



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

**Centro de Tecnologia e Ciências**

**Instituto Politécnico**

**Diego Pinheiro Sodré**

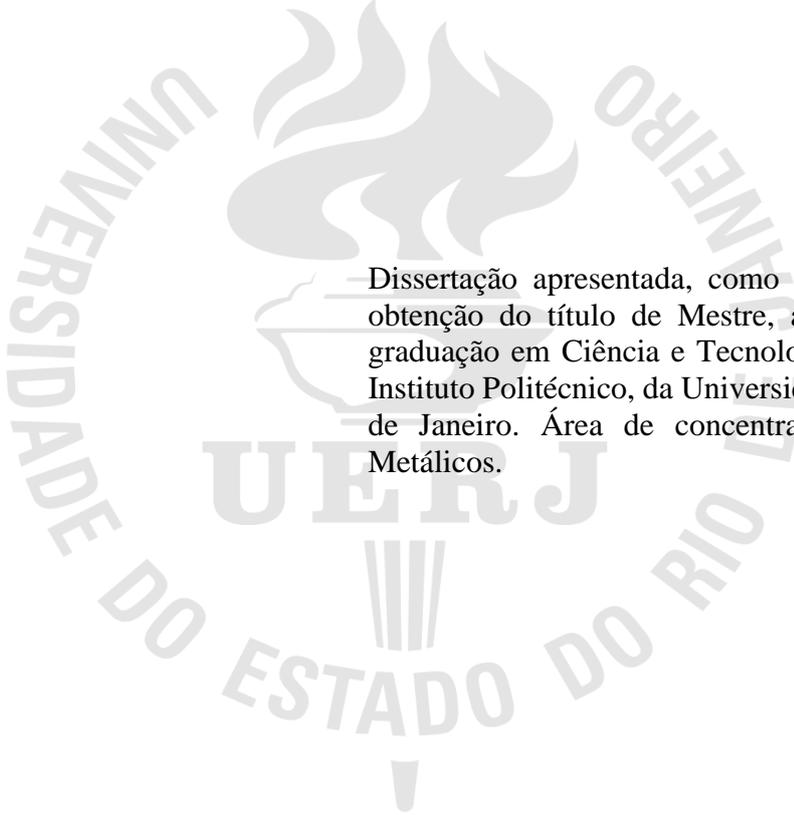
**Estudo do desempenho de blocos de concreto balístico reforçados com fibra de  
aramida para aplicações em segurança: identificação de danos em escala global  
e local**

**Nova Friburgo**

**2023**

Diego Pinheiro Sodré

**Estudo do desempenho de blocos de concreto balístico reforçados com fibra de aramida para aplicações em segurança: identificação de danos em escala global e local**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Materiais Não-Metálicos.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis

Nova Friburgo

2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/E

S679 Sodré, Diego Pinheiro.  
Estudo do desempenho de blocos de concreto balístico reforçados com fibra de aramida para aplicações em segurança: identificação de danos em escala global e local / Diego Pinheiro Sodré. - 2023.  
51 f. : il.

Orientadores: Joaquim Teixeira de Assis.  
Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Testes de impacto- Projéteis– Teses. 2. Concreto – Teses. 3. Medidas de segurança – Teses. 4. Fibras – Polímeros- Teses. I. Assis, Joaquim Teixeira de. II.. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. III. Título.

CDU 533.6.078

Bibliotecária Pâmela Lisboa CRB7/ 5965

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Diego Pinheiro Sodré

**Estudo do desempenho de blocos de concreto balístico reforçados com fibra de aramida para aplicações em segurança: identificação de danos em escala global e local**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Materiais Não-Metálicos.

Aprovada em 25 de agosto de 2023.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis (Orientador)  
Instituto Politécnico - UERJ

---

Prof. Dr. Joel Sanchez  
Instituto Politécnico - UERJ

---

Prof. Dr. José Renato de Castro Pessôa  
Universidade de Santa Cruz - UESC

Nova Friburgo

2023

## DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a minha Família, em especial a minha Mãe, cujo inabalável amor, apoio e incentivo foram os alicerces que me sustentaram durante toda minha trajetória acadêmica. A vocês, que sempre depositaram fé em meu potencial e me impulsionaram a seguir em frente, dedico com profunda gratidão este trabalho.

Também dedico esta dissertação a meu orientador Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis, cuja orientação perspicaz e conhecimento profundo foram pilares fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Que esta dedicatória simbolize o carinho, gratidão e reconhecimento que alimento por todos aqueles que estiveram ao meu lado durante este percurso. Que possamos seguir compartilhando conquistas e celebrando momentos especiais juntos.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, sou profundamente grato a Deus, sua luz iluminou meu caminho, fortaleceu minha fé e me deu forças para superar os desafios e alcançar este objetivo.

A meus pais Divalme e Eva, pelo amor incondicional, apoio e sacrifícios inestimáveis que foram os alicerces que me sustentaram ao longo deste percurso.

A meu irmão Douglas, cuja admiração, apoio e encorajamento foram inestimáveis.

À minha filha Maria Luísa, que compreendeu precocemente os motivos subjacentes à minha ausência.

Ao meu orientador Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis, agradeço pela orientação sábia, conhecimento profundo e paciência, que foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Também expresso minha gratidão aos amigos e colegas, cuja amizade e apoio foram valiosos ao longo desses anos de estudo. Agradeço a todos que compartilharam conhecimentos, trocaram ideias e experiências, tornando esta jornada ainda mais significativa.

Não posso deixar de agradecer a todas as instituições que de alguma forma colaboraram para a realização desta pesquisa, fornecendo recursos, acesso a laboratórios etc.

Por fim, dedico um agradecimento especial a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para este projeto e para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Que este agradecimento reflita a minha profunda gratidão a Deus e a todos que fizeram parte desta jornada. Muito obrigado a todos!

Insanidade é continuar fazendo sempre a mesma coisa e esperar resultados diferentes.

*Albert Einstein*

## RESUMO

SODRÉ, Diego Pinheiro. *Estudo do desempenho de blocos de concreto balístico reforçados com fibra de aramida para aplicações em segurança: identificação de danos em escala global e local*. 2023. 51f. Dissertação. (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2023.

A crescente necessidade de segurança na sociedade, impulsionada pelos inúmeros conflitos armados, sejam em cenários bélicos ou urbanos, enfatiza a imperiosa demanda de salvaguardar os cidadãos, equipamentos, instalações e infraestruturas. Esta pesquisa emergiu diante da necessidade premente da Polícia Militar do Estado do Rio de Janeiro em construir edificações em áreas atingidas pelo tráfico de drogas e consideradas como zonas de risco. O escopo desta investigação centra-se no estudo do concreto com manta de aramida submetido ao impacto balístico, almejando otimizar o desempenho de estruturas de concreto sujeitas a tais impactos. Dois modelos de blocos de concreto foram confeccionados, ambos enriquecidos com a adição de seis camadas de manta de aramida, localizadas a aproximadamente 5 cm da superfície sujeita ao ataque. Todos os corpos de prova foram submetidos a impactos balísticos, sendo efetuado um disparo de calibre 5,56 mm e três de calibre 7,62 mm, sendo analisados quanto a danos globais e locais, à profundidade de penetração do projétil e à perda de massa. Evidenciou-se que a incorporação interna da manta de aramida contribuiu para a propagação de trincas e ensejou uma perda de massa na ordem de 2,2%, apontando para uma aderência insuficiente entre o concreto e a manta. Tais constatações sublinham a relevância de prosseguir com investigações objetivando o aperfeiçoamento da resistência e proteção em estruturas de concreto expostas a impactos balísticos.

Palavras-chave: Estruturas de concreto. Impactos balísticos. Concreto com manta de aramida. Danos globais e locais.

## ABSTRACT

SODRÉ, Diego Pinheiro. *Study of the performance of ballistic concrete blocks reinforced with aramid fiber for security applications: identification of damage on a global and local scale*. 2023. 51f. Dissertação. (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2023.

The growing need for security in society, driven by numerous armed conflicts, whether in warlike or urban settings, emphasizes the imperative demand to safeguard citizens, equipment, facilities and infrastructure. This research emerged from the pressing need of the Military Police of the State of Rio de Janeiro to build buildings in areas affected by drug trafficking and considered as risk zones. The scope of this investigation focuses on the study of concrete with aramid blanket subjected to ballistic impact, aiming to optimize the performance of concrete structures subject to such impacts. Two models of concrete blocks were made, both enriched with the addition of six layers of aramid blanket, located approximately 5 cm from the surface subject to attack. All specimens were subjected to ballistic impacts, with one 5.56 mm shot and three 7.62 mm shots being analyzed for global and local damage, depth of penetration of the projectile and loss of mass. It was evident that the internal incorporation of the aramid blanket contributed to the propagation of cracks and resulted in a mass loss of around 2.2%, pointing to insufficient adhesion between the concrete and the blanket. Such findings highlight the relevance of continuing with investigations aimed at improving resistance and protection in concrete structures exposed to ballistic impacts.

Keywords: Concrete structures. Ballistic impacts. Concrete with aramid blanket. Global and local damages.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Tabela 1 -	Classificação dos níveis de proteção balística.....	15
Figura 1 -	Cinemática do projétil no interior do cano da arma.....	16
Figura 2 -	Percurso do projétil após liberar-se da influência dos gases propelentes.....	16
Figura 3 -	Atuação do projétil com o alvo.....	17
Figura 4 -	Esquema geral para a constituição de um cartucho de fogo.....	18
Figura 5 -	Perfil de vários projéteis.....	19
Figura 6 -	Danos locais em placas de concreto sob impacto balístico.....	24
Figura 7 -	Fórmula estrutural do Monômero do Kevlar®.....	26
Tabela 2 -	Denominações dos tipos de Kevlar® e suas características.....	27
Tabela 3 -	Propriedades dos dois principais tipos de Kevlar®.....	27
Tabela 4 -	Resultados de testes com cabos.....	29
Figura 8 -	Ensaio de impacto para placas com fibras de aramida incorporadas.....	31
Figura 9 -	Resistência à compressão simples com todos os teores.....	31
Figura 10 -	Combinação e geometria da amostra.....	32
Figura 11 -	Lavagem do agregado graúdo.....	34
Figura 12 -	Especificação do aditivo plastificante.....	35
Figura 13 -	Tecido de Fibra de Aramida Kevlar® (1x1,30m) .....	36
Figura 14 -	Betoneira utilizada para manipulação do concreto.....	37
Figura 15 -	Dimensões das placas em centímetros.....	37
Figura 16 -	Concretagem das formas.....	38
Tabela 5 -	Caracterização dos blocos A e B quanto à densidade.....	39
Figura 17 -	Prensa Solotest utilizada para o ensaio de resistência a compressão.....	39
Gráfico 1 -	Ensaio de resistência à compressão após período de cura.....	40
Figura 18 -	Ensaio balístico.....	41
Figura 19 -	Armas e munições utilizadas no ensaio balístico.....	41
Figura 20 -	Ocorrência de trincas na face oposta dos blocos impactados por projéteis cal. 5,56mm e cal.7,62mm.....	42
Figura 21 -	Blocos impactados por projéteis cal. 5,56mm e cal.7,62mm.....	43
Figura 22 -	Blocos A e B após aferição de suas respectivas massas.....	44
Figura 23 -	Amostra transversal de bloco seccionado no ponto médio do impacto balístico.....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ISP -	Instituto de Segurança Pública do Rio de Janeiro
PMERJ -	Polícia Militar do estado do Rio de Janeiro
ABRABLIN-	Associação Brasileira de Blindagem
UERJ -	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
ABNT-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NIJ-	Instituto Nacional de Justiça dos Estados Unidos
MPa-	Mega Pascal
N-	Newton
Kg-	Kilograma
m-	Metro
mm-	Milímetro
cm-	Centímetro
DLOG-	Departamento Logístico do Exército Brasileiro
DCMun-	Depósito Central de Armas e Munições da PMERJ
g-	Gramma
IPRJ-	Instituto Politécnico do Estado do Rio de Janeiro
RJ-	Rio de Janeiro

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
1	<b>OBJETIVOS</b> .....	13
1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	13
1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	13
2	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	14
2.1	<b>Segurança pública no estado do Rio de Janeiro</b> .....	14
2.2	<b>Níveis de blindagem</b> .....	14
2.3	<b>Balística</b> .....	15
2.4	<b>Munições</b> .....	17
2.5	<b>Propelente</b> .....	20
2.6	<b>Concreto</b> .....	21
2.7	<b>Impacto balístico e seus efeitos sobre o concreto</b> .....	23
2.8	<b>Aramida</b> .....	24
2.8.1	<u>História da aramida</u> .....	25
2.8.2	<u>Kevlar</u> .....	26
2.8.3	<u>Propriedade mecânica</u> .....	28
2.8.4	<u>Resistência ao impacto</u> .....	29
2.9	<b>Concreto balístico reforçado com fibras de aramida</b> .....	29
2.10	<b>Coletes com validade prescrita</b> .....	32
3	<b>METODOLOGIA</b> .....	34
3.1	<b>Materiais empregados</b> .....	34
3.2	<b>Confecção dos corpos de prova</b> .....	36
3.3	<b>Ensaio balístico</b> .....	40
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	42
	<b>CONCLUSÃO</b> .....	46
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	48

## INTRODUÇÃO

A crescente problemática da violência urbana nas grandes cidades, notadamente na América Latina, coloca a segurança como uma das mais prementes questões globais contemporâneas. O crescimento do tráfico de armas cada vez mais poderoso e a facilidade de acesso a essas armas acentuaram a necessidade de elevar a resistência ao impacto das estruturas físicas utilizadas pelas forças de segurança.

No ano de 2021, o estado do Rio de Janeiro contabilizou um total de 2.405 óbitos resultantes de episódios envolvendo armamento de fogo, consoante dados do Instituto de Segurança Pública do Rio de Janeiro (ISP). Em conformidade com as estatísticas divulgadas pelo referido instituto, durante o mesmo período, foram registrados 691 policiais militares feridos e 9 policiais civis feridos, além de serem relatados 55 óbitos de policiais militares e 9 óbitos de policiais civis, exclusivamente no âmbito do mencionado estado.

Na década de 1970, a corporação norte-americana DuPont introduziu o Kevlar®, uma fibra polimérica à base de poli-para-fenilenotereftalamida, renomada por sua elevada resistência à tração e ao impacto, reduzida densidade e coeficiente de expansão térmica negativo na direção longitudinal, atributos que conferem estabilidade dimensional. As fibras de Kevlar® têm sido amplamente empregadas como constituintes de compósitos, não apenas em dispositivos militares de proteção, mas também em aplicações aeroespaciais e navais que demandam estruturas leves e de elevada resistência mecânica (MALLICK, 2007).

Nesse contexto, as aplicações de materiais compósitos, com ênfase na capacidade de salvar pessoas e equipamentos contra a penetração de projéteis de alta velocidade, revestem-se de extrema importância (NAIK; SHRIRAO, 2004). A eficiência balística de um compósito concentra-se em sua capacidade de absorver energia durante um impacto. Dentre os fatores que particularmente afetam a resposta ao impacto balístico, encontram-se as propriedades do material de reforço e da matriz, a interação entre as múltiplas camadas, bem como o número e a orientação dessas camadas, além da velocidade e geometria do projétil, como ressaltado por Abrate (2011).

As fibras de alto desempenho empregadas em produtos balísticos são caracterizadas por sua baixa densidade, elevada resistência e habilidade de absorção de alta energia, sendo que, conforme destacado por Silva jr. et al. (2004), o uso de fibras de aramida em compósitos reforçados apresenta-se como uma das melhores opções para aplicações de impacto. No entanto, embora a aramida (Kevlar®) tenha sido introduzida como matéria-prima para proteção

balística, a quantidade de tecidos requerida para atender aos requisitos de proteção contra ameaças balísticas típicas, aliada ao custo elevado dessas fibras, representa uma desvantagem inerente. Ademais, em consonância com diretrizes internacionais de segurança, coletes balísticos devem ser substituídos, geralmente, a cada período de cinco anos (NIJ GUIDE 100–01, 2001). Informa-se que, em 2021, a PMERJ contava com mais de 3.000 coletes com prazos de validade expirados (PMERJ, 2021). Considerando-se que esses coletes não podem ser descartados sem tratamento adequado, torna-se premente a necessidade de reciclagem.

Desde a década de 1960, a adição de fibras ao concreto surgiu como uma alternativa relevante nessa busca, pois a incorporação de fibras à matriz cimentícia contribui para aprimorar sua ductilidade e comportamento perante fissuração (BERNARDI, 2003).

Fundamentado na análise das características e exemplos de utilização das fibras aramida, deduziu-se que o concreto com adição desse tipo de fibra pode apresentar boas possibilidades de uso, especialmente no que tange à resistência ao fogo e impactos.

Nessa perspectiva, o tema desta dissertação foi estabelecido com enfoque principal o estudo do desempenho de blocos de concreto reforçados com fibra de aramida, objetivando a criação de um material compósito resistente a impactos balísticos.

# 1 OBJETIVOS

## 1.1 Objetivo Geral

Efetuar uma pesquisa experimental com o propósito de analisar a resposta dinâmica de placas de concreto reforçadas com fibras de aramida quando sujeitas ao impacto de projéteis balísticos.

## 1.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma análise do fenômeno de impacto em placas
- Investigar as implicações do efeito de impacto em elementos de concreto;
- Conduzir ensaios balísticos em placas de concreto, dotadas de reforço em Kevlar®, com o intuito de examinar suas performances sob condições de impacto balístico.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Segurança pública no estado do rio de janeiro

Conforme aponta o Artigo 144 da Constituição Federal, dizendo o seguinte:

Art. 144. A segurança pública, é dever do Estado, direito e responsabilidade de todos, é exercida para a preservação da ordem pública e da incolumidade das pessoas e do patrimônio, através dos seguintes órgãos:

I – Polícia federal;

II – Polícia rodoviária federal;

III – Polícia ferroviária federal;

IV – Polícias civis;

V – Polícias militares e corpos de bombeiros militares;

VI – Polícias penais federal, estaduais e distrital. (Redação dada pela Emenda Constitucional nº 104, de 2019)

No âmbito das atribuições da polícia militar, incumbe-lhe a missão de preservar ostensivamente a ordem pública, resguardando o cidadão, a sociedade e o patrimônio público, contribuindo, assim, para a harmonia de todos os segmentos, mitigando conflitos e assegurando a segurança à população.

No ano de 2021, o estado do Rio de Janeiro registrou um total de 2.405 óbitos decorrentes de incidentes envolvendo armas de fogo, segundo dados do Instituto de Segurança Pública do Rio de Janeiro (ISP). Além disso, conforme informações do ISP, no mesmo período, 691 policiais militares e 9 policiais civis foram feridos, enquanto 55 policiais militares e 9 policiais civis perderam suas vidas, exclusivamente no contexto do estado do Rio de Janeiro.

Diante da atividade desempenhada pela Polícia Militar, torna-se manifesta a iminência de riscos relacionados a conflitos armados. As instalações da PMERJ são frequentemente alvo de ataques por criminosos, culminando, em alguns casos, com ferimentos fatais aos agentes. Diante desse cenário, torna-se premente a demanda pelo desenvolvimento de técnicas de blindagem que possam conferir maior segurança aos agentes de segurança.

### 2.2 Níveis de blindagem

A ABNT NBR 15000-1, classifica os níveis de blindagens em I, II-A, II, III-A, III e IV conforme demonstrado na tabela 1. Sendo permitido para os civis a blindagem até o nível III-A, e somente o Presidente da República tem direito ao nível de blindagem IV.

A Associação Brasileira de Blindagem (ABRABLIN) define resistência balística levando em consideração a arma, o projétil, a energia cinética de uma massa (em joules) e a distância dos disparos com relação ao alvo e a distância entre os disparos. As medidas de proteção são estabelecidas conforme padrões normativos e apresentam variações conforme a natureza da resistência oferecida em face desses projéteis.

Tabela 1 – Classificação dos níveis de proteção balística

Nível	Munição e projétil			Distância (d) m	Velocidade (v) m/s	Números de impactos	Energia <sup>a</sup> J (mv <sup>2</sup> /2)
	Calibre	Tipo	Massa g				
I	.22" LR CBC	HV chumbo	2,6 ± 0,1	5 a 5,5	320 ± 12	5	133
	.38" Special CBC	RN chumbo	10,2 ± 0,1	5 a 5,5	254 ± 15	5	329
II-A	9 mm Luger CBC	FMJ	8,0 ± 0,1	5 a 5,5	332 ± 12	5	441
	.357" Magnum CBC	SJSP	10,2 ± 0,1	5 a 5,5	381 ± 15	5	740
II	9 mm Luger CBC	FMJ	8,0 ± 0,1	5 a 5,5	358 ± 12	5	513
	.357" Magnum CBC	SJSP	10,2 ± 0,1	5 a 5,5	425 ± 15	5	921
III-A	9 mm Luger CBC	FMJ	8,0 ± 0,1	5 a 5,5	426 ± 15	5	726
	.44" Magnum CBC	SJSP	15,6 ± 0,1	5 a 5,5	426 ± 15	5	1 416
III	7,62 mm × 51mm CBC	FMJ NATO Ball	9,3 ± 0,1	15 a 15,5	838 ± 15	5	3 265
IV	.30"-.06	AP	10,8 ± 0,1	15 a 15,5	868 ± 15	1	4 068

Os significados das siglas da coluna "Tipo" estão relacionados a seguir:  
AP *Armor Piercing* (perfurante)  
BZ (API) *Armor Piercing Incendiary* (perfurante incendiário)  
BMG *Browning Machine Gun*  
CBC Companhia Brasileira de Cartuchos  
FMJ *Full Metal Jacket* (jaquetado/encamisado)  
FMJ/PB/HC *Full Metal Jacket, Pointed Bullet, Hard Core* (Encamisado, pontagudo e com núcleo duro)  
LC *Lead Core* (núcleo de chumbo)  
MSC *Mild Steel Core* (núcleo com ponta de aço)  
NP Núcleo com aço, perfurante  
SJSP *Semi Jacket Soft Point* (semijaquetado / encamisado, ponta deformável)  
WC Carbetto de tungstênio

<sup>a</sup> Valor nominal médio por disparo.

Fonte: Adaptado da ABNT 15000-2, 2020.

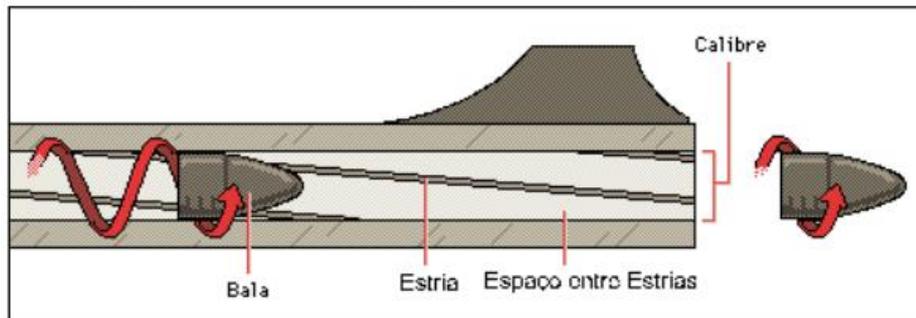
## 2.3 Balística

A balística, em sua essência, é um campo da física que se dedica ao estudo do impulso, movimento e impacto dos projéteis, abrangendo corpos sólidos que se movem no espaço após

terem recebido um impulso. No contexto de um projétil lançado por uma arma de fogo, sua trajetória é dividida em três distintas fases: a balística interior, a balística exterior e a balística terminal, cada uma delas explorando aspectos específicos desse movimento.

- a) A balística interior dedica-se à investigação da trajetória que se desenvolve desde o momento do disparo até a fase em que o projétil se separa da arma. Nessa esfera, são investigados os elementos relacionados à estrutura, ao mecanismo e ao funcionamento das armas, bem como aos aspectos referentes à carga de projeção e aos fenômenos inerentes ao processo de propulsão dos projéteis. Portanto, abrange uma análise minuciosa das características das armas e munições, até a fase em que o projétil é ejetado do cano.

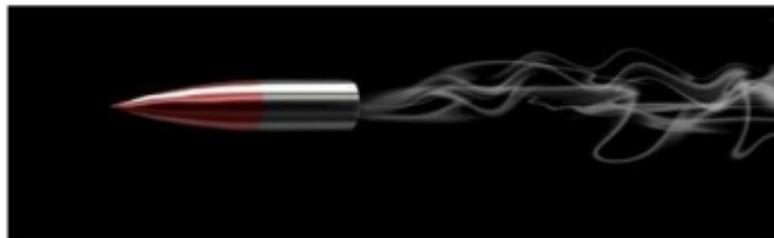
Figura 1 – Cinemática do projétil no interior do cano da arma



Fonte: Adaptado de Oliveira, 2020.

- b) A balística exterior, por sua vez, dedica-se à análise do movimento dos projéteis no ar, a partir do instante em que estes abandonam a boca do cano da arma até o primeiro ponto de impacto. Nesse escopo, são examinadas as diversas influências que atuam nessa trajetória, tais como o ângulo de lançamento, a velocidade de saída, a resistência do ar, a força gravitacional, a velocidade e direção do vento, entre outros fatores de relevância.

Figura 2 – Percurso do projétil após liberar-se da influência dos gases propelentes



Fonte: Werner, 2013.

- c) Já a balística terminal focaliza-se no estudo do movimento do projétil a partir do primeiro impacto até a dissipação completa de sua energia cinética, ou seja, até alcançar seu estado de repouso final. Nessa perspectiva, são examinados os efeitos causados pelos impactos dos projéteis no alvo, abrangendo aspectos como os ricochetes, as lesões e as características resultantes deixadas nas superfícies pelos impactos dos projéteis.

Figura 3 – Atuação do projétil com o alvo



Fonte: Wikipedia, 2023.

Em síntese, a balística, com suas subdivisões em balística interior, balística exterior e balística terminal, configura-se como uma ciência essencial na compreensão e exploração dos movimentos e efeitos dos projéteis, tornando-se fundamental na avaliação de questões de segurança e eficácia de sistemas de armamento e proteção. O presente estudo contemplou a consideração das aplicações dos conceitos da balística terminal.

## 2.4 Munições

Segundo Stefanopoulos et al. (2014), as armas de fogo partilham de uma característica intrínseca comum, que é a presença de um cilindro de dimensões variáveis conhecido como tambor, o qual é acompanhado por uma câmara adjacente destinada a receber o cartucho, unidade fundamental da munição, que engloba o projétil, o propulsor (pólvora) e o iniciador (espoleta).

Figura 4 – Esquema geral para a constituição de um cartucho de fogo

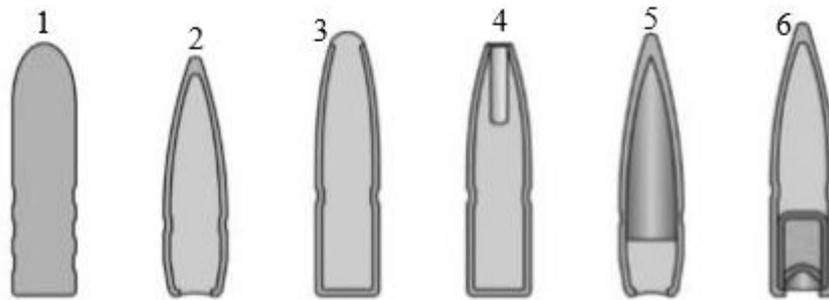


Fonte: Adaptado de Oliveira, 2019.

Os projéteis utilizados nas munições, normalmente feitos de chumbo, podem possuir revestimento metálico, sendo classificados de acordo com o tipo de revestimento aplicado. Algumas das principais terminologias empregadas para descrever as características específicas do projétil incluem:

- a. Armour Piercing (AP): projetado para ter sua carcaça destruída, permitindo a penetração seguida de detonação. São constituídos, em grande parte, de carbeto de tungstênio ou aço endurecido, revestidos por cobre ou alumínio.
- b. Lead Round Nose (LRN): projéteis fabricados inteiramente em chumbo, podendo conter alguns agentes de liga endurecedores.
- c. Full Metal Jacket (FMJ): aplicável a projéteis com um núcleo de chumbo coberto por uma liga de cobre (aproximadamente 90% Cu-10% Zn) em toda a sua extensão, exceto na base.
- d. Jacketed Soft Point (JSP): aplicável a projéteis totalmente revestidos por uma liga de cobre (aproximadamente 90% Cu-10% Zn), exceto na ponta.
- e. Round Nose (RN): projétil com a ponta ou nariz geralmente sem corte ou arredondado, apresentando uma pequena superfície plana na sua extremidade.
- f. Semi Jacketed Hollow Point (SJHP): projéteis com núcleo de chumbo e revestimento de liga de cobre (aproximadamente 90% Cu-10% Zn) na base e na superfície de maior diâmetro, deixando uma porção do núcleo de chumbo exposta na ponta, formando uma cavidade ou furo (NIJ, 2001).

Figura 5 – Perfil de vários projéteis: 1. Solid; 2 Full metal-jacketed; 3. Semi-jacketed; 4. Semi-jacketed hollow point; 5. Hard-core; 6. Tracer;



Fonte: Adaptado Coupland, 2011.

Segundo, Naik e Shrirao (2004) Os projéteis podem ser classificados em baixa, alta ou ultra alta velocidade de impacto, categorias que se adequam, principalmente, às armas de pistolas e rifles. A classificação está relacionada à quantidade de energia transferida entre o projétil e o alvo, à dissipação dessa energia e aos mecanismos de propagação de dano, que são alterados com a variação da velocidade. O termo "baixa velocidade" refere-se a velocidades subsônicas, menores que 350 m/s, enquanto o termo "alta velocidade" não possui uma definição precisa, englobando valores em torno de 600 a 700 m/s, acima dos quais efeitos explosivos são mais comuns. As velocidades de magnitude média a intermediária (variando de 350 a 600 m/s) são alcançadas por pistolas de maior potência, notadamente aquelas empregando munições Magnum (CHOW, 2001).

Ao ser disparado, o projétil é acelerado sob altas pressões, resultantes da combustão do material propulsor. Caso o projétil esteja envolvido por uma arma raiada, que apresenta sulcos helicoidais em seu cano, ele adquire movimento de rotação, devido às ranhuras em espiral existentes no interior do cano da arma. A rotação proporcionada pelas ranhuras confere estabilidade ao projétil durante o voo, embora sua trajetória seja afetada pela ação da gravidade e pelas forças de atrito com o ar. A configuração da extremidade e a massa do projétil desempenham um papel crucial na preservação de sua velocidade e energia ao longo de sua trajetória aérea. Após o disparo, a energia do projétil é significativamente reduzida. Para armas de cano curto, como revólveres e pistolas, essa redução ocorre em torno de 45 metros de distância do local do disparo, já no caso de projéteis provenientes de armas de cano alongado, como fuzis, metralhadoras e submetralhadoras, a energia sofre uma notável diminuição ao atingir uma distância de 100 metros a partir do ponto de disparo. A extensão do dano causado

pelo impacto do projétil está relacionada à dissipação local da energia cinética (CHOW, 2001; STEFANOPOULOS et al., 2014).

Nesse contexto, a ameaça balística de um projétil depende de sua composição, formato, calibre, massa, ângulo de incidência e velocidade de impacto, entre outros fatores. Devido à diversidade de cartuchos e projéteis disponíveis para um calibre específico, além da capacidade de carregamento manual de projéteis, os comportamentos exibidos pelos materiais de blindagem são variados, podendo ter resistência variada a um determinado calibre, de acordo com a composição da munição utilizada. Dessa forma, os ensaios balísticos seguem normas internacionais e utilizam munições representativas de ameaças comuns enfrentadas pelas forças de segurança.

## **2.5 Propelente**

A pólvora preta representa o mais antiquado propelente empregado em armas de fogo, sendo que, até o término do século XIX, as munições foram carregadas com este explosivo (DI MAIO, 1999). Di Maio (1999) esclarece que esse composto consiste em uma mistura de carvão, enxofre e nitrato de potássio: o carvão atua como combustível; o nitrato de potássio como suprimento de oxigênio e oxidante; e o enxofre confere maior densidade à mistura, tornando-a mais prontamente inflamável.

Heard (2008) provê-nos uma breve alusão histórica à pólvora preta, frequentemente associando-a aos chineses, que utilizavam artefatos explosivos e incendiários por volta do ano 1000 d.C. A primeira menção à pólvora preta na Europa é atribuída a Roger Bacon, que, embora conhecesse suas características explosivas, provavelmente desconhecia sua utilização como propelente (HEARD, 2008).

Santos (2011) enfatiza que, quando surgiu a necessidade de diminuir o calibre e aumentar a velocidade inicial dos projéteis, verificou-se que a pólvora preta gerava excessiva pressão e considerável recuo da arma. Nesse contexto, foi de grande importância a concepção de um explosivo cuja base era o algodão-pólvora (nitrocelulose), idealizado pelo engenheiro químico francês Vielle, em 1884. Essa substância compacta e sem poros queimava de modo mais estável e sem originar fumaça, tornando-se conhecida como pólvora inodora. Essa pólvora possibilita velocidades constantes e pressões regulares. De acordo com Heard (2008), Alfred Nobel, em 1887, desenvolveu outro tipo de agente propulsor, no qual a nitrocelulose era dissolvida em nitroglicerina.

Segundo Fernandes (2019), o agente propulsor é a fonte de energia de uma arma, permitindo acelerar o projétil através da aplicação da pressão gerada pelos gases em sua base. As substâncias empregadas devem ser altamente inflamáveis e liberar uma grande quantidade de gases durante a combustão. Para gerar elevadas pressões, a combustão deve ocorrer em espaço confinado, que, por ser de pequenas dimensões, não contém oxigênio suficiente para permitir a queima. Por isso, os agentes propulsores devem ser capazes de prover o oxigênio necessário para sua própria combustão. Os autores asseveram que, quando a pólvora preta queima, ela gera dióxido de carbono, nitrogênio e sulfeto de potássio. Esse último produz um fumo visível e deixa depósitos no cano da arma. A sua massa equivale a 40% da massa da pólvora utilizada em sua produção, o que justifica a limitada eficácia da pólvora preta. As pólvoras inodoras, que praticamente substituíram o uso da pólvora preta nas armas de fogo, baseiam-se em uma invenção do século XIX, a nitrocelulose. Essa substância é transformada em uma massa que é posteriormente cortada em "grãos de pólvora" no formato necessário. As pólvoras de nitrocelulose são conhecidas como pólvoras monobásicas, uma vez que contêm apenas uma substância que fornece energia. No entanto, a nitrocelulose também pode ser dissolvida em nitroglicerina, resultando em pólvoras dibásicas, uma vez que contêm duas substâncias fornecedoras de energia (COUPLAND et al., 2011).

Durante o processo de combustão, as pólvoras inodoras praticamente são transformadas em gases, tais como dióxido de carbono, monóxido de carbono, vapor de água, hidrogênio e nitrogênio. Essas substâncias geram cerca de três vezes mais gás em comparação com a mesma quantidade de pólvora negra, possibilitando a obtenção de pressões mais elevadas e, conseqüentemente, maiores forças de aceleração, com menor quantidade de pólvora (COUPLAND et al., 2011).

## **2.6 Concreto**

Alves (1982) conceitua o concreto como o resultado da combinação entre aglomerante, agregados, água e aditivos, constituindo um material flexível, capaz de se adaptar à geometria das estruturas, e caracterizado por um custo relativamente acessível.

Conforme afirmado por Neville (2011), o concreto se configura como um material compósito, reunindo a resistência à compressão inerente ao cimento com a durabilidade e a tenacidade proporcionadas pelos agregados. Nesse contexto, a pasta de cimento, resultante da

combinação entre cimento Portland e água, assume o papel de matriz que envolve os agregados, desempenhando um papel fundamental na consolidação da resistência do material. A introdução de aditivos exerce a função de alterar as características do concreto, aprimorando a sua trabalhabilidade, regulando o processo de cura, ou incrementando os níveis de resistência.

Por sua vez, Silva (1985) enfatiza que um concreto de excelência deveria primar pela resistência, durabilidade e eficiência econômica. Para alcançar tal padrão, é imprescindível que os agregados exibam uma distribuição granulométrica que minimize a presença de vazios, os quais serão preenchidos pela matriz de cimento, requerendo, ademais, apenas a quantidade necessária de água para o amassamento.

No tocante às características mecânicas, Alves (1982) afirma que os elementos constituintes da mistura do concreto são ajustados para conferir as propriedades predefinidas para o desenho da estrutura. Essas propriedades são determinadas de acordo com o cálculo estrutural, englobando aspectos cruciais como:

- Cargas mecânicas, térmicas e de outra natureza;
- Flutuações climáticas;
- Respostas dos materiais da superestrutura, das fundações e dos apoios;
- Forças influenciadas pelo tempo e características reológicas dos materiais.

Na fase de estado fresco, o concreto apresenta outras características, como homogeneidade, segregação e trabalhabilidade.

Segundo Godinho (2009) o concreto exibe características notáveis de versatilidade, durabilidade, eficiência econômica e resistência. De acordo com Verçoza (1983) e Silva (1985), as propriedades do concreto endurecido que merecem atenção incluem densidade, retração, expansão térmica, permeabilidade, resistência à compressão, tração e flexão, resistência ao desgaste e deformação lenta.

Segundo Lisboa (2023), o concreto é um material de construção de natureza complexa, cujas características e comportamentos demandam uma compreensão profunda das normas associadas, juntamente com a aplicação dos princípios relativos à dosagem, preparação, execução e projeto. Esses elementos se revelam de importância fundamental para assegurar tanto a durabilidade quanto o adequado desempenho das estruturas edificadas com esse material.

## 2.7 Impacto balístico e seus efeitos sobre o concreto

De acordo com as observações de Bangash (2009), a ação balística pode resultar tanto em danos gerais quanto locais em elementos estruturais de concreto. Danos gerais podem englobar deformações provenientes de flexão, cisalhamento e fissuras significativas, enquanto danos locais podem envolver situações como penetração e perfuração, destacamento, estilhaçamento e estilhaçamento por punção.

A penetração refere-se à profundidade da cavidade formada no alvo de concreto na região de impacto, sem no entanto, atravessá-lo completamente (Figura 6a). O destacamento ocorre quando fragmentos da estrutura são expelidos na direção da face de impacto (Figura 6a), enquanto o estilhaçamento envolve a ejeção de fragmentos na face oposta a essa área (Figura 6b). A perfuração é caracterizada pela completa transfixação do projétil através da espessura total do alvo de concreto, seja com ou sem uma velocidade residual remanescente (Figura 6c). O estilhaçamento por punção é a ejeção de um fragmento (em forma de tronco de cone) da estrutura de concreto na face oposta à face de ataque (Figura 6d).

Existem dois conceitos distintos de mecanismo de penetração do projétil em alvos de concreto: o bifásico e o trifásico.

O mecanismo bifásico baseia-se na teoria da expansão cavitacional dinâmica, na qual o processo de penetração é dividido em duas fases: a de formação de cratera e a de formação de túnel (FORRESTAL et al., 1994). A fase de formação de cratera inicia-se com a penetração do projétil na face de ataque do alvo e termina quando o projétil percorre, no interior do alvo, uma distância correspondente a duas vezes o diâmetro do projétil. A fase de formação de túnel inicia-se imediatamente após o término da fase de cratera e termina na penetração máxima do projétil.

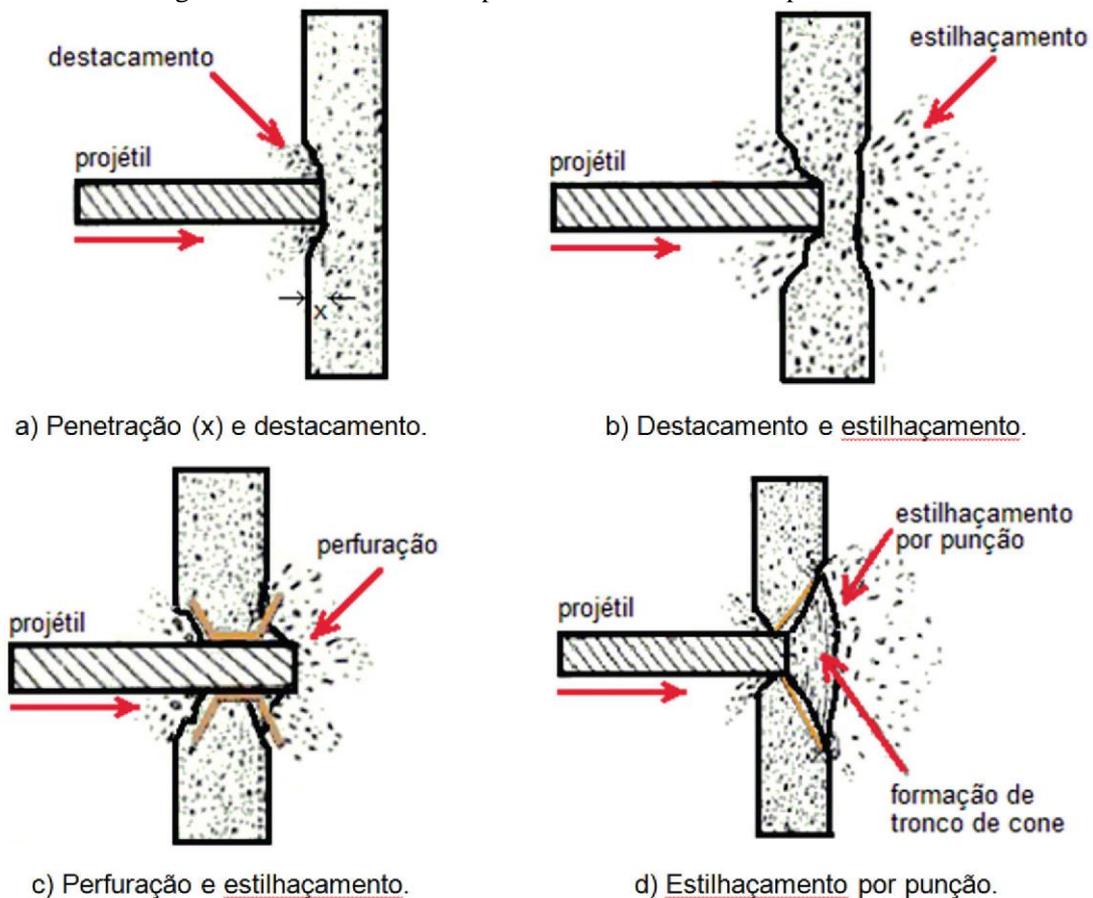
O mecanismo trifásico contém as duas fases do mecanismo anterior (formação da cratera frontal e do túnel) e a fase de cisalhamento da espessura restante de concreto, ocasionando a formação de uma cratera posterior (LI e TONG, 2003 apud LI et al., 2005). A etapa de criação do túnel pode deixar de ocorrer em situações em que a espessura do alvo seja reduzida.

Segundo Lefone (2015), a velocidade de impacto do projétil é um parâmetro relevante para a capacidade do concreto atuar como proteção balística. Quanto maior esta velocidade,

maiores o comprimento de penetração do projétil no concreto e a perda de massa do alvo de concreto

Ainda segundo Lefone (2015), a resistência à compressão do concreto também é um parâmetro relevante. À medida que a resistência à compressão do concreto aumenta, ocorre a redução do comprimento de penetração do projétil. No entanto, essa diminuição não se manifesta de maneira equivalente quando a resistência à compressão do concreto atinge patamares consideravelmente elevados.

Figura 6 – Danos locais em placas de concreto sob impacto balístico



Fonte: BANGASH, 2009 apud LEFONE, 2015.

## 2.8 Aramida

Conforme exposto por Kaw (2006), o termo "Fibra de aramida", ou simplesmente "aramida", designa um conjunto genérico de fibras orgânicas sintéticas reconhecidas como poliamidas aromáticas. Ao contrário das poliamidas lineares de cadeia longa, exemplificadas

pelo Nylon, as aramidas se notabilizam pela inclusão de anéis benzênicos em sua estrutura molecular. Essa particularidade confere a essas fibras uma configuração singular.

As aramidas ostentam atributos distintivos, a saber, baixa densidade, notável resistência mecânica e elevada capacidade de absorção de impactos. Todavia, é válido apontar que tais qualidades não se desincumbem de desvantagens inerentes, como baixas propriedades compressivas, higroscopia e vulnerabilidade à degradação quando expostas à radiação solar.

### 2.8.1 História da aramida

No decurso da década de 1960, as fibras sintéticas nylon e poliéster representavam a vanguarda tecnológica. Contudo, para conferir alta tenacidade e um elevado módulo de elasticidade às moléculas poliméricas, a configuração de cadeia estendida e arranjo cristalino quase perfeito era essencial. Em polímeros flexíveis, como o nylon e poliéster, essa configuração só poderia ser alcançada mecanicamente, após a fusão e tecelagem do polímero base. No entanto, essa operação era complexa, resultando em valores de tenacidade e módulo de elasticidade abaixo do potencial teórico.

Segundo Bernardi (2003), em 1965, um método inovador foi descoberto, gerando cadeias poliméricas quase perfeitas. O polímero poli-p-benzamina formava soluções cristalinas líquidas devido à estrutura molecular repetitiva. A orientação paralela do anel de benzeno era fundamental para a formação dessa espinha dorsal, gerando uma estrutura molecular semelhante a bastão.

Esse método trouxe a singularidade das soluções poliméricas cristalinas líquidas sob cisalhamento. Durante o fluxo por um orifício, os segmentos orientados começavam a alinhar-se, resultando em uma cadeia molecular quase perfeita. Essa estrutura era mantida na formação filamentar "puxada e torcida" das fibras, devido à lenta dissipação da orientação do cisalhamento.

A tecnologia de "montagem" de polímeros orientados proporcionou novas dimensões na fabricação de fibras de excepcional resistência. Isso culminou nas fibras de aramida comerciais. Diversas empresas empregaram essa metodologia para a criação de fibras de poli-para-fenol teraftalamida, as quais foram lançadas no mercado em 1971 como exemplares de fibras de aramida de notável tenacidade. Yang (1993) relata que, embora o termo "alto

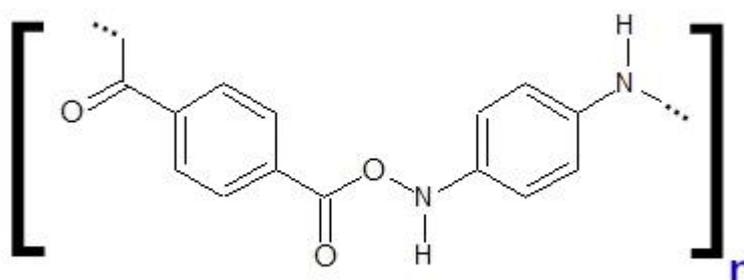
desempenho" careça de definição precisa, ele é utilizado para materiais tecnologicamente avançados e superiores em desempenho sob condições rigorosas. As fibras desenvolvidas nas décadas de 1950 e 1960 para altas temperaturas podem ser consideradas de alto desempenho. Desde a década de 1970, novas fibras de alto desempenho priorizaram atributos como resistência mecânica e térmica, resistência química e baixa densidade. As fibras aramida, com suas notáveis características mecânicas e térmicas, fazem parte desse grupo.

### 2.8.2 Kevlar®

Segundo DIAS 2022 o Kevlar® (ou poliarilamida ou poliaramida) é uma fibra sintética ou tecido sintético (polímero) que foi construído pela primeira vez no ano de 1965 pela cientista Stephanie Kwolek, da empresa norte-americana Du Pont. Este é um composto sintético caracterizado por uma força cerca de cinco a sete vezes superior à do aço. Além de sua resistência considerável, exibe uma notável leveza e flexibilidade, atributos que o tornam propício para a utilização em elementos pessoais, como os coletes à prova de balas.

E segundo Martello (2020), apesar do Kevlar® ser uma fibra, a sua razão de força/peso é altíssima, se tratando em resistência, o material de aramida é considerado 5 vezes mais forte se comparado ao mesmo peso do material de aço.

Figura 7 – Fórmula estrutural do Monômero do Kevlar®



Fonte: BRASIL ESCOLA, 2022.

A fibra de aramida conhecida como Kevlar® ingressou inicialmente no segmento de fibras de alto desempenho com uma variante de fio filamentar contínuo denominada Fibra B. Posteriormente, uma iteração de alta rigidez foi desenvolvida, sendo designada como PRD-49. Essa nomenclatura foi subsequente substituída pela designação comercial Kevlar 49®. Ao longo de determinados períodos, outras variantes de fios Kevlar® foram concebidas para

aplicações de caráter especializado. A Tabela 2 elucida as respectivas denominações e características inerentes a essas manifestações.

Tabela 2 – Denominações dos tipos de Kevlar® e suas características

Denominação	Tipo
Kevlar 29	Fio para todas as utilizações
Kevlar 49	Fio alto módulo
Kevlar 68	Fio de módulo moderado
Kevlar 100	Fio colorido
Kevlar 119	Fio alto alongamento
Kevlar 129	Fio de alta tenacidade
Kevlar 149	Fio de ultra alto módulo

Fonte: adaptado de Bernardi, 2003.

O filamento e a fibra conhecidos como Kevlar® estão acessíveis em diversas variantes, cada uma com suas propriedades intrínsecas e distintas características de desempenho, destinadas a atender às distintas exigências de proteção. Destacam-se dois tipos principais, a saber, o Kevlar® 29 e o Kevlar® 49. Ambos ostentam uma semelhante resistência específica, contudo, o Kevlar® 49 se destaca por sua maior rigidez específica, resultante de uma cristalinidade mais acentuada, quando comparado ao Kevlar® 29, uma diferenciação verificável por meio da técnica de difração de raios X, revelando uma menor orientação fibrilar no Kevlar® 29 (SMITH et al., 1998).

Tais distinções estruturais engendram aplicações distintas: o Kevlar® 29 encontra aplicabilidade em contextos balísticos, na confecção de cordas e cabos, blindagem de veículos e revestimentos elastoméricos de pneus; por outro lado, o Kevlar® 49 é empregado em cabos de fibra óptica, processos têxteis, reforço de resinas epóxi, poliéster e outras matrizes no setor aeroespacial, automotivo, naval e nas indústrias de esportes aquáticos. (CHAWLA, 2013; DUPONT, 2015) A Tabela 3 sintetiza algumas propriedades inerentes aos dois proeminentes tipos de Kevlar®.

Tabela 3 – Propriedades dos dois principais tipos de Kevlar®

Propriedades	Kevlar® 29	Kevlar® 49
Densidade (g cm <sup>-3</sup> )	1,44	1,45
Diâmetro (µm)	12	12
Resistência à tração (GPa)	2,8-3,8	2,8-3,8
Tensão elástica de fratura (%)	3,5-4,0	2,8
Módulo de elasticidade (GPa)	65	125
Coefficiente de expansão (10 <sup>-6</sup> )	-4,0	-4,9

Fonte: adaptado de Chawla, 2013.

A constatação realizada por Yan e Chen (2014) revela que as fibras de elevada performance, como é o caso do Kevlar®, exibem notável rigidez em consonância com reduzidos valores de densidade. Nesse âmbito, os compósitos fortificados por tais fibras, as quais demonstram, adicionalmente, uma notável resistência à tração e um elevado módulo de elasticidade, são frequentemente de significativo interesse em aplicações de caráter avançado. Estas abrangem, exemplarmente, a contenção de lâminas em turbomáquinas, a constituição de estruturas aeronáuticas e a elaboração de painéis balísticos empregados na proteção automotiva.

### 2.8.3 Propriedade mecânica

As propriedades mecânicas englobam a plenitude das características que definem a reação dos materiais perante estímulos mecânicos externos, manifestando-se por meio da habilidade desses materiais em manifestar deformações de natureza tanto reversível quanto irreversível, além de sua resistência intrínseca à fratura, como explanado por Mano (2000).

Consoante Salaverría et al. (1997), as fibras constituídas de aramida revelam uma notável resistência à tração, atingindo aproximadamente 3.150 MPa, e exibem um módulo elástico de magnitude de 125.000 MPa, contudo não manifestam resistência alguma à compressão. É relevante assinalar que fibras provenientes de um mesmo produtor podem adotar características distintas, de acordo com os métodos de produção e os processos de tecelagem empregados. No contexto dessas variações, a Tabela 4 explicita as propriedades intrínsecas de diferentes variantes de aramida Kevlar, elucidadas por meio de ensaios efetuados em cabos confeccionados pela empresa DuPont. Constatamos que, embora o Kevlar 49 partilhe densidade análoga e apresente tenacidade comparável ao Kevlar 29, demonstra-se amplamente mais rígido. Este avanço é obtido mediante a aquisição de uma maior rigidez da cadeia, resultando em uma redução concomitante da capacidade de extensão, conforme discernido na referida tabela.

Tabela 4 – Resultados de testes com cabos

<b>Testes diretos em cabos condicionados</b>			
	Unidade	Kevlar 29	Kevlar 49
Esforço de ruptura	N	338	264
Esforço de tenacidade	MPa	2920	3000
Módulo de tração	MPa	70500	112400
Alongamento de ruptura	%	3,6	2,4

Fonte: DU PONT, 199-

#### 2.8.4 Resistência ao impacto

Na esfera dos compósitos reforçados com fibras de aramida, destaca-se uma notável resistência ao impacto em contraposição a compósitos que incorporam fibras de vidro ou fibras de carbono. Acresce-se que tais compósitos revelam um grau apreciável de tolerância a danos, conforme evidenciado por Yang (1993). Em um cenário comparativo, a fibra de carbono se caracteriza por um comportamento frágil e uma baixa capacidade de resistência a impactos.

Segundo Trevisan (2001) apud Bernardi (2003), ao focar a resistência a impactos inerente à fibra de aramida, endossa a reconhecida utilização deste material em aplicações de blindagem, bem como em elementos como para-choques automobilísticos e dispositivos de salvaguarda pessoal. No contexto dos compósitos balísticos, a performance das fibras está intrinsecamente vinculada à sua capacidade de absorção de energia e aos mecanismos subjacentes à fratura dinâmica durante impactos. De maneira geral, os compósitos de cunho avançado ostentam uma notável capacidade de absorção de energia cinética em confronto aos materiais metálicos tradicionais. De acordo com Martello (2020), frequentemente se utiliza a estratégia de empregar tecidos a fim de conter a propagação das linhas de fratura, proporcionando simultaneamente um papel de natureza estrutural e protetiva para os compósitos.

### 2.9 Concreto balístico reforçado com fibras de aramida

O emprego de fibras como reforço em estruturas de concreto armado tem emergido como um setor altamente atrativo. A incorporação destas fibras proporciona modificações nas características dos compósitos resultantes, como mencionado por Kern (1999) citado por

Bernardi (2003), conferindo uma aprimorada gama de propriedades mecânicas nas matrizes vulneráveis. Esse aprimoramento inclui um incremento nas resistências à tração, flexão e impacto, bem como uma maior ductilidade e um controle mais efetivo na propagação de fissuras. No contexto específico das matrizes cimentícias, a presença das fibras contribui para mitigar o fenômeno de fissuração por retração, concomitantemente ampliando a durabilidade do compósito. Adicionalmente, tais fibras potencializam a resistência ao impacto e ao fogo, ao mesmo tempo em que conferem maior resiliência.

Relativamente à trabalhabilidade, a elaboração de concreto projetado com fibras apresenta desafios notáveis, notadamente concernentes ao aglomeramento das fibras e à readição do aditivo, como enfatizado por Araújo da Silva (2002) citado por Bernardi (2003). A mitigação do aglomeramento pode ser alcançada mediante a manipulação do volume de fibras, a qualidade do processo de mistura e a ponderação do fator de forma, definido como a razão entre o comprimento e o diâmetro das fibras.

Bernardi (2003) postula que a incorporação de fibras em uma matriz qualquer concorre para a amplificação da capacidade desta em suportar esforços, visto que uma parcela da carga é transmitida da matriz para a fibra por meio de deformações de cisalhamento na interface matriz/fibra. Essa redistribuição de carga muitas vezes resulta das disparidades nas características físicas entre a fibra e a matriz, amplificando-se significativamente após a ocorrência de fissuras na matriz.

No entanto, vale mencionar as contribuições recentes de Sovják (2021), que salienta que a resistência à compressão uniaxial dos materiais de construção pode ser enganadora, uma vez que a resistência à penetração exhibe variações significativas entre materiais que compartilham resistências à compressão similares. Portanto, a realização de ensaios de impacto balístico emerge como crucial para a obtenção de dados mais verossímeis.

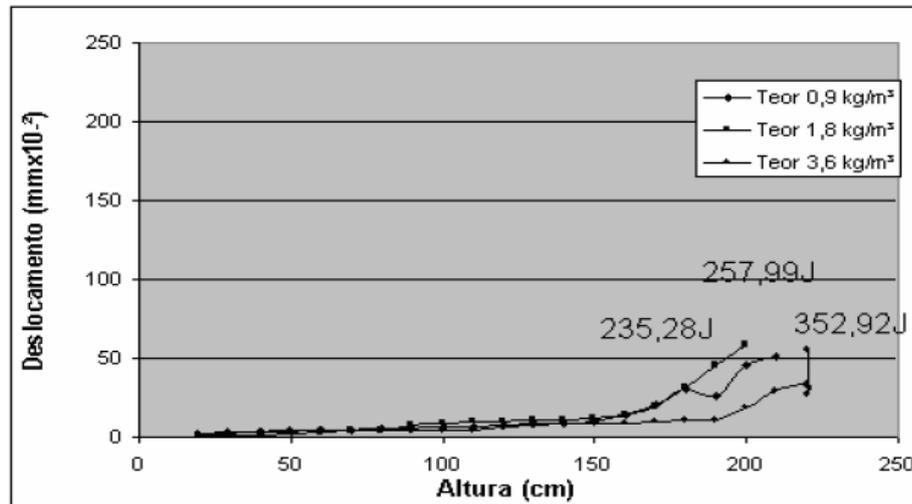
Bernardi (2003) delinea o conteúdo e o comprimento das fibras de aramida com base na analogia química e no diâmetro das fibras de polipropileno.

No tocante à composição do traço, o estudo conduzido por Bernardi (2003) adotou a proporção de 1:2,21:3,21 (cimento:areia:brita), em termos de massa, com uma relação água/cimento de 0,52 e uma adição de superplastificante correspondente a 0,3%.

Para avaliar o impacto da incorporação de fibras de aramida nas amostras de concreto reforçado, Bernardi (2003) conduziu ensaios com teores de 0,9 kg/m<sup>3</sup>, 1,8 kg/m<sup>3</sup> e 3,6 kg/m<sup>3</sup> de

fibras, adotando fibras de 12 mm de comprimento. Notavelmente, o desempenho ótimo foi registrado no teor de fibra de  $3,6 \text{ kg/m}^3$ , como ilustrado na figura 8.

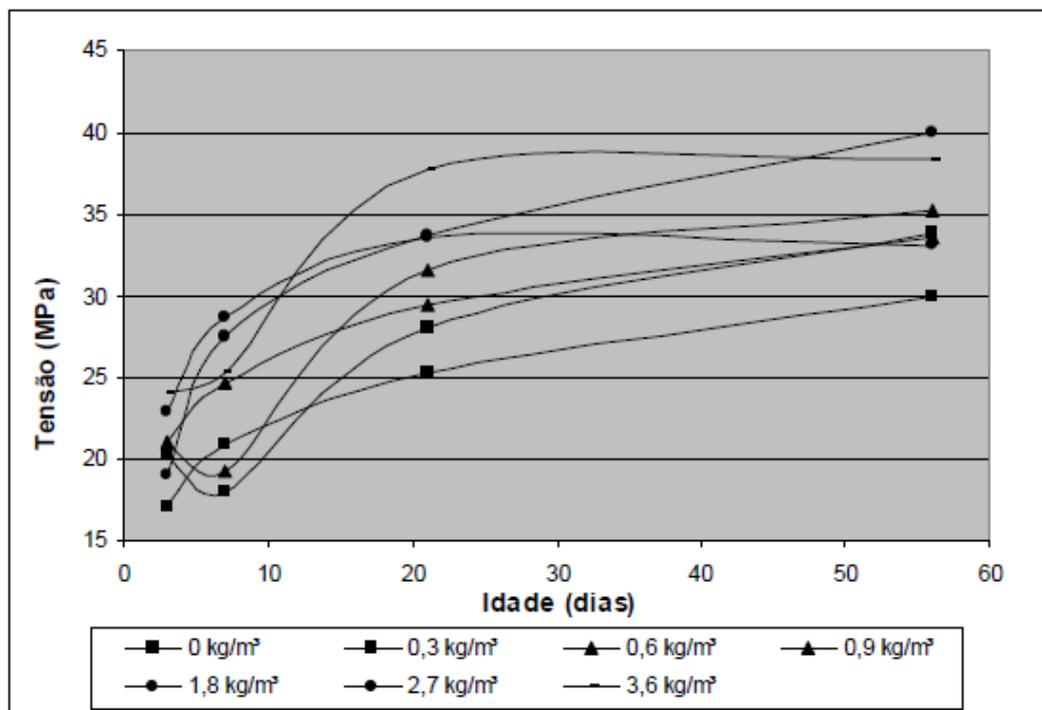
Figura 8 – Ensaio de impacto para placas com fibras de aramida incorporadas



Fonte: Bernardi, 2003.

No que concerne ao ensaio de compressão simples, a pesquisa realizada por Bernardi (2003) corrobora a obtenção do melhor desempenho no teor de fibra correspondente a  $1,8 \text{ kg/m}^3$ , conforme ilustrado de maneira elucidativa na figura 9.

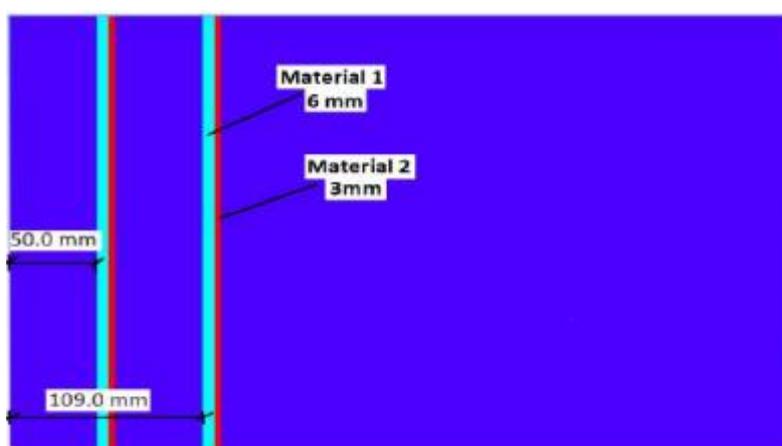
Figura 9 – Resistência à compressão simples com todos os teores.



Fonte: Bernardi, 2003.

No estudo conduzido por Elhozayen et al. (2019), foi procedida a avaliação da profundidade de penetração do projétil em corpos de prova de concreto reforçados por uma combinação estratificada de duas camadas distintas. A primeira camada, com espessura de 6 mm, consiste em material cerâmico ou alumínio, enquanto que a segunda camada, com 3 mm de espessura, é constituída por fibra de Kevlar®. Conforme representado de modo esclarecedor na figura 10, os resultados demonstraram que tal abordagem resultou em uma significativa redução de aproximadamente 69,9% na profundidade de penetração do projétil.

Figura 10- Combinação e geometria da amostra



Fonte: Elhozayen et al., 2019.

## 2.10 Coletes com validade prescrita

A gestão de coletes balísticos no contexto brasileiro representa um desafio significativo para as instituições de segurança pública, que adotam a prática de substituição desses coletes a cada cinco anos. O descarte adequado dos coletes utilizados é de extrema importância e deve seguir as diretrizes estabelecidas na portaria nº 18-DLOG, de dezembro de 2006, que preconiza a destruição desses equipamentos vencidos por meio de técnicas como picotamento ou, no caso de coletes fabricados inteiramente com aramida, por incineração.

O Coronel Serra, Diretor do Depósito Central de Armas e Munições (DCMun), informou que em 2021 cerca de 3.000 coletes vencidos estavam aguardando procedimentos de descarte na Polícia Militar do Estado do Rio de Janeiro (PMERJ).

Considerando o forte comprometimento das forças policiais no gerenciamento adequado dos coletes balísticos expirados e o interesse de algumas dessas instituições em

explorar novas aplicações para esses materiais, surge a necessidade de um processo adicional de reciclagem. Entre as possíveis abordagens, destaca-se a importância de realizar um estudo abrangente para avaliar a viabilidade de utilizar essas fibras na melhoria da resistência de blocos de concreto, visando à proteção dos agentes públicos.

No entanto, devido à classificação dos coletes como ativos de natureza bélica, a obtenção desses materiais envolve um notável nível de complexidade burocrática para concretizar a doação. Essa circunstância, por sua vez, se apresenta como uma barreira substancial, tornando-se impraticável aguardar pela aquisição desse material. Portanto, o tecido composto por fibras de aramida utilizado para reforçar o concreto é proveniente da marca Redelease, a qual atende integralmente aos rigorosos critérios de qualidade necessários para os propósitos desta pesquisa.

### 3 METODOLOGIA

O método utilizado neste trabalho está apresentado ao longo deste capítulo e dividido em três partes para melhor entendimento dos procedimentos, conforme itens 4.1, 4.2 e 4.3. No item 4.1 apresentam-se os materiais que foram utilizados. No item 4.2 apresentam-se os procedimentos utilizados para a moldagem dos corpos de prova e suas propriedades. E no item 4.3 apresenta-se os procedimentos utilizados no ensaio balístico em placas de concreto reforçadas com tecido de fibra de Aramida.

#### 3.1 Materiais empregados

O material aglomerante utilizado foi o cimento Portland de alto-forno CAMPEÃO - ECOMAX CP III-32 RS, cujas características físicas e químicas descritas na embalagem se enquadram na ABNT NBR 16.697:2018, que trata dos requisitos do cimento portland. O agregado graúdo empregado no presente concreto foi a brita número zero, adquirida junto ao comércio local. Previamente ao uso, esse agregado foi submetido a processos de lavagem, visando a eliminação de eventuais impurezas, e sua seleção foi criteriosamente conduzida por meio de peneiramento, conforme figura 11, obedecendo a uma granulometria mínima de sete milímetros. O agregado miúdo empregado consiste em areia lavada de rio, adquirida igualmente junto ao comércio local.

Figura 11 – Lavagem do agregado graúdo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O aditivo plastificante empregado na presente pesquisa é o SIKA - Concreto Forte, fornecido pela empresa SIKA S.A., e adquirido junto ao comércio local na cidade de Nova Friburgo/RJ. Este aditivo é compatível com todas as classes de cimento Portland e foi cuidadosamente selecionado para ser utilizado com o propósito de incrementar a trabalhabilidade das misturas com fibras, sem promover um aumento na relação água-cimento.

Figura 12 – Especificação do aditivo plastificante



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O propósito da pesquisa residia na utilização de fibras de aramida provenientes de coletes balísticos cujo prazo de validade havia expirado. No entanto, devido à categorização dos coletes como bens de natureza bélica, a obtenção desses materiais implica uma significativa complexidade burocrática para a consecução da doação. Essa situação, por sua vez, se configura como uma barreira substancial, tornando-se impraticável aguardar pela aquisição desse material. Sendo assim, o tecido de fibras de aramida empregado na composição do concreto é proveniente da marca Redelease, e suas dimensões abrange uma medida de 1x1,30 metros. A aquisição deste material foi realizada levando em consideração os critérios de qualidade necessários para os propósitos desta pesquisa.

Figura 13 – Tecido de Fibra de Aramida Kevlar® (1x1,30 m)



Fonte: Redelease, 2023.

O traço adotado na formulação do concreto foi estabelecido com base em uma investigação conduzida por Lisboa (2023), que determinou a relação entre as massas dos diferentes componentes. Inicialmente, o traço escolhido seguia a proporção de 1:1,5:2 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo), com uma relação água/cimento (a/c) de 43%. De acordo com Oliveira et al. (2018), esse traço resultou em uma resistência à compressão de 26,2 MPa após 28 dias de cura.

Em conformidade com as diretrizes estabelecidas na ABNT NBR 12655:2015, foram realizados ajustes empíricos para alcançar as características mínimas desejadas de resistência à compressão. Essas características foram obtidas com a adoção da proporção de 1:2,8:2,1 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo). Além disso, as relações entre água/cimento e plastificante/cimento foram fixadas em 34% e 4%, respectivamente, a fim de garantir a formulação apropriada das misturas empregadas neste estudo.

### **3.2 Confeção dos corpos de prova**

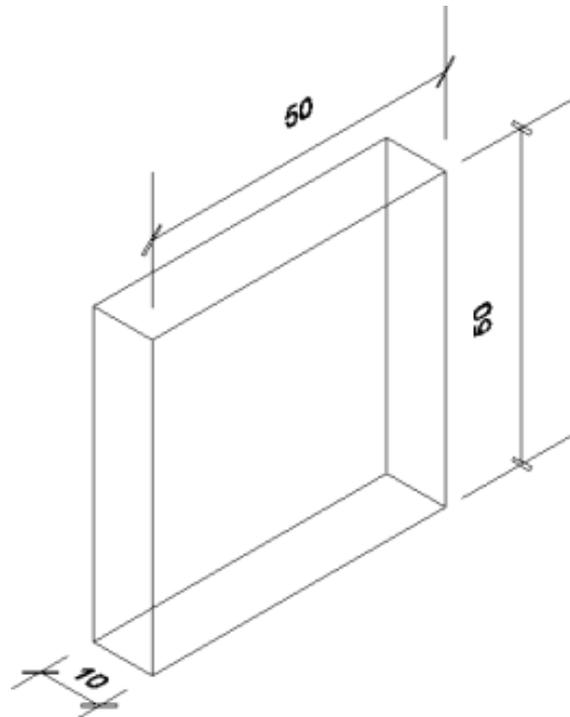
Efetuuou-se a concretagem de todo o material essencial para a presente pesquisa, utilizando-se uma betoneira de concreto, conforme figura 14. Foram, portanto, confeccionadas duas placas de dimensões 50x50x10 centímetros (cm), conforme figura 15 e vinte e um corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

Figura 14 – Betoneira utilizada para manipulação do concreto



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 15 – Dimensões das placas em centímetros



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para a confecção do concreto, foram empregados: uma balança digital de bancada da marca Toledo, com capacidade de 60 kg com precisão de  $\pm 20$  g, recipientes para a mensuração e manipulação dos materiais, uma concha metálica, uma espátula de aço em formato triangular, vinte e um moldes cilíndricos e duas formas de madeira.

Todos os componentes referentes à concretagem foram devidamente acondicionados na betoneira, e esta foi acionada, até que se alcançasse uma mistura homogênea. Em seguida, procedeu-se ao preenchimento das formas de madeira, inserindo concreto até a metade do molde. Subsequentemente, foram dispostas seis camadas do tecido de fibra de aramida, seguidas do complemento com concreto para preencher a parte restante da forma.

Figura 16 – Concretagem das formas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

As duas placas foram desmoldadas após 24 horas da concretagem e submetidas a um processo de cura durante um período de 28 dias. Em sequência, foram armazenados nas condições ambientais do laboratório por um acréscimo de 21 dias, até a data do ensaio balístico.

Antes da realização do ensaio balístico, procedeu-se à pesagem das duas placas mediante o uso de uma balança digital de bancada, marca Toledo, sendo denominadas como Bloco A e Bloco B para fins de identificação. O Bloco A apresentou uma massa de 55,4 kg e uma densidade de  $2.216 \text{ kg/m}^3$ , enquanto o Bloco B registrou uma massa de 57,6 kg e uma densidade de  $2.294 \text{ kg/m}^3$ , conforme ilustrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização dos blocos A e B quanto à densidade

	<b>Massa</b>	<b><math>\rho</math></b>
Bloco A	55,4 kg	2216,0 kg/m <sup>3</sup>
Bloco B	57,6 kg	2294,0 kg/m <sup>3</sup>
Média	56,5 kg	2255,0 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Após o período de 28 dias de cura, os vinte e um corpos de prova cilíndricos (CPC) foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, utilizando-se uma prensa da marca Solotest conforme figura 17. É importante ressaltar que todos os corpos de prova foram confeccionados com concreto desprovido de fibras.

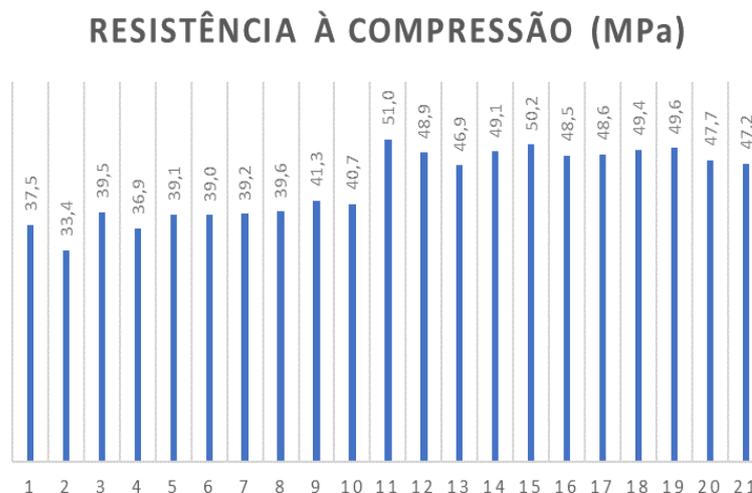
No término do ciclo de cura de 28 dias, os mesmos CPC empregados neste estudo foram examinados por Lisboa (2023). Observou-se que esses corpos de prova apresentaram uma média de resistência à compressão axial de 44 MPa, conforme ilustrado no gráfico 1.

Figura 17 – Prensa Solotest utilizada para o ensaio de resistência a compressão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Gráfico 1 – Ensaio de resistência à compressão após período de cura



Fonte: LISBOA, 2023

### 3.3 Ensaio balístico

O ensaio balístico foi conduzido após o período de 49 dias nas instalações do Clube de Tiro Oodaloop, localizado no município de Nova Friburgo – RJ, com a participação de representantes do 11º Batalhão da Polícia Militar do Estado do Rio de Janeiro. As armas e munições empregadas no experimento foram cedidas pela PMERJ, assim como os equipamentos de proteção individual.

A distância estabelecida entre o atirador e o alvo foi delimitada em 15 metros, seguindo as diretrizes estipuladas na norma NIJ 0108.01:1985 para armamentos classificados como tipo III. A NIJ 0108.01:1985 constitui a norma norte-americana que estabelece um padrão de referência para avaliar a resistência balística de materiais de proteção. Os blocos foram posicionados com uma leve inclinação em relação à normal, com o objetivo de evitar o fenômeno de ricochete. O atirador permaneceu em postura ajoelhada, buscando manter a trajetória do projétil disparado perpendicular à face de impacto.

Figura 18 – Ensaio balístico



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Cada bloco foi alvo de três impactos balísticos, todos eles causados por disparos efetuados por fuzis da marca Imbel, modelo Parafal, de calibre 7,62 mm, além de um impacto balístico originado por um fuzil Imbel de calibre 5,56 mm.

Figura 19 – Armas e munições utilizadas no ensaio balístico



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são expostos os resultados adquiridos a partir do ensaio balístico efetuado. Além dos dados referentes às placas, foram inclusas informações concernentes aos impactos sofridos por elas, com o propósito de viabilizar uma análise comparativa.

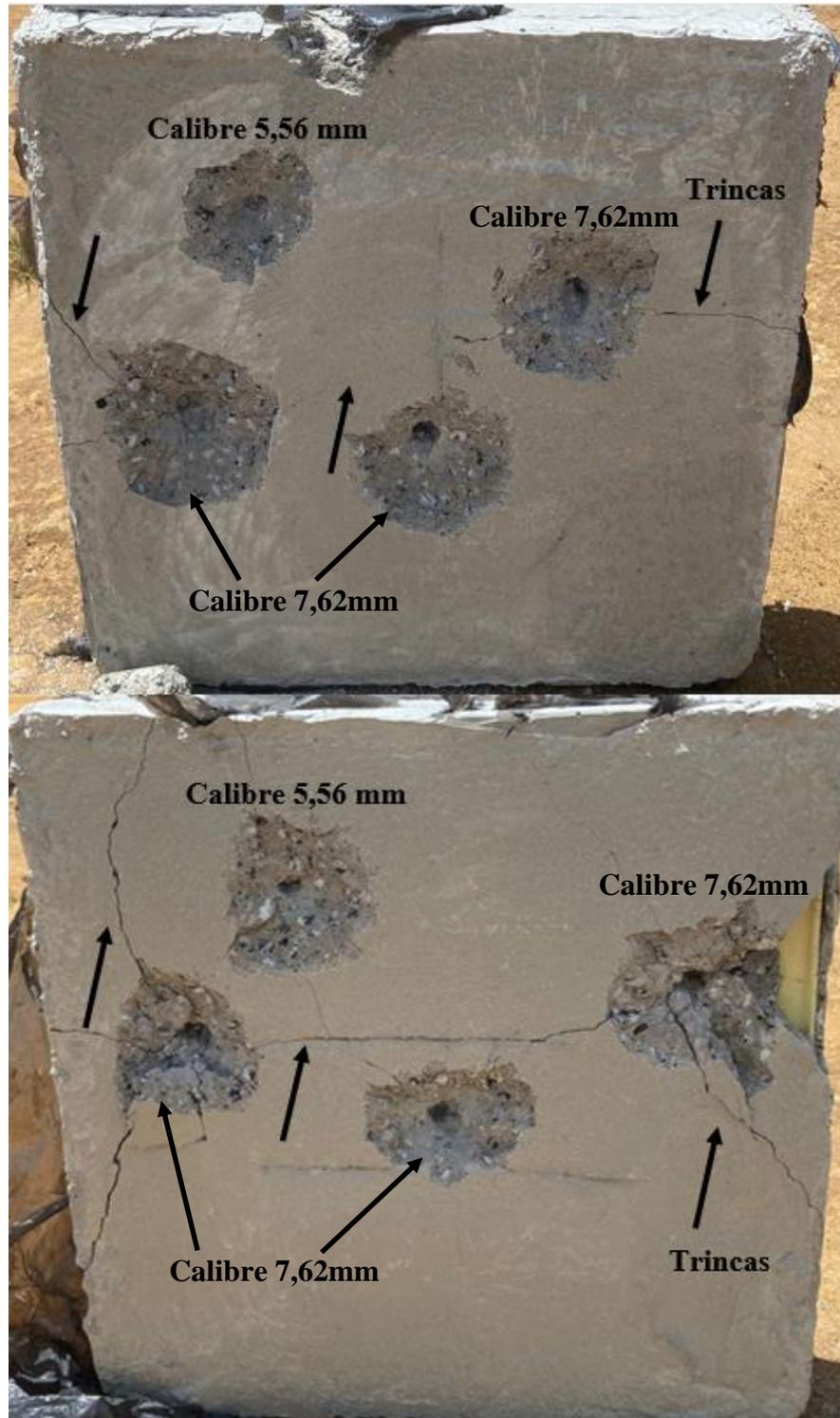
Os blocos foram submetidos ao impacto balístico causado por projéteis de calibre 7,62mm e 5,56mm. Para a realização do experimento, utilizou-se um Fuzil da marca Imbel, modelo Parafal, com calibre 7,62mm, efetuando-se três disparos, em cada placa, e um Fuzil da mesma marca e modelo, com calibre 5,56mm, efetuando-se um disparo, em cada placa. Foi registrado, conforme figura 21, a ocorrência de danos tanto em escala local quanto global. Pode-se observar em ambos os blocos a ocorrência dos danos locais de penetração e destacamento e os danos globais foram identificados como trincas que se propagaram a partir das bordas dos danos locais e também na face oposta de impacto do projétil conforme figura 20. Essa evidência corrobora a ocorrência do mecanismo bifásico de impacto balístico (TIBÚRCIO, 2019), no qual ocorreram a formação de cratera e túnel, mas não houve o acontecimento do mecanismo trifásico, ou seja, os blocos não foram perfurados ou transfixados.

Figura 20 – Ocorrência de trincas na face oposta dos blocos impactados por projéteis cal. 5,56mm e cal.7,62mm



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 21 – Blocos impactados por projéteis cal. 5,56mm e cal.7,62mm

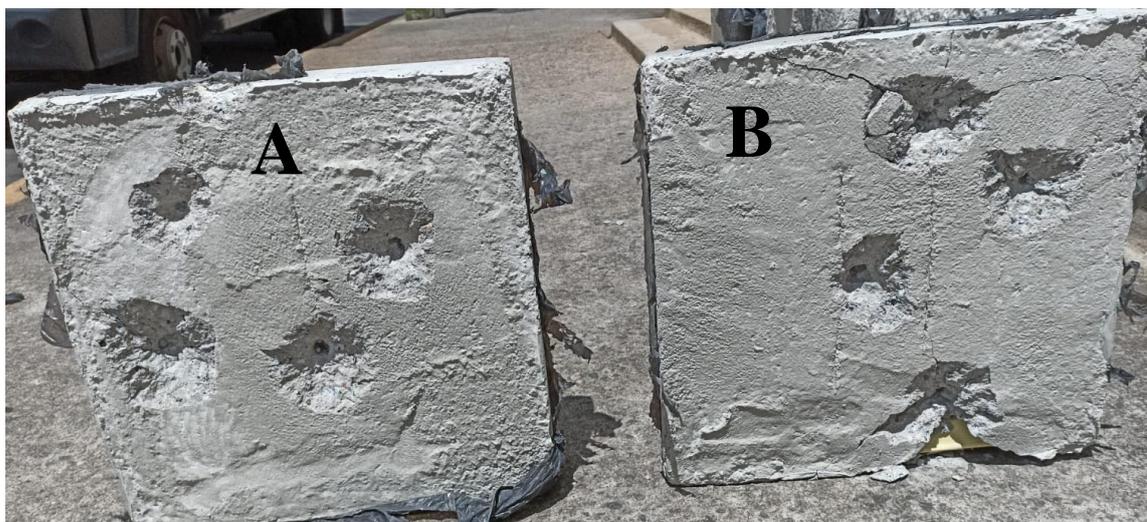


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Após a conclusão dos disparos, os blocos foram coletados e, posteriormente, submetidos a uma nova mensuração de suas respectivas massas, com a mesma balança utilizada anteriormente ao teste. Constatou-se, conforme figura 22, uma redução de massa em ambos os

corpos de prova, sendo o bloco A afetado por uma perda de 1,62% em sua massa, enquanto que o bloco B registrou uma diminuição de 2,78% em relação a sua massa inicial. Evidenciou-se que o bloco B apresentou uma porcentagem superior de perda de massa, o que pode ser atribuído ao fato de um disparo de calibre 7,62 mm ter atingido uma área próxima à borda do bloco. Tal ocorrência resultou no deslocamento de uma maior quantidade de fragmentos de concreto, contribuindo para acentuar a perda de massa observada nesse bloco.

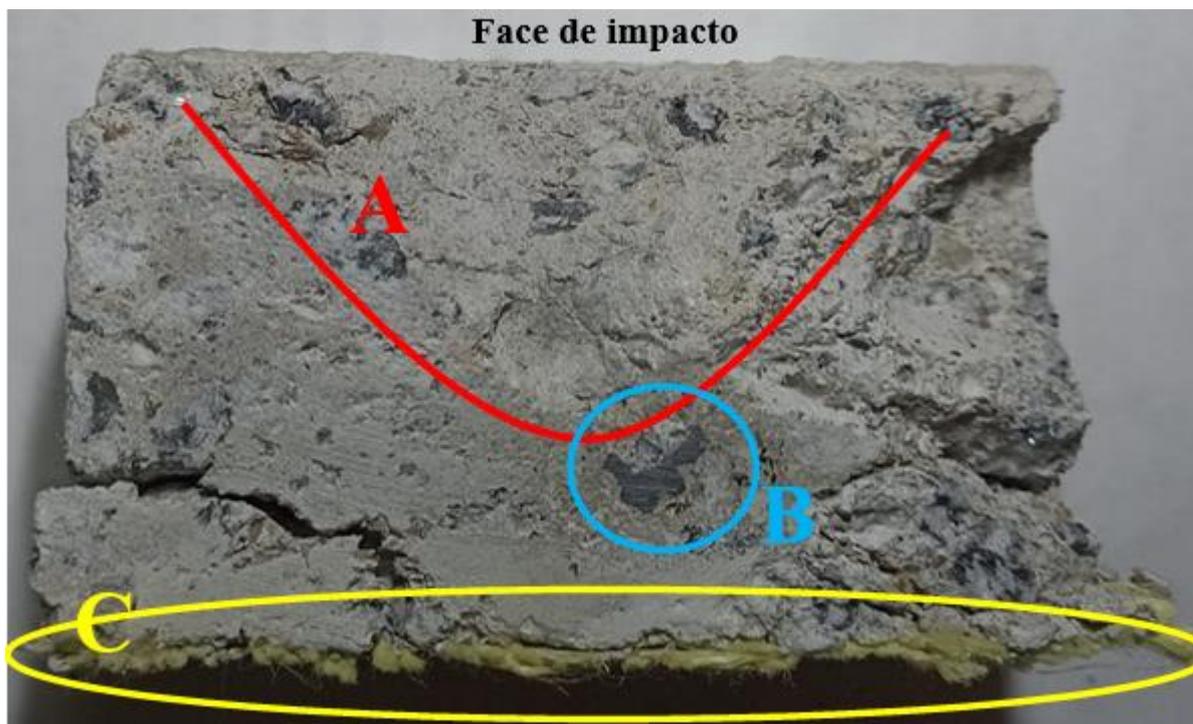
Figura 22 – Blocos A e B após aferição de suas respectivas massas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Foram analisadas as dimensões das crateras decorrentes do impacto dos projéteis, revelando uma profundidade de 44,5 milímetros para as crateras geradas por disparos de calibre 7,62 mm, enquanto que as crateras ocasionadas por calibre 5,56 mm apresentaram uma profundidade de 28 milímetros. Com o intuito de proporcionar uma interpretação mais aprofundada acerca dos danos causados à estrutura, procedeu-se à realização de cortes transversais das amostras, que possibilitaram uma análise intrínseca dos mecanismos identificados.

Figura 23 – Amostra transversal de bloco seccionado no ponto médio do impacto balístico



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

De acordo com a figura 23, é possível notar no ponto A a configuração de uma cratera resultante do impacto do projétil. No ponto B, observa-se a presença de um fragmento do projétil imerso no interior do concreto, enquanto que no ponto C é evidenciada a existência de uma camada do tecido de fibra de aramida. Embora tenha ocorrido a formação do mecanismo bifásico de penetração, caracterizado pela criação de cratera e túnel, o mecanismo trifásico, que compreenderia a perfuração com transfixação do bloco, não se concretizou. Nota-se, conforme figura 23, que o fragmento do projétil permanece alojado antes de atingir a primeira camada do tecido de fibra de aramida.

## CONCLUSÃO

Concluiu-se que, os blocos de concreto A e B, após serem submetidos a disparos balísticos, apresentaram uma redução significativa em suas massas. O bloco A registrou uma perda de massa de 1,62%, enquanto o bloco B demonstrou uma diminuição mais substancial, atingindo 2,78% em relação à sua massa inicial. A disparidade nas perdas de massa pode ser atribuída à localização do impacto, uma vez que um projétil de calibre 7,62 mm atingiu uma área próxima à borda do bloco B, ocasionando o deslocamento de uma quantidade maior de fragmentos de concreto e, conseqüentemente, acentuando a perda de massa observada nesse bloco. Isso evidencia a influência crítica da localização do impacto na magnitude das perdas de massa em estruturas de concreto sujeitas a impactos balísticos.

Com base nas análises realizadas, conclui-se que os disparos de calibre 7,62 mm resultaram em crateras com uma profundidade de 44,5 milímetros, enquanto os disparos de calibre 5,56 mm geraram crateras com 28 milímetros de profundidade.

Além disso, cortes transversais das amostras revelaram informações adicionais sobre os danos locais causados à estrutura. Na análise detalhada dos cortes transversais, notou-se que, embora tenha ocorrido o mecanismo bifásico de penetração, caracterizado pela formação de cratera e túnel, o mecanismo trifásico, que envolveria a perfuração com a transfixação completa do bloco, não foi observado. A partir destes danos locais, tornou-se evidente a ocorrência de trincas de extensão por todo bloco, as quais foram caracterizadas como danos globais

Apesar dos resultados indicarem a capacidade de absorção de energia do concreto reforçado com fibras de aramida em resposta a impactos balísticos, pode-se afirmar que a inserção interna da manta de aramida contribuiu para a propagação de trincas e uma perda média de massa de aproximadamente 2,2%, evidenciando a falta de aderência necessária tanto entre o concreto e a aramida, quanto entre as laminações da própria aramida.

### **Sugestões para trabalhos futuros**

Como sugestão para novas pesquisas deixa-se as seguintes:

- Utilizar concreto de ultra alto desempenho;
- Utilizar cronógrafo para medição da velocidade dos projéteis;
- Analisar o desempenho de elementos de concreto com adição de fibra contínuas e descontínuas submetidos a um impacto balístico;

- Condução dos testes balísticos empregando uma câmera de alta velocidade para registro;
- Utilizar alguma substância/produto que viabilize a aderência entre a aramida e o concreto.

## REFERÊNCIAS

ALVES, José Dafico. Manual de tecnologia do concreto. 2ª ed. Goiânia: Ed. Da Universidade Federal de Goiás, 1982. 158p.

André Martello. Análise sobre o uso de fibra de carbono e aramida em reforço estrutural. Ignis, Caçador, v. 9, n. 2, p. 19-39, mai./ago. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BLINDAGEM. Abrablin – Associação Brasileira de Blindagem. Disponível em: Abrablin | Associação Brasileira de Blindagem. Acesso em: 14 jul. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento Portland. 7ª ed. São Paulo, 2002. 28p (BT.106).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland - Requisitos. NBR 16.697. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. NBR 5.739. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. NBR 5.738. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concretos para fins estruturais, por grupos de resistência e consistência. NBR 8.953. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Proteção balística. Parte 2: Classificação, requisitos e métodos de ensaio para materiais planos. NBR 15.000-2. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Sistemas de Blindagem. Parte 1: Terminologia. NBR 15.000-1. Rio de Janeiro, 2020.

BANGASH, M.Y.H. Shock, Impact and Explosion: Structural Analysis and Design. Springer, Germany, 2009.

BERNARDI, Tesi Bernardi. Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida Kevlar®. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.

CHAWLA, K.K. Composite Materials. Science and Engineering. 3ª ed. Springer. Birmingham, 2013.

COUPLAND, R., ROTHSCILD, M., & THALI, M. (2011). Wound ballistics: basics and applications. Beat Kneubuehl, Ed., Springer Science & Business Media.

DIAS, Diogo Lopes. "Kevlar." Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/quimica/kevlar.htm>. Acesso em: 14 de julho de 2022.

DIMAIO, V. J. M. (1999). *Gunshot Wounds Practical Aspects of firearms, Ballistics, and Forensic Techniques* (2ª ed.). CRC Press.

DU PONT. Du Pont de Nemours & Co., Inc., E.I Catálogo Técnico, 199-.

ELHOZAYEN, Aya; LAISSY, Mohamed Y.; ATTIA, Walid A. Investigation of High-Velocity Projectile Penetrating Concrete Blocks Reinforced by Layers of High Toughness and Energy Absorption Materials. *Civil Engineering Journal*, Vol. 5, No. 7, July, 2019, p. 1518.

FERNANDES, João Pedro Ferreira. *Balística Terminal: Estudo do Comportamento de Projéteis na Estrutura de Viaturas*. Lisboa: Instituto Superior de Ciências Policiais e Segurança Interna, Maio de 2019.

FORRESTAL, M. J et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets. *International Journal of Impact Engineering*, v. 15, n. 4, pp. 395-405, 1994.

GODINHO, Dalter Pacheco. *Pavimento intertravado: uma reflexão na ótica da durabilidade e sustentabilidade*. 2009.

HEARD, B. J. (2008). *Handbook of Firearms and Ballistics* (2ª ed.). John Wiley & Sons.

KAW, A.K. *Mechanics of Composite Materials*. 2ª ed. Florida: Taylor & Francis, 2006.

KERN, A.P. *Estudo da Viabilidade da Incorporação de Resíduos de Contrafortes de Calçados em Matriz de Gesso para Uso como Material de Construção Civil*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 1999.

LEFONE, Renato Cancherini, CARNEIRO, Luiz Antonio Vieira, TEIXEIRA, Ana Maria Abreu Jorge. *Concretos especiais para blindagem de estruturas de defesa*. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia (RMCT)*, 2015.

LI, Q. M. et al. Local impact effects of hard missiles on concrete targets. *International Journal of Impact Engineering*, v. 32 n. 1–4, p. 224–284, 2005.

LISBOA, Wesley Machareth. *Análise de impactos balísticos em corpos de prova de concreto: caracterização do material e identificação, análise e classificação dos danos*. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico de Engenharia, 2023.

MALLICK, P.K. *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. Third edition: Taylor & Francis Group, 2007.

MANO, E. B. *Polímeros como materiais de engenharia*. São Paulo: Edgar Bucher, 2ª ed., 2000.

MONTEIRO. Conceitos fundamentais de balística. Página do Monteiro, [s.l.], [s.d.]. Disponível em: [index.html](http://index.html) ([apaginadomonteiro.net](http://apaginadomonteiro.net)). Acesso em: 13 jul. 2022.

NAIK, N.K., Shrirao, P., Reddy, B.C.K. Ballistic impact behavior of woven fabric composites: Formulation. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, p. 1521-1552, 2006.

NEVILLE, A. M. *Properties of Concrete*. 5ª ed. São Paulo: Pearson, 2011.

OLIVEIRA, Alexandre Guimarães M. O paradigma do “stopping power” e os benefícios do calibre 9mm luger em comparação ao calibre .40 s&w para o serviço policial. Site portal das armas, *Balística | Portal das Armas* ([wordpress.com](http://wordpress.com)), acessado 04/08/2023.

OLIVEIRA, Matheus Pontes de. *Concreto com manta de aramida submetido a impacto balístico*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica do Paraná, 2020.

"PENETRAÇÃO (PROJÉTIL)." In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2022. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Penetra%C3%A7%C3%A3o\\_\(proj%C3%A9til\)&oldid=62902625](https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Penetra%C3%A7%C3%A3o_(proj%C3%A9til)&oldid=62902625). Acesso em: 26 jan. 2023.

RIO DE JANEIRO (Estado). Instituto de Segurança Pública. *Série Histórica - ISP*. Visualização ([ispvisualizacao.rj.gov.br](http://ispvisualizacao.rj.gov.br)), acessado em 14 jul 2022.

SALAVERRIA, J.H.; CASAS, J.R.; Aparicio, A.C. *Estúdio experimental sobre el uso de fibras aramidas para reparación y refuerzo de puentes existentes*. IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções, 1997.

OLIVEIRA, S. A. N. et al. *Elaboração de tabelas para dosagem de concreto com base nos agregados utilizados no nordeste mineiro*. *Research, Society and Development*, Vol. 7, Núm. 4. Universidade Federal de Itajubá, 2018.

SANTOS, R. (2011). *M211 - Elementos de Armamento, Manual do Aluno*. Lisboa: Academia Militar.

SILVA, Moema Ribas. *Materiais de Construção*. São Paulo: Pini, 1985. 266p.

SILVA JUNIOR, J.E.L., PACIORNIK, S., D'ALMEIDA, J.R.M. Evaluation of effect of ballistic damaged area on the residual impact strength and tensile stiffness of glass-fabric composite materials. *Composite Structures*, Vol. 64, No. 1, p. 123-127, 2004.

SITE REDELEAVE. Disponível em: <https://www.redeleave.com.br/tecido-fibra-de-aramida-kevlar-0-5x1-30-m.html>. Acesso em: 02/03/2023.

SMITH, A. P. et al. *Quantitation of the lateral orientational order within various grades of Kevlar high strength fibers with X-ray linear dichroism microscopy*. North Carolina State University, 1998.

SOBRAL, T. R. J. Concretos Sob Cargas de Impacto para a Segurança das Vias Públicas, Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, IME, Rio de Janeiro, 2011.

SOVJÁK, Radoslav; KOUTNÝ, Ondřej; HÁLA, Petr. Penetration Resistance of Building Materials against 7.62-mm Armor-Piercing Projectile. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, v. 33.

SPIEKERMANN F. Ludgero, KONARZEWSKI V. Hugo. Reciclabilidade de fibras de aramida. Feira de inovação tecnológica da UFRGS – FINOVA. 2017.

Stefopoulos, P.K. et al. Gunshot wounds: A review of ballistics related to penetrating trauma. *Journal of Acute Disease*, Vol. 1, p. 178-185, 2014.

TREVISAN, C. O mercado do medo. *Época*, Rio de Janeiro, ed. 160, jun. 2001. Disponível em: [http://epoca.globo.com/edic/20010611/brasil\\_4a.htm](http://epoca.globo.com/edic/20010611/brasil_4a.htm). Acesso em: 11 ago 2023.

VERÇOZA, Enio José. *Materiais de Construção*. Porto Alegre: Sagra, 1983. 191 p. ISBN 85-241-0020-6.

WERNER, S., THIENEL, K., KUSTERMANN, A. Study of fractured surfaces of concrete caused by projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*, v. 52, p. 23–27, 2013.

YAN, R., CHEN, X. Aramid/epoxy composites with angle-laid reinforcement constructions for ballistic protection. *Journal of Industrial Textiles*. Vol. 0, No 0, p. 1-15, 2014.

YANG, I. B. *Textile fabrics and their selection*. 5ª edição. New York, 1964.

YANG, H.H. *Kevlar Aramid Fiber*. Wiley, 1993.