



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Instituto Politécnico

Fernanda Gomes Pixioline

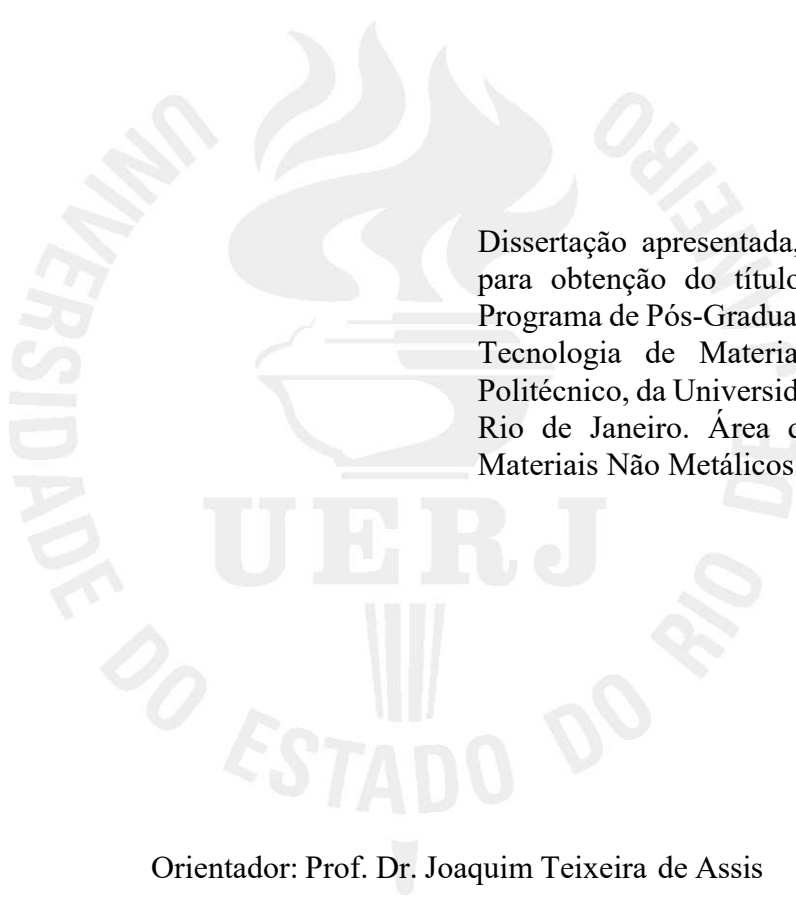
Análise de impactos balísticos de alto calibre em blocos de concreto com reforço de malha de aço: caracterização do material e identificação, análise e classificação dos danos

Nova Friburgo

2024

Fernanda Gomes Pixioline

Análise de impactos balísticos de alto calibre em blocos de concreto com reforço de malha de aço: caracterização do material e identificação, análise e classificação dos danos



Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de 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

2024

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

P694 Pixioline, Fernanda Gomes.
Análise de impactos balísticos de alto calibre em blocos de concreto com reforço de malha de aço: caracterização do material e identificação, análise e classificação dos danos / Fernanda Gomes Pixioline. - 2024.
47 f. : il.

Orientador: Joaquim Teixeira de Assis.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

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

CDU 533.6.078

Bibliotecária Fernanda Souza Cruz CRB7/7361

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

Fernanda Gomes Pixioline

Data

Fernanda Gomes Pixioline

Análise de impactos balísticos em corpos de prova de concreto: caracterização do material e identificação, análise e classificação dos danos

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

Aprovada em 23 de outubro de 2024.

Banca Examinadora:

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

Prof^ª. Dr^ª. Marisa Cristina Gimarães Rocha
Instituto Politécnico – UERJ

Prof. Dr. Davi Ferreira de Oliveira
PEN/COPPE - UFRJ

Nova Friburgo

2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus em primeiro lugar, pois sem ele eu nada conseguiria realizar, e confesso que em vários momentos só Ele para me dar forças para continuar e dedicar a esta empreitada acadêmica.

À minha mãe, por sempre estar comigo me ajudando e fazendo acreditar que sempre posso ser uma pessoa melhor, nem sei como agradecer por tanto e por todo o auxílio com meu filho em todos os momentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis, tem minha enorme gratidão. Sua orientação sábia, conhecimento excepcional e dedicação inabalável foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Aprendi muito com você e sou grata pela oportunidade de tê-lo como meu guia nessa jornada acadêmica.

Também dedico este trabalho aos meus queridos amigos Wesley Lisboa Marchareth e Diego Pinheiro Sodré, por sempre me incentivarem com o desenvolvimento neste projeto. A colaboração e apoio dos Srs. foram imprescindíveis para o sucesso desta dissertação, e sou grata por poder contar com a amizade e parceria ao longo dessa caminhada.

Ao meu marido, você tem sido a minha rocha, meu porto seguro e minha fonte de inspiração ao longo de toda a minha jornada acadêmica. Sua paciência, compreensão e apoio incondicional foram fundamentais para que eu pudesse me dedicar a este mestrado com tranquilidade e foco. Mesmo diante dos desafios, você esteve sempre ao meu lado, incentivando-me a superar obstáculos e acreditar em meu potencial. Agradeço por ser meu pilar de força nos momentos de cansaço e dúvida, por ser um dos principais incentivadores e participante ativo, obrigado por sonhar sempre comigo, ser esta pessoa incrível que você é, sem você isso tudo não teria acontecido, mas também a nossa jornada conjunta de amor, companheirismo e cumplicidade.

A todos vocês, minha eterna gratidão. Suas presenças em minha vida foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Cada palavra de incentivo, cada gesto de amizade e cada ensinamento compartilhado fizeram a diferença.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela dádiva da vida e pela orientação em todos os momentos, guiando-me para alegrias e conquistas significativas.

Ao Dr. Joaquim Teixeira de Assis, meu respeitado orientador e um amigo, cuja presença constante, apoio incondicional e estímulo incansável foram fundamentais na realização deste trabalho e durante os desafios que enfrentei.

Ao Sr. Luiz Felipe Lobato da Fonseca, pelo compartilhamento não apenas de conhecimento técnico, mas também de preciosas lições de vida.

À minha família, com destaque especial para meu marido, Mario Sérgio, cujo apoio e dedicação singular permitiram que eu trilhasse este caminho acadêmico com confiança e determinação.

O esforço só é expresso em recompensa, quando uma pessoa se recusa a desistir.

Napoleão Hill

RESUMO

PIXIOLINE, Fernanda Gomes. Análise de impactos balísticos de alto calibre em blocos de concreto com reforço de malha de aço: caracterização do material e identificação, análise e classificação dos danos, 2024.47f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais) - Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2024.

Esta dissertação tem como objetivo analisar o processo comportamental do concreto com reforço de malha de aço submetidas a impactos balísticos de alto calibre, visando oferecer subsídios para o desenvolvimento de soluções de proteção mais eficazes a disparos de arma de fogo. A pesquisa aborda temas relevantes relacionados à violência no Brasil, o uso de armas de fogo e sistemas de blindagem. A metodologia incluiu ensaios de compressão, características dos corpos de prova a impacto balístico em concreto. Os resultados permitiram a identificação e classificação de danos, revelando que o concreto normal de classe C40 com reforço de malha de aço apresenta bom comportamento para proteção balística. Essa pesquisa contribui para o avanço do conhecimento na área de proteção balística utilizando concreto, fornecendo subsídios para projetos mais seguros e eficientes.

Palavras-chave: concreto; malha de aço; impacto balístico; armas de fogo; violência; segurança.

ABSTRACT

PIXIOLINE, Fernanda Gomes. Analysis of high caliber ballistic impact on concrete blocks with steel mesh reinforcement: material characterization, and damage identification, analysis and classification, 2024.47f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2024.

This dissertation aims to analyze the behavioral process of concrete with steel mesh reinforcement subjected to high-caliber ballistic impacts, aiming to provide subsidies for the development of more effective protection solutions to firearm shots. The research addresses relevant topics related to violence in Brazil, the use of firearms and armor systems. The methodology included compression tests, characteristics of the specimens to ballistic impact in concrete. The results allowed the identification and classification of damage, revealing that normal C40 class concrete with steel mesh reinforcement presents good behavior for ballistic protection. This research contributes to the advancement of knowledge in the area of ballistic protection using concrete, providing subsidies for safer and more efficient projects.

Keywords: concrete; steel mesh; ballistic impact; firearms; violence; security,

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Homicídios praticados com uso de arma de fogo no ano de 2023 | 15 |
| Figura 2 – Número de armas apreendidas no Estado do Rio de Janeiro no 1º semestre..... | 16 |
| Figura 3 – Número de pistolas e fuzis apreendidos no Estado do Rio de Janeiro no primeiro semestre de 2024 | 16 |
| Figura 4 – Composição do cartucho de calibre nominal 7,62” e 0,40” | 18 |
| Figura 5 - Mecanismo do disparo | 19 |
| Figura 6 – Balística interna | 20 |
| Figura 7 – Balística externa..... | 20 |
| Figura 8 – Balística terminal | 21 |
| Figura 9 – Danos locais em placas de concreto sob impacto balístico..... | 25 |
| Figura 10 – Componentes utilizados para produção do concreto | 33 |
| Figura 11 – Betoneira utilizada na manipulação do concreto | 34 |
| Figura 12 – Corpos de prova de 10 cm diâmetro e 20 cm de altura no molde e após a cura | 34 |
| Figura 13 – Concretagem das formas..... | 35 |
| Figura 14 – Prensa Solotest (ensaio de compressão) | 36 |
| Figura 15 – Ensaio balístico (atirador)..... | 38 |
| Figura 16 – Arma e munição utilizada no ensaio balístico | 39 |
| Figura 17 – Bloco A e B: Ambos impactados por munição de cal. 7,62mm | 41 |
| Figura 18 – Bloco A e B: Estimativa dos diâmetros das crateras | 43 |
| Gráfico 1 – Ensaio de resistência a compressão após período de cura..... | 36 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Níveis de proteção balística..... | 24 |
| Tabela 2 – Caracterização dos corpos de prova prismáticos quanto à densidade..... | 37 |
| Tabela 3 – Apuração das massas dos corpos de prova após o ensaio de impacto balísticos ... | 41 |
| Tabela 4 – Apuração dos danos locais com estimativa de perda de massa e volume..... | 42 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| CN | Concreto Normal |
| CPC | Corpo de Prova Cilíndrico |
| CPP | Corpo de Prova Prismático |
| Fck | Resistência à Compressão |
| ISP | Instituto de Segurança Pública |
| NBR | Norma Brasileira |
| NIJ | <i>National Institute of Justice</i> |
| SEPM | Secretaria de Estado de Polícia Militar |
| ρ | Massa Específica |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 14 |
| 1.1 | Violência e estatística | 14 |
| 1.2 | Armas de fogo | 16 |
| 1.2.1 | <u>O projétil</u> | 16 |
| 1.2.2 | <u>O propelente</u> | 16 |
| 1.2.3 | <u>O mecanismo de disparo</u> | 16 |
| 1.3 | Funcionamento | 17 |
| 1.4 | Conceitos balísticos | 18 |
| 1.4.1 | <u>Balística Interna</u> | 18 |
| 1.4.2 | <u>Balística Externa</u> | 19 |
| 1.4.3 | <u>Balística Terminal</u> | 19 |
| 1.5 | Níveis de blindagem | 20 |
| 1.5.1 | <u>Regulamentação técnica</u> | 21 |
| 1.6 | Concreto | 22 |
| 1.7 | Impacto balístico e seus efeitos sobre o concreto | 23 |
| 1.8 | Cimento | 25 |
| 1.9 | Aço | 27 |
| 1.9.1 | <u>Influência do teor de Carbono</u> | 28 |
| 1.9.2 | <u>Aço 1020 em Obras de Engenharia Civil</u> | 29 |
| 1.10 | Concreto balístico reforçado com malha de aço | 29 |
| 2 | METODOLOGIA | 31 |
| 2.1 | Definição de material | 31 |
| 2.1.1 | <u>Bloco de concreto</u> | 31 |
| 2.1.2 | <u>Preparo de corpos de prova</u> | 32 |
| 2.1.3 | <u>Reforço das malhas de aço</u> | 34 |
| 2.1.4 | <u>Ensaio balístico</u> | 36 |
| 3 | RESULTADO E DISCUSSÃO | 39 |
| | CONCLUSÃO | 43 |
| | REFERÊNCIAS | 45 |

INTRODUÇÃO

A blindagem de veículos e edificações tem ganhado destaque no Brasil, especialmente em estados como São Paulo e Rio de Janeiro, em resposta à crescente violência urbana caracterizada por sequestros relâmpago, assaltos à mão armada e tiroteios. Esses fatores impulsionaram o crescimento do mercado de segurança privada e intensificaram a demanda por serviços de blindagem. Segundo Dresh (2011), aproximadamente 95% da produção nacional de produtos blindados está concentrada nessas duas regiões, reflexo direto da elevada procura por soluções de proteção nessas localidades.

Apesar do avanço nesse setor, a construção de edificações resistentes a impactos balísticos ainda enfrenta desafios significativos. A combinação tradicional de alvenaria convencional com materiais como aço, amplamente utilizada por empresas da construção civil, é caracterizada por elevados custos e processos de execução demorados. Esses fatores muitas vezes inviabilizam a aplicação em larga escala, conforme apontado por Dresh (2012). Portanto, torna-se essencial explorar alternativas que combinem eficiência técnica, viabilidade econômica e escalabilidade, atendendo à crescente demanda por segurança em um cenário urbano cada vez mais desafiador

JUSTIFICATIVA

Em 2024, a violência e a segurança pública permanecem desafios críticos no Brasil, especialmente no Rio de Janeiro, onde o Instituto de Segurança Pública (ISP-RJ) tem desempenhado um papel essencial na análise e implementação de políticas de combate à criminalidade. Em 2023, o estado registrou 3.405 homicídios cometidos com armas de fogo, o que equivale a aproximadamente nove mortes diárias (ISP, 2023). Além disso, entre o segundo semestre de 2023 e o primeiro semestre de 2024, foram apreendidos 438 fuzis pela Polícia Militar, conforme informações do Coronel Menezes, Secretário Geral da Polícia Militar do Estado do Rio de Janeiro.

Nesse contexto, o uso do concreto como proteção balística apresenta-se como uma estratégia eficaz para melhorar a segurança pública, especialmente em áreas urbanas com altos índices de violência, como o Rio de Janeiro. Devido à sua elevada densidade e resistência, o concreto é capaz de absorver e dissipar a energia cinética de projéteis, funcionando como uma barreira física eficiente contra tiros e explosões. Essas características tornam o material uma solução viável para proteger instalações estratégicas e construir estruturas em áreas de conflito.

Pesquisas têm demonstrado a eficácia do concreto em aplicações balísticas. Tibúrcio (2019) apresentou resultados satisfatórios com o uso de concreto pesado em ensaios de impacto balístico. Silva e Jorge (2017) realizaram uma análise experimental de placas de concreto armado, enquanto Paes, Ferreira e Lima (2018) investigaram o impacto balístico de placas reforçadas com fibras de aço. Esses estudos destacam o potencial do concreto para melhorar a proteção em ambientes de risco.

Além disso, outras investigações, como as realizadas por Freire, Lopes e Rezende (2015), analisaram o comportamento balístico de painéis submetidos a projéteis de pequeno calibre, enquanto Ribeiro e Gomes (2014) exploraram o desempenho de placas de concreto armado com fibras de aço contra projéteis de alto calibre. Rocha, Tutikian e Tavares (2009) também contribuíram significativamente ao apresentar uma análise experimental sobre o comportamento de placas de concreto frente a impactos balísticos.

Esses estudos fornecem subsídios essenciais para o desenvolvimento de soluções inovadoras e eficazes no campo da segurança balística, contribuindo para avanços científicos e tecnológicos nesta área de grande relevância.

Analisar o comportamento balístico de placas de concreto reforçadas com malhas de aço quando submetidas ao impacto de projéteis de calibre 7,62 mm em alta velocidade. O estudo busca compreender a capacidade dessas estruturas em resistir e absorver a energia do impacto balístico, fornecendo subsídios para caracterizar o concreto balístico como uma solução eficiente e segura para proteção contra projéteis de alta velocidade.

Investigar o fenômeno do impacto balístico em placas de concreto reforçadas, com foco no comportamento mecânico e na dissipação de energia, considerando os danos estruturais e a capacidade de absorção proporcionada pelo reforço com malhas de aço.

Analisar o efeito do impacto em elementos de concreto, avaliando as propriedades mecânicas e estruturais do material, bem como a influência das variáveis de reforço no desempenho balístico.

Executar e interpretar ensaios balísticos em placas de concreto reforçadas, avaliando como a inclusão de malhas de aço contribui para a resistência à perfuração, a redistribuição de tensões e a contenção dos projéteis.

Caracterizar as propriedades do concreto balístico reforçado, verificando sua eficácia como barreira contra projéteis de alta velocidade, com ênfase na aplicabilidade prática desse material em contextos que demandem alta proteção balística.

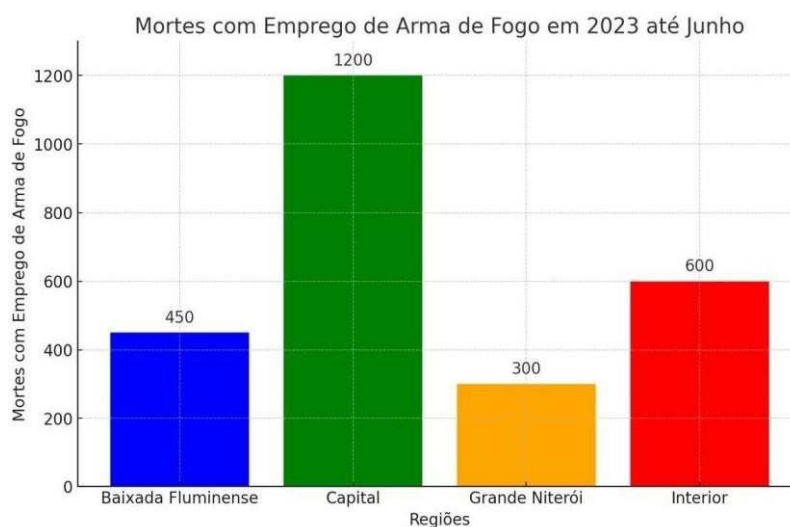
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Violência e estatísticas

No ano de 2023, o Brasil registrou 46.328 mortes violentas, um número alarmante que, apesar de representar uma redução de 3,4% em relação ao ano anterior, ainda reflete o elevado nível de violência no país. Esses dados são provenientes do 18º Anuário Brasileiro de Segurança Pública. Mesmo com a queda observada, o Brasil continua a ocupar o oitavo lugar no ranking mundial de violência, evidenciando a gravidade e persistência dos desafios enfrentados no âmbito da segurança pública (Ribeiro, 2023).

No caso específico do estado do Rio de Janeiro, o cenário também é preocupante. Em 2023, o Instituto de Segurança Pública (ISP) reportou 3.550 homicídios cometidos com o uso de armas de fogo, o que equivale a uma média de aproximadamente dez mortes por dia (Figura 1). Essa realidade reflete o impacto significativo do uso de armas de fogo na dinâmica da violência urbana, tornando o estado um dos mais desafiadores em termos de segurança pública no Brasil.

Figura 1 – Homicídios praticados com uso de arma de fogo no ano de 2023

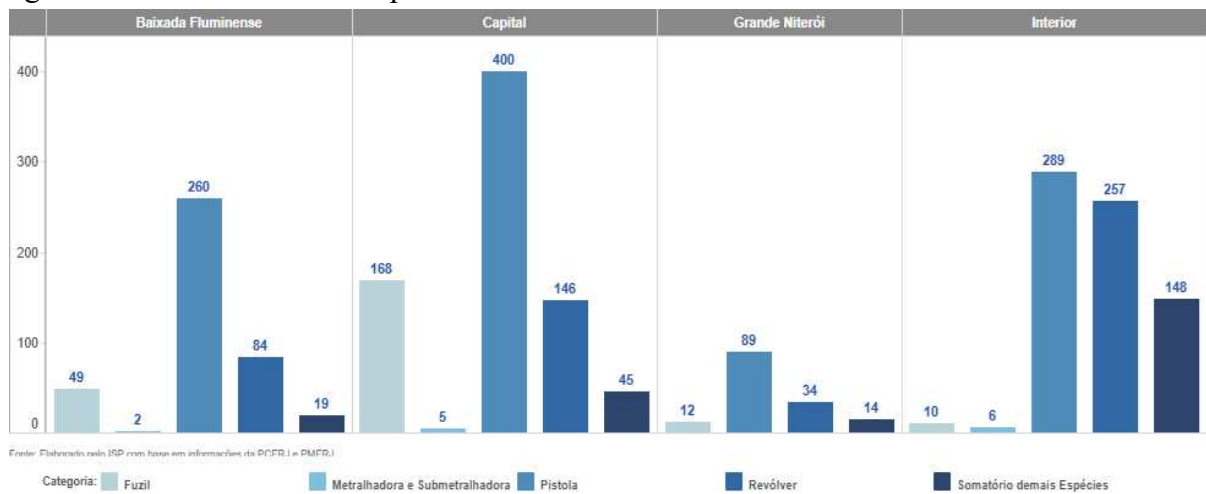


Fonte: IPEA, 2023

Além disso, o período de 2015 a 2023 registrou apreensões significativas de armas de

fogo no estado do Rio de Janeiro, totalizando 3.138 unidades. Entre essas, destacam-se 321 fuzis e 1.748 pistolas, conforme indicado nas Figuras 2 e 3, respectivamente (ISP, 2024).

Figura 2 – Número de armas apreendidas no Estado do Rio de Janeiro no 1º semestre



Fonte: ISP, 2024

Figura 3 – Número de pistolas e fuzis apreendidos no Estado do Rio de Janeiro no primeiro semestre de 2024

| Região | Arma de Fabricação Caseira | Carabina | Espingarda | Fuzil | Garrucha | Garruchão | Metralhado.. | Outros | Pistola | Revólver | Submetral.. | Total |
|--------------------|----------------------------|----------|------------|-------|----------|-----------|--------------|--------|---------|----------|-------------|-------|
| Baixada Fluminense | 1 | 5 | 10 | 49 | | | 2 | 3 | 260 | 84 | | 414 |
| Capital | 4 | 16 | 20 | 168 | 4 | | | 1 | 400 | 146 | 5 | 764 |
| Grande Niterói | 2 | | 12 | 12 | | | | | 89 | 34 | | 149 |
| Interior | 24 | 13 | 88 | 10 | 13 | 1 | | 9 | 289 | 257 | 6 | 710 |
| Total | 31 | 34 | 130 | 239 | 17 | 1 | 2 | 13 | 1.038 | 521 | 11 | 2.037 |

Fonte: ISP, 2024

Esses números evidenciam a grande circulação de armamentos ilegais que contribuem significativamente para os elevados índices de violência. O fácil acesso a armas de alto poder letal, como os fuzis intensifica os confrontos entre facções criminosas e entre estas as forças de segurança criando um ambiente de constante perigo em áreas urbanas densamente povoadas. Nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de medidas integradas e eficazes para reduzir a violência e proteger a população. Por um lado, é fundamental ampliar as políticas de segurança que visem ao desarmamento, a interceptação de armas ilegais e a redução de letalidade policial. Por outro deve-se considerar a implementação de sistemas que ofereçam maior segurança aos cidadãos e agentes públicos sobretudo em áreas de maior vulnerabilidade. O desenvolvimento

de tecnologias de proteção, como barreiras físicas resistentes a impactos de projetos e materiais balísticos avançados, pode desempenhar um papel crucial nesse processo a integração desses dessas tecnologias em áreas críticas não apenas reforça a segurança de agentes civis mas também demonstra a viabilidade de soluções modernas sustentáveis para enfrentar os desafios impostos pela violência armada. Além disso tais investimentos podem contribuir para a reconstrução da confiança da população nas instituições de segurança, criando um ciclo virtuoso de preservação proteção e bem-estar coletivo. Portanto, é essencial que a segurança seja tratada como uma prioridade estratégica combinando ações imediatas de repreensão ao crime com medidas de longo prazo que fortaleça a infraestrutura urbana e promover a inclusão social e reduzam as condições que alimentam a criminalidade, isso inclui ainda a capacitação das forças de segurança e o incentivo à pesquisa inovação desenvolvimento de materiais balísticos e sistema de defesa que possam ser aplicados em larga escala.

1.2 Armas de fogo

As armas de fogo são dispositivos projetados para lançar projéteis em alta velocidade por meio de um cano, utilizando a pressão gerada pela queima de um propelente, geralmente pólvora. Esses dispositivos variam amplamente em tamanho, alcance, poder de fogo e uso, sendo classificados em diferentes categorias, como pistolas, revólveres, rifles e espingardas. O funcionamento básico de uma arma de fogo baseia-se em três componentes principais:

1.2.1 O projétil: (cartucho);

1.2.2 O propelente: (geralmente pólvora), que ao ser inflamado, gera gases que impulsionam o projétil;

1.2.3 O mecanismo de disparo: que inicia a combustão do propelente. (Ivan Hogg 2002).

As armas de fogo se classificam de acordo com suas mobilidade e utilização. Neste estudo, adotaremos a classificação com base nesses critérios, resultando em três categorias principais:

Arma não portátil: são aquelas que devido ao seu tamanho, peso, não podem ser

transportadas manualmente e necessitam de suporte físico fixo ou veículos de movimentação e uso. Exemplos incluem metralhadoras pesadas e canhões de artilharia (Miranda, 2010).

Arma de porte: são armas de fogo leves, destinadas ao uso individual e portadas junto ao corpo como pistolas e revólveres. Essas armas são projetadas para defesa pessoal ou uso em operações de curta distância (Miranda, 2010).

Arma portátil: são armas de fogo que podem ser carregadas e operadas por uma pessoa, mais que geralmente requerem suporte ou pé para disparos mais precisos inclui fuzis e metralhadoras leves (Miranda, 2010).

Cartuchos

“Munição”, é o conjunto de componentes utilizados em armas de fogo para disparo de projetos. Ela é composta por 4 elementos principais: o projétil, a parte da munição que é lançada em direção ao alvo e estojo, a cápsula que contém os outros componentes unidos pólvora e propelente que ao ser incendiado gera gases que impulsiona o projétil espoleta o dispositivo que inicia a queima da pólvora conhecida como cartucho, é uma peça essencial no funcionamento das armas de fogo, composta por componentes distintos, conforme ilustrado na fig. 4. Esses elementos são a espoleta, responsável por iniciar o processo de disparo, a carga de projeção, geralmente composta por pólvora, o estojo que contém os demais elementos e o projétil, que é lançado em direção ao alvo.

Figura 4 – Composição do cartucho de calibre nominal 7,62” e 0,40”:



Fonte: Adaptado Pixioline, 2024

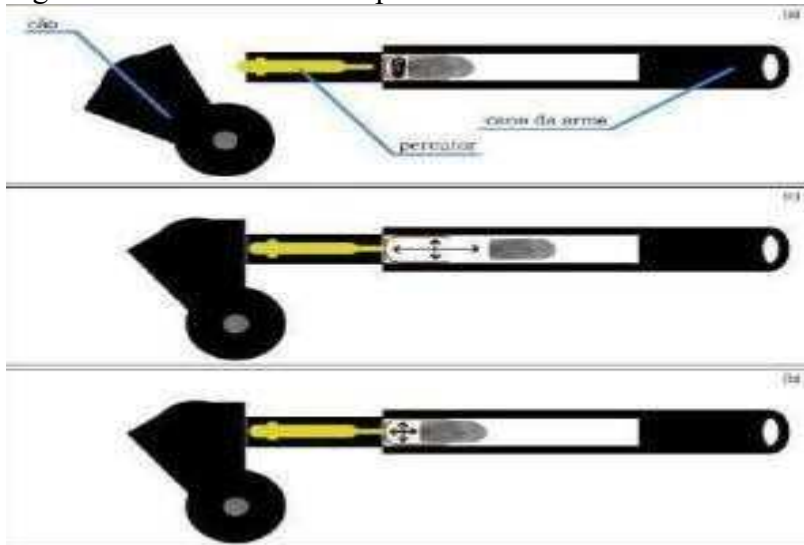
1.3 Funcionamento

Quando ocorre o disparo, ao acionar o gatilho, o percussor atinge a espoleta do cartucho

que contém uma mistura iniciadora que provoca a queima dessa mistura iniciando a queima da carga de projeção (pólvora), gera a expansão dos gases que expulsa o projétil em direção ao alvo.

Essa rápida expansão dos gases pressiona o projétil, empurrando-o pelo cano da arma em alta velocidade em direção ao alvo, conforme representado na fig. 5. O controle preciso da direção e estabilidade do projétil é possibilitado pelo design e características do cano da arma.

Figura 5 - Mecanismo do disparo



Fonte: Adaptado de Pixioline, 2024.

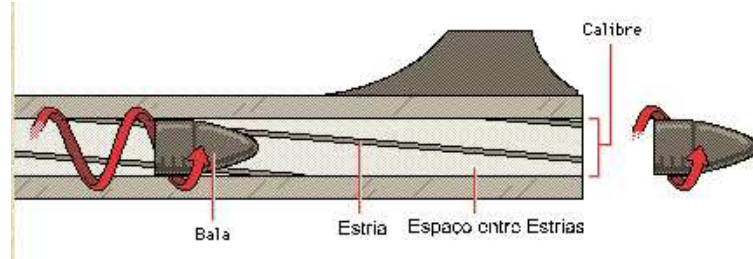
1.4 Conceitos balísticos

A balística é a ciência que estuda o comportamento dos projéteis, incluindo o movimento e os efeitos deles em diferentes fases. Ela se divide em três principais tipos:

1.4.1 Balística Interna:

Foca no comportamento do projétil dentro da arma. Estuda o processo de ignição da pólvora, a pressão gerada pela combustão, e como o projétil se move através do cano da arma. Esse tipo de balística é crucial para otimizar o desempenho das armas de fogo e garantir sua eficiência cf. fig. 6.

Figura 6 – Balística interna



Fonte: Balística interna, 2022.

1.4.2 Balística Externa:

Analisa o trajeto do projétil após sair do cano da arma até atingir o alvo. Considera fatores como a gravidade, a resistência do ar, o vento e a rotação do projétil. O objetivo é prever com precisão o caminho do projétil e melhorar a precisão em tiros de longo alcance cf. fig. 7.

Figura 7 – Balística externa

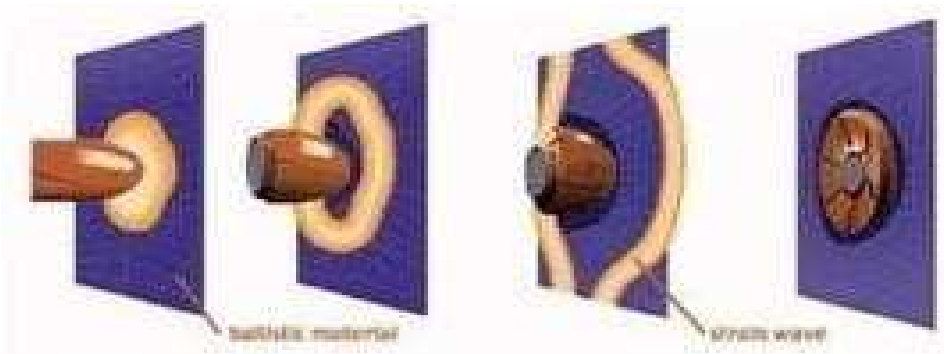


Fonte: Werner, 2013.

1.4.3 Balística Terminal:

Estuda os efeitos do projétil ao impactar o alvo, como a penetração, a deformação e o impacto causado. Examina como o projétil interage com diferentes materiais e tecidos cf. fig. 8, sendo crucial para a compreensão da eficácia das munições em diferentes cenários (Carr, 2008).

Figura 8 – Balística terminal



Fonte: Teodoro, 2023.

1.5 Níveis de blindagem

Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a resistência balística em blindagens refere-se à capacidade de um material ou estrutura de suportar o impacto de projéteis, como munições de armas de fogo, sem sofrer perfurações ou gerar fragmentações significativas que comprometam a segurança. A blindagem é classificada em níveis com base no tipo de munição que a estrutura é capaz de resistir, garantindo a proteção contra diferentes calibres e energias de impacto. De acordo com a Associação Brasileira de Blindagem (Abrablin), os níveis de blindagem variam de **nível I** a **nível IV**:

- **Nível I:** Proteção contra calibres de baixa potência, como .22 LR e .38 SPL.
- **Nível II-A e II:** Resistência contra armas de mão de calibres médios, como 9mm e .40 S&W.
- **Nível III-A:** Proteção contra calibres de alta energia, como .44 Magnum e 9mm disparados de submetralhadoras.
- **Nível III:** Resistência a calibres de rifles, como o 7,62mm NATO, frequentemente utilizado em rifles de assalto.
- **Nível IV:** O mais elevado nível de proteção, capaz de suportar projéteis perforantes, como munições de 7,62mm AP (armor-piercing). Este nível é restrito e, no Brasil, é utilizado exclusivamente pelo Presidente da República.

1.5.1 Regulamentação Técnica

A ABNT NBR 15000:2012 (Blindagem balística para veículos automotores) estabelece os parâmetros técnicos para blindagens automotivas, definindo os critérios de resistência balística que os materiais de blindagem devem atender para proteger os ocupantes contra ataques de armas de fogo. A norma também classifica os níveis de proteção com base no tipo de munição e arma, especifica os procedimentos de teste para avaliação da resistência balística e descreve os requisitos mínimos de qualidade que os materiais e processos devem cumprir, cf. fig.9.

Além disso, os testes incluem disparos em condições controladas, simulando cenários reais de ataque, com o objetivo de verificar se o material suporta o impacto balístico sem perfurações ou falhas estruturais. Essa regulamentação é essencial para assegurar que os níveis de blindagem atendam às exigências de segurança, protegendo os usuários contra as ameaças mais comuns no contexto urbano e em situações de risco elevado.

Tabela 1 – Níveis de proteção balística

| Nível | Munição e projétil | | | Distância (d) m | Velocidade (v) m/s | Números de impactos | Energia ^a J (mv ² /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 |

Fonte: Adaptado NBR 15000/2020

1.6 Concreto

O concreto é amplamente utilizado em diversas estruturas, como edifícios, pontes, barragens e estradas, devido às suas propriedades mecânicas essenciais, como resistência à compressão e tração, que são cruciais para o desempenho estrutural. De acordo com Neville (1995), o concreto apresenta alta resistência à compressão, mas sua resistência à tração é significativamente menor. Isso geralmente exige o uso de reforços, como o aço, especialmente em estruturas sujeitas a tensões de tração.

Mehta e Monteiro (2006) ressaltam que o desempenho do concreto está diretamente relacionado à qualidade dos materiais utilizados e à proporção adequada entre eles. A adição de aditivos e o controle preciso da relação água/cimento são determinantes para a obtenção de um concreto de alta performance, capaz de resistir a impactos e outras formas de deterioração ao longo do tempo.

Os agregados, que podem ser miúdos (como areia) ou graúdos (como brita), desempenham um papel fundamental nas propriedades e no comportamento do concreto, influenciando aspectos como resistência, durabilidade e trabalhabilidade do material. Representando entre 60% e 80% do volume do concreto, os agregados são componentes essenciais para o seu desempenho. Mehta e Monteiro (2006) destacam que características como granulometria, forma, textura e composição dos agregados afetam diretamente a coesão e a trabalhabilidade da mistura, além de influenciar a proporção necessária de cimento e água. A utilização de agregados reciclados pode ser uma alternativa sustentável, embora exija cuidados adicionais para garantir a integridade estrutural do concreto.

1.7 Impacto balístico e seus efeitos sobre o concreto

Os impactos balísticos sobre o concreto causam uma série de efeitos físicos, que dependem da velocidade, energia e tipo do projétil, bem como das características do concreto. E esses efeitos físicos ou fenômenos são chamados de penetração, perfuração, destacamento, estilhaçamento e estilhaçamento por punção, são as principais formas de danos causadas pela interação de projéteis com material como concreto.

A penetração ocorre quando um projeto entra parcialmente no concreto sem atravessá-lo completamente neste caso concreto sofre compressão e cisalhamento na área de impacto resultando em deformações plásticas e fissuras internas. Mindess (2003) explica que a profundidade de penetração depende da densidade do concreto da energia do projétil fenômeno está associado a dissipação de energia cinética do projétil dentro do material, com a propagação de ondas de choque fraturas cf. fig. 10a.

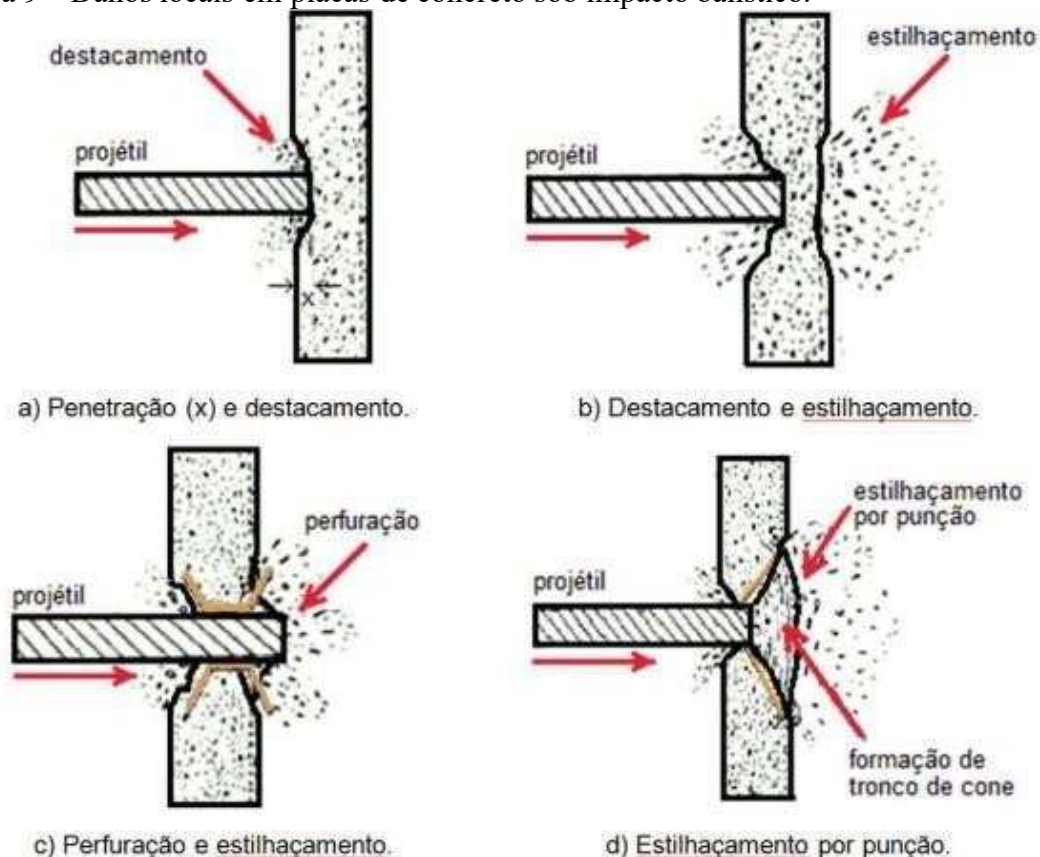
A perfuração ocorre quando o projétil atravessa completamente concreto, criando um canal de fratura esse fenômeno acontece quando a energia cinética do projétil é suficiente para romper a estrutura do concreto ao longo de todo o seu espessamento, resultand o em uma passagem limpa, geralmente com crateras de entrada e saída. Pereira (2017) relatam que a

perfuração é dependente da espessura do concreto de tipo de esforço utilizado e da densidade do material. O uso de reforços como aço ou fibras, podem aumentar a resistência do concreto contra esse tipo de falha cf. fig. 10c.

O destacamento refere-se à expulsão de material do lado oposto ao impacto, em forma de fragmentos. Esse fenômeno acontece quando as ondas de tensão geradas pelo impacto atingem um limite oposto do concreto e superam sua resistência à tração. Isso provoca a separação de camadas superficiais do material criando carteiras e removendo pedaços do concreto.

Estilhaçamento é o fenômeno na qual pedaços de concreto se quebram e são projetados a partir da superfície oposta do impacto. Ocorre quando as ondas de choque provocada pelo impacto causando tensões internas que ultrapassa a resistência a tração do concreto, resultando a expulsão violenta de fragmentos. Conforme Zhang (2018), a severidade de lançamento depende da velocidade e massa do projétil assim como da espessura e estrutura do concreto cf. fig. 10b e 10c. E o estilhaçamento por punção é a soltura de um fragmento, em forma de cone da estrutura de concreto na face oposta à face do ataque cf. fig. 10d.

Figura 9 – Danos locais em placas de concreto sob impacto balístico.



Fonte: Bangash, 2009.

1.8 Cimento

De acordo com Neville (2011), o cimento é um material essencial na construção, utilizado como aglutinante em argamassas e concretos. Sua produção envolve a mistura de calcário e argila, que são calcinados em altas temperaturas para formar o clínquer, um composto formado pela queima dessa mistura. Ao ser misturado com água, o cimento forma uma pasta que endurece com o tempo e adere a outros materiais, como areia e brita, para formar estruturas sólidas.

O tipo de cimento mais utilizado em obras de engenharia civil é o Cimento Portland Composto (CP II). Este cimento é amplamente empregado por ser versátil e adequado para a maioria das aplicações estruturais, como em edificações residenciais, comerciais e infraestruturas em geral.

As principais propriedades do cimento incluem:

- **Resistência:** Refere-se à capacidade do cimento endurecido de suportar cargas e forças.
- **Tempo de pega:** Indica o tempo necessário para o cimento começar a endurecer e o tempo em que ele continua a endurecer, sendo crucial para o controle do processo de aplicação.
- **Expansão e contração:** Relacionado à variação dimensional do cimento durante o processo de secagem e cura.
- **Fino e granulometria:** A finura do cimento afeta sua taxa de hidratação e o desenvolvimento de resistência.
- **Estabilidade:** Refere-se à capacidade do cimento de manter suas propriedades químicas e físicas ao longo do tempo, sem sofrer degradação, conforme Neville (2013).

O Professor Geraldo Cechella Isaia, em sua obra *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*, aborda os diferentes tipos de cimento, classificados conforme suas características e propriedades, que os tornam adequados para diversas aplicações. Os principais tipos de cimento e suas respectivas utilizações incluem:

- **Cimento Portland Comum (CP I)**
Composição: Não contém aditivos adicionais, sendo composto basicamente por clínquer e gesso.
Aplicações: Usado em obras que não exigem características especiais, como pequenas construções, calçadas e reparos. É o mais comum em estruturas simples.
- **Cimento Portland Composto (CP II)**
Subtipos: CP II-E (com escória de alto-forno), CP II-Z (com pozolana), CP II-F (com fíler).
Composição: Contém adições de escória de alto-forno, pozolana ou fíler. **Aplicações:** Utilizado em obras gerais, sendo mais econômico e com menor impacto ambiental. O CP II-Z, por exemplo, é mais resistente à ação de sulfatos, sendo indicado para obras em áreas agressivas, como redes de esgoto.
- **Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI)** **Composição:** Produzido com maior proporção de clínquer e moagem mais fina, proporcionando maior resistência nas primeiras idades.
Aplicações: Ideal para obras que necessitam de desforma rápida, como pré-moldados, lajes e grandes estruturas que exigem produtividade acelerada.
- **Cimento Portland Pozolânico (CP IV)**
Composição: Contém pozolana, que aumenta a durabilidade e reduz o calor de hidratação.
Aplicações: Indicado para barragens, fundações profundas, obras em ambientes agressivos e locais com alta exposição à umidade, como obras marítimas.
- **Cimento Portland de Alta Resistência a Sulfatos (RS)** **Composição:** Desenvolvido para oferecer maior resistência à ação de sulfatos presentes no solo ou na água. **Aplicações:** Usado em obras em ambientes com alta concentração de sulfatos, como em áreas industriais, estações de tratamento de esgoto e obras subterrâneas.
- **Cimento Portland Resistente ao Calor de Hidratação (BC)** **Composição:** Produz menos calor durante o processo de hidratação. **Aplicações:** Ideal para grandes volumes de concreto, como barragens e grandes fundações, onde o calor gerado pode causar fissuras.
- **Cimento Portland Branco**
Composição: Possui baixo teor de ferro, conferindo-lhe a cor branca. **Aplicações:** Usado principalmente em acabamentos arquitetônicos e decorativos, como revestimentos e elementos decorativos de concreto.
- **Cimento Portland Aluminoso**
Composição: Contém altos teores de óxido de alumínio, o que resulta em uma rápida hidratação.
Aplicações: Ideal para reparos rápidos, concreto refratário e obras em locais com baixas temperaturas, pois endurece rapidamente.

- **Cimento Portland de Baixo Calor (CP III)**
Composição: Contém uma grande quantidade de adições minerais, como escória ou pozolana, o que reduz o calor de hidratação.
Aplicações: Indicados para grandes volumes de concreto, como barragens e grandes blocos estruturais.
- **Cimento Portland de Alto Forno (CP III)**
Composição: Contém uma alta proporção de escória de alto-forno. **Aplicações:** Ideal para obras em ambientes agressivos, como obras marítimas, redes de esgoto e estações de tratamento de água.

Esse conjunto de cimentos oferece opções específicas para diferentes condições de uso, proporcionando soluções adequadas em termos de resistência, durabilidade e eficiência, de acordo com as exigências de cada tipo de obra.

1.9 Aço

O aço, conforme descrito por Callister (2011), é uma liga metálica composta predominantemente por ferro e carbono, com a quantidade de carbono variando entre 0,2% e 2,1%. Além desses componentes principais, o aço pode conter outros elementos de liga, como manganês, cromo, níquel, molibdênio e vanádio, que são adicionados para melhorar propriedades como resistência, dureza e ductilidade (Lucas, 2012).

De acordo com Wilson (2015), os tipos de ferro e aço mais empregados em funções estruturais e de reforço incluem:

- **Ferro fundido:** Usado em elementos estruturais como tubos e colunas, devido à sua boa resistência à compressão e capacidade de fundição.
- **Ferro fundido nodular (ou dúctil):** Com maior ductilidade e resistência à tração, é ideal para peças que exigem alta resistência e deformabilidade.
- **Aço carbono:** Muito utilizado em estruturas de edifícios, pontes e veículos, o aço carbono é conhecido por sua resistência e facilidade de soldagem.
- **Aço de alta resistência:** Exemplificado pelo aço estrutural ASTM A992, que possui uma resistência mínima à tração de 345 MPa (50 ksi). Este aço é amplamente utilizado em estruturas de aço devido à sua excelente resistência e tenacidade (Fischer, 2016).

- **Aço para reforço de concreto (CA-50 e CA-60):** Utilizado no concreto armado para melhorar a resistência à tração e flexão, garantindo maior durabilidade à estrutura.

Fischer (2016) adota a classificação AISI-SAE (American Iron and Steel Institute - Society of Automotive Engineers) para classificar os tipos de aço carbono, que são amplamente utilizados em diversos setores industriais, como engenharia civil e mecânica. Abaixo estão alguns exemplos dessa classificação:

- **Aço 1010:** Com aproximadamente 0,10% de carbono, esse aço apresenta baixo teor de carbono, o que confere maior maleabilidade e ductilidade, mas reduz a resistência mecânica. É utilizado em chapas, dobradiças e peças que exigem alta conformabilidade, como parafusos e porcas.
- **Aço 1020:** Com 0,20% de carbono, este aço tem resistência ligeiramente superior ao Aço 1010, mantendo boa maleabilidade. É fácil de soldar e usinar, sendo amplamente empregado na fabricação de eixos, engrenagens, peças automotivas e outros componentes mecânicos.
- **Aço 1050:** Com 0,50% de carbono, este aço oferece maior resistência e dureza, mas com menor ductilidade e maleabilidade em comparação aos aços de menor teor de carbono. É ideal para componentes que exigem alta resistência mecânica, como molas, lâminas de ferramentas e peças capazes de suportar grandes cargas.

1.9.1 Influência do Teor de Carbono

O teor de carbono é determinante nas propriedades do aço. Aços com baixo teor de carbono (como 1010 e 1020) são mais macios, o que facilita processos como soldagem, dobra e usinagem, embora apresentem menor resistência à tração. Esses aços são escolhidos para aplicações onde a maleabilidade é mais importante que a resistência. Em contraste, aços com maior teor de carbono (como 1050) são mais duros e resistentes, mas com menor ductilidade. Esses aços são mais difíceis de trabalhar e soldar, sendo mais adequados para peças que exigem alta resistência e dureza, como componentes de máquinas pesadas.

1.9.2 Aço 1020 em Obras de Engenharia Civil

O Aço 1020 (SAE 1020) é amplamente utilizado em obras de engenharia civil devido ao seu excelente equilíbrio entre resistência e ductilidade. Sua facilidade de soldagem e usinagem torna-o versátil e adequado para diversas aplicações, especialmente em concreto armado e estruturas metálicas. Sua capacidade de fornecer um desempenho eficaz em termos de resistência e flexibilidade é essencial para garantir a durabilidade e a segurança das construções.

Esses diferentes tipos de aço são selecionados de acordo com as exigências específicas de cada obra, garantindo a otimização das propriedades mecânicas e a eficiência estrutural. Cada tipo de aço oferece soluções que atendem às necessidades de resistência, durabilidade e flexibilidade das estruturas, assegurando o sucesso dos projetos em engenharia civil.

1.10 **Concreto balístico reforçado com malha de aço**

De acordo com Neville (2013), o concreto reforçado com malha de aço é projetado para aprimorar a resistência e o desempenho estrutural do concreto, incorporando malhas ou telas de aço na mistura. O uso combinado de aço e concreto em estruturas de concreto armado contribui significativamente para a resistência a impactos balísticos, devido a uma série de características sinérgicas que ampliam a eficácia do material:

- **Resistência a impactos:** O aço oferece alta resistência à tração e uma grande capacidade de absorver energia, o que é essencial para dissipar a energia resultante de um impacto balístico. O concreto, por sua vez, apresenta grande resistência à compressão, o que o torna ideal para suportar as forças de impacto direto.
- **Distribuição de carga:** O concreto armado auxilia na distribuição da carga do impacto ao longo de toda a estrutura, minimizando a concentração de tensões em um único ponto. Isso contribui para a redução da probabilidade de falhas localizadas, aumentando a resistência global da estrutura.
- **Deformação controlada:** A presença do aço permite que a estrutura se deforme de forma controlada sob o impacto, absorvendo parte da energia e reduzindo o risco de

colapso repentino. Esse comportamento é fundamental para garantir a segurança das construções sob cargas extremas (Lucas, 2012).

- **Controle de fissuração:** A malha de aço desempenha um papel importante no controle da formação e propagação de fissuras que podem ocorrer devido a mudanças de temperatura, retração ou a aplicação de cargas. Isso aumenta a integridade estrutural ao longo do tempo.
- **Durabilidade aprimorada:** O reforço com malha de aço não só aumenta a resistência à tração e compressão, mas também contribui para a durabilidade do concreto. Ele torna a estrutura mais resistente a efeitos adversos, como esforços repetidos e cargas pesadas, além de protegê-la contra deterioração precoce.

Mário T. Figueiredo (2016) investiga o uso de fibras de aço e malhas metálicas para aumentar a resistência à tração, à flexão e ao impacto em estruturas de concreto. Essa abordagem tem aplicações diretas em ambientes de alta carga e em situações de proteção contra impactos, como em estruturas de defesa. A pesquisa de Figueiredo busca melhorar a durabilidade e a resistência de estruturas de concreto reforçado, examinando como a adição de fibras e malhas metálicas pode prevenir falhas prematuras sob cargas extremas. Ao melhorar a resistência à tração e ao impacto, essas tecnologias avançadas ampliam significativamente a confiabilidade e a segurança das estruturas, especialmente em cenários de alto risco.

2 METODOLOGIA

O objetivo deste estudo será avaliar a resistência balística de blocos de concreto reforçados com malha de aço. A seguir, será descrita uma metodologia que pode ser aplicada para desenvolver essa pesquisa, desde a preparação do material até os testes de resistência balística.

2.1 Definição de material

2.1.1 Bloco de concreto

Dimensões: Os blocos foram moldados com 50x50x10 cm, em molde de madeira.

Mistura: O cimento utilizado foi o Portland de alto-forno CAMPEÃO – ECOMAX CPIII-32 RS, cujas características químicas e físicas estão de acordo com as especificações da ABNT NBR 16.697:2018, que regulamenta os requisitos para o cimento Portland. O agregado graúdo utilizado foi a brita zero, adquirida no comércio local, que passou por um processo de lavagem para remoção de impurezas. O agregado miúdo foi areia lavada de rio, também proveniente do comércio local. Adicionalmente, foi utilizado um aditivo plastificante SIKA – Concreto Forte, fornecido pela empresa Sika e adquirido em Nova Friburgo, RJ. Este aditivo é compatível com todas as classes de cimento Portland e foi selecionado para melhorar a trabalhabilidade da mistura.

O traço para a formulação do concreto foi estabelecido com uma base na ABNT NBR 12.655:2015, com as características mínimas desejadas a resistência à compressão. E foi adotada a proporção de 1:2,8:2,1(cimento: agregado miúdo: agregado graúdo). E as relações entre água/cimento e plastificante/cimento foram fixadas em 34% e 4% respectivamente a fim de garantir a formulação apropriada para as misturas empregadas neste estudo. Os materiais utilizados estão cf. fig.10.

Figura 10 – Componentes utilizados para produção do concreto



(a)



(b)



(c)



(d)

Legenda: (a) – Agregado graúdo (brita); (b) – Agregado miúdo (areia); (c) – Plastificante;
(d) - Cimento

Fonte: O autor, 2024

2.1.2 Preparação dos Corpos de Prova

Foi realizada a mistura de todo o material, em uma betoneira de concreto cf. fig. 12. Foram, então, confeccionadas primeiramente os 21 corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura cf. fig. 13.

Figura 11 – Betoneira utilizada na manipulação do concreto



Fonte: A autora, 2024.

Figura 12 – Corpos de prova de 10 cm diâmetro e 20 cm de altura no molde e após a cura



Fonte: A autora, 2024.

Para auxiliar na confecção do concreto, foi utilizada uma balança digital de bancada da marca Toledo, com capacidade de 60 kg, juntamente com recipientes adequados para a mensuração e manipulação dos materiais. Foram também utilizados 21 moldes cilíndricos e 2 formas de madeira. Após a colocação de todos os componentes na betoneira, a mistura foi acionada para garantir a homogeneização completa dos materiais. Quando a mistura alcançou a consistência desejada, os moldes cilíndricos foram preenchidos com o concreto.

Além disso, foram confeccionados dois blocos de prova, cada um com as dimensões de 500 mm x 500 mm x 100 mm. Cada bloco foi armado com duas camadas de malha de aço, contendo 4 vergalhões dispostos horizontalmente (vergalhão de 3/8 de polegada ou 9,525 mm) e 4 vergalhões na vertical, formando uma malha quadrada soldada. Entre as camadas de malha de aço, foi inserido concreto, garantindo a integridade estrutural da armadura. A forma foi então completamente preenchida com concreto, conforme ilustrado na Figura 14.

2.1.3 Reforço das malhas de aço

As malhas de aço foram posicionadas dentro dos blocos de concreto. Cada bloco com duas camadas de malha de aço, com quatro vergalhões dispostos na horizontal e quatro na vertical, formando uma malha quadrada soldada.

O aço utilizado será de média resistência, como o Aço 1020, com diâmetro de vergalhões entre 8 e 10 mm, dependendo do estudo da resistência.

Figura 13 – Concretagem das formas



Fonte: A autora, 2024.

Posteriormente o período de 28 dias de cura, os 21 corpos de prova cilíndricos (CPC) com 300 mm de comprimento e 100 mm de diâmetro, foram submetidos a ensaios de resistência à compressão, onde foi utilizada uma prensa da marca Solotest, conforme figura 15. É importante ressaltar que todos os corpos de prova foram confeccionados com concreto sem adicionar o aço.

Figura 14 – Prensa Solotest (ensaio de compressão)



Fonte: A autora, 2024.

Foi observado que os corpos de prova apresentam uma média de resistência à compressão axial de 44 MPa conforme ilustrado no gráfico 1.

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



Fonte: Lisboa, 2023.

As placas foram desmoldadas 24 horas após a concretagem e, em seguida, submetidas ao processo de cura por um período de 28 dias. Durante esse tempo, as placas foram armazenadas em condições ambientais controladas no laboratório por mais de 21 dias até a realização do ensaio balístico.

Após o período de cura, as dimensões e as massas dos blocos foram aferidas para determinar a massa específica (ρ), uma propriedade de grande importância na caracterização do material. A massa específica é fundamental para diversos cálculos e projetos de engenharia, pois permite a determinação da densidade do material e suas implicações em termos de resistência, durabilidade e comportamento mecânico.

Antes de realizar o ensaio balístico, as duas placas foram pesadas utilizando uma balança digital de bancada da marca Toledo, sendo denominadas Bloco A e Bloco B para fins de identificação. O Bloco A apresentou uma massa específica de 60 kg e uma densidade de 2428 kg/m³, enquanto o Bloco B registrou uma massa de 56,7 kg e uma densidade de 2268 kg/m³, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 2 – Caracterização dos corpos de prova prismáticos quanto à densidade

| CPP | Massa | ρ |
|-------|---------|--------------------------|
| A | 60 kg | 2428,0 kg/m ³ |
| B | 56,7 kg | 2268,0 kg/m ³ |
| Média | 58,7 kg | 2348,0 kg/m ³ |

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2024

Dessa forma, foi possível caracterizar o concreto desenvolvido de acordo com os critérios estabelecidos pela norma ABNT/NBR 8953/2015, tanto em relação à massa específica quanto à resistência à compressão. De acordo com a norma, o material empregado se enquadra na categoria de concreto normal, pois apresenta uma massa específica dentro do intervalo de 2000 kg/m³ a 2800 kg/m³. Além disso, em termos de resistência à compressão, o concreto foi classificado como C40, posicionando-se no grupo I dentro da classificação das classes de resistência.

2.1.4 Ensaio Balístico

Os ensaios de impacto balístico foram realizados no estande de treinamento e tiro OODALOOOP, localizado em Nova Friburgo/RJ, com a colaboração e supervisão dos Policiais Militares da Seção de Material Bélico do Décimo Primeiro Batalhão de Polícia Militar. A distância entre o alvo (corpo de prova) e o atirador foi de quinze metros, conforme estipulado pela norma norte-americana NIJ 00108.01:1985, que estabelece os requisitos para avaliar a

resistência balística de materiais de proteção, especialmente para armamentos classificados como tipo III.

Seguindo as orientações do instrutor de tiro do estande e visando minimizar os riscos associados ao efeito de ricochete dos projéteis, os corpos de prova foram levemente inclinados durante os testes. O Bloco A foi submetido a três impactos consecutivos de projéteis de calibre 7,62 mm, disparados de um fuzil da marca Imbel, modelo Parafal. Da mesma forma, o Bloco B sofreu três impactos com projéteis do mesmo calibre e provenientes do mesmo armamento.

Essa abordagem experimental foi planejada para analisar de forma detalhada os efeitos dos impactos balísticos sobre os corpos de prova e a resposta do concreto. O objetivo foi permitir uma avaliação comparativa entre os dois blocos, fornecendo uma compreensão mais aprofundada sobre o comportamento do material quando submetido a impactos balísticos, contribuindo para o desenvolvimento de materiais mais resistentes e eficientes em contextos de proteção.

Figura 15 – Ensaio balístico (*atirador*)



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

Figura 16 – Arma e munição utilizada no ensaio balístico



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

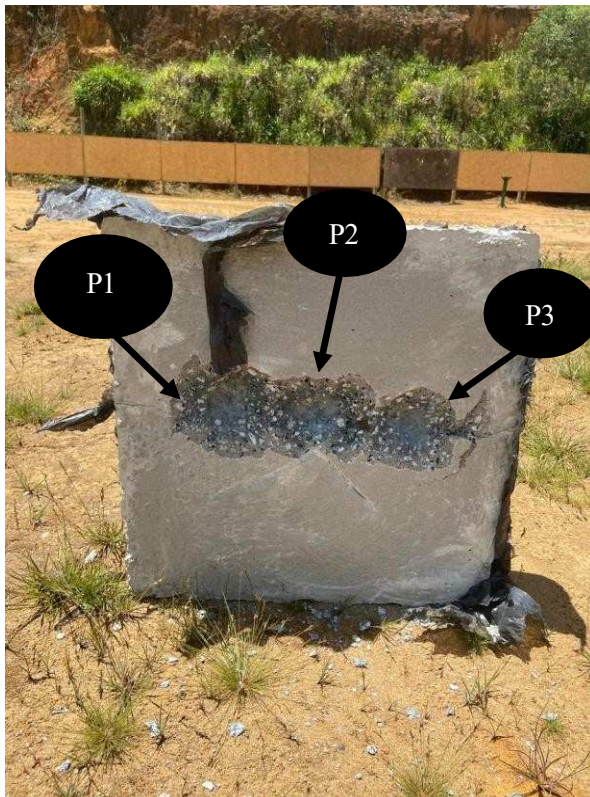
Os blocos foram submetidos exclusivamente ao impacto de munições de calibre 7,62 mm. O experimento foi conduzido com o uso de um fuzil da marca Imbel, modelo Parafal, calibre 7,62 mm, que efetuou três disparos em cada bloco, conforme ilustrado na Figura 17. Durante os testes, observou-se a ocorrência do mecanismo bifásico no impacto balístico, descrito por Tibúrcio (2019), na face de impacto do Bloco A e B: ponto 1 (P1), ponto 2 (P2) e ponto 3 (P3), ponto 4 (P4), ponto 5 (P5) e ponto 6 (P6), que se caracteriza pela formação de uma cratera na face do impacto e de um túnel que se propaga através do bloco, representando um comportamento típico do concreto sob cargas balísticas.

Na face diretamente atingida pelos projéteis, não foram observados danos globais significativos, ou seja, não houve falhas estruturais graves que comprometem a integridade do bloco. Contudo, nas faces opostas ao ponto de impacto (Figura 17 Bloco A (face oposta) e Bloco B (face oposta)), foi constatada a ocorrência de danos globais, como a propagação de trincas (Bloco A), que se espalham através do material, o que sugere a dissipação de parte da energia do impacto e a fragilidade do concreto quando submetido a tensões elevadas.

No caso do Bloco B, especificamente na face oposta ao impacto (Figura 17 Bloco B face oposta), foi registrado um dano localizado mais severo, com um destacamento significativo de material e considerável perda de massa. Esse tipo de dano pode ser explicado pela transferência de energia do impacto, resultando em uma fratura interna que não chegou a comprometer a integridade estrutural do bloco de forma completa, mas afetou sua capacidade de resistir a impactos subsequentes.

Apesar desses danos, em nenhum dos blocos foi observada a presença de velocidade residual nos projéteis, indicando que, embora tenha ocorrido uma dissipação de energia significativa no impacto, os projéteis não conseguiram continuar seu percurso após a colisão, sem perfurar ou transfixar o concreto. Assim, os blocos não apresentaram perfuração ou transfixação, o que confirma sua capacidade de resistência a impactos balísticos, ainda que com danos internos significativos nas faces opostas ao impacto direto.

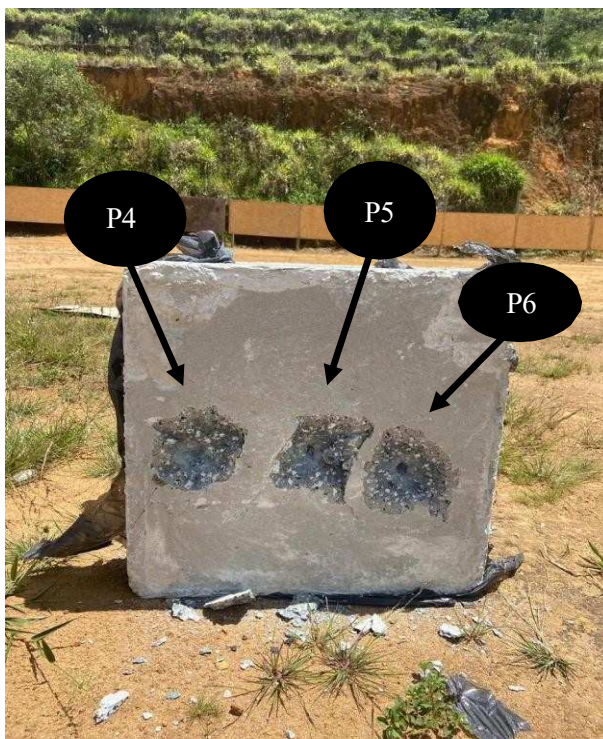
Figura 17 – Bloco A e B: Ambos impactados por munição de cal. 7,62mm.



(a)



(b)



(c)



(d)

Legenda: (a) - Bloco A - face do impacto; (b) - Bloco A - face oposta ao disparo; (c) - Bloco B - face do disparo; (d) - Bloco B - face oposta ao disparo.

Fonte: A autora, 2024.

Após a realização dos disparos, os blocos foram recolhidos e, realizou-se a aferição das respectivas das suas respectivas massas. Sendo verificada a perda de massa, em ambos os corpos, apresentados na tabela 2. Foram ainda analisados os danos locais e globais apresentados por cada bloco, sendo a dimensão (área X profundidade) também registrada na citada tabela.

Tabela 3 – Apuração das massas dos corpos de prova após o ensaio de impacto balístico

| CPP | Massa real | Massa Apurada | Perda |
|-----|------------|---------------|-------|
| A | 60 kg | 58,5 kg | 3,62% |
| B | 56,7 kg | 54,5 kg | 3,88% |

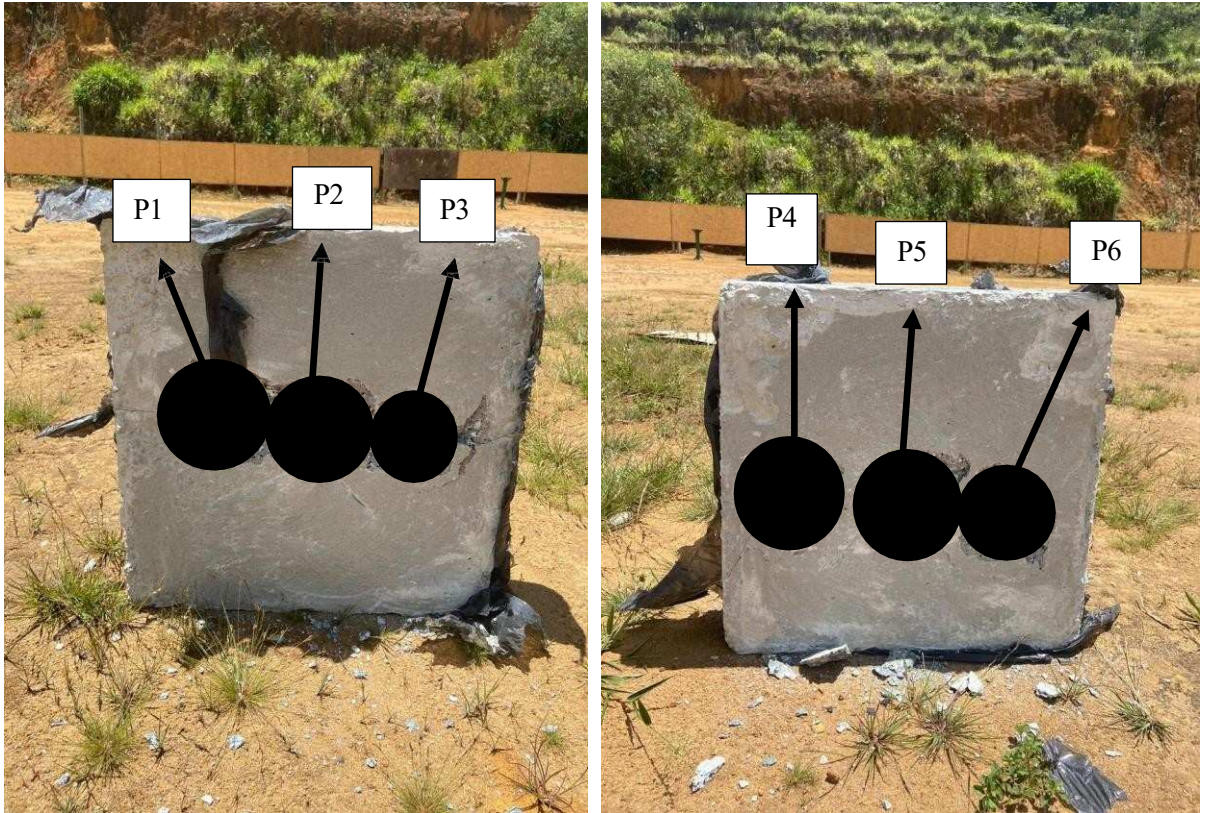
Fonte: A autora, 2024.

Tabela 4 – Apuração dos danos locais com estimativa de perda de massa e volume

| Ponto de incidência | Diâmetro (mm) | Profundidade (mm) | Área (mm ²) | Volume (mm ³) | Massa estimada (g) |
|---------------------|---------------|-------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------|
| P1 | 100 | 15 | 9255 | 82930 | 700 |
| P2 | 90 | 13 | 6798 | 56320 | 500 |
| P3 | 80 | 12 | 5024 | 26795 | 300 |
| P4 | 100 | 18 | 9255 | 83903 | 600 |
| P5 | 110 | 19 | 9499 | 88654 | 1,100 |
| P6 | 90 | 17 | 6798 | 87405 | 500 |

Fonte: A autora, 2024.

Figura 18 – Bloco A e B: Estimativa dos diâmetros das crateras



Fonte: A autora, 2024.

CONCLUSÃO

A determinação das dimensões dos blocos (CPPs) possibilitou o cálculo de seus volumes e a caracterização do material conforme os padrões da ABNT/NBR 8953/2015. Com base nas massas medidas, foi identificada uma média de massa específica de 2348,0 kg/m³, classificando o material como concreto normal (CN), com massa específica dentro do intervalo de 2000 kg/m³ a 2800 kg/m³. Em relação à resistência à compressão, os blocos alcançaram 44 MPa, sendo classificados no Grupo I da classe de resistência.

Embora a norma ABNT/NBR 15000/2020 estabeleça diretrizes específicas para os ensaios balísticos, o experimento realizado não seguiu essas condições por limitações técnicas. Durante os testes, os blocos A e B foram submetidos a disparos de projéteis de calibre 7,62 mm. As dimensões laterais dos blocos permaneceram inalteradas após os impactos. Nas faces de impacto, ambos os blocos apresentaram danos localizados, incluindo a formação de crateras e túneis, sem, no entanto, apresentar danos globais significativos.

Na face oposta ao impacto, o Bloco A apresentou uma área com trincas e perda de 3,65% de massa, com profundidade de 15 mm. Já o Bloco B apresentou uma área maior de destacamento, com perda de 3,9% de massa e profundidade de 19 mm. Essas análises foram realizadas visualmente e por medições manuais. A profundidade das penetrações correspondia a menos de 30% da espessura total dos blocos, enquanto a perda de massa ficou abaixo de 40% do total.

Os resultados indicam que o concreto produzido com materiais acessíveis no mercado apresentou desempenho satisfatório, demonstrando potencial para aplicações em edificações com resistência a impactos balísticos. Contudo, ensaios rigorosos conforme a ABNT/NBR 15000/2020 são necessários para a devida certificação do material.

Estudos Comparativos

Estudos prévios corroboram os resultados obtidos neste experimento. Wesley (2023) avaliou o impacto balístico em corpos de prova de concreto sem reforço, utilizando disparos de calibres .40” e 5,56”. Os blocos resistiram aos impactos sem transfixação, com perda de massa inferior a 30%. O experimento foi realizado em condições semelhantes às do presente estudo.

Outro estudo, realizado por Diego (2023), investigou blocos de concreto reforçados com fibras de aramida para aplicações em segurança. Apesar de não ocorrer transfixação completa, foi observada penetração significativa e formação de um mecanismo trifásico. Além disso, a manta de fibra de aramida causou propagação de trincas, evidenciando problemas de aderência

entre o concreto e o reforço.

Considerações Finais

Os blocos de concreto reforçados com malha de aço demonstraram resistência balística adequada, sem perfuração ou transfixação completa. Apesar disso, foram observados destacamentos consideráveis na face oposta ao impacto. Esses danos foram minimizados pela presença das pontes de tensão formadas pelo reforço de aço, que contribuíram para limitar os danos globais.

Este estudo contribuiu para o entendimento da resistência balística de concreto reforçado e mostrou que o desempenho obtido nos ensaios foi compatível com as expectativas. No entanto, há oportunidades para aprimorar futuras investigações.

Sugestões para Estudos Futuros

1. Utilizar fibras de aço finas incorporadas na mistura de concreto para avaliar seu impacto na resistência.
2. Empregar cronógrafos para medir a velocidade dos projéteis e correlacionar com os danos observados.
3. Realizar ensaios de radiografia nos blocos para análise interna detalhada após os impactos.
4. Aplicar ensaios de ultrassom nos blocos para avaliar possíveis micro danos e alterações na integridade estrutural.

REFERÊNCIAS

- ACI COMMITTEE 318. **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M14) and Commentary**. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7212**: Execução de concreto dosado em central - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953**: Concretos para fins estruturais, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Preparo, controle e recebimento de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15000**: Blindagens para impactos balísticos – Classificação e critérios de avaliação. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- BANGASH, M. Y. H. **Shock, impact and explosion**: structural analysis and design. Germany: Springer, 2009.
- CALLISTER, W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais**. 5ª ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2011.
- CARLUCCI, D. E.; JACOBSON, S. S. **Ballistics**: theory and design of guns and ammunition. USA: CRC Press, 2008.
- CARR, J. **Ballistics Explained**: A Practical Guide to External, Terminal, and Forensic Ballistics. New York: Firearms Research Press, 2018.
- DRESCH, A.; TUTIKIAN, B. Estudo do concreto balístico. *In*: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE CONCRETOS ESPECIAIS, 5, Fortaleza, 2012.
- DRESCH, Alexander Braun. **Desenvolvimento de placas balísticas com diferentes tipos de concretos**. 2011. 101 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil, Ciências Exatas e Tecnológicas) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.
- FISCHER, J. **Aços estruturais e suas aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2016.
- FIGUEIREDO, M. T. **Influência de fibras de aço e malhas metálicas na resistência à tração do concreto**. São Paulo: Editora Blucher, 2016.

FREIRE, P. M.; LOPES, S. M.; REZENDE, P. P. Comportamento balístico de painéis de concreto armado submetidos a projéteis de pequeno calibre. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 57, 2015, Florianópolis. **Anais [...]** São Paulo: IBRACON, 2015. p. 2452-2462.

HATCHER, Julian S. **Hatcher's Notebook**. Harrisburg: Stackpole Books, 1962.

HOGG, Ivan V. **The Complete Illustrated Encyclopedia of the World's Firearms**. New York: MetroBooks, 2002.

LEFONE, R. C. **Estudo de concreto armado com fibras para blindagem de estruturas para defesa**. 2014. 230f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Defesa) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

LISBOA, W. M. **Identificação de resíduos de disparos de armas de fogo utilizando fluorescência de raios X por dispersão em energia**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Nova Friburgo, 2017.

LIOTTO, Pedro Félix; SANTANA, Genilson Pereira. **O uso do vidro em concreto**: revisão. *Revista Scientia Amazonia*, Manaus, v. 9, p. C1-C20, 2020.

LUCAS, S. **Impacto e Permeabilidade em Estruturas de Concreto Armado**. 1ª ed. São Paulo: Editora Pini, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4ª ed. São Paulo: Blucher, 2014.

MIRANDA, E. R. **Armas de Fogo: História, Tipos e Funcionamento**. São Paulo: Editora Milenar, 2010.

MIRANDA, Leví Inimá de. **Balística Forense: do Criminalista ao Legista**. 1ª ed. Rio de Janeiro. Editora Rúbio, 2014.

MOTA, L. P. **Materiais de construção e seus comportamentos**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2018.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2013.

PAES, R. J.; FERREIRA, V. M.; LIMA, T. C. Estudo da resistência ao impacto balístico de placas de concreto armado com adição de fibras de aço. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 60., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais [...]** São Paulo: IBRACON, 2018. p. 3704- 3714.

RIBEIRO, A. Apesar de queda em mortes violentas, Brasil é oitavo país mais letal do mundo. **O Globo**, São Paulo, 28 jun. 2022. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/noticia/2022/06/apesar-de-queda-em-mortes-violentas-brasil-e-oitavo-pais-mais-letal-do-mundo.ghtml>. Acesso em: 05 mar. 2023.

RIBEIRO, G. R.; GOMES, A. M. V. Estudo experimental de placas de concreto armado com fibras de aço submetidas a impacto de projéteis. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 56., 2014, Gramado. **Anais [...]**. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 1981-1990.

RIO DE JANEIRO (Estado). Instituto de Segurança Pública. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.ispvisualizacao.rj.gov.br>. Acesso em 11 de jul. 2023.

ROCHA, L. A. P.; TUTIKIAN, B. F.; TAVARES, S. M. R. Estudo experimental do comportamento de placas de concreto submetidas a impacto balístico. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 51., 2009, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. São Paulo: IBRACON, 2009. p. 360-369.

ROSA, Sérgio Augusto Barreto da; RANGEL, Márcio J. **Introdução à Balística: Balística Interior, Exterior e Terminal**. Campinas: Editora Millennium, 2011.

SÁ, Pedro Paulo Menezes. **Balística Forense: Princípios e Técnicas**. Campinas: Editora Millennium, 2014.

SILVA, Aline Ribeiro da; JORGE, Maria Lúcia da Silva. **Análise experimental de placas de concreto armado submetidas a impacto balístico**. São Paulo: EPUSP, 2017.

TAURUS PT 100 .40 SW. Disponível em: <https://www.taurusarmas.com.br/pt/produtos/pistolas/100-40-sw>. Acesso em: 20 de jan. de 2023.

Teodoro, Adilson. **Tiro Policial**. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/AdilsonTeodoro/tiropolicial-251234322>. Acesso em: 20 mar. 2023.

TIBÚRCIO, Gabriela Dutra. **Análise Experimental de placas de concreto submetidas a impacto de projéteis em alta velocidade**. 2019. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2019.

WILSON, S. J. **Fundamentos da engenharia de estruturas**. 2ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2015.