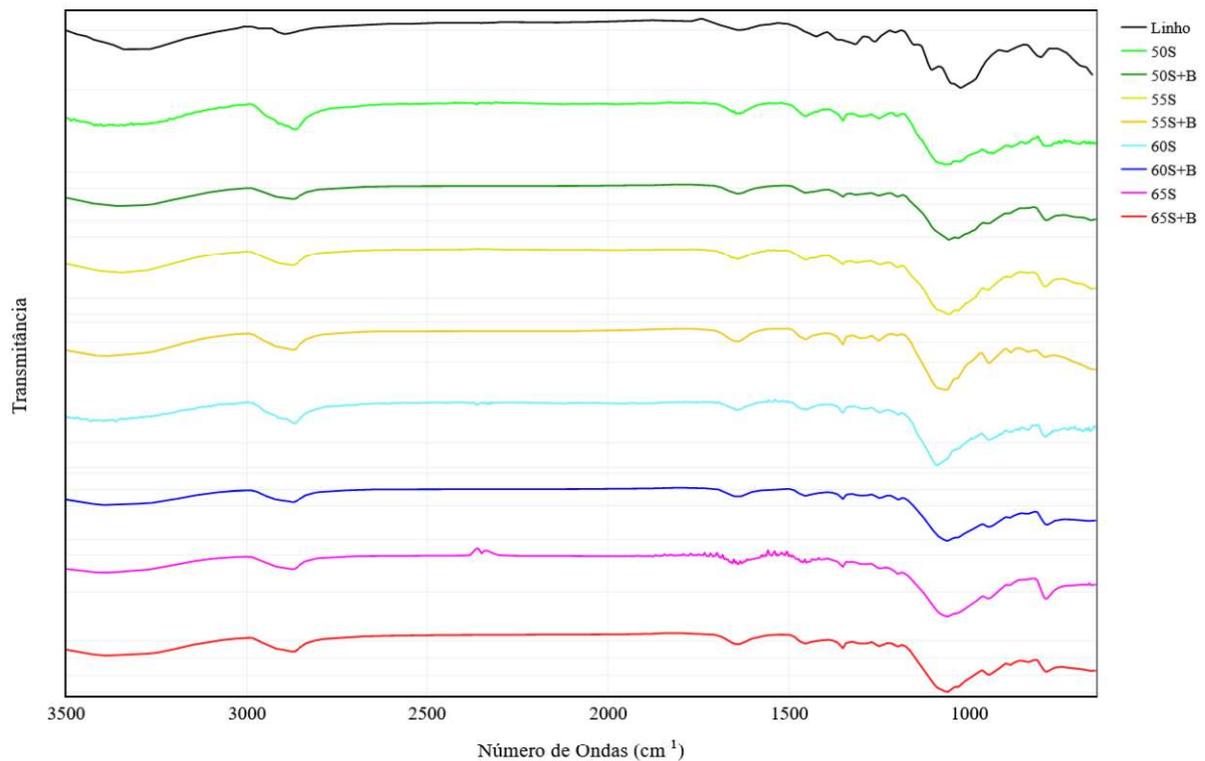


Figura 4.3 – Espectro de FTIR dos compósitos em análise.

Da Fig. acima, é possível notar os picos em 1640 e 3340 cm^{-1} apresentaram uma proeminência nos compósitos, relacionadas à presença de água absorvida no material devido ao caráter higroscópico da sílica além de proporções de H_2O no PEG. A presença de um pico na banda em 790 e 949 cm^{-1} é relativo à presença de partículas de sílica pelos sinais de vibração de estiramento de ligações simétricas de Si-O-Si e grupos Si-OH (LI et al., 2016; DUBEY; RAJESH; MORE, 2015).

Nos compósitos em que se adicionou carvão de boro, nota-se sensivelmente pico em 860 e uma proeminência em 1495 cm^{-1} , típicos de vibrações de bandas presentes no carvão; além de uma ligeira proeminência em 1347 cm^{-1} relativa à vibrações de B-O na superfície da cerâmica. Os picos relativos ao B_4C se mostram com intensidade relativamente baixa por conta de seu percentual em relação aos outros materiais (LI et al., 2013; WANG et al., 2022).

4.2 Difração de Raios X (DRX)

Na Figura 4.4 são apresentados os difratogramas obtidos para as amostras de tecido de linho e tecido de aramida.

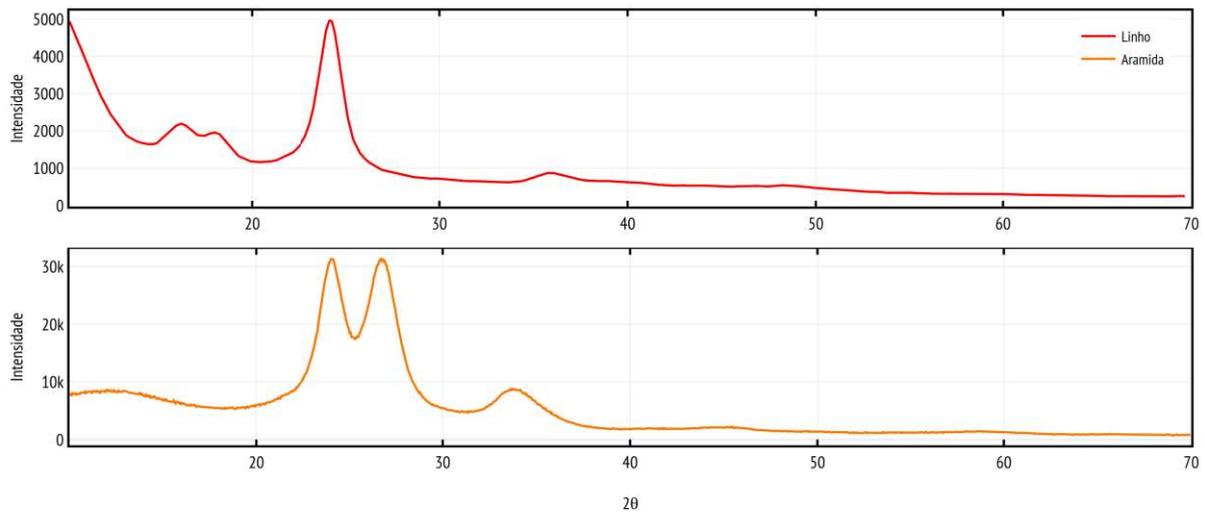


Figura 4.4 – Difratograma do tecido de linho.

Na determinação do Índice de Cristalinidade dos tecidos, conforme mencionado na Seção 3.5.2, foram adotadas as intensidades dos picos presentes entre 20 e 30°, e entre 15 e 20° para o linho; e entre 25 e 31°, e entre 30 e 40° para a aramida, conforme a Eq. 3.1.

A partir dessas intensidades e do método proposto pela Eq. 3.1, obteve-se um Índice de Cristalinidade de aproximadamente 60,7% para o tecido de linho utilizado no trabalho e 72,0% para o tecido de aramida. Esses resultados são consistentes com valores já reportados na literatura, como em Bourmaud et al. (2018), Mondragon et al. (2014), N, V e C (2021), Wu, Sikdar e Bhat (2023).

Comparando com trabalhos que utilizaram fibras naturais e analisaram o comportamento balístico, as fibras de junco apresentaram um valor aproximado ao obtido para o linho, cerca de 62,47% de cristalinidade (NEUBA et al., 2023a). Posteriormente, a aplicação desse material natural em epóxi proporcionou um conjunto com velocidade balística limite semelhante ou superior ao Kevlar (NEUBA et al., 2023b; FILHO et al., 2020). Esse efeito também foi observado para a fibra de guarumã, com 67,0% (REIS et al., 2021), e para a fibra de fique, com 28,7% (OLIVEIRA et al., 2021a; SILVA et al., 2023).

Na Figura 4.5, apresenta-se a curva resultante da análise de DRX para as partículas utilizadas no presente trabalho, como recebidas.

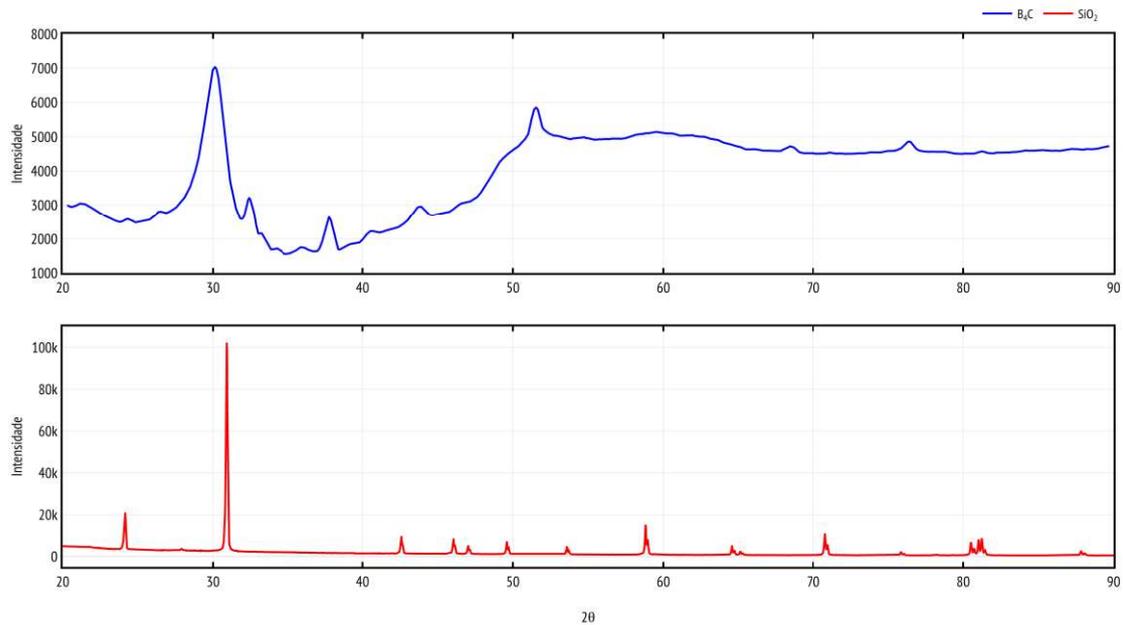


Figura 4.5 – Difratoograma para as partículas de SiO_2 utilizadas na confecção do FEC que impregnaram o tecido de linho.

A análise qualitativa dos pós pelo software HighScore revelou um nível satisfatório de pureza no pó. Observam-se características relacionadas àquelas apresentadas na ficha cristalográfica 01-070-2517, que descreve o polimorfismo de alfa-quartzo com uma estrutura hexagonal, grupo espacial P3221 e densidade calculada em $2,63 \text{ g/cm}^3$, uma das formas mais comuns de sílica encontradas. Já o carбето de boro, conforme a carta de difração 00-044-1206, exibe um sistema cristalino romboédrico, com grupo espacial R-3M.

4.3 Análise da Gramatura

Na Tabela 4.1 a seguir, apresentam-se a massa média, gramatura e espessura do tecido de linho puro, bem como das amostras impregnadas nas diversas proporções estudadas.

Tabela 4.1 – Massa, gramatura e espessura dos tecidos de linho impregnados nas proporções estudadas.

Amostra	Massa (g)	Gramatura (g/m ²)	Espessura (mm)
L	4,62 ± 0,10	256,76	0,41 ± 0,02
A	3,91 ± 0,16	217,10	0,26 ± 0,01
Twaron CT736	8,34 ± 0,13	463,30	0,49 ± 0,01
L-50S	13,12 ± 1,32	728,70	0,48 ± 0,02
L-55S	13,44 ± 2,04	746,67	0,59 ± 0,09
L-60S	13,60 ± 0,45	755,28	0,70 ± 0,02
L-65S	14,00 ± 0,72	777,73	0,87 ± 0,01
L-50SB	14,94 ± 0,40	829,94	0,73 ± 0,03
L-55SB	15,11 ± 1,33	839,17	0,80 ± 0,03
L-60SB	16,87 ± 0,57	936,99	0,91 ± 0,07
L-65SB	17,27 ± 0,68	959,43	1,02 ± 0,07

É evidente que os valores obtidos pelas amostras impregnadas são significativamente superiores aos observados para o linho puro. Nota-se um aumento na gramatura de até 3 vezes para os tecidos impregnados com SiO₂ e de até 3,7 vezes para os tecidos impregnados com SiO₂ e B₄C, em comparação com o linho puro. Em relação aos tecidos sintéticos, observa-se que o linho puro apresenta valores ligeiramente superiores à aramida em análise. No entanto, ao ser comparado ao Twaron CT736, também amplamente utilizado em materiais balísticos, destaca-se que o linho puro possui uma densidade substancialmente inferior. A Fig. 4.6 ilustra graficamente os resultados apresentados na tabela acima para o linho puro e para os compósitos.

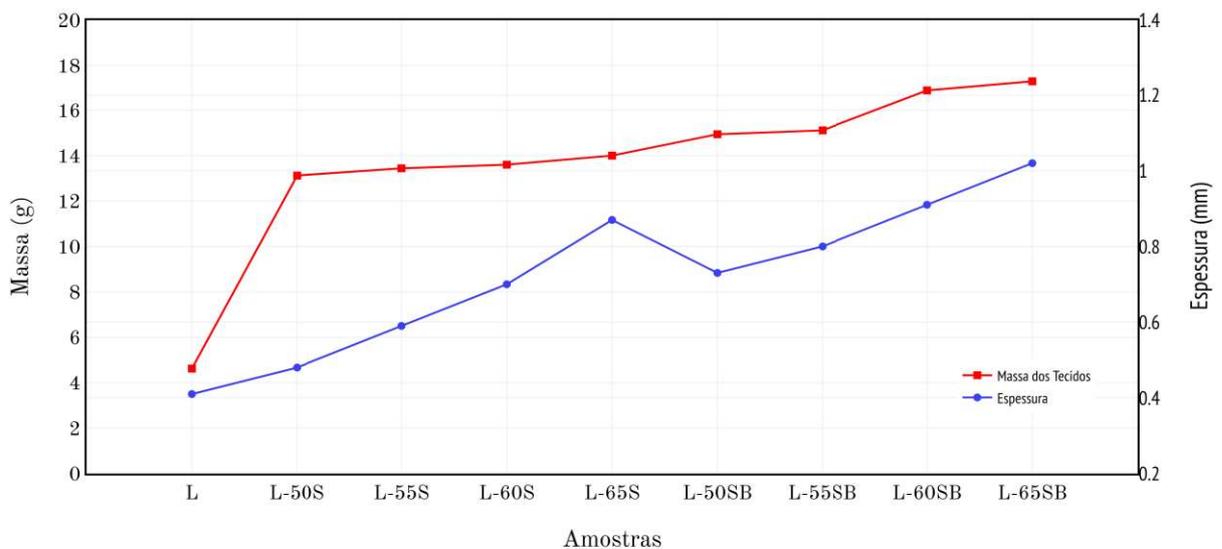


Figura 4.6 – Massa média e espessura média das amostras de cada grupo estudado.

Visualmente, é possível observar a tendência de aumento na massa do tecido à

medida que ele é impregnado pelos diferentes grupos. Nota-se que, nos compósitos, o acréscimo não segue uma relação linear com a adição de sílica e sílica com carbetto de boro, ocorrendo em estágios de 5%. Quanto à espessura, o material apresenta a mesma tendência de aumento. À medida que a massa de partículas no material aumenta, a deposição do fluido na superfície do linho também é incrementada. Isso resulta em um efeito de diminuição da espessura entre L-65S e L-50SB, uma vez que este último contém uma quantidade menor de sílica, embora ainda carregue uma proporção de aditivo.

Uma possível explicação pode ser derivada da análise morfológica do tecido, conforme mostrado na Fig. 4.7.

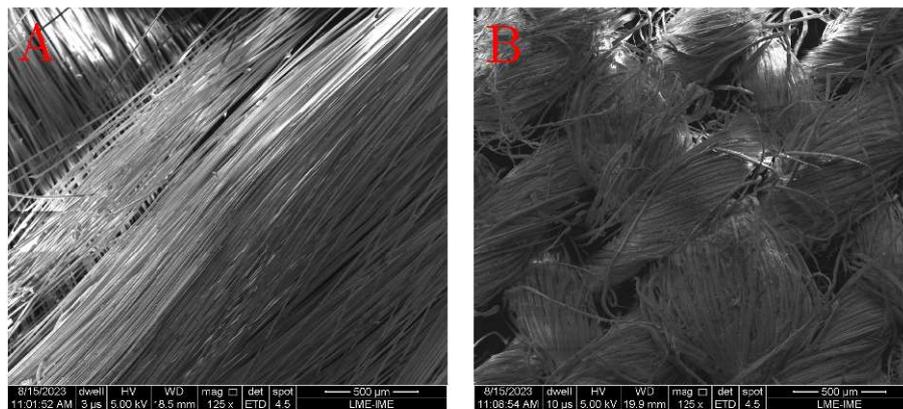


Figura 4.7 – Morfologia das superfícies do tecido de aramida (A) e do tecido de linho (B).

Nota-se que o tecido de linho (Fig. 4.7B) apresenta uma morfologia bastante irregular em comparação com a aramida (Fig. 4.7A), devido às diferenças de produção e natureza dos materiais. Isso pode resultar na formação de aglomerados de FAd em vários pontos pela superfície do material natural, o que ocorre na aramida apenas em pontos de entrelaçamento e em menor escala (PARK et al., 2014), embora em estudos anteriores (TAN; TAY; TEO, 2005) tenha sido observado um comportamento semelhante ao encontrado neste trabalho em tecidos de aramida. Maiores detalhes sobre a morfologia dos tecidos impregnados serão apresentados na Seção 4.4.

Em estudos anteriores, a tendência de aumento da gramatura resultou em uma maior capacidade de absorção de energia pelo tecido, devido ao maior intertravamento mecânico dos fluidos, ao aumento da região secundária ou ao atrito incrementado entre as camadas (MISHRA et al., 2022; LIU et al., 2020a; TANG et al., 2022). Em Mahesh, Harursampath e Mahesh (2022), observou-se um aumento de proporção semelhante ao obtido neste trabalho: um tecido de juta impregnado com 40% de sílica nanométrica teve um aumento de 3,3 vezes na gramatura em relação ao tecido de juta pura. Já em Khodadadi et al. (2019), com kevlar impregnado com 45% em massa de sílica, observou-se um aumento de 3,5 vezes na gramatura em relação ao kevlar puro. Destaca-se que, em

ambos os casos, os grupos impregnados com maiores gramaturas traduziram-se em um aumento vertiginoso na absorção de energia balística. Entretanto, é necessário avaliar a EAE para ponderar entre gramatura e desempenho balístico do tecido em análise.

A fim de analisar mais especificamente as diferenças observadas nos valores médios de espessura dos grupos impregnados, realizou-se a análise de variância (ANOVA) e o Teste de Tukey. A Tabela 4.2 apresenta a análise para os grupos de amostras.

Tabela 4.2 – Análise de variância dos resultados de espessura.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	$F_{\text{calculado}}$	$F_{\text{crítico}}$
Tratamento	7	2,24	0,32	45,78	2,87
Resíduo	64	0,44	0,01		
Total	71	2,69			

Deste modo, como $F_{\text{calculado}}$ é maior que $F_{\text{crítico}}$, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que ocorreram diferenças nos resultados dos oito grupos de compósitos. Para analisar precisamente as diferenças entre as médias de cada parâmetro, realizou-se o Teste de Tukey. A partir dos cálculos do teste, pôde-se determinar a DMS para a análise, que foi de 0,13. A Tab. 4.3 mostra as comparações entre as médias.

Tabela 4.3 – Comparação das médias de espessura dos grupos a partir do Teste de Tukey.

Amostra	50S	55S	60S	65S	50SB	55SB	60SB	65SB
50S	0,00	0,15	0,27	0,42	0,30	0,38	0,48	0,60
55S	0,15	0,00	0,12	0,27	0,15	0,23	0,33	0,45
60S	0,27	0,12	0,00	0,16	0,03	0,11	0,21	0,33
65S	0,42	0,27	0,16	0,00	0,13	0,05	0,05	0,17
50SB	0,30	0,15	0,03	0,13	0,00	0,08	0,18	0,30
55SB	0,38	0,23	0,11	0,05	0,08	0,00	0,10	0,22
60SB	0,48	0,33	0,21	0,05	0,18	0,10	0,00	0,12
65SB	0,60	0,45	0,33	0,17	0,30	0,22	0,12	0,00

A partir dos resultados obtidos, nota-se que, dentre as amostras L-xS e L-xSB, as L-65S se mostraram diferentes das demais amostras com o mesmo tipo de aditivo. L-65SB se mostrou semelhante somente a L-60SB. Já este, mostrou semelhanças com L-55SB e L-65S. As amostras L-50S se mostrou inferior a todos os grupos analisados, e L-55S apresentou semelhanças somente com as amostras L-60S, ainda que esteja em valores próximos ao DMS. Isto é um indício do comportamento mecânico do material, já que a espessura está intimamente relacionada à rigidez do compósito.

4.4 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Na Figura 4.8, estão representados os tecidos de linho impregnados estudados neste trabalho. As imagens estão dispostas em ordem crescente de proporção em massa de sílica.

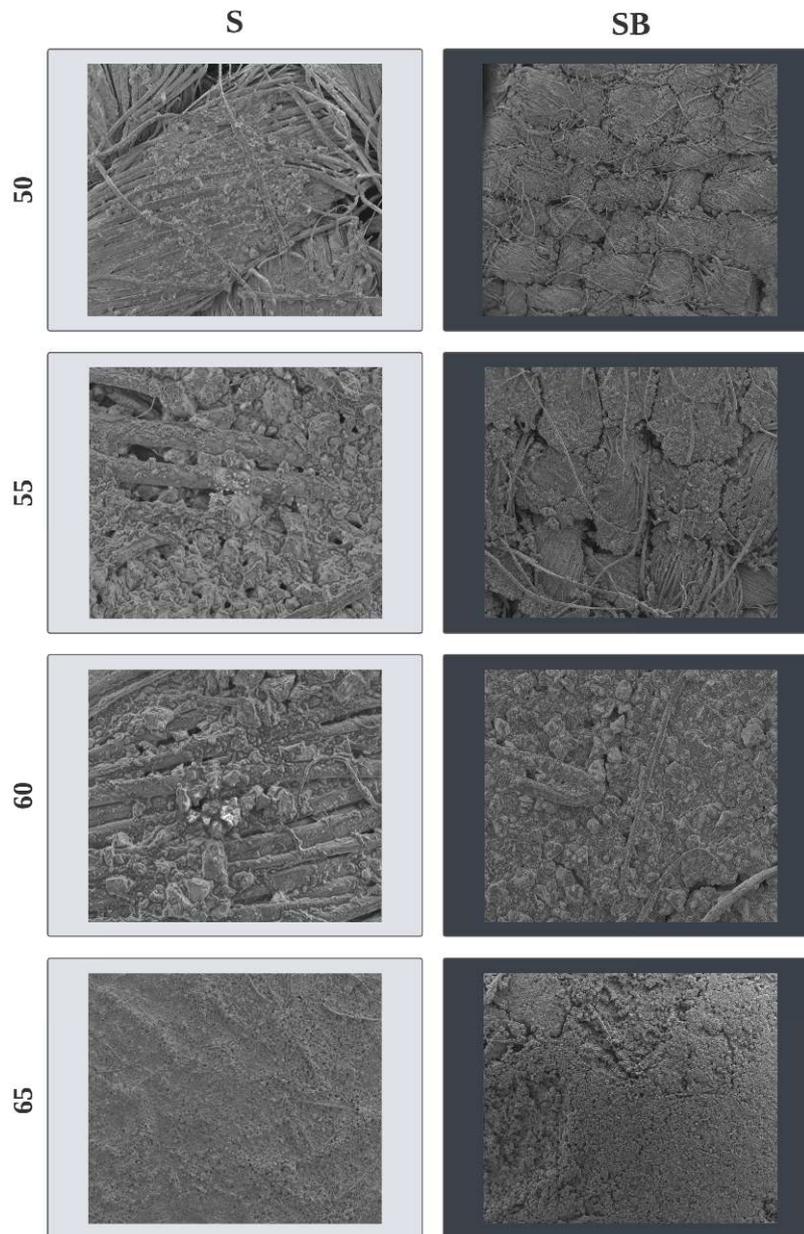


Figura 4.8 – Micrografia dos compósitos em estudo.

A partir das imagens, é possível notar a presença das partículas cerâmicas sobre o tecido, cuja trama se mostra de superfície irregular e com presença de vazios entre os fios, como já visto em seções anteriores. Em um primeiro momento, nas frações menores, 50S, 55S, 50SB e 55SB, observa-se uma melhor dispersão da partícula pelas tramas do tecido, o que favorece a atuação do intertravamento mecânico, um dos mecanismos de dispersão de energia de impacto. À medida que se aumenta a proporção de sílica, além da adição

da segunda fase no fluido, nota-se que o tecido tende a formar pontos de aglomeração do fluido viscoso na superfície, ainda que de maneira espaçada sobre o corpo de prova. Ainda assim, é visível que o acréscimo de carбето de boro produz ocupação de vazios entre o entrelaçamento dos fios, como pode ser comparado entre os grupos 50S e 55S, e 50SB e 55SB. Posteriormente a estas frações, encontram-se regiões do tecido totalmente recobertas pelo FAd em estudo, acarretando no aumento de espessura e rigidez. Tal aspecto também foi notado nos tecidos de fibra sintética impregnados, porém de forma mais difusa (PARK et al., 2014; QIN et al., 2020). Fehrenbach et al. (2023) também observou o mesmo comportamento para tecidos de linho impregnados com 50 e 70% de nano sílica.

Ao considerar o tecido, Fig. 4.9, é notável que, comparado aos tecidos de aramida (B) largamente utilizados com impregnação, os fios de linho (A) apresentam naturalmente uma rugosidade elevada, dada a composição fisicoquímica do material. Desse modo, ainda que a fricção dos fios seja benéfica em um primeiro momento, Mawkhlieng, Majumdar e Laha (2020) destacou em seu trabalho que uma rugosidade excessiva proporciona concentrações de tensão que prejudicam a absorção de energia e, conseqüentemente, implicam no rompimento dos fios.

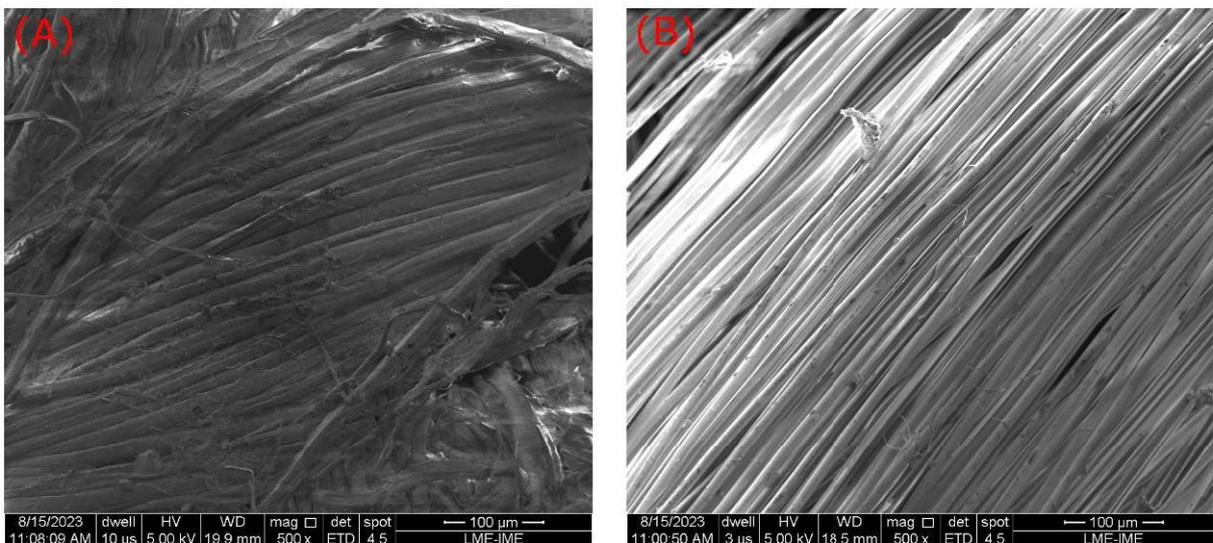


Figura 4.9 – Comparação entre a superfície do (A) linho e da (B) aramida (500x).

A partir de observações também realizadas por meio do MEV, bem como o processamento realizado pelo *software* ImageJ, a Figura 4.10 apresenta a distribuição granulométrica das partículas de sílica adotada no trabalho, a qual se apresenta em maior proporção no material.

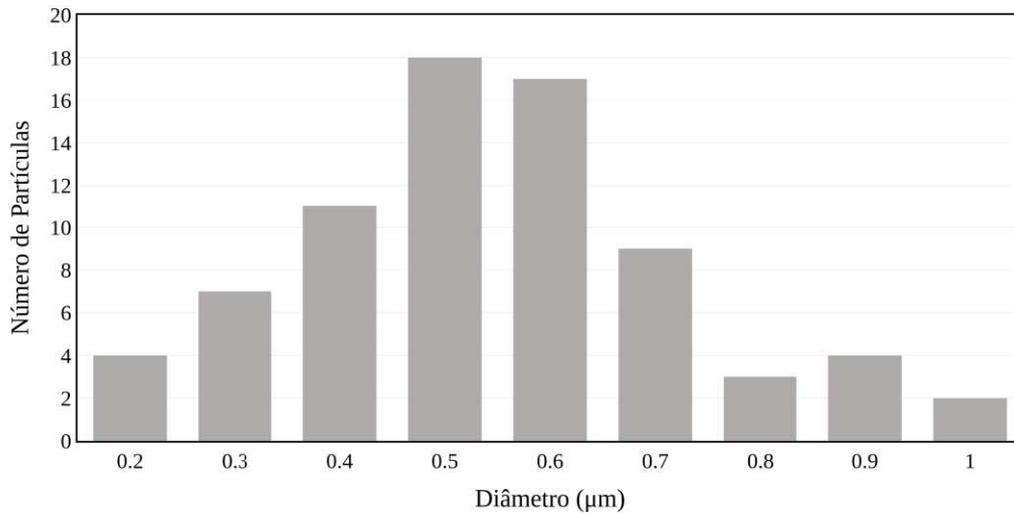


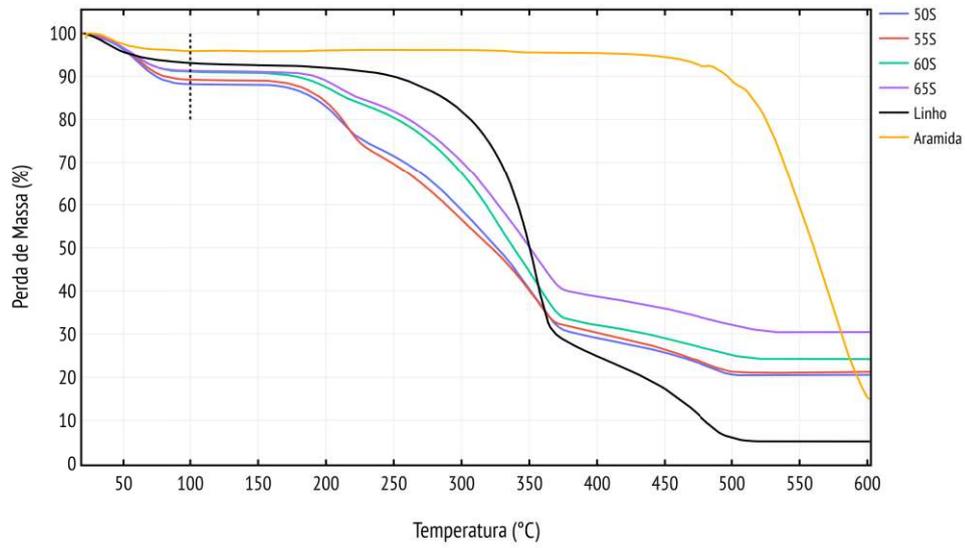
Figura 4.10 – Distribuição de tamanho de partículas de sílica utilizada no trabalho.

Nota-se que, das análises realizadas pelo software de micrografias do pó, o diâmetro de partícula ocorre em grande parte entre 0,5 µm e 0,6 µm, calculando uma média de 0,562 µm. Comparado a trabalhos de destaque, nota-se que este valor se encontra ligeiramente acima do intervalo de diâmetro de partículas empregado em materiais que apresentaram resistência balística ou resistência ao arrancamento de fios relevante, conforme listado na Tab. 2.8, na Seção 2.3.1.

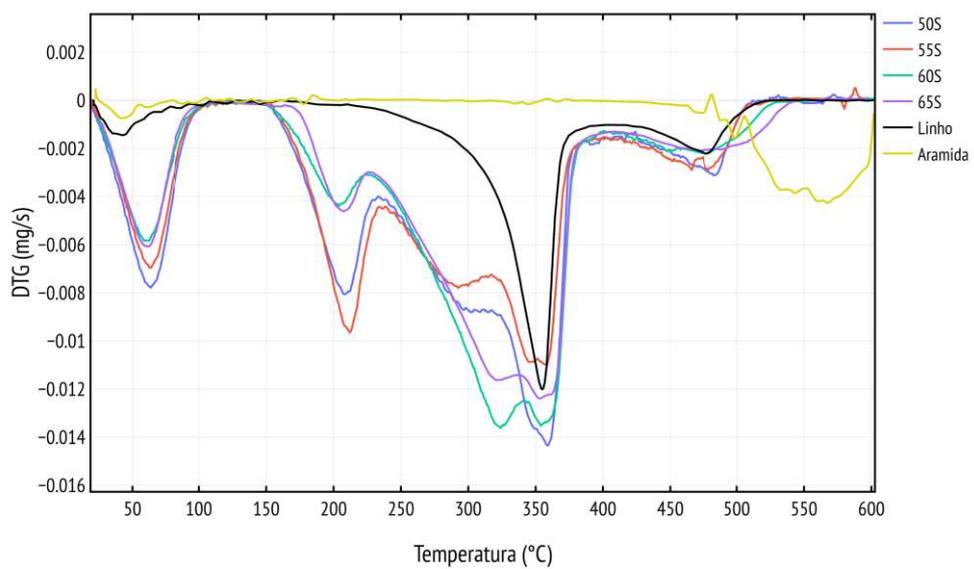
Por fim, a partir das análises do *software*, pôde-se calcular a circularidade do material. Este parâmetro, como já anunciado por Srivastava, Majumdar e Butola (2012), aponta para a capacidade de intertravamento mecânico e ativação do espessamento do fluido. Com isso, a partir das análises, constatou-se uma circularidade de cerca de 0,494, o que aponta para uma partícula com formato de relevante irregularidade e, conseqüentemente, pode auxiliar nas características desejáveis para aplicação do material sob impacto, como na diminuição da taxa de cisalhamento crítica (FENG et al., 2014), porém, por outro lado, favorece uma maior abrasão que compromete a integridade dos fios que compõem o tecido (STACHOWIAK; STACHOWIAK, 2001; THAKARE et al., 2012).

4.5 Análise Termogravimétrica (TGA)

Nas Figuras 4.11a e 4.11b estão apresentadas, respectivamente, as curvas de TG e DTG dos compósitos de linho impregnados, bem como do tecido de linho puro e aramida pura para fins de comparação.



(a)



(b)

Figura 4.11 – Curvas de (a) TG e (b) DTG para os tecidos impregnados com sílica.

Os principais pontos observados nos termogramas anteriores estão resumidos na Tabela 4.4 para uma melhor discussão dos resultados.

Tabela 4.4 – Resumo dos principais valores e parâmetros analisados na TGA do linho e dos compósitos.

Grupo	Perdas até 100 °C (%)	Início da Degrad. Máx. (°C)	Degrad. Máx. (°C)	Perdas na Degrad. Máx. (%)	Massa em 600 °C (%)
A	4,2	391,2	567,6	52,1	14,9
L	6,9	184,5	354,8	49,5	5,1
L-50S	11,8	144,5	359,1	51,9	20,5
L-55S	10,8	143,1	358,2	51,9	21,3
L-60S	9,0	143,2	353,5	48,4	24,2
L-65S	8,7	129,8	353,3	42,5	30,5

De forma geral, é possível notar três estágios bem definidos em todos os compósitos e no tecido de linho puro. O primeiro estágio, até 100 °C, é marcado pela perda de massa em todas as amostras, variando de 4,2 a 11,8%. Esta fase é relativa à perda de umidade e à degradação de impurezas presentes em todos os materiais analisados, conforme já observado em estudos anteriores (SHARMA et al., 2019; PERIYASAMY et al., 2023; GIEPARDA et al., 2023; OZEN et al., 2022) e sinalizado em análises de FTIR na Seção 4.1. Vale destacar que, nesta fase, nos compósitos, há um aumento sensível na perda de massa para percentuais menores de sílica e, proporcionalmente, maiores de PEG. Essa característica pode estar relacionada à degradação do fluido devido ao seu caráter hidrofílico solúvel em água com grupos polares (-OH) (BRDLÍK et al., 2022).

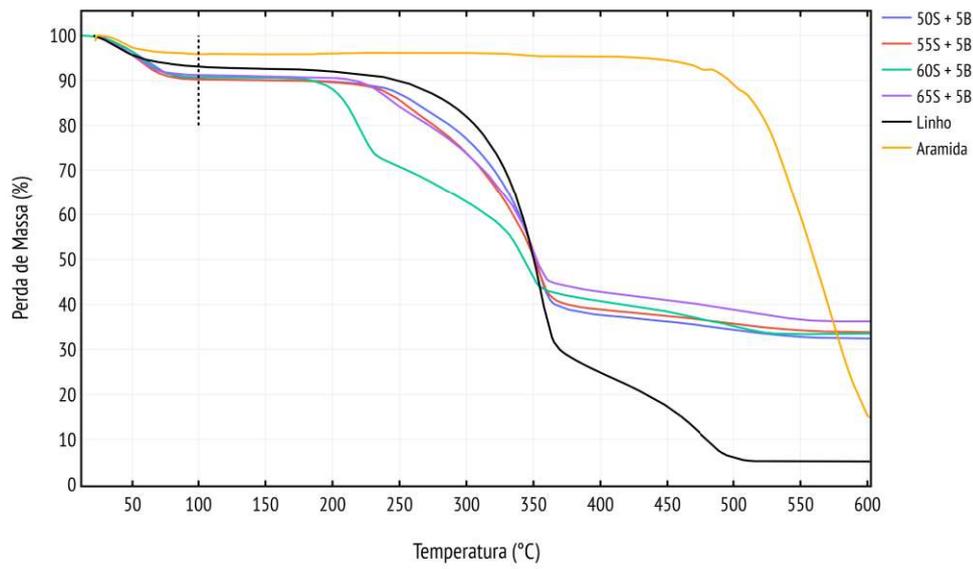
O segundo estágio engloba a ocorrência da degradação máxima nos materiais até 400 °C. Observa-se nesta etapa que a estabilidade térmica dos compósitos fica comprometida com a presença da sílica, a partir dos valores de início da degradação máxima de 184,5 °C para o linho e de 129,8 a 144,5 °C para os compósitos.

Nesta etapa de análise, observa-se, sobretudo, a decomposição de alguns constituintes do linho. Gieparda et al. (2023) já apontaram em pesquisas anteriores a degradação da hemicelulose, graxas, pectina e o início da decomposição da celulose em temperaturas próximas de 170 °C, bem como a completa degradação da celulose em temperaturas próximas de 320 °C. Isto justifica a decomposição máxima observada na região entre 323,5 e 359,1 °C, o que proporcionou uma perda de massa de 68,6% para o linho puro e entre 52,8 e 58,8% para o linho impregnado. Dada a composição da celulose por cadeias semicristalinas e o índice de cristalinidade obtido na Seção 4.2, o percentual de perda se mostra coerente. Ademais, a condensação de ligações Si-OH na superfície das partículas de sílica ocorre em temperaturas próximas de 180 °C, o que também contribui em certo grau para o incremento do percentual de perda de massa (SHARMA et al., 2019).

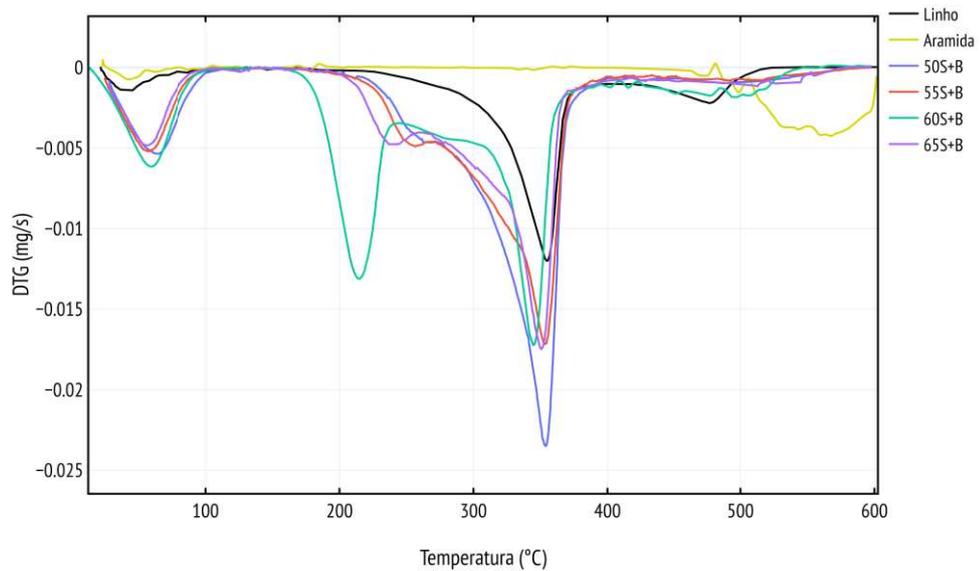
Por fim, o terceiro e último estágio é observado em todos os materiais entre 400 e 600 °C. Para o tecido de linho e os compósitos, a presença de um pico nas curvas de DTG (Fig. 4.11b) nesse intervalo de temperatura significa a degradação final de compostos

naturais. Isto pode ser explicado pela decomposição da lignina, presente no tecido de linho, que sofre uma degradação lenta e proporciona um processo de perda de massa em temperaturas superiores a 350 °C (GIEPARDA et al., 2023). Já no tecido de aramida, a degradação que ocorre a partir de 450 °C pode ser atribuída à decomposição da poliamida aromática Ozen et al. (2022), Naveen et al. (2019). A 600 °C, observa-se uma maior quantidade de material para os compósitos em relação ao linho puro e à aramida devido ao recobrimento presente na fibra, o que auxilia na proteção contra radiação térmica e suprime a liberação de gases combustíveis, além do fato de que as partículas cerâmicas não apresentam perda de massa significativa até 600 °C, o que ocasiona maior acúmulo de material para os compósitos ao final da análise (EHSANIMEHR et al., 2023; GIEPARDA et al., 2023; RAVINDRAN et al., 2022; MARCHI et al., 2023).

Nas Fig. 4.12a e 4.12b, estão apresentadas, respectivamente, as curvas de TG e DTG para o tecido de linho puro e impregnado por sílica e carbetto de boro.



(a)



(b)

Figura 4.12 – Curvas de (a) TG e (b) DTG para os tecidos impregnados com sílica e carbeto de boro.

Os principais pontos observados nos termogramas acima estão resumidos na Tab. 4.5 para melhor discussão dos resultados.

Tabela 4.5 – Resumo dos principais valores e parâmetros analisados na TGA do linho e dos compósitos.

Grupo	Perdas até 100 °C (%)	Início da Degrad. Máx. (°C)	Degrad. Máx. (°C)	Perdas na Degrad. Máx. (%)	Massa em 600 °C (%)
A	4,2	391,2	567,6	57,0	14,9
L	6,9	184,5	354,8	68,6	5,1
L-50SB	9,7	153,6	354,1	52,6	32,4
L-55SB	9,8	147,3	353,9	51,6	33,8
L-60SB	9,3	145,3	344,9	50,3	33,5
L-65SB	8,8	144,1	350,7	48,8	36,2

No primeiro momento, em relação às amostras L-xS, os compósitos apresentaram uma perda de massa semelhante até 100 °C. Da mesma forma que se atribuiu àqueles compósitos, esta fase inicial também tem relação com a perda de umidade presente nos materiais, sobretudo nas fibras naturais que compõem o material conjugado.

Na etapa seguinte, nota-se um acréscimo na estabilidade térmica do material em análise em relação aos do grupo L-xS. As amostras com SiO₂ apresentaram o início da degradação máxima entre 129,8 e 144,5 °C para L-65S e L-50S, respectivamente, enquanto que nos grupos L-xSB esta etapa ocorreu entre 144,1 e 153,6 °C para L-65SB e L-50SB, respectivamente. Apesar da presença do pó cerâmico, verifica-se nesta análise novamente a tendência de maior estabilidade térmica para compostos com menor massa de SiO₂. Isto pode estar relacionado ao domínio em massa do silicato, ainda que o carbetto de boro tenha atuado positivamente no incremento da estabilidade. Embora o uso da cerâmica seja inédito nesta aplicação, nota-se que outros materiais experimentaram maior estabilidade térmica com o uso do carbetto como revestimento (SUN et al., 2019; ZHANG et al., 2021b; WANG et al., 2022).

Na última etapa, novamente nota-se maior massa residual em relação aos grupos analisados anteriormente, dado o maior volume de partículas a partir da adição de carbetto de boro à suspensão impregnada nos tecidos.

4.6 Análise de Viscosidade

A fim de realizar um estudo prévio para a seleção de materiais, a análise de viscosidade ocorreu em duas etapas: primeiramente, analisaram-se os fluidos puros e, posteriormente, a combinação entre o fluido e partículas de SiO₂, com o objetivo de alcançar a maior viscosidade possível. Na Tabela 4.6, estão resumidas as viscosidades dos fluidos puros, etilenoglicol (EG) e PEGs 200, 300 e 400, disponíveis para o trabalho, e os mesmos fluidos com adição de 50% em massa de SiO₂.

Tabela 4.6 – Valores de viscosidade para fluidos puros.

Fluido	Visco. Média (Pa·s)	
	0% SiO ₂	50% SiO ₂
EG	0,012	0,037
PEG 200	0,035	0,276
PEG 300	0,051	0,404
PEG 400	0,061	1,160

Os resultados para os fluidos puros corroboram o que já foi previsto na literatura. O peso molecular dos fluidos realmente influencia na viscosidade do material (MAWKH-LIENG; MAJUMDAR, 2019), o que ratifica o uso inicial do PEG 400 para a produção do fluido que irá impregnar o tecido, já que uma maior viscosidade acarretará, em tese, em diminuição da taxa crítica de cisalhamento e maior formação de hidroaglomerados, conforme elucidado na Seção 3.2.3. Além disso, nota-se uma variação considerável entre o fluido puro e o fluido com 50% de sílica adicionado, sobretudo para o PEG 400, o qual atingiu um aumento de viscosidade de cerca de 19 vezes, enquanto os demais não superaram um aumento de 8 vezes na viscosidade do seu respectivo fluido puro. Dessa forma, esses valores fornecem um indício de potencial aumento do atrito entre os fios dos tecidos impregnados.

Na Tab. 4.7, estão apresentados os resultados de viscosidade máxima obtidos para todos os fluidos compostos.

Tabela 4.7 – Viscosidade máxima atingida pelos fluidos estudados sob taxa de cisalhamento de 1 a 1000 s⁻¹.

Amostra	Visco. Máx. (Pa·s)
50S	1,16
55S	10,57
60S	20,76
65S	33,88
50SB	32,61
55SB	41,33
60SB	47,14
65SB	84,63

Os resultados reológicos indicaram que os aditivos de fato imprimiram uma evolução no perfil de viscosidade das suspensões de forma substancial. Nota-se que o perfil de viscosidade aumenta à medida que a quantidade de aditivos na suspensão cresce. De modo geral, os grupos xSB obtiveram as maiores viscosidade, com exceção do grupo 50SB, que teve a viscosidade menor que o grupo 65S. A viscosidade alcançou um crescimento vertiginoso de aproximadamente 10 vezes entre 50S e 55S, enquanto que nos grupos com carbetto de boro, entre 50SB e 65SB, o incremento não atingiu 3 vezes o valor. Ao analisar

a diferença de viscosidade entre a adição de partículas de B_4C , nota-se que a diferença de maior proporção ficou entre os grupos 50S e 50SB, cerca de quase 30 vezes. Esse comportamento pode ser explicado pelo fortalecimento da adesão que ocorre interpartícula, além da diminuição da distância relativa entre as partículas, o que acarreta na restrição do movimento da partícula na suspensão (MAWKHLIENG; MAJUMDAR; LAHA, 2020; GÜRGEN; KUŞHAN; LI, 2017; GÜRGEN; LI; KUŞHAN, 2016; ŻUROWSKI et al., 2021; ZHAO et al., 2022).

Na Fig. 4.13 está representado o perfil reológico das amostras em estudo.

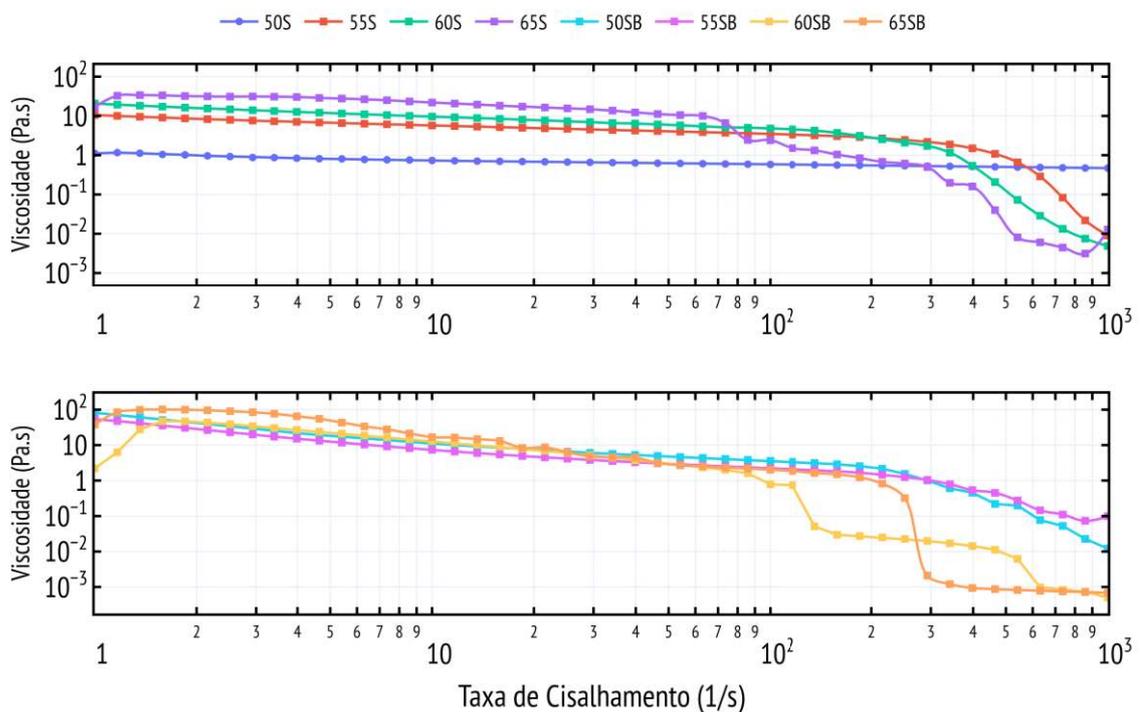


Figura 4.13 – Comportamento viscoso dos fluidos estudados.

Ao analisar o comportamento reológico do material, observa-se um desenvolvimento linear do fluido ao início do teste. O grupo 50S, até 1000 s^{-1} , apresentou a viscosidade linear, indicando uma fração de partida para as análises. Sob taxas por volta de 300 s^{-1} , observa-se um aumento na tendência à fluidificação de todos os materiais na proporção que se incrementa as partículas de sílica. O início da fluidificação de 55S se inicia em torno de 340 s^{-1} ; e de 60S, em torno de 292 s^{-1} . Já o grupo 65S apresenta o início em torno de 99 s^{-1} . A partir da adição de carbetto de boro, este início sofre uma ligeira modificação: para 55SB, o comportamento se inicia em 184 s^{-1} ; de 60SB, em torno de 215 s^{-1} ; e de 65SB, em 158 s^{-1} .

Para os fluidos 65S, mostrado isoladamente na Fig. 4.14, se observa uma tendência ao espessamento ao final da análise, a partir do limite de cisalhamento em torno de 825 s^{-1} . De fato, tal comportamento é consistente comparado a trabalhos anteriores, já que a

taxa de cisalhamento crítica tende a diminuir com o aumento da carga de partículas no dispersante dado o menor módulo de força necessário para superar a tendência à repulsão das partículas, formando assim cadeias aglomerados pelo material, a partir da justificativa à luz da teoria do hidroaglomerado. Por outro lado, comparativamente, o fluido 65SB não apresentou comportamento semelhante.

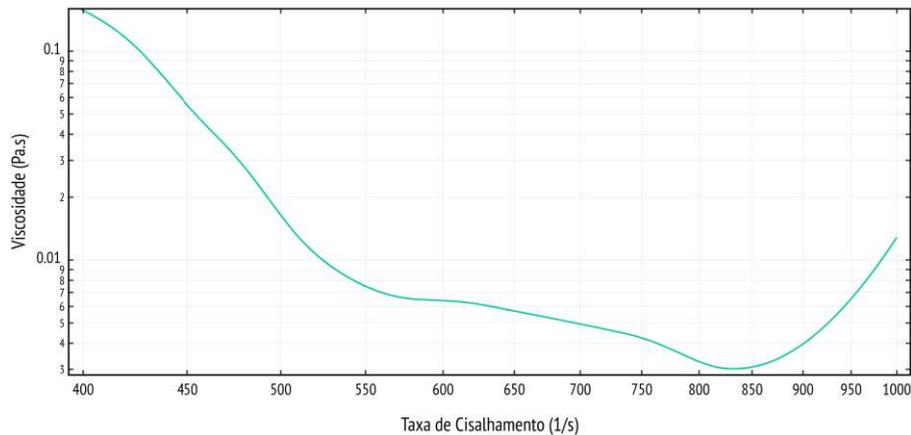


Figura 4.14 – Comportamento reológico do fluido 65S.

Na Fig. 4.15 está representada uma mistura de PEG 400 com os pós de sílica e carbetto de boro para visualização da distribuição. A partir do que foi observado anteriormente, a presença do carbetto de boro teve influência tanto na viscosidade do fluido quanto no comportamento reológico do material.

De início, a presença de um volume considerável do aditivo, dado a sua relativa menor massa específica, acarretou em maior volume de material, ainda que represente somente 5% em massa do FAd. A partir da maior concentração volumétrica de sólidos, isto acarretou em maior viscosidade.

Por outro lado, a tendência fluidificante, dado o fato de que diâmetros de partícula maiores tendem a proporcionar menores taxas de cisalhamento crítica, pode ter relação com a presença de partículas de B_4C na formação de aglomerados de sílica. Ainda que aglomerados de B_4C atinjam diâmetros de cerca de 200 nm, esse comportamento faz com que a extensão dos aglomerados de sílica seja limitada e, assim, o espessamento do fluido seja dificultado, o que acarreta em fluidificação do FAd (GÜRGEN; LI; KUŞHAN, 2016; MAWKHLIENG; MAJUMDAR, 2019). Além disso, a combinação de diferentes tamanhos de partículas, aliado ao formato diferente dos pós, favorece o afilamento do fluido devido a uma estrutura mais ordenada das partículas no líquido polimérico na direção do fluxo (OLHERO; FERREIRA, 2004).

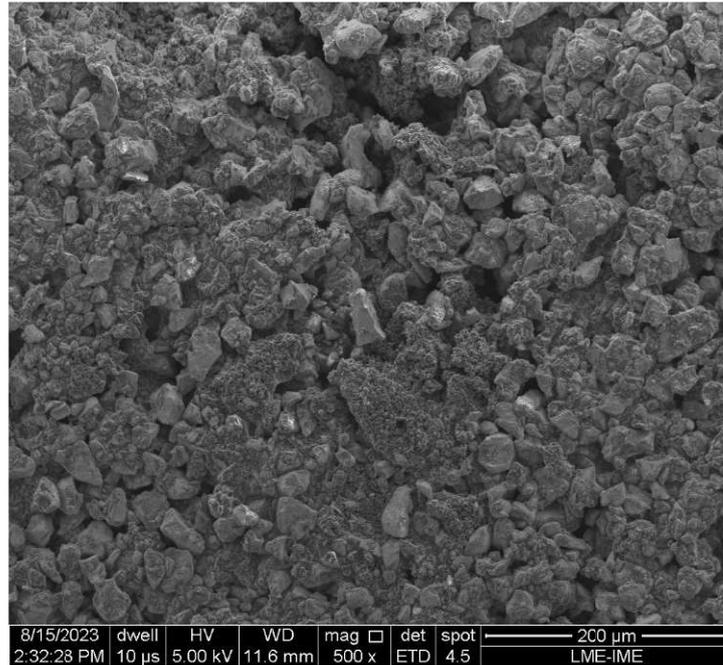


Figura 4.15 – Mistura de partículas de sílica e carbeto de boro (500x).

4.7 Ensaio de Tração - *Yarn Pullout*

Na Figura 4.16 está apresentado a curva característica do tecido de linho puro submetido ao arrancamento de fios da trama.

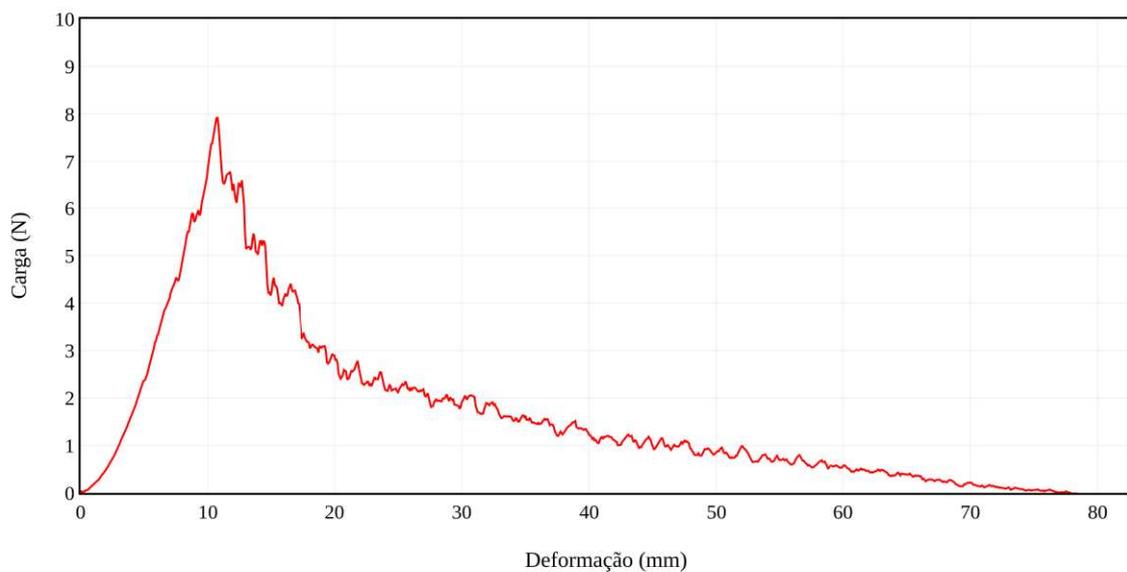


Figura 4.16 – Resultados de ensaio de arrancamento de fios para o tecido de linho puro.

No gráfico em tela, é possível notar que os tecidos de linho puro apresentam dois regimes de comportamento dos fios. O primeiro, desde o início do teste até o pico mais

alto, corresponde a uma zona estática do fio. Ou seja, o fio tende a seguir a direção da força aplicada e a superar o atrito estático devido à presença da trama, atingindo um valor máximo. O início da segunda fase é marcado pelo ponto de máxima na curva, representando o atrito estático máximo. A partir desse ponto, o fio começa a se movimentar pela trama. Os diversos picos presentes nessa segunda zona formam o movimento conhecido como *stick-slip*, que reflete o percurso que o urdume faz sob e sobre a trama, reduzindo gradativamente à medida que o número de tramas que cruzam o fio diminui.

Na Figura 4.17 estão apresentadas as curvas características de arrancamento de fio para os compósitos em estudo.

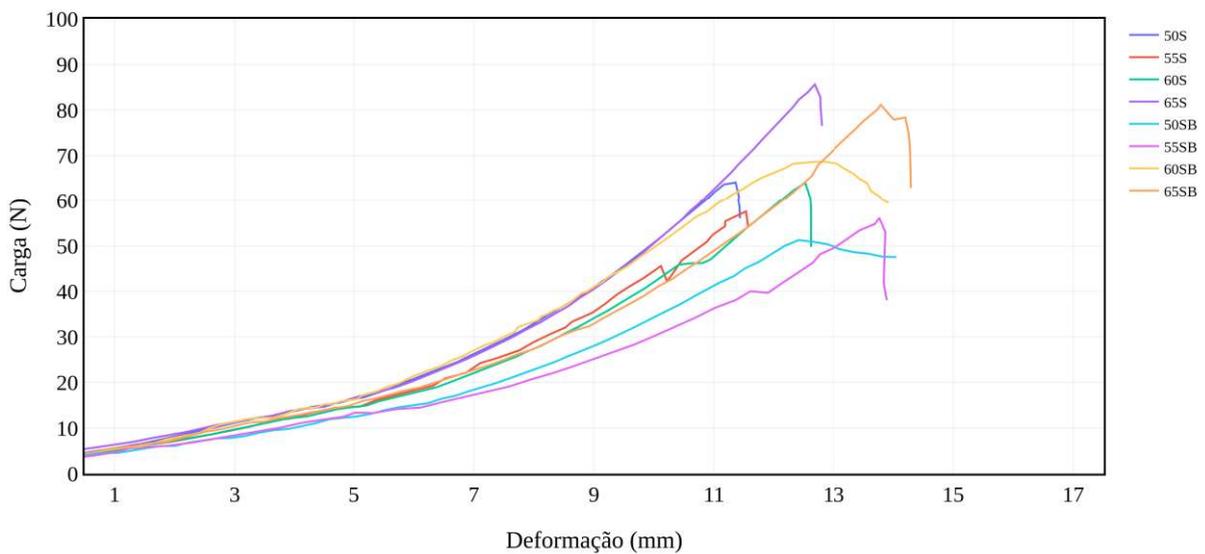


Figura 4.17 – Curvas características observadas no ensaio de arrancamento de fios para os compósitos em estudo.

Nos compósitos, inicialmente, observa-se uma diferença significativa na inclinação das curvas entre os tecidos impregnados e o tecido puro, como apresentado na Figura 4.16. Esse intervalo do gráfico está associado à movimentação do tecido na direção do esforço e indica uma deformação sem rompimento dos fios, evidenciada pelo recrutamento das tramas devido aos intertravamentos mecânicos (BILISIK, 2012).

Posteriormente, notou-se que, em todos os tecidos impregnados, o fio rompeu-se antes de que o urdume se deslocasse pela trama.

Do ponto de vista mecânico, ficou evidente que os fluidos viscosos efetivamente aumentaram o atrito entre os fios do tecido, somado ao pré-tensionamento causado pelas partículas, além dos intertravamentos mecânicos na trama, resultando em uma maior necessidade de dissipação de energia antes do rompimento total (NASSER et al., 2019; STEINKE; SODANO, 2021; GÜRGEN; KUŞHAN; LI, 2017). A ruptura do fio é explicada

pelo aumento da concentração de tensão devido à presença das partículas, conforme observado na Seção 4.4 e demonstrado na Figura 4.18 a seguir, com setas em vermelho, levando à imobilização dos fios e ao seu rompimento (ZENG; TAN; SHIM, 2006). Além disso, os tecidos de FNLs apresentam menor controle tecnológico na fabricação (JOST et al., 2014; YE et al., 2019; SALMAN et al., 2015). Isto, somado à dureza das partículas, que favorece o desbaste das fibras que compõem os fios da trama e urdume. Portanto, defeitos nos fios, variações nas propriedades inerentes às FNLs somada à presença de partículas de alta dureza podem influenciar no desempenho do material, comprometendo a uniformidade dos valores de resistência (MAWKHLIENG; MAJUMDAR, 2019; STACHOWIAK; STACHOWIAK, 2001; THAKARE et al., 2012).

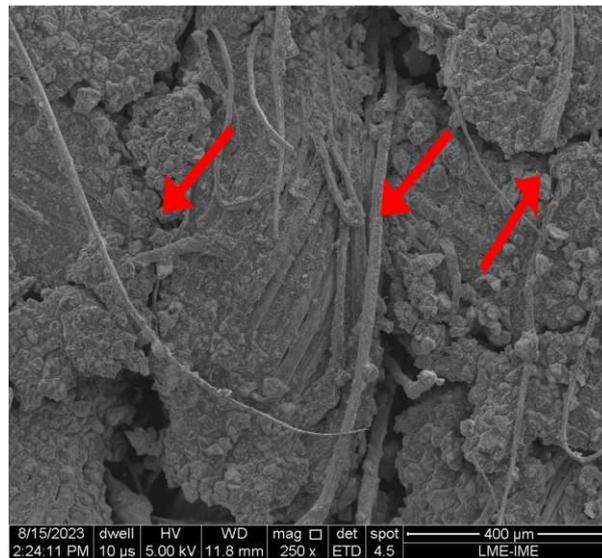


Figura 4.18 – Aspecto superficial de uma amostra do grupo L-55SB. Setas em vermelho apresentam pontos de concentração de tensão (250x).

Na Tab. 4.8 relata-se os valores médios obtidos no ensaio de arrancamento de fios dos tecidos dos grupos analisados neste trabalho.

Tabela 4.8 – Valores médios de carga máxima de arrancamento de fios.

Amostras	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	$Def_{m\acute{a}x}$ (mm)
A	$26,0 \pm 4,8$	$8,4 \pm 0,9$
L	$8,5 \pm 3,2$	$59,5 \pm 26,6$
L-50S	$61,4 \pm 14,2$	$10,6 \pm 0,9$
L-55S	$58,4 \pm 6,6$	$11,4 \pm 0,5$
L-60S	$63,0 \pm 8,9$	$12,6 \pm 0,5$
L-65S	$80,0 \pm 6,0$	$12,5 \pm 1,4$
L-50SB	$57,6 \pm 9,7$	$12,8 \pm 1,3$
L-55SB	$59,4 \pm 7,3$	$13,0 \pm 0,7$
L-60SB	$68,8 \pm 13,4$	$12,0 \pm 1,0$
L-65SB	$75,2 \pm 4,7$	$12,6 \pm 1,3$

Os valores obtidos para os compósitos L-xS e L-xSB podem ser visualizados graficamente na Fig. 4.19 para comparação.

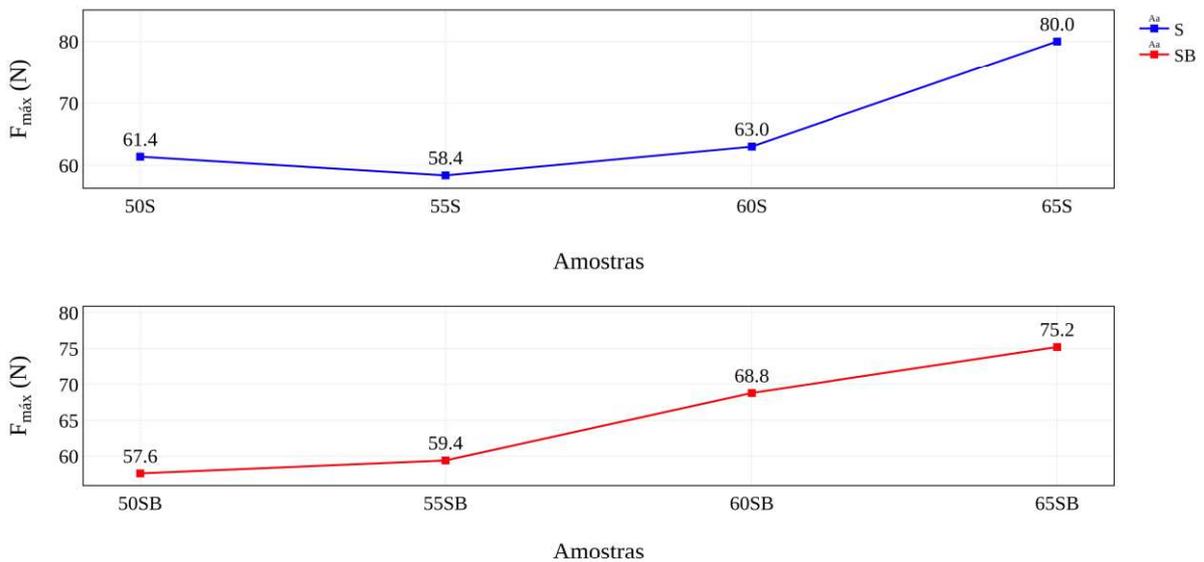


Figura 4.19 – Representação gráfica dos valores médios obtidos para os compósitos em análise.

Inicialmente, observa-se que, para ambos os grupos, houve um aumento na resistência da trama ao arrancamento em comparação com o tecido de linho puro, à medida que se adicionou uma maior proporção de fase dispersa no fluido viscoso. Uma exceção visível a esse padrão ocorreu nos grupos com 55% em massa de sílica, onde foi observada uma queda significativa de cerca de 5% nos resultados. O grupo com sílica apresentou um aumento de aproximadamente 30% na resistência à fricção entre as amostras L-50S e L-65S, destacando-se o incremento de cerca de 27% entre L-60S e L-65S, que pode estar relacionado com um mecanismo a mais de intertravamento mecânico, como o espessamento do fluido. Já o grupo com sílica e carбето de boro demonstrou uma melhoria de aproximadamente 31% entre as amostras L-50SB e L-60SB, com uma variação máxima de 15% entre as amostras do grupo L-xSB.

A fim de analisar mais especificamente as diferenças observadas nos valores médios de máxima fricção entre fios dos grupos impregnados apenas com sílica, realizou-se a análise de variância (ANOVA) e o Teste de Tukey. A Tabela 4.9 apresenta a análise para os grupos de amostras impregnados com sílica.

Tabela 4.9 – Análise de variância dos resultados de Yarn Pullout do grupo L-xS.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F_{calculado}	F_{crítico}
Tratamento	3	1417,8	472,6	5,2	3,2
Resíduo	16	1448,4	90,5		
Total	19	2866,2			

Deste modo, como $F_{\text{calculado}}$ é maior que $F_{\text{crítico}}$, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que ocorreram diferenças nos resultados dos quatro grupos de compósitos. Para analisar precisamente as diferenças entre as médias de cada parâmetro, realizou-se o Teste de Tukey. A partir dos cálculos do teste, pôde-se determinar a DMS para a análise, que foi de 17,23. A Tab. 4.10 mostra as comparações entre as médias.

Tabela 4.10 – Comparação das médias de Yarn Pullout dos grupos L-xS a partir do Teste de Tukey.

Amostra	50S	55S	60S	65S
50S	0,0	3,0	1,6	18,6
55S	3,0	0,0	4,6	21,6
60S	1,6	4,6	0,0	17,0
65S	18,6	21,6	17,0	0,0

A partir da comparação entre as médias, nota-se que houve uma diferença expressiva entre os grupos L-65S e os grupos L-50S e L-55S. Ainda que os resultados obtidos para L-65S e L-60S não se diferenciaram significativamente, cabe destacar que a variação dos parâmetros está em valores próximos ao DMS calculado.

Similar ao grupo impregnado com sílica, a Tabela 4.11 mostra a análise para os grupos de amostras impregnados com SiO_2 e B_4C .

Tabela 4.11 – Análise de variância dos resultados de Yarn Pullout do grupo L-xSB.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F_{calculado}	F_{crítico}
Tratamento	3	1021,7	340,5	3,9	3,2
Resíduo	16	1402,0	87,6		
Total	19	2423,7			

Deste modo, como $F_{\text{calculado}}$ é maior que $F_{\text{crítico}}$, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que ocorreram diferenças nos resultados dos quatro grupos de compósitos. Para que seja possível analisar precisamente as diferenças entre as médias de cada parâmetro, também realizou-se o Teste de Tukey. A partir dos cálculos do teste, pôde-se conhecer a DMS para a análise, que foi de 18,96. A Tabela 4.12 mostra as comparações entre as médias.

Tabela 4.12 – Comparação das médias de Yarn Pullout dos grupos L-xSB a partir do Teste de Tukey.

Amostra	50SB	55SB	60SB	65SB
50SB	0,0	1,8	11,2	17,6
55SB	1,8	0,0	9,4	15,8
60SB	11,2	9,4	0,0	6,4
65SB	17,6	15,8	6,4	0,0

A partir da comparação entre as médias, nota-se que as amostras não alcançaram a diferença significativa a partir do DMS calculado. Entretanto, como na análise anterior, cabe destacar que as amostras L-65SB apresentaram a média próxima do limite computado quando comparado aos grupos L-50SB e L-55SB, o que indica uma resistência sensivelmente superior ao arrancamento.

No que se refere aos grupos L-60S e L-65S em relação às amostras impregnadas com SiO₂ e aos grupos impregnados com SiO₂ e B₄C, a Tabela 4.13 mostra a análise entre aquele grupo de sílica e esse conjunto de amostras com sílica e carbetto.

Tabela 4.13 – Análise de variância dos resultados de Yarn Pullout do grupo L-xS.

Causas de Variação	GL	SQ	QM	F _{calculado}	F _{crítico}
Tratamento	5	2004,7	400,9	5,2	2,9
Resíduo	24	1868,0	77,8		
Total	29	3872,7			

Como F_{calculado} é maior que F_{crítico}, pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que ocorreram diferenças nos resultados dos grupos de compósitos analisados. Para que seja possível analisar precisamente as diferenças entre as médias de cada parâmetro, novamente adotou-se o Teste de Tukey. A partir dos cálculos do teste, pôde-se conhecer a DMS para a análise, que foi de 17,24. A tabela 4.14 mostra as comparações entre as médias.

Tabela 4.14 – Comparação das médias de Yarn Pullout dos grupos analisados a partir do Teste de Tukey.

Comp.	60S	65S	50SB	55SB	60SB	65SB
60S	0,0	17,0	5,4	3,6	5,8	12,2
65S	17,0	0,0	22,4	20,6	11,2	4,8
50SB	5,4	22,4	0,0	1,8	11,2	17,6
55SB	3,6	20,6	1,8	0,0	9,4	15,8
60SB	5,8	11,2	11,2	9,4	0,0	6,4
65SB	12,2	4,8	17,6	15,8	6,4	0,0

A partir da comparação entre as médias, nota-se que as amostras L-65S apresentaram um desempenho relevante entre alguns grupos estudados. Comparado aos grupos L-50SB e L-55SB, aquele conjunto de sílica apresentou uma diferença significativa bem acima do DMS. Por outro lado, observa-se que L-65S apresentou desempenho estatisticamente semelhante a L-60SB e L-65SB. Ainda assim, a discrepância de valores se manteve com relevância em uma das amostras. Entre L-60S e L-65S, a diferença se mostrou próxima sensivelmente abaixo do DMS.

Na Tab. 4.15 estão apresentados os maiores valores obtidos de carga máxima no ensaio de *yarn pullout* comparados a outros materiais analisados.

Tabela 4.15 – Comparação da carga máxima de *Yarn Pullout* em outros materiais.

Amostras	Fmáx (N)	Ref.
A	26,0	
L	8,5	
L-60S	63,0	P.A.
L-65S	80,0	
L-60SB	68,8	
L-65SB	75,2	
Kevlar 706	8,3	
Kevlar706 + 45% SiO₂	18,1	Khodadadi et al. (2019)
Twaron	1,5	Gurgen et al. (2017)
Twaron + 20% SiO₂ + 45% SiC	15,0	

Inicialmente, nota-se que a adição de FAd nos materiais têxteis variados reforçou a fricção dos fios do tecido. Nos tecidos de Kevlar 706, alcançou-se pouco mais que o dobro da carga máxima ao adicionar cerca de 45% de nanopartículas de sílica no tecido. Já no Twaron, observou-se um incremento de cerca de 10 vezes no arrancamento com a adição de 20% em massa de sílica e 45% em massa de carbetto de silício. Nos valores de carga máxima alcançados com linho, mostraram-se expressivamente mais elevados que os demais tecidos. Na mesma proporção que o Twaron, observou-se que 65% em massa de sílica acarretou em um incremento de cerca de 10 vezes no arrancamento do fio em relação ao linho puro. Entretanto, comparado à aramida pura adotada como referência, esse aumento se deu em cerca de 3 vezes.

De fato, ao analisar os valores obtidos pelos autores listados na tabela, nota-se que ambos conseguiram que os fios fossem arrancados sem se romperem, conforme Fig. 4.20 para (A) Khodadadi et al. (2018) e (B) Gürgen, Kuşhan e Li (2017). Enquanto isso, no linho estudado, a resistência à tração do fio do tecido, aliado ao atrito estático da superfície dos fios, direcionou a carga máxima descrita para seu arrancamento, conforme estudos

anteriores da fibra elementar de linho (SOATTHIYANON; CROSKY; HEITZMANN, 2022).

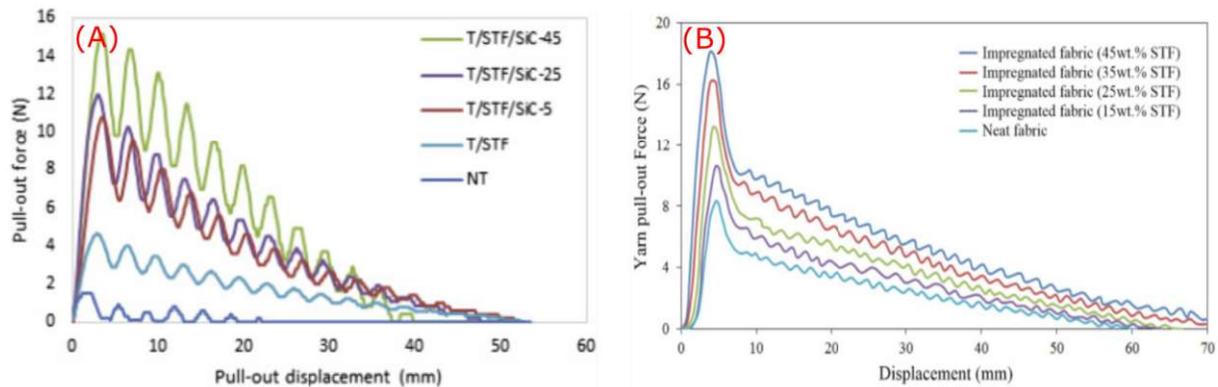


Figura 4.20 – Resultado de yarn pullout obtidos nos trabalhos de (A) Khodadadi et al. (2018) e (B) Gürgen, Kuşhan e Li (2017).

Fonte: Adaptado de Khodadadi et al. (2018) e Gürgen, Kuşhan e Li (2017).

4.8 Análise de Absorção de Impacto Balístico

Os testes balísticos foram executados nos tecidos de aramida, de linho puro e de linho impregnado com o fluido estudado neste trabalho. Os resultados de absorção da energia do impacto balístico estão apresentados na Tab. 4.16 para todos os grupos.

Tabela 4.16 – Resultados de absorção de energia de impacto balístico nos grupos estudados e publicações recentes.

Amostras	E_{abs} (J)	V_L (m/S)	Ref.
A	$18,36 \pm 2,18$	60,01	P.A.
3L	$15,51 \pm 1,34$	55,15	
3L-50S	$15,24 \pm 0,18$	54,66	
3L-55S	$16,11 \pm 4,53$	56,20	
3L-60S	$17,63 \pm 1,46$	58,79	
3L-65S	$17,53 \pm 3,58$	58,63	
3L-50SB	$15,37 \pm 2,76$	54,90	
3L-55SB	$12,72 \pm 0,86$	49,94	
3L-60SB	$14,94 \pm 2,38$	54,12	
3L-65SB	$15,51 \pm 2,02$	55,14	
3 Juta	1,31	-	Mahesh et al. (2022)
3 Juta-30% SiO ₂	10,77	52	
3 Juta-40% SiO ₂	13,71	54	
2 Kevlar-15% SiO ₂	10,76	-	Khodadadi et al. (2018)
2 Kevlar-25% SiO ₂	21,23	-	

Os resultados apresentam uma melhoria no desempenho balístico em termos de absorção de energia em boa parte dos grupos de tecido de linho impregnado com SiO₂

em relação ao tecido de linho puro. Os grupos impregnados com 60% e 65% de SiO_2 foram os que apresentaram melhor desempenho entre os materiais estudados, alcançando cerca de 14% de acréscimo na dissipação de energia cinética. Nos grupos aditivados com B_4C , apenas se notou desempenho comparável ao tecido puro, o que foi o caso do linho impregnado com 65% de SiO_2 e 5% de B_4C . Logo no ensaio de *Yarn Pullout*, verificou-se um indício desta tendência, sobretudo para os grupos 65S, o qual apresentou resistências relevantes ao arrancamento de fios, o principal fator de dissipação de energia, representando maior recrutamento da trama do tecido. Ademais, na análise de viscosidade, foi apontado uma tendência de espessamento dos fluidos 65S, o que pode acrescentar no mecanismo de dissipação de energia do conjunto. Em termos de velocidade limite, observa-se a mesma tendência de superioridade das amostras 3L-60S e 3L-65S, ainda que com destacada sensibilidade na diferença. Nota-se que obteve-se um incremento sensível de 6% em relação ao linho puro, ainda que se apresente 2% abaixo da aramida. Ainda assim, o grupo 3L-60S se mostrou cerca de 9% superior ao obtido para juta impregnada com 40% de sílica.

Ainda que a adição de carбето de boro ao FAd tenha proporcionado maiores valores de viscosidade máxima, como observado na Seção 4.6, isso não se traduziu em desempenho mecânico. De fato, estudos anteriores apontaram que, devido à menor massa específica das partículas de B_4C , sua adição, mesmo em proporções baixas, resulta em um volume considerável de partículas na mistura (GÜRGEN; LI; KUŞHAN, 2016). Isso proporciona valores mais altos de viscosidade em baixas taxas de cisalhamento, mas propicia maiores concentrações de tensão nas fibras do tecido, maior abrasão entre os fios e as partículas, além de um comportamento fluidificante em taxas de cisalhamento mais altas, como o que ocorre em um impacto balístico, dado o comprometimento da extensão de hidroaglomerados (MAWKHLIENG; MAJUMDAR; LAHA, 2020).

A Fig. 4.21 apresenta a diferença entre os corpos de prova L-55S e L-55SB testados. Na Fig. 4.21(A), a seta vermelha aponta um dos diversos pontos de vazios entre os fios do tecido, mesmo que ele esteja impregnado com sílica. Entretanto, ao adicionar a porcentagem de carбето de boro, na Fig. 4.21(B), esses vazios diminuem drasticamente, como apontado pela seta amarela, levando a um maior atrito estático (conforme observado na Seção 4.7).

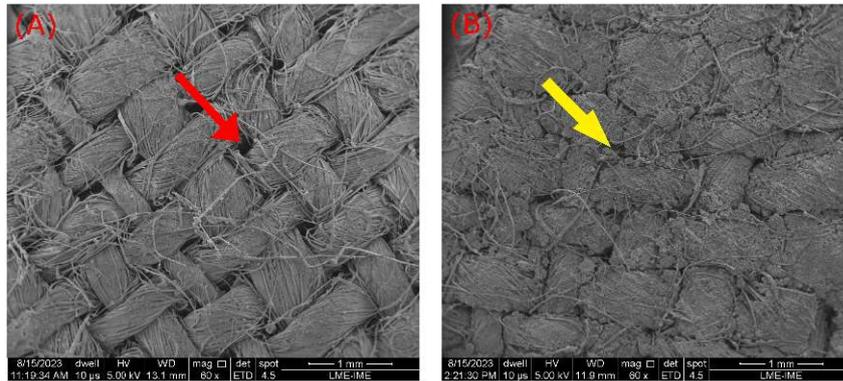


Figura 4.21 – (A) Vazios presentes entre os fios numa amostra L-xS e (B) vazios preenchidos com partículas de B_4C (60x).

Numericamente, constatou-se uma evolução no desempenho balístico do linho impregnado em comparação com a juta impregnada. Observa-se que Mahesh, Harursampath e Mahesh (2022), em um conjunto de 3 camadas de juta impregnadas com um FAd de 40% em nano sílica, atingiu um desempenho inferior até mesmo ao grupo 3L-50S. Entretanto, dado o baixo desempenho das camadas de juta puras, calcula-se que o incremento no desempenho da FNL submetida ao processo de impregnação foi consideravelmente mais relevante no trabalho de Mahesh, Harursampath e Mahesh (2022), já que saltou de 1,31 J para 13,71, para 3-Juta e 3-Juta-40% SiO_2 , respectivamente. Também cabe ressaltar que os valores obtidos neste trabalho apresentaram comportamento mais próximo ao de duas camadas de Kevlar impregnado com 25% de SiO_2 desenvolvido por Khodadadi et al. (2018), o que configura um progresso nos estudos da utilização das FNLs em substituição aos tecidos balísticos.

Na Fig. 4.22 apresenta-se o aspecto superficial das amostras testadas, inicialmente os tecidos de aramida e de linho puro.

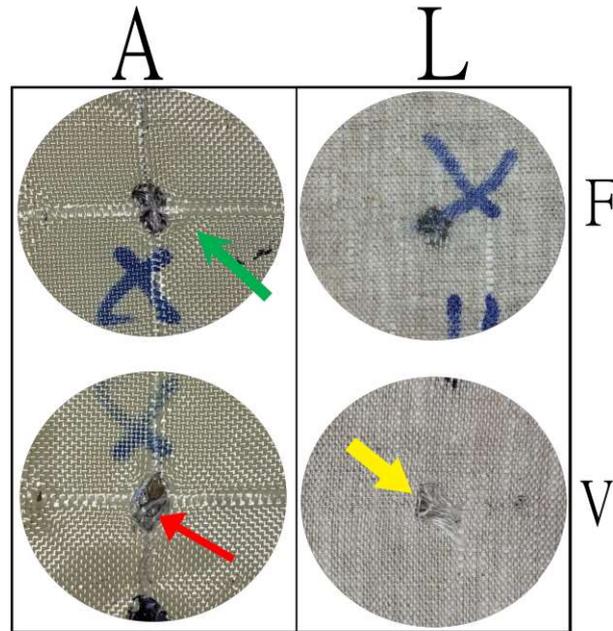


Figura 4.22 – Aspecto dos tecidos de aramida e de linho sob impacto balístico, frente (f) e verso (v).

Diversas são as formas de dissipação de energia de um tecido, conforme já comentado na Seção 2.4. No caso do tecido de aramida, observou-se um comportamento esperado: relevante presença de fios desfiados na região de perfuração após impacto (seta vermelha) e a região primária de tensionamento de fios, em forma cruzada (seta verde). Esse último comportamento está diretamente relacionado à incapacidade de recrutamento de fios do tecido na região adjacente, devido ao baixo atrito entre fios para que compartilhe a dissipação de energia no material (TAN; TAY; TEO, 2005).

Já no tecido de linho, nota-se também a presença de fios deslocados após o impacto do projétil, em menor escala (seta amarela), apresentando sinais de desfiamentos e leve desconfiguração da trama, tratado como "efeito janela" (TAN; TAY; TEO, 2005). Na região de impacto (frente), não se observou sinais de *pullout* que proporcionasse a configuração cruzada da aramida. Isso indica uma maior ativação de uma região secundária em comparação à aramida. De fato, como foi observado na Seção 4.4, os fios do tecido de linho apresentam maior rugosidade e o tecido apresenta maior gramatura, o que pode estar relacionado a um maior intertravamento mecânico pelo tecido e pontos de transferência de energia, mesmo que não apresente a mesma resistência à tração, conforme observado também na Seção 4.7, acarretando em menor absorção de energia com maior área de ativação. Aspecto semelhante também foi observado em tecido de juta (MAHESH; HARURSAMPATH; MAHESH, 2022).

Na Fig. 4.23 está apresentada o aspecto superficial dos compósitos estudados.

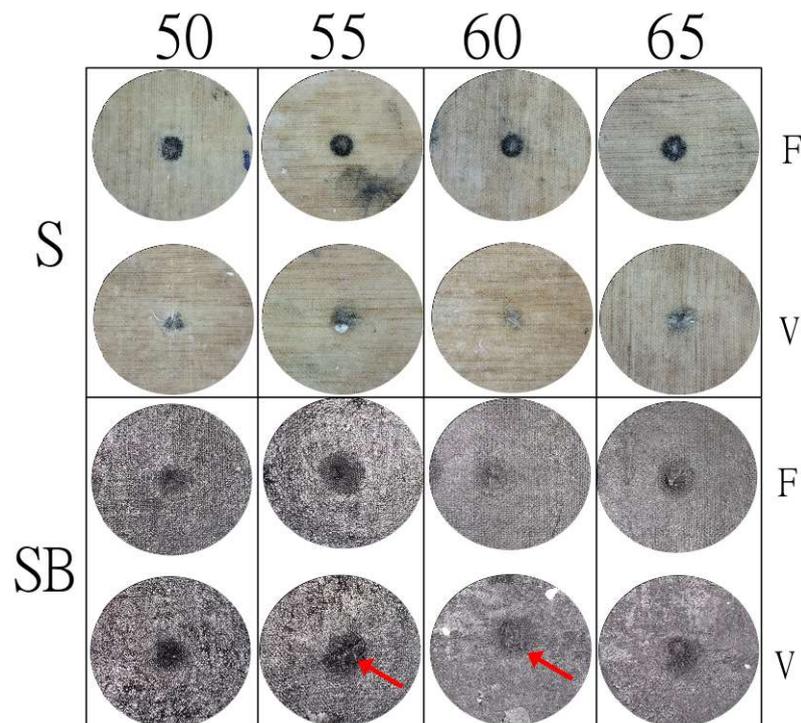


Figura 4.23 – Aspecto dos tecidos compósitos sob impacto balístico, frente (f) e verso (v).

No caso dos compósitos impregnados com FAd com sílica, o desfiamento e o efeito janela não são observados. O atrito incrementado pelo fluido induz a uma contenção do movimento dos fios, o que leva a uma maior ativação da região secundária em relação ao linho puro e, conseqüentemente, à manutenção da trama após o impacto. Além disso, esse comportamento se traduz em uma menor área danificada pelo projétil no compósito. Na Fig. 4.24, está apresentada a movimentação de fios de linho impregnado com 60% de sílica.

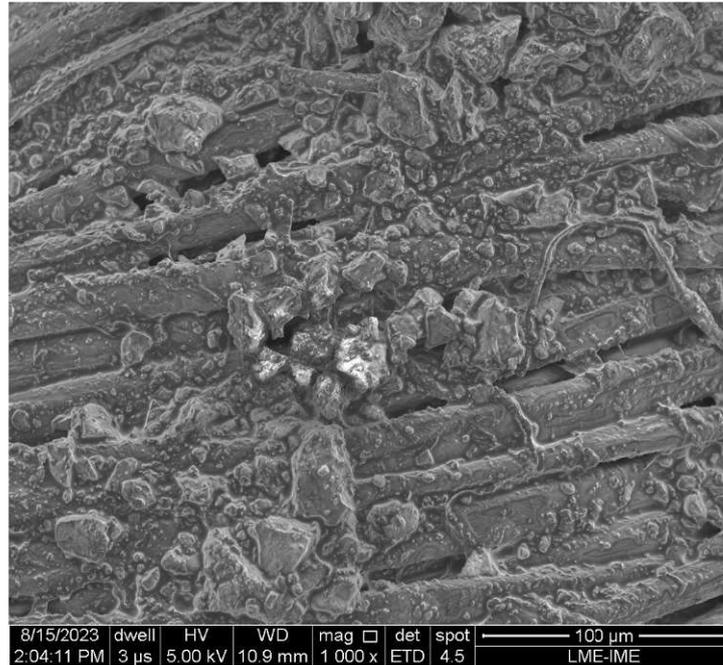


Figura 4.24 – Tecido de linho impregnado com 60% de sílica com intertravamento mecânico acionado (1000x).

Nos compósitos com carbetos de boro, esta tendência não foi observada na mesma medida: nota-se uma maior região de impacto do projétil nos tecidos (verso), além da presença de desfiamentos esparsos da trama, principalmente em 55SB e 60SB (setas vermelhas). A partir do que já foi observado na Seção 4.3, na qual se retratou maior densidade superficial e espessura média neste grupo, além de menor valor de absorção de energia, nota-se que as amostras impregnadas com B_4C sofreram as consequências da rigidez do material. Isto acarreta em menor tenacidade do conjunto, o que se traduz em uma deformação localizada e menor volume de tecido recrutado no impacto, ainda que um certo grau de rigidez seja favorável contra uma indentação maior. Na Fig. 4.25 está representado o tecido de linho, movimentado pelo impacto, impregnado com sílica e carbetos de boro

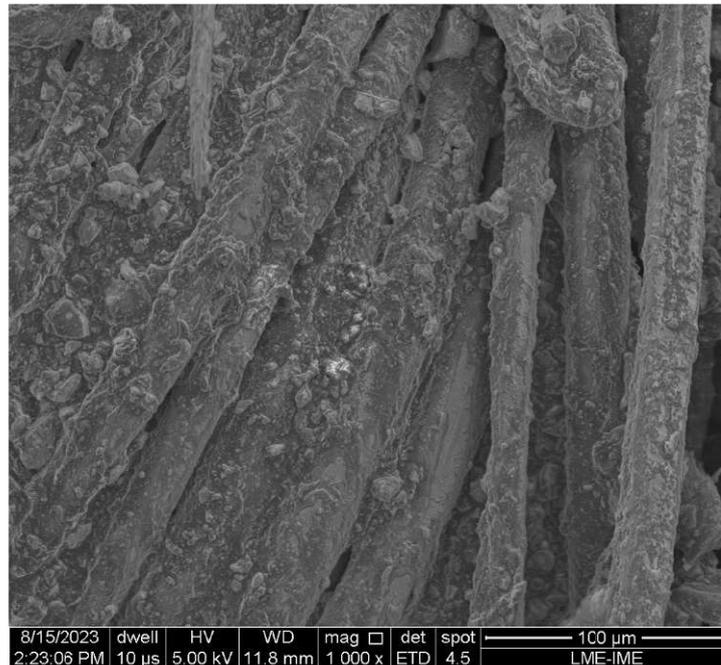


Figura 4.25 – Tecido de linho impregnado com sílica e carbeto de boro com intertravamento mecânico acionado (1000x).

Na Fig. 4.26 estão representados os valores de EAE para os materiais compósitos em estudo e comparação com o parâmetro obtido por Mahesh, Harursampath e Mahesh (2022).

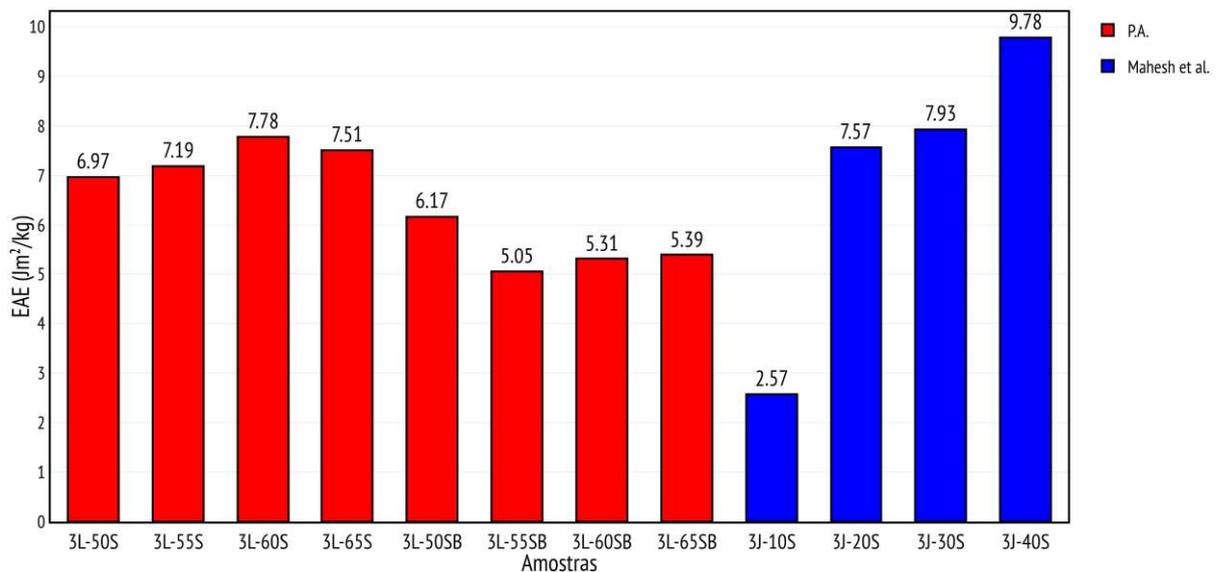


Figura 4.26 – Comparação da EAE dos compósitos estudados no trabalho e obtidos por Mahesh, Harursampath e Mahesh (2022).

Visualmente se observa que o EAE dos grupos com sílica foram maiores que aqueles impregnados com carbeto de boro. Entre todos os grupos analisados, aqueles impregnados com 60% de SiO₂ foi maior em aproximadamente 11, 8 e 3,6% em comparação com

compósitos com 50, 55 e 65% de sílica, respectivamente. Comparando com os pares de mesma porcentagem em massa, o grupo 3L-60S apresentou EAE cerca de 46% superior ao grupo 3L-60SB, e o grupo 3L-65S apresentou EAE cerca de 39% superior ao grupo 3L-65SB. Nos grupos aditivados com B_4C , os grupos 3L-55SB, 3L-60SB, 3L-65SB foram os compósitos com menores acréscimos de EAE. Ainda que tenha obtido um desempenho balístico próximo ao do linho puro, a adição de FAd com B_4C não foi eficaz pelo desempenho e sua densidade, o que leva a deprender que o uso de grupo 3L-60S e 3L-65S se mostram razoáveis.

Ao contrastar com as amostras de juta, percebe-se um comportamento relativamente superior. Ao comparar os grupos 3L-60S e 3J-30S, nota-se que o grupo de juta superou a EAE em apenas 2%. Ainda que a discrepância seja diminuta, o fato de se ter adotado apenas 30% em massa de nano sílica o torna de maior conveniência, conduzindo a seleção de material a termos de custo de produção das partículas de sílica e obtenção das fibras naturais.

5 CONCLUSÃO

Por meio dos resultados obtidos e do comportamento visualizado nos testes, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- Os resultados de FTIR corroboram a presença de grupos característicos da FNL em análise, bem como com as fases que compõem os compósitos. Nas análises por DRX, o linho empregado na produção do tecido apresentou cerca de 60,7 % de cristalinidade, enquanto que a aramida apresentou cerca de 72,0%. A FNL apresenta um valor de cristalinidade aproximado ao obtido por algumas outras fibras naturais que alcançaram comportamento mecânico relevante.
- O tecido de linho apresentou uma densidade superficial superior ao do tecido de aramida, o que se traduz em maior volume de pontos de entrelaçamento. O acréscimo de FAd nas diversas proporções estudadas aumentou consideravelmente a massa dos tecidos, de 3 a 4 vezes, se comparadas ao tecido L-50S e L-65SB, os de maior e menor massa, respectivamente. As amostras impregnada apresentaram um incremento uniforme na massa, com exceção do grupo L-60SB e L-65SB, o que está relacionado com as irregularidades inerentes durante a fabricação de tecidos de FNLs.
- As micrografias obtidas por MEV proporcionaram uma análise morfológica dos tecidos e dos grãos utilizados no trabalho. A partir das imagens, pôde-se constatar a forma como as partículas estão dispostas pela trama, o que favorece o intertravamento mecânico mas incrementa a concentração de tensão. Além disso, a morfologia do tecido aponta para uma tendência de aglomeração do fluido na superfície do material por conta de vazios presentes no entrelaçamento dos fios. Por fim, observou-se que o diâmetro dos grãos de sílica adotado está no intervalo encontrado em outros trabalhos com desempenho mecânico relevante, com cerca de 0,562 μm , além de uma tendência a um formato irregular das partículas, o que favorece uma menor taxa de cisalhamento crítica.
- Para corroborar as observações realizadas no FTIR, a análise de TG mostrou que o tecido impregnado começou a sua degradação em menores temperaturas, de 40 a 54,7 °C a menos para L-50S a L-65SB, respectivamente; e de 30 a 40 °C a menos para L-50SB e L-65SB, respectivamente. A presença do carvão de boro garantiu que o material compósito apresentasse maior estabilidade térmica do que aqueles sem esta partícula, cerca de 10 °C. Ademais, o volume de partículas proporcionou maior material residual à 600 °C em todas as proporções, logrando a conservação de até 36,2% de material, como no caso de L-65SB.

- A partir da análise da viscosidade, pôde-se corroborar que o PEG 400 apresenta vantagem na viscosidade em relação aos outros fluidos disponíveis e este fluido apresentou uma melhor compatibilidade com a partícula de SiO_2 adotadas. Ademais, notou-se que a adição de partículas proporcionou acréscimo na viscosidade, com uma variação de até 30 vezes entre os grupos 50S e 50SB. O FAd 65S apresentou uma ligeira tendência ao espessamento para taxas de cisalhamento acima de 825 s^{-1} , o que pode proporcionar maior resistência balística ao material. As amostras com carbetto de boro tenderam à fluidificação de forma considerável, dada a incapacidade de as cadeias de aglomerados formarem uma maior extensão pelo FAd.
- Pelo ensaio de *yarn pullout*, observou-se que pode ocorrer uma diferença sensível de desempenho entre os tecidos, influenciado pelo controle tecnológico que se emprega na fabricação de um tecido de FNL. Ao se comparar a carga necessária de arrancamento de um fio de um tecido puro e dos tecidos impregnados, nota-se que houve um aumento considerável no atrito estático, ou seja, antes do fio entrar em movimento dentro do tecido. Entretanto, as amostras 65S se mostrou superior até mesmo em relação aos materiais com carbetto de boro adicionado. Isto é uma evidência relevante para o desempenho balístico. Os tecidos romperam-se antes do movimento dos fios na trama, o que apontou a fragilidade do tecido sob impactos de alta velocidade, ainda que haja recrutamento de maior área no mecanismo de dissipação de energia.
- As análises de impacto balístico corroboraram ao que foi observado nas análises de viscosidade e de *yarn pullout*. As amostras 60S e 65S apresentaram maior desempenho em relação ao restante, inclusive às impregnadas com B_4C , cerca de 14% superior ao tecido de linho. No caso das amostras 3L-65S, esse desempenho pode ter relação com a tendência ao espessamento observado para altas taxas de cisalhamento. Além disso, corroborou-se o que havia sido observado por MEV quanto à concentração de tensão excessiva pela trama do material. O aspecto superficial dos tecidos denunciaram uma maior área de tecido recrutado quando do impacto balístico, entretanto também apontou para presença de desfiamento nos grupos 55SB e 60SB, além de maior área de perfuração do tecido, característico de elevada rigidez e conseqüente fragilidade das camadas. Por fim, as amostras 3L-60S e 3L-65S apresentaram maior EAE, cujo parâmetro para tecido de juta impregnado com uma menor porcentagem de sílica fora mais elevado, indicando melhor relação massa/desempenho balístico. Com isso, 3L-60S se mostrou de maior razoabilidade para a aplicação balística.
- Em suma, pode-se afirmar que a adição de B_4C não foi eficiente no fluido que impregnou o material estudado no presente trabalho. Ademais, os grupos impregnados com 65% em peso de sílica apresentaram desempenho mecânico e balístico vantajosos, ainda que termicamente tenha apresentado um equilíbrio térmico 30% menor.

6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

As fibras naturais lignocelulósicas são um dos materiais mais estudados no Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais do IME. A principal aplicação da fibra tem sido como reforços em blindagens balística, apresentando ineditismos tanto em relação ao material adotado (REIS et al., 2021; RIBEIRO et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2021; GARCIA et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2019) quanto ao seu processamento e configuração (MELIANDE et al., 2022; GARCIA-FILHO et al., 2021), com resultados mecânicos, térmicos e balísticos satisfatórios. Ao se observar outros tipos de blindagens balísticas, como a blindagem flexível, largamente utilizada pelas forças de segurança, apenas dois trabalhos com FNLs são mostrados na literatura (MAHESH; HARURSAMPATH; MAHESH, 2022; FEHRENBACH et al., 2023).

Portanto, diversos trabalhos podem ser desenvolvido a partir do presente estudo e da combinação de fibra natural e fluido viscoso, a saber:

- Estudo do quantitativo de camadas de linho impregnado com fluido viscoso para nível IIA;
- Estudo da resistência de impacto perfurante do tecido de linho impregnado com fluido viscoso;
- Avaliação de gramatura de tecidos de linho para aplicação balística;
- Caracterização de tecidos de linho impregnado com fluido espessante por cisalhamento composto por B_4C .

REFERÊNCIAS

- ABTEW, M. A.; BOUSSU, F.; BRUNIAUX, P. Dynamic impact protective body armour: A comprehensive appraisal on panel engineering design and its prospective materials. *Defence Technology*, Elsevier, v. 17, n. 6, p. 2027–2049, 2021.
- ARORA, S.; GHOSH, A. Evolution of soft body armor. *Advanced textile engineering materials*, John Wiley & Sons, Ltd. Hoboken, NJ, v. 7, p. 499–552, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15000*: Blindagens para impactos balísticos-classificação e critérios de avaliação. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10591*: Materiais têxteis-determinação da gramatura de superfícies têxteis. Rio de Janeiro, 2008.
- BABLU, M. A.; MANIMALA, J. M. Mechanisms of ballistic performance enhancement in silica nanoparticle-treated kevlar fabric. *Journal of composite materials*, v. 56, n. 14, p. 2253–2266, 2022. ISSN 0021-9983. Place: London, England Publisher: London, England: SAGE Publications.
- BAJYA, M.; MAJUMDAR, A.; BUTOLA, B. S.; VERMA, S. K.; BHATTACHARJEE, D. Design strategy for optimising weight and ballistic performance of soft body armour reinforced with shear thickening fluid. *Composites. Part B, Engineering*, v. 183, p. 107721, 2020. ISSN 1359-8368. Publisher: Elsevier Ltd.
- BALAKRISHNARAJAN, M. M.; PANCHARATNA, P. D.; HOFFMANN, R. Structure and bonding in boron carbide: The invincibility of imperfections. *New Journal of Chemistry*, Royal Society of Chemistry, v. 31, n. 4, p. 473–485, 2007.
- BALEY, C.; BOURMAUD, A.; DAVIES, P. Eighty years of composites reinforced by flax fibres: A historical review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, v. 144, p. 106333, 2021.
- BALEY, C.; GOMINA, M.; BREARD, J.; BOURMAUD, A.; DAVIES, P. Variability of mechanical properties of flax fibres for composite reinforcement. a review. *Industrial crops and products*, Elsevier, v. 145, p. 111984, 2020.
- BARNES, H. A. Shear-thickening (“dilatancy”) in suspensions of nonaggregating solid particles dispersed in newtonian liquids. *Journal of Rheology*, Society of Rheology, v. 33, n. 2, p. 329–366, fev. 1989. ISSN 1520-8516.
- BAZHENOV, . S. Dissipation of energy by bulletproof aramid fabric. *Journal of materials science*, Springer, v. 32, n. 15, p. 4167–4173, 1997.
- BERGNA, H. E. Colloid chemistry of silica: An overview. ACS Publications, 1994.
- BILISIK, K. Experimental determination of yarn pull-out properties of para-aramid (kevlar®) woven fabric. *Journal of Industrial Textiles*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 41, n. 3, p. 201–221, 2012.

- BOURMAUD, A.; BEAUGRAND, J.; SHAH, D. U.; PLACET, V.; BALEY, C. Towards the design of high-performance plant fibre composites. *Progress in Materials Science*, Elsevier, v. 97, p. 347–408, 2018.
- BRAGA, F. d. O.; BOLZAN, L. T.; LIMA-JR, É. P.; MONTEIRO, S. N. Performance of natural curaua fiber-reinforced polyester composites under 7.62 mm bullet impact as a stand-alone ballistic armor. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 6, n. 4, p. 323–328, 2017.
- BRDLÍK, P.; NOVÁK, J.; BORŮVKA, M.; BĚHÁLEK, L.; LENFELD, P. The influence of plasticizers and accelerated ageing on biodegradation of PLA under controlled composting conditions. *Polymers*, MDPI AG, v. 15, n. 1, p. 140, dec 2022.
- CANEDO, E. L. *Fenômenos de transporte*. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- CASTELLANI, R.; GIUSEPPE, E. D.; BEAUGRAND, J.; DOBOSZ, S.; BERZIN, F.; VERGNES, B.; BUDTOVA, T. Lignocellulosic fiber breakage in a molten polymer. part 1. qualitative analysis using rheo-optical observations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, v. 91, p. 229–237, 2016.
- CÉLINO, A.; GONÇALVES, O.; JACQUEMIN, F.; FRÉOUR, S. Qualitative and quantitative assessment of water sorption in natural fibres using ATR-FTIR spectroscopy. *Carbohydrate Polymers*, Elsevier BV, v. 101, p. 163–170, jan 2014.
- CHANG, C.-P.; SHIH, C.-H.; YOU, J.-L.; YOUH, M.-J.; LIU, Y.-M.; GER, M.-D. Preparation and Ballistic Performance of a Multi-Layer Armor System Composed of Kevlar/Polyurea Composites and Shear Thickening Fluid (STF)-Filled Paper Honeycomb Panels. *Polymers*, v. 13, n. 18, p. 3080, 2021. ISSN 2073-4360. Place: Basel Publisher: Basel: MDPI AG.
- CHARLET, K.; EVE, S.; JERNOT, J.; GOMINA, M.; BREARD, J. Tensile deformation of a flax fiber. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 1, n. 1, p. 233–236, 2009.
- CHEN, W.; QI, W.; DU, J.; ZHAO, L. Radiation effects on kevlar fibers through high energy electron beam. *Polymer Engineering & Science*, Wiley, v. 63, n. 9, p. 3083–3090, jul 2023.
- CHOKSHI, S.; PARMAR, V.; GOHIL, P.; CHAUDHARY, V. Chemical composition and mechanical properties of natural fibers. *Journal of Natural Fibers*, Informa UK Limited, v. 19, n. 10, p. 3942–3953, dez. 2020. ISSN 1544-046X.
- CHUNG, D. D. *Composite materials: science and applications*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2010.
- COOPER, G.; GOTTS, P. Ballistic protection. In: _____. *Ballistic trauma*. [S.l.]: Springer, 2005. p. 67–90.
- CRISTALDI, G.; LATTERI, A.; RECCA, G.; CICALA, G. Composites based on natural fibre fabrics. *Woven fabric engineering*, InTech, v. 17, p. 317–342, 2010.
- CROUCH, I. G. Body armour – new materials, new systems. *Defence Technology*, v. 15, n. 3, p. 241–253, 2019. ISSN 2214-9147. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914718305932>>.

- DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, E. Princípios e aplicações de análise térmica. *São Carlos: IQSC*, p. 40, 2012.
- DING, J.; TRACEY, P. J.; LI, W.; PENG, G.; WHITTEN, P. G.; WALLACE, G. G. Review on shear thickening fluids and applications. *Textile and Light Industrial Science and Technology*, v. 2, n. 4, p. 161–173, 2013.
- DOMNICH, V.; REYNAUD, S.; HABER, R. A.; CHHOWALLA, M. Boron carbide: structure, properties, and stability under stress. *Journal of the American Ceramic Society*, Wiley Online Library, v. 94, n. 11, p. 3605–3628, 2011.
- DUBEY, R.; RAJESH, Y.; MORE, M. Synthesis and characterization of SiO₂ nanoparticles via sol-gel method for industrial applications. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier BV, v. 2, n. 4-5, p. 3575–3579, 2015.
- DURAND, S.; D'ORLANDO, A.; MOUGNARD, L.; BOURMAUD, A.; BEAUGRAND, J. Combining infrared and raman spectra to assess MDI localization in novel flax-reinforced automotive composites. *Composites Part C: Open Access*, Elsevier BV, v. 12, p. 100382, oct 2023.
- EHSANIMEHR, S.; SONNIER, R.; BADAWI, M.; DUCOS, F.; KADI, N.; SKRIFVARS, M.; SAEB, M. R.; VAHABI, H. Sustainable flame-retardant flax fabrics by engineered layer-by-layer surface functionalization with phytic acid and polyethylenimine. *Fire Technology*, Springer Science and Business Media LLC, mar 2023.
- FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H.-P.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in polymer science*, v. 37, n. 11, p. 1552–1596, 2012.
- FEHRENBACH, J.; HALL, E.; GIBBON, L.; SMITH, T.; AMIRI, A.; ULVEN, C. Impact resistant flax fiber fabrics using shear thickening fluid. *Journal of Composites Science*, MDPI AG, v. 7, n. 1, p. 31, jan 2023.
- FENG, X.; LI, S.; WANG, Y.; WANG, Y.; LIU, J. Effects of different silica particles on quasi-static stab resistant properties of fabrics impregnated with shear thickening fluids. *Materials amp; Design*, Elsevier BV, v. 64, p. 456–461, dez. 2014. ISSN 0261-3069.
- FILHO, F. D. C. G.; OLIVEIRA, M. S.; PEREIRA, A. C.; NASCIMENTO, L. F. C.; MATHEUS, J. R. G.; MONTEIRO, S. N. Ballistic behavior of epoxy matrix composites reinforced with piassava fiber against high energy ammunition. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier BV, v. 9, n. 2, p. 1734–1741, mar 2020.
- FORNARI-JR, C. C. M. *Fibras Vegetais Para Compositos Polimericos*. Bahia: CUESC, 2017.
- FUQUA, M. A.; HUO, S.; ULVEN, C. A. Natural fiber reinforced composites. *Polymer Reviews*, Taylor & Francis, v. 52, n. 3, p. 259–320, 2012.
- GARCIA, F. D. C.; OLIVEIRA, M. S.; PEREIRA, A. C.; NASCIMENTO, L. F. C.; MATHEUS, J. R. G.; MONTEIRO, S. N. Ballistic behavior of epoxy matrix composites reinforced with piassava fiber against high energy ammunition. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019.

- GARCIA-FILHO, C.; DA, F.; OLIVEIRA, M. S.; LUZ, F. S. d.; MONTEIRO, S. N. Influence of graphene oxide functionalization strategy on the dynamic mechanical response of natural fiber reinforced polymer matrix composites. In: *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2021*. [S.l.]: Springer, 2021. p. 29–36.
- GARCIA, L. C.; XAVIER, J. C.; SEIXAS, F. R. F.; SCHOENINGER, V.; CARDOSO, C. A. L.; CARDUCCI, C. E. Flax seeds produced in the brazilian midwest: chemical and physical quality. *Brazilian Journal of Food Research*, v. 11, n. 3, p. 39–53, 2020.
- GATES, L. E. *Evaluation and development of fluid armor systems*. [S.l.], 1968.
- GHOLAMPOUR, A.; OZBAKKALOGLU, T. A review of natural fiber composites: Properties, modification and processing techniques, characterization, applications. *Journal of Materials Science*, Springer, p. 1–64, 2020.
- GIEPARDA, W.; PRZYBYLAK, M.; ROJEWSKI, S.; DOCZEKALSKA, B. Polysiloxanes and silanes with various functional groups—new compounds for flax fibers’ modification. *Materials*, MDPI AG, v. 16, n. 10, p. 3839, may 2023.
- GÜRGEN, S. Numerical modeling of fabrics treated with multi-phase shear thickening fluids under high velocity impacts. *Thin-Walled Structures*, Elsevier, v. 148, p. 106573, 2020.
- GÜRGEN, S.; KUŞHAN, M. C.; LI, W. Shear thickening fluids in protective applications: a review. *Progress in Polymer Science*, Elsevier, v. 75, p. 48–72, 2017.
- GÜRGEN, S.; LI, W.; KUŞHAN, M. C. The rheology of shear thickening fluids with various ceramic particle additives. *Materials & Design*, Elsevier, v. 104, p. 312–319, 2016.
- GÜVEN, O.; MONTEIRO, S. N.; MOURA, E. A.; DRELICH, J. W. Re-emerging field of lignocellulosic fiber–polymer composites and ionizing radiation technology in their formulation. *Polymer Reviews*, Taylor & Francis, v. 56, n. 4, p. 702–736, 2016.
- HAN, S. O. Morphology and surface properties of natural fiber treated with electron beam. In: . [s.n.], 2010. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:13865915>>.
- HARO, E. E.; SZPUNAR, J. A.; ODESHI, A. G. Ballistic impact response of laminated hybrid materials made of 5086-H32 aluminum alloy, epoxy and Kevlar® fabrics impregnated with shear thickening fluid. *Composites. Part A, Applied science and manufacturing*, v. 87, p. 54–65, 2016. ISSN 1359-835X. Publisher: Elsevier Ltd.
- HASAN, K.; HORVÁTH, P. G.; ALPÁR, T. Potential natural fiber polymeric nanobio-composites: A review. *Polymers*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 5, p. 1072, 2020.
- HASAN-NEZHAD, H.; YAZDANI, M.; JEDDI, M. High- and low-velocity impact experiments on treated STF/3D glass fabrics. *Thin-walled structures*, v. 171, p. 108720, 2022. ISSN 0263-8231. Publisher: Elsevier Ltd.
- HORNE, M. R. Bast fibres: hemp cultivation and production. In: _____. *Handbook of Natural Fibres*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 163–196.

- HOSUR, M.; VAIDYA, U.; ULVEN, C.; JEELANI, S. Performance of stitched/unstitched woven carbon/epoxy composites under high velocity impact loading. *Composite Structures*, v. 64, n. 3-4, p. 455–466, 2004.
- ISMAIL, A. S.; JAWAID, M.; HAMID, N. H.; YAHAYA, R.; HASSAN, A.; ASIM, M.; SUPIAN, A. Effect of curing temperature on mechanical properties of bio-phenolic/epoxy polymer blends. *Journal of Polymers and the Environment*, Springer, v. 30, n. 3, p. 878–885, 2022.
- JANDAS, P. J.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. Renewable resource-based biocomposites of various surface treated banana fiber and poly lactic acid: Characterization and biodegradability. *Journal of Polymers and the Environment*, Springer Science and Business Media LLC, v. 20, n. 2, p. 583–595, feb 2012.
- JEDDI, M.; YAZDANI, M.; HASAN-NEZHAD, H. Energy absorption characteristics of aluminum sandwich panels with Shear Thickening Fluid (STF) filled 3D fabric cores under dynamic loading conditions. *Thin-walled structures*, v. 168, p. 108254, 2021. ISSN 0263-8231. Publisher: Elsevier Ltd.
- JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers*, v. 71, n. 3, p. 343–364, 2008.
- JOST, K.; DURKIN, D. P.; HAVERHALS, L. M.; BROWN, E. K.; LANGENSTEIN, M.; LONG, H. C. D.; TRULOVE, P. C.; GOGOTSI, Y.; DION, G. Natural fiber welded electrode yarns for knittable textile supercapacitors. *Advanced Energy Materials*, Wiley, v. 5, n. 4, oct 2014.
- JUNG, H. Y.; LEE, J. S.; HAN, H. T.; JUNG, J.; EOM, K.; LEE, J. T. Lignin-based materials for sustainable rechargeable batteries. *Polymers*, MDPI AG, v. 14, n. 4, p. 673, fev. 2022. ISSN 2073-4360.
- KAMARUDIN, S. H.; BASRI, M. S. M.; RAYUNG, M.; ABU, F.; AHMAD, S.; NORI-ZAN, M. N.; OSMAN, S.; SARIFUDDIN, N.; DESA, M. S. Z. M.; ABDULLAH, U. H.; TAWAKKAL, I. S. M. A.; ABDULLAH, L. C. A review on natural fiber reinforced polymer composites (nfrpc) for sustainable industrial applications. *Polymers*, MDPI AG, v. 14, n. 17, p. 3698, set. 2022. ISSN 2073-4360.
- KARIMAH, A.; RIDHO, M. R.; MUNAWAR, S. S.; ADI, D. S.; ISMADI; DAMAYANTI, R.; SUBIYANTO, B.; FATRIASARI, W.; FUDHOLI, A. A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier BV, v. 13, p. 2442–2458, jul. 2021. ISSN 2238-7854.
- KATIYAR, A.; NANDI, T.; PRASAD, N. E. Impact behavior of aminosilane functionalized nanosilica based shear thickening fluid impregnated Kevlar fabrics. *Journal of applied polymer science*, v. 138, n. 34, p. 50862–n/a, 2021. ISSN 0021-8995. Place: Hoboken, USA Publisher: Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- KHAN, A.; SAPUAN, S.; SIDDIQUI, V. U.; ZAINUDIN, E.; ZUHRI, M.; HARUSSANI, M. A review of recent developments in kenaf fiber/polylactic acid composites research. *International Journal of Biological Macromolecules*, Elsevier BV, v. 253, p. 127119, dez. 2023. ISSN 0141-8130.

- KHODADADI, A.; LIAGHAT, G.; SABET, A.; HADAVINIA, H.; ABOUTORABI, A.; RAZMKHAH, O.; AKBARI, M.; TAHMASEBI, M. Experimental and numerical analysis of penetration into Kevlar fabric impregnated with shear thickening fluid. *Journal of thermoplastic composite materials*, v. 31, n. 3, p. 392–407, 2018. ISSN 0892-7057. Place: London, England Publisher: London, England: SAGE Publications.
- KHODADADI, A.; LIAGHAT, G.; VAHID, S.; SABET, A.; HADAVINIA, H. Ballistic performance of Kevlar fabric impregnated with nanosilica/PEG shear thickening fluid. *Composites. Part B, Engineering*, v. 162, p. 643–652, 2019. ISSN 1359-8368. Publisher: Elsevier Ltd.
- KOOHESTANI, B.; DARBAN, A.; MOKHTARI, P.; YILMAZ, E.; DAREZERESHKI, E. Comparison of different natural fiber treatments: a literature review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, Springer, v. 16, n. 1, p. 629–642, 2019.
- KUBIT, A.; TRZEPIECIŃSKI, T.; KICIŃSKI, R.; JURCZAK, K. Three-Dimensional Smooth Particle Hydrodynamics Modeling and Experimental Analysis of the Ballistic Performance of Steel-Based FML Targets. *Materials*, v. 15, n. 10, p. 3711, 2022. ISSN 1996-1944. Place: Switzerland Publisher: Switzerland: MDPI AG.
- KVAVADZE, E.; BAR-YOSEF, O.; BELFER-COHEN, A.; BOARETTO, E.; JAKELI, N.; MATSKEVICH, Z.; MESHVELIANI, T. 30,000-year-old wild flax fibers. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 325, n. 5946, p. 1359–1359, 2009.
- LAIBLE, R. *Ballistic materials and penetration mechanics*. [S.l.: s.n.], 2012. v. 5.
- LEE, Y. S.; WETZEL, E. D.; WAGNER, N. J. The ballistic impact characteristics of kevlar® woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid. *Journal of materials science*, Springer, v. 38, n. 13, p. 2825–2833, 2003.
- LI, M.; PU, Y.; THOMAS, V. M.; YOO, C. G.; OZCAN, S.; DENG, Y.; NELSON, K.; RAGAUSKAS, A. J. Recent advancements of plant-based natural fiber–reinforced composites and their applications. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier BV, v. 200, p. 108254, nov. 2020. ISSN 1359-8368.
- LI, T.; CHEN, C.; BROZENA, A. H.; ZHU, J. Y.; XU, L.; DRIEMEIER, C.; DAI, J.; ROJAS, O. J.; ISOGAI, A.; WÄGBERG, L.; HU, L. Developing fibrillated cellulose as a sustainable technological material. *Nature*, Springer Science and Business Media LLC, v. 590, n. 7844, p. 47–56, fev. 2021. ISSN 1476-4687.
- LI, W.; XIONG, D.; ZHAO, X.; SUN, L.; LIU, J. Dynamic stab resistance of ultra-high molecular weight polyethylene fabric impregnated with shear thickening fluid. *Materials amp; Design*, Elsevier BV, v. 102, p. 162–167, jul. 2016. ISSN 0264-1275.
- LI, X.; JIANG, D.; ZHANG, J.; LIN, Q.; CHEN, Z.; HUANG, Z. The dispersion of boron carbide powder in aqueous media. *Journal of the European Ceramic Society*, Elsevier BV, v. 33, n. 10, p. 1655–1663, sep 2013.
- LI, Z.; CHENG, X.; HE, S.; SHI, X.; GONG, L.; ZHANG, H. Aramid fibers reinforced silica aerogel composites with low thermal conductivity and improved mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier BV, v. 84, p. 316–325, may 2016.

- LIU, L.; CAI, M.; LIU, X.; ZHAO, Z.; CHEN, W. Ballistic impact performance of multi-phase STF-impregnated Kevlar fabrics in aero-engine containment. *Thin-walled structures*, v. 157, p. 107103, 2020. ISSN 0263-8231. Publisher: Elsevier Ltd.
- LIU, L.; YANG, Z.; ZHAO, Z.; LIU, X.; CHEN, W. The influences of rheological property on the impact performance of kevlar fabrics impregnated with SiO₂/PEG shear thickening fluid. *Thin-walled structures*, v. 151, p. 106717, 2020. ISSN 0263-8231. Publisher: Elsevier Ltd.
- MAHESH, V.; HARURSAMPATH, D.; MAHESH, V. An experimental study on ballistic impact response of jute reinforced polyethylene glycol and nano silica based shear thickening fluid composite. *Defence Technology*, Elsevier, v. 18, n. 3, p. 401–409, 2022.
- MANUKONDA, B. H.; CHATTERJEE, V. A.; VERMA, S. K.; BHATTACHARJEE, D.; BISWAS, I.; NEOGI, S. Rheology based design of shear thickening fluid for soft body armor applications. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, Periodica Polytechnica Budapest University of Technology and Economics, v. 64, n. 1, p. 75–84, abr. 2019. ISSN 0324-5853.
- MARCHI, B. Z.; SILVEIRA, P. H. P. M. da; BEZERRA, W. B. A.; NASCIMENTO, L. F. C.; LOPES, F. P. D.; CANDIDO, V. S.; SILVA, A. C. R. da; MONTEIRO, S. N. Ballistic performance, thermal and chemical characterization of ubim fiber (*geonoma baculifera*) reinforced epoxy matrix composites. *Polymers*, MDPI AG, v. 15, n. 15, p. 3220, jul 2023.
- MAWKHLIENG, U.; MAJUMDAR, A. Soft body armour. *Textile Progress*, Taylor & Francis, v. 51, n. 2, p. 139–224, 2019.
- MAWKHLIENG, U.; MAJUMDAR, A.; LAHA, A. A review of fibrous materials for soft body armour applications. *RSC advances*, Royal Society of Chemistry, v. 10, n. 2, p. 1066–1086, 2020.
- MEER, S.; KAUSAR, A.; IQBAL, T. Attributes of polymer and silica nanoparticle composites: A review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Informa UK Limited, v. 55, n. 8, p. 826–861, nov. 2015. ISSN 1525-6111.
- MELELLI, A.; SHAH, D.; HAPSARI, G.; CORTOPASSI, R.; DURAND, S.; ARNOULD, O.; PLACET, V.; BENAZETH, D.; BEAUGRAND, J.; JAMME, F.; BOURMAUD, A. *Dataset for "Lessons on textile history and fibre durability from a 4,000-year-old Egyptian flax yarn"*. [S.l.]: Apollo - University of Cambridge Repository, 2021.
- MELIANDE, N. M.; SILVEIRA, P. H. P. M. da; MONTEIRO, S. N.; NASCIMENTO, L. F. C. Tensile properties of curaua–aramid hybrid laminated composites for ballistic helmet. *Polymers*, MDPI, v. 4, 2022.
- MISHRA, V. D.; MISHRA, A.; SINGH, A.; VERMA, L.; RAJESH, G. Ballistic impact performance of UHMWP fabric impregnated with shear thickening fluid nanocomposite. *Composite structures*, v. 281, p. 114991, 2022. ISSN 0263-8223. Publisher: Elsevier Ltd.
- MONDRAGON, G.; FERNANDES, S.; RETEGI, A.; PEÑA, C.; ALGAR, I.; ECEIZA, A.; ARBELAIZ, A. A common strategy to extracting cellulose nanoentities from different plants. *Industrial crops and products*, Elsevier, v. 55, p. 140–148, 2014.

- MOORE, M. Crystalline silica: occurrence and use. *Indoor and Built Environment*, Karger Publishers, v. 8, n. 2, p. 82–88, 1999.
- MORROW, B.; MCFARLAN, A. Surface vibrational modes of silanol groups on silica. *The Journal of Physical Chemistry*, ACS Publications, v. 96, n. 3, p. 1395–1400, 1992.
- MORYE, S.; HINE, P.; DUCKETT, R.; CARR, D.; WARD, I. Modelling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact. *Composites science and technology*, v. 60, n. 14, p. 2631–2642, 2000.
- N, R.; V, A.; C, S. K. Effect of fiber surface modifications on the interfacial adhesion in kevlar fiber reinforced polymer composites. *Journal of Adhesion Science and Technology*, Informa UK Limited, v. 36, n. 1, p. 54–74, may 2021.
- NANDA, A.; MOHAPATRA, B. B.; MAHAPATRA, A.; MAHAPATRA, A. A. P. K.; MAHAPATRA, A. Multiple comparison test by tukey's honestly significant difference (hsd): Do the confident level control type i error. *IJAMS*, v. 6, p. 59–65, 2021.
- NASCIMENTO, L. F. C.; MONTEIRO, S. N.; SANTOS, J. L. dos; COSTA, U. O.; DEMOSTHENES, L. C. da C. Evaluation of the absorbed energy and velocity limits of reinforced epoxy composites with mallow natural fibers used in ballistic protection. In: *Green Materials Engineering*. [S.l.]: Springer, 2019. p. 185–192.
- NASSER, J.; STEINKE, K.; GROO, L.; SODANO, H. A. Improved inter yarn friction, impact response, and stab resistance of surface fibrilized aramid fabric. *Advanced Materials Interfaces*, Wiley, v. 6, n. 19, aug 2019.
- NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE. *NIJ 0101.06*: Ballistic resistance of personal body armor. Washington, USA, 2008.
- NAVEEN, J.; JAWAID, M.; ZAINUDIN, E.; SULTAN, M. T.; YAHAYA, R.; MAJID, M. A. Thermal degradation and viscoelastic properties of kevlar/cocos nucifera sheath reinforced epoxy hybrid composites. *Composite Structures*, Elsevier BV, v. 219, p. 194–202, jul 2019.
- NEUBA, L. de M.; JUNIO, R. F. P.; SOUZA, A. T.; CHAVES, Y. S.; TAVARES, S.; PALMEIRA, A. A.; MONTEIRO, S. N.; PEREIRA, A. C. Alkaline treatment investigation for sedge fibers (cyperus malaccensis): A promising enhancement. *Polymers*, MDPI AG, v. 15, n. 9, p. 2153, apr 2023.
- NEUBA, L. de M.; PEREIRA, A. C.; JUNIO, R. F. P.; SOUZA, A. T.; CHAVES, Y. S.; OLIVEIRA, M. P.; MONTEIRO, S. N. Ballistic performance of cyperus malaccensis sedge fibers reinforcing epoxy matrix as a standalone target. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier BV, v. 23, p. 4367–4375, mar 2023.
- OLHERO, S. M.; FERREIRA, J. M. F. Influence of particle size distribution on rheology and particle packing of silica-based suspensions. *Powder Technology*, v. 139, n. 1, p. 69–75, jan. 2004. ISSN 0032-5910. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591003003279>>.
- OLIVEIRA, M.; LUZ, F.; LOPERA, H.; NASCIMENTO, L.; FILHO, F. G.; MONTEIRO, S. Energy absorption and limit velocity of epoxy composites incorporated with fique fabric as ballistic armor—a brief report. *Polymers*, MDPI AG, v. 13, n. 16, p. 2727, aug 2021.

- OLIVEIRA, M. J.; GOMES, A. V.; PIMENTA, A. R.; FIGUEIREDO, A. B.-H. da S. Alumina and low density polyethylene composite for ballistics applications. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier, v. 14, p. 1791–1799, 2021.
- OLIVEIRA, M. S.; FILHO, F. da C. G.; PEREIRA, A. C.; NUNES, L. F.; LUZ, F. S. da; BRAGA, F. de O.; COLORADO, H. A.; MONTEIRO, S. N. Ballistic performance and statistical evaluation of multilayered armor with epoxy-fique fabric composites using the weibull analysis. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 8, n. 6, p. 5899–5908, 2019.
- OLIVEIRA, M. S.; LUZ, F. S. d.; NASCIMENTO, L.; MONTEIRO, S. N. Evaluation of ballistic behavior by residual velocity of epoxy composite reinforced with sisal fabric after uv radiation exposure. In: SPRINGER. *Materials Engineering—From Ideas to Practice: An EPD Symposium in Honor of Jiann-Yang Hwang*. [S.l.], 2021. p. 293–299.
- OLSZEWSKA, K.; ZIELINSKA, D.; STRUSZCZYK, M. H.; WIERZBICKI, ; LEONOWICZ, M. K. Thermal stability of the elastomeric anti-trauma pad. *Polish journal of chemical technology*, v. 19, n. 2, p. 93–100, 2017. ISSN 1899-4741. Place: Szczecin Publisher: Szczecin: De Gruyter Open.
- OUN, A.; MANALO, A.; ALAJARMEH, O.; ABOUSNINA, R.; GERDES, A. Influence of elevated temperature on the mechanical properties of hybrid flax-fiber-epoxy composites incorporating graphene. *Polymers*, MDPI, v. 14, n. 9, p. 1841, 2022.
- OZEN, M.; DEMIRCAN, G.; KISA, M.; ACIKGOZ, A.; CEYHAN, G.; İŞIKER, Y. Thermal properties of surface-modified nano-al₂o₃/kevlar fiber/epoxy composites. *Materials Chemistry and Physics*, Elsevier BV, v. 278, p. 125689, feb 2022.
- PANTALONI, D.; MELELLI, A.; SHAH, D. U.; BALEY, C.; BOURMAUD, A. Influence of water ageing on the mechanical properties of flax/pla non-woven composites. *Polymer Degradation and Stability*, Elsevier, v. 200, p. 109957, 2022.
- PARK, Y.; KIM, Y.; BALUCH, A. H.; KIM, C.-G. Empirical study of the high velocity impact energy absorption characteristics of shear thickening fluid (STF) impregnated Kevlar fabric. *International journal of impact engineering*, v. 72, p. 67–74, 2014. ISSN 0734-743X. Publisher: Elsevier Ltd.
- PEÇAS, P.; CARVALHO, H.; SALMAN, H.; LEITE, M. Natural fibre composites and their applications: a review. *Journal of Composites Science*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 2, n. 4, p. 66, 2018.
- PEREIRA, A. C.; ASSIS, F. S. de; FILHO, F. da C. G.; OLIVEIRA, M. S.; DEMOSTHENES, L. C. da C.; LOPERA, H. A. C.; MONTEIRO, S. N. Ballistic performance of multilayered armor with intermediate polyester composite reinforced with fique natural fabric and fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 8, n. 5, p. 4221–4226, 2019.
- PERIYASAMY, D.; MANOHARAN, B.; AROCKIASAMY, F. S.; ARAVIND, D.; SENTHILKUMAR, K.; RAJINI, N.; MUHAMMED, F. F.; AL-LOHEDAN, H. A. Exploring the recycling potential of HDPE films reinforced with flax fiber for making sustainable decorative tiles. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier BV, v. 25, p. 2049–2060, jul 2023.

- PETEL, O. E.; OUELLET, S.; LOISEAU, J.; FROST, D. L.; HIGGINS, A. J. A comparison of the ballistic performance of shear thickening fluids based on particle strength and volume fraction. *International Journal of Impact Engineering*, Elsevier, v. 85, p. 83–96, 2015.
- PETEL, O. E.; OUELLET, S.; LOISEAU, J.; FROST, D. L.; HIGGINS, A. J. A comparison of the ballistic performance of shear thickening fluids based on particle strength and volume fraction. *International Journal of Impact Engineering*, v. 85, p. 83–96, nov. 2015. ISSN 0734743X. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734743X15001207>>.
- PINTO, D. G.; RODRIGUES, J.; BERNARDO, L. A review on thermoplastic or thermo-setting polymeric matrices used in polymeric composites manufactured with banana fibers from the pseudostem. *Applied Sciences*, MDPI AG, v. 10, n. 9, p. 3023, abr. 2020. ISSN 2076-3417.
- PRADO, A. G.; FARIA, E. A.; PADILHA, P. M. Aplicação e modificação química da sílica gel obtida de areia. *Química Nova*, SciELO Brasil, v. 28, p. 544–547, 2005.
- PREZ, J. D.; VUURE, A. W. V.; IVENS, J.; AERTS, G.; VOORDE, I. Van de. Flax treatment with strategic enzyme combinations: Effect on chemical fiber composition and ease of fiber extraction. *Biotechnology Reports*, Elsevier, v. 23, p. e00358, 2019.
- QIN, J.; GUO, B.; ZHANG, L.; WANG, T.; ZHANG, G.; SHI, X. Soft armor materials constructed with kevlar fabric and a novel shear thickening fluid. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 183, p. 107686, 2020.
- RAHMAN, M. M.; MANIRUZZAMAN, M.; YEASMIN, M. S. A state-of-the-art review focusing on the significant techniques for naturally available fibers as reinforcement in sustainable bio-composites: Extraction, processing, purification, modification, as well as characterization study. *Results in Engineering*, Elsevier BV, v. 20, p. 101511, dez. 2023. ISSN 2590-1230.
- RAJAMURUGAN, G. et al. Vibration and tribological behaviour of flax/wire mesh/hemp composite reinforced with wfc particles. *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, v. 77, p. 525–538, 2022.
- RAPONI, E.; SERGI, C.; BORIA, S.; TIRILLÒ, J.; SARASINI, F.; CALZOLARI, A. Temperature effect on impact response of flax/epoxy laminates: Analytical, numerical and experimental results. *Composite Structures*, Elsevier, v. 274, p. 114316, 2021.
- RAVINDRAN, L.; S., S. M.; ANILKUMAR, S.; PONNAN, S.; KALARIKKAL, N.; THOMAS, S. Mechanical, morphological behaviour and electrical conductivity of phenol formaldehyde-flax fabric (PF-f) hybrid composites reinforced with rice husk derived nano-silica. *Silicon*, Springer Science and Business Media LLC, v. 15, n. 7, p. 3237–3250, dec 2022.
- REIS, R. H. M.; NUNES, L. F.; LUZ, F. S. da; CANDIDO, V. S.; SILVA, A. C. R. da; MONTEIRO, S. N. Ballistic performance of guaruman fiber composites in multilayered armor system and as single target. *Polymers*, MDPI, v. 13, n. 8, p. 1203, 2021.
- RIBEIRO, M. P.; NEUBA, L. de M.; SILVEIRA, P. H. P. M. da; LUZ, F. S. da; FIGUEIREDO, A. B.-H. da S.; MONTEIRO, S. N.; MOREIRA, M. O. Mechanical, thermal and

- ballistic performance of epoxy composites reinforced with cannabis sativa hemp fabric. *Journal of materials research and technology*, Elsevier, v. 12, p. 221–233, 2021.
- RIBEIRO, M. P.; SILVEIRA, P. H. P. M. da; BRAGA, F. de O.; MONTEIRO, S. N. Fabric impregnation with shear thickening fluid for ballistic armor polymer composites: An updated overview. *Polymers*, MDPI AG, v. 14, n. 20, p. 4357, out. 2022. ISSN 2073-4360.
- RICHELY, E.; BOURMAUD, A.; PLACET, V.; GUESSASMA, S.; BEAUGRAND, J. A critical review of the ultrastructure, mechanics and modelling of flax fibres and their defects. *Progress in Materials Science*, Elsevier, v. 124, p. 100851, 2022.
- SALEEM, M.; ALI, A.; SHAH, S. K.; SHUAIB, M. Advanced body armor utilizing shear thickening fluid based on nanosized silica particles. *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications, Ltd., v. 1068, p. 121–128, ago. 2022. ISSN 1662-9752.
- SALMAN, S. D.; LEMAN, Z.; SULTAN, M. T. H.; ISHAK, M. R.; CARDONA, F. Kenaf/synthetic and kevlar®/cellulosic fiber-reinforced hybrid composites: A review. *Bio-Resources*, BioResources, v. 10, n. 4, p. 8580–8603, aug 2015.
- SARASINI, F.; TIRILLÒ, J.; LAMPANI, L.; BARBERO, E.; SANCHEZ-SAEZ, S.; VALENTE, T.; GAUDENZI, P.; SCARPONI, C. Impact behavior of sandwich structures made of flax/epoxy face sheets and agglomerated cork. *Journal of natural fibers*, Taylor & Francis, 2018.
- SCHWARTZ, M. *Encyclopedia of materials, parts and finishes*. [S.l.]: CRC press, 2002.
- SEBASTIAN, S.; BAILEY, A.; BRISCOE, B.; TABOR, D. Effect of a softening agent on yarn pull-out force of a plain weave fabric. *Textile Research Journal*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 56, n. 10, p. 604–611, 1986.
- SEGAL, L.; CREELY, J.; JR, A. M.; CONRAD, C. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the x-ray diffractometer. *Textile research journal*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 29, n. 10, p. 786–794, 1959.
- SEZER, A. O.; BRAND, J. Chemical vapor deposition of boron carbide. *Materials Science and Engineering: B*, Elsevier BV, v. 79, n. 3, p. 191–202, fev. 2001. ISSN 0921-5107.
- SHARMA, R.; VERMA, S. K.; BISWAS, I.; BHATTACHARJEE, D.; KAMAL, P. Effect of thermal surface activation of silica nanoparticles on the rheological behavior of shear thickening fluid. *Materials Research Express*, v. 6, n. 6, p. 65710, 2019. ISSN 2053-1591. Publisher: IOP Publishing.
- SILVA, B. D. L. da; AGRIZE, P. L.; VEIGA, B. C.; NASCIMENTO, L. F. C.; ROCHA, C. A. A.; BRAGA, F. de O. Mechanical behavior and physicochemical modifications in lignosulfonate-treated fique (*furcraea andina*) fibers. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, Metallurgy and Materials Science Research Institute, Chulalongkorn University, v. 33, n. 1, p. 107–115, mar 2023.
- SINGH, J.; KUMAR, M.; KUMAR, S.; MOHAPATRA, S. Properties of glass-fiber hybrid composites: a review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Taylor & Francis, v. 56, n. 5, p. 455–469, 2017.

- SINGH, Y.; SHARMA, S.; KUMAR, U.; SIHAG, P.; BALYAN, P.; SINGH, K. P.; DHANKHER, O. P. Strategies for economic utilization of rice straw residues into value-added by-products and prevention of environmental pollution. *Science of The Total Environment*, Elsevier BV, v. 906, p. 167714, jan. 2024. ISSN 0048-9697.
- SOATTHIYANON, N.; CROSKY, A.; HEITZMANN, M. T. Comparison of experimental and calculated tensile properties of flax fibres. *Journal of Composites Science*, MDPI AG, v. 6, n. 4, p. 100, mar. 2022. ISSN 2504-477X.
- SRIVASTAVA, A.; MAJUMDAR, A.; BUTOLA, B. Improving the impact resistance of textile structures by using shear thickening fluids: a review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, Taylor & Francis, v. 37, n. 2, p. 115–129, 2012.
- STACHOWIAK, G.; STACHOWIAK, G. The effects of particle characteristics on three-body abrasive wear. *Wear*, Elsevier BV, v. 249, n. 3–4, p. 201–207, maio 2001. ISSN 0043-1648.
- STEINKE, K.; SODANO, H. A. Improved inter-yarn friction and ballistic impact performance of zinc oxide nanowire coated ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). *Polymer*, Elsevier BV, v. 231, p. 124125, sep 2021.
- SUN, Y.; ZHANG, C.; WU, J.; MENG, Q.; LIU, B.; GAO, K.; HE, L. Enhancement of oxidation resistance via titanium boron carbide coatings on diamond particles. *Diamond and Related Materials*, Elsevier BV, v. 92, p. 74–80, feb 2019.
- SURI, A. K.; SUBRAMANIAN, C.; SONBER, J. K.; MURTHY, T. S. R. C. Synthesis and consolidation of boron carbide: a review. *International Materials Reviews*, Informa UK Limited, v. 55, n. 1, p. 4–40, jan. 2010. ISSN 1743-2804.
- TAN, V.; TAY, T.; TEO, W. Strengthening fabric armour with silica colloidal suspensions. *International journal of solids and structures*, v. 42, n. 5, p. 1561–1576, 2005. ISSN 0020-7683. Publisher: Elsevier Ltd.
- TANG, F.; DONG, C.; YANG, Z.; KANG, Y.; HUANG, X.; LI, M.; CHEN, Y.; CAO, W.; HUANG, C.; GUO, Y.; WEI, Y. Protective performance and dynamic behavior of composite body armor with shear stiffening gel as buffer material under ballistic impact. *Composites science and technology*, v. 218, p. 109190, 2022. ISSN 0266-3538. Place: Barking Publisher: Barking: Elsevier Ltd.
- TAPIE, E.; GUO, Y.; SHIM, V. Yarn mobility in woven fabrics—a computational and experimental study. *International Journal of Solids and Structures*, Elsevier, v. 80, p. 212–226, 2016.
- THAKARE, M.; WHARTON, J.; WOOD, R.; MENGER, C. Effect of abrasive particle size and the influence of microstructure on the wear mechanisms in wear-resistant materials. *Wear*, Elsevier BV, v. 276–277, p. 16–28, fev. 2012. ISSN 0043-1648.
- THOMAS, S.; PAUL, S.; POTHAN, L.; DEEPA, B. Natural fibres: structure, properties and applications. In: _____. *Cellulose fibers: bio-and nano-polymer composites*. [S.l.]: Springer, 2011. p. 3–42.
- THÉVENOT, F. Boron carbide—a comprehensive review. *Journal of the European Ceramic Society*, Elsevier BV, v. 6, n. 4, p. 205–225, jan. 1990. ISSN 0955-2219.

- TOWNSEND, T. World natural fibre production and employment. In: _____. *Handbook of Natural Fibres*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 15–36.
- VERMA, D.; JAIN, S.; ZHANG, X.; GOPE, P. C. *Green approaches to biocomposite materials science and engineering*. [S.l.]: IGI Global, 2016.
- VIALA, J.; BOUIX, J.; GONZALEZ, G.; ESNOUF, C. Chemical reactivity of aluminium with boron carbide. *Journal of Materials Science*, Springer, v. 32, n. 17, p. 4559–4573, 1997.
- VIGNESHWARAN, S.; SUNDARAKANNAN, R.; JOHN, K.; JOHNSON, R. D. J.; PRASATH, K. A.; AJITH, S.; ARUMUGAPRABU, V.; UTHAYAKUMAR, M. Recent advancement in the natural fiber polymer composites: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier BV, v. 277, p. 124109, dez. 2020. ISSN 0959-6526.
- WANG, M.; LIANG, Z.; YAN, S.; TAO, X.; ZOU, Y.; LI, J.; ZHOU, X.; ZHANG, H. The preparation and property analysis of b4c modified inorganic amorphous aluminum phosphates-based intumescent flame retardant coating. *Construction and Building Materials*, Elsevier BV, v. 359, p. 129480, dec 2022.
- WEERASINGHE, D.; MOHOTTI, D.; ANDERSON, J. Incorporation of shear thickening fluid effects into computational modelling of woven fabrics subjected to impact loading: A review. *International Journal of Protective Structures*, v. 11, n. 3, p. 340–378, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/2041419619889071>>.
- WEI, M.; LIN, K.; SUN, L. Shear thickening fluids and their applications. *Materials & Design*, Elsevier, p. 110570, 2022.
- WU, S.; SIKDAR, P.; BHAT, G. S. Recent progress in developing ballistic and anti-impact materials: Nanotechnology and main approaches. *Defence Technology*, Elsevier BV, v. 21, p. 33–61, mar 2023.
- XIA, X.; LIU, W.; ZHOU, L.; HUA, Z.; LIU, H.; HE, S. Modification of flax fiber surface and its compatibilization in polylactic acid/flax composites. *Iranian Polymer Journal*, Springer, v. 25, n. 1, p. 25–35, 2016.
- XIE, K. Y.; DOMNICH, V.; FARBANIEC, L.; CHEN, B.; KUWELKAR, K.; MA, L.; MCCAULEY, J. W.; HABER, R. A.; RAMESH, K.; CHEN, M. et al. Microstructural characterization of boron-rich boron carbide. *Acta Materialia*, Elsevier, v. 136, p. 202–214, 2017.
- XU, Y.; ZHANG, H.; HUANG, G. Ballistic performance of b4c/stf/twaron composite fabric. *Composite Structures*, Elsevier, v. 279, p. 114754, 2022.
- YAN, L.; CHOUW, N.; JAYARAMAN, K. Flax fibre and its composites—a review. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 56, p. 296–317, 2014.
- YE, C.; REN, J.; WANG, Y.; ZHANG, W.; QIAN, C.; HAN, J.; ZHANG, C.; JIN, K.; BUEHLER, M. J.; KAPLAN, D. L.; LING, S. Design and fabrication of silk templated electronic yarns and applications in multifunctional textiles. *Matter*, Elsevier BV, v. 1, n. 5, p. 1411–1425, nov 2019.

YEH, S.; ZHUANG, H.; CHEN, Y.; TSENG, P.; ZHENG, J.; YANG, L.; LEE, K.; CHEN, Y. High-velocity impact performance of shear-thickening fluid/kevlar composites made by the padding process. *Polymer composites*, v. 40, n. 8, p. 3040–3049, 2019. ISSN 0272-8397. Place: Hoboken, USA Publisher: Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc.

YEH, S.-K.; LIN, J.-J.; ZHUANG, H.-Y.; CHEN, Y.-C.; CHANG, H.-C.; ZHENG, J.-Y.; YANG, L.-Y.; LEE, K.-C.; CHEN, Y.-L.; RWEI, S.-P. Light shear thickening fluid (STF)/Kevlar composites with improved ballistic impact strength. *Journal of polymer research*, v. 26, n. 6, p. 1–13, 2019. ISSN 1022-9760. Place: Dordrecht Publisher: Dordrecht: Springer Netherlands.

ZENG, X.; TAN, V.; SHIM, V. Modelling inter-yarn friction in woven fabric armour. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Wiley Online Library, v. 66, n. 8, p. 1309–1330, 2006.

ZHANG, J.; WANG, Y.; ZHOU, J.; ZHAO, C.; WU, Y.; LIU, S.; GONG, X. Intralayer interfacial sliding effect on the anti-impact performance of STF/Kevlar composite fabric. *Composites. Part A, Applied science and manufacturing*, v. 145, p. 106401, 2021. ISSN 1359-835X. Publisher: Elsevier Ltd.

ZHANG, X.; SUN, Y.; MENG, Q.; WU, J.; HE, L. Enhancement of oxidation resistance via chromium boron carbide on diamond particles. *Coatings*, MDPI AG, v. 11, n. 2, p. 162, jan 2021.

ZHANG, X.; ZHANG, Q.; YAN, R.; QIN, Z. Fluid-structure interaction simulation and evaluation of ballistic impact of STF impregnated UHMWPE fiber composites. *Polymer Testing*, v. 115, p. 107757, nov. 2022. ISSN 0142-9418. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941822002781>>.

ZHANG, Z.; CAI, S.; LI, Y.; WANG, Z.; LONG, Y.; YU, T.; SHEN, Y. High performances of plant fiber reinforced composites—a new insight from hierarchical microstructures. *Composites Science and Technology*, Elsevier, p. 108151, 2020.

ZHAO, D.; ZHU, Y.; CHENG, W.; CHEN, W.; WU, Y.; YU, H. Cellulose-based flexible functional materials for emerging intelligent electronics. *Advanced Materials*, Wiley, v. 33, n. 28, abr. 2020. ISSN 1521-4095.

ZHAO, M.; ZHANG, J.; LIU, Y.; PENG, Z.; LI, X. Rheological characteristics analysis of shear thickening fluids based on response surface methodology. *Materials Research Express*, v. 9, n. 2, p. 25701, 2022. ISSN 2053-1591. Place: Bristol Publisher: Bristol: IOP Publishing.

ZHIHAO, X.; XIAODI, H.; LULU, L.; WEI, C.; ZHENHUA, Z.; GANG, L. Influences of a wide service-environment temperature range on the ballistic performance of STF-impregnated Kevlar. *Composite structures*, v. 287, p. 115330, 2022. ISSN 0263-8223. Publisher: Elsevier Ltd.

ZHOU, Y.; ALI, M.; GONG, X.; YANG, D. An overview of yarn pull-out behavior of woven fabrics. *Textile Research Journal*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 89, n. 2, p. 223–234, 2019.

ZHU, B.; LEE, M.; QUIGLEY, E.; FEDKIW, R. Codimensional non-newtonian fluids. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, ACM New York, NY, USA, v. 34, n. 4, p. 1–9, 2015.

ZUKAS, J.; T, N.; HF, S.; LB, G.; DR, C. *Impact Dynamics*. New York: John Wiley & Sons, 1982.

ŻUROWSKI, R.; FALKOWSKI, P.; ZYGMUNTOWICZ, J.; SZAFRAN, M. Rheological and Technological Aspects in Designing the Properties of Shear Thickening Fluids. *Materials*, v. 14, n. 21, p. 6585, 2021. ISSN 1996-1944. Place: Basel Publisher: Basel: MDPI AG.