



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico de Engenharia

Wesley Machareth Lisboa

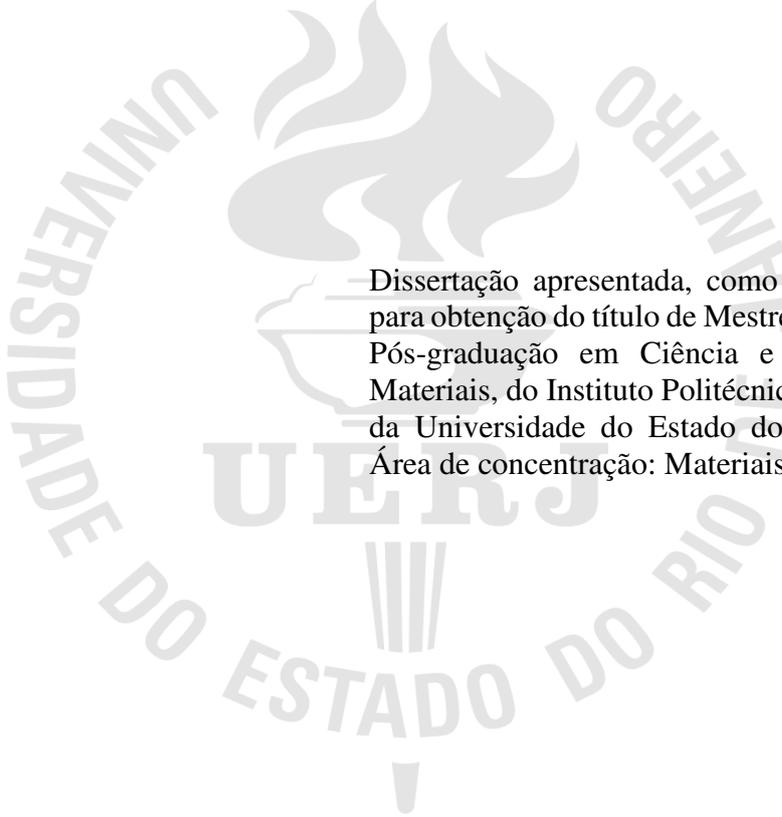
**Análise de impactos balísticos em corpos de prova de concreto:
caracterização do material e identificação, análise e classificação dos danos**

Nova Friburgo

2023

Wesley Machareth Lisboa

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



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 de Engenharia, 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

L769 Lisboa, Wesley Machareth.
Análise de impactos balísticos em corpos de prova de concreto: caracterização do material e identificação, análise e classificação dos danos / Wesley Machareth Lisboa. - 2023.
55 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. 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

Wesley Machareth Lisboa

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

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 de Engenharia, 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 de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Joel Sanchez
Instituto Politécnico de Engenharia - UERJ

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

Nova Friburgo

2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha amada mãe, cujo amor, apoio incondicional e incentivo foram a força motriz que me impulsionou durante toda minha jornada acadêmica. Seu carinho e encorajamento foram essenciais para que eu pudesse alcançar este importante marco em minha vida.

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

Também dedico este trabalho ao meu querido amigo Luiz Felipe Lobato da Fonseca. Sua dedicação singular ao desenvolvimento deste projeto foi inspiradora e impactante. Sua colaboração e apoio foram imprescindíveis para o sucesso desta dissertação, e sou grato por poder contar com sua amizade e parceria ao longo dessa caminhada.

A minha esposa Elizabeth Curty, 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 minha maior fã nos momentos de conquista e por compartilhar comigo cada vitória e cada obstáculo superado. Você é a minha parceira de vida e, com gratidão, dedico este trabalho a você, Elizabeth. Que ele simbolize não apenas meu crescimento acadêmico, 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 companheiro, cuja presença constante, apoio incondicional e estímulo incansável foram fundamentais na realização deste trabalho e durante os desafios pessoais que enfrentei.

Ao Sr. Luiz Felipe Lobato da Fonseca, meu estimado amigo, pelo compartilhamento não apenas de conhecimento técnico, mas também de preciosas lições de vida. Sua sabedoria e amizade são inestimáveis.

À minha família, com destaque especial para minha esposa, Elizabeth, cujo apoio e dedicação singular permitiram que eu trilhasse este caminho acadêmico com confiança e determinação.

Quando a educação não é libertadora, o sonho do oprimido é ser o opressor

Paulo Freire

RESUMO

LISBOA, Wesley Machareth Lisboa. *Análise de impactos balísticos em corpos de prova de concreto*: caracterização do material e identificação, análise e classificação dos danos. 2023. 55 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais) – Instituto Politécnico de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Estatísticas publicadas pelo Instituto de Segurança Pública têm impulsionado a busca crescente por métodos de construção que ampliem a sensação de segurança, marcando os últimos anos com um notável aumento nos investimentos em sistemas de blindagem. O concreto, por sua vez, se revela como um importante para o desenvolvimento de produtos com esse propósito, e apresenta resultados promissores quando submetido a impactos balísticos. Este estudo apresenta o desempenho de amostras de concreto com uma resistência média à compressão de 40 MPa, que foram submetidas a impactos balísticos causados por projéteis de calibres nominais de 0.40" e 5.56 mm. Para a realização do experimento, foram fabricados corpos de prova de concreto cilíndricos e prismáticos. Os cilíndricos passaram por ensaios de compressão usando uma prensa Solotest, enquanto os prismáticos foram submetidos ao ensaio de impactos balísticos disparados a uma distância de quinze metros. Os ensaios revelaram a ocorrência de danos locais, como a formação de crateras e túneis, sem que fossem identificados danos globais. Esses resultados destacam a capacidade do concreto, com uma resistência à compressão de 40 MPa, de resistir a impactos provocados por projéteis de calibres 5.56 mm e 0.40", mesmo sem a aplicação de reforços adicionais.

Palavras-chave: Concreto. Impacto balístico. Calibre. Blindagem. Segurança.

ABSTRACT

LISBOA, Wesley Machareth Lisboa. *Ballistic impact analysis on concrete specimens: material characterization and identification, damage analysis, and classification*. 2023. 55 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais) – Instituto Politécnico de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Statistics published by the Institute of Public Security have been driving the increasing search for construction methods that enhance the sense of security, marking recent years with a significant growth in investments in shielding systems. Concrete, in turn, proves to be an important instrument for the development of products for this purpose and presents promising results when subjected to ballistic impacts. This study presents the performance of concrete samples with an average compressive strength of 40 MPa, which were subjected to ballistic impacts caused by projectiles of nominal calibers 0.40" and 5.56 mm. To conduct the experiment, concrete specimens in both cylindrical and prismatic shapes were manufactured. The cylindrical specimens underwent compression tests using a Solotest press, while the prismatic ones were subjected to ballistic impact tests fired from a distance of fifteen meters. The tests revealed the occurrence of local damage, such as the formation of craters and tunnels, without significant global damage being identified. These results highlight the ability of concrete, with a compressive strength of 40 MPa, to withstand impacts caused by 5.56 mm and 0.40" caliber projectiles, even without the application of additional reinforcements.

Keywords: Concrete. Ballistic impact. Caliber. Armor. Security

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 –	Homicídios praticados com uso de arma de fogo no ano de 2022.....	15
Gráfico 2 –	Número de armas apreendidas no Estado do Rio de Janeiro no 1º semestre do ano de 2023.....	16
Figura 1 –	Composição do cartucho de calibre nominal 0,40”.....	17
Figura 2 –	Balística interna.....	19
Figura 3 –	Balística terminal.....	21
Tabela 1 –	Níveis de proteção balística	25
Tabela 2 –	Classificação do concreto quanto a Resistência à Compressão.....	28
Tabela 3 –	Classificação quanto a classe de consistência.....	29
Figura 4 –	Danos locais.....	31
Figura 5 –	Modelo bifásico de penetração.....	31
Figura 6 –	Modelo trifásico de penetração. (a) alvos de grande espessura; (b) alvos de pequena espessura.....	32
Figura 7 –	Componentes utilizados para produção do concreto.....	33
Figura 8 –	Processo de seleção de agregado graúdo.....	34
Figura 9 –	Blocos CPC para ensaio de compressão.....	35
Figura 10 –	Corpos de prova prismáticos.....	35
Figura 11 –	Processo de homogeneização com emprego de betoneira.....	36
Figura 12 –	Ensaio de compressão em prensa Solotest.....	37
Figura 13 –	Pistola PT 100 Taurus calibre .40 S&W.....	37
Figura 14 –	Carabina Colt M4 calibre 5,56 mm.....	38
Gráfico 3 –	Ensaio de resistência à compressão após período de cura.....	41
Tabela 4 –	Caracterização dos corpos de prova prismáticos quanto à densidade.....	42
Figura 15 –	Face de impacto do CPPA. Incidência de quatro impactos de projéteis calibre nominal 0,40”.....	43
Figura 16 –	Face de impacto do CPPB – Incidência de seis impactos de projéteis calibre nominal 5,56 mm.....	44
Figura 17 –	Face CPPB oposta ao impacto balístico.....	45
Figura 18 –	Projétil fixado à estrutura do CPPB.....	45
Figura 19 –	Ensaio radiológico de localização do projétil.....	46
Figura 20 –	Estimativa dos diâmetros das crateras do CPPA.....	47
Figura 21 –	Estimativa dos diâmetros das crateras do CPPB.....	47

Tabela 5 –	Apuração das massas dos corpos de prova após o ensaio de impacto balístico.....	48
Tabela 6 –	Estimativa de perdas causadas pelos danos registrados.....	48
Tabela 7 –	Estimativa de perdas causadas pelos danos registrados.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ISP	Instituto de Segurança Pública
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
SEPM	Secretaria de Estado de Polícia Militar
AF	Arma de Fogo
NIJ	<i>National Institute of Justice</i>
CPC	Corpo de Prova Cilíndrico
CPP	Corpo de Prova Prismático
F_{ck}	Resistência à Compressão
CPPA	Corpo de Prova Prismático A
CPPB	Corpo de Prova Prismático B
PT100	Pistola Taurus modelo PT100
M4	Carabina Colt modelo M4
MPa	Megapascal
ρ	Massa Específica
CN	Concreto Normal
P1	Ponto 1
P2	Ponto 2
P3	Ponto 3
P4	Ponto 4
P5	Ponto 5
P6	Ponto 6
P7	Ponto 7
P8	Ponto 8
P9	Ponto 9
P10	Ponto 10
CP	Corpo de Prova

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	12
1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
1.1	Violência e estatísticas	15
1.2	Armas de fogo	16
1.2.1	<u>Cartuchos</u>	17
1.2.2	<u>Funcionamento</u>	18
1.3	Conceitos balísticos	18
1.3.1	<u>Balística interna</u>	19
1.3.2	<u>Balística intermédia</u>	19
1.3.3	<u>Balística externa</u>	20
1.3.4	<u>Balística terminal</u>	21
1.3.4.1	Tipos de alvos.....	22
1.3.4.1.1	Alvos duros.....	22
1.3.4.1.2	Alvos moles.....	23
1.4	Proteção balística e níveis de blindagem	24
1.5	Concreto	25
1.5.1	<u>Classificação do Concreto</u>	27
1.5.1.1	Classificação quanto a densidade.....	28
1.5.1.2	Classificação quanto a resistência à compressão.....	28
1.5.1.3	Classificação quanto a consistência.....	29
1.6	Impacto balístico e seus efeitos sobre o concreto	30
2	METODOLOGIA	33
2.1	Preparação dos corpos de prova	33
2.2	Identificação dos corpos de prova	36
2.3	Ensaio de impacto balístico	38
2.4	Registro de dimensões e massas pós-impacto	39
2.5	Análise de dados	39
2.6	Interpretação dos resultados	40
3	RESULTADOS	41
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
	REFERÊNCIAS	52

INTRODUÇÃO

Contextualização

A crescente onda de violência que assola o país tem gerado uma busca incessante por soluções que proporcionem maior segurança e proteção. Nesse contexto, os sistemas de blindagem têm ganhado destaque como uma alternativa eficaz para mitigar os riscos decorrentes da violência urbana. Dresh (2011) observa que o setor de blindagem experimentou um crescimento significativo nos últimos anos, especialmente nas regiões do Rio de Janeiro e São Paulo, que concentram cerca de 95% do consumo da produção nacional de portas e janelas blindadas.

No entanto, a construção de edificações com resistência ao impacto balístico ainda apresenta desafios consideráveis. A mesclagem entre alvenaria convencional e chapas de aço, que tem sido uma abordagem adotada por empresas do setor de construção civil, revela-se um processo moroso e oneroso, muitas vezes inviabilizando a aplicação em larga escala, segundo dresh (2012).

Justificativa

Em 2021, o Brasil registrou 47503 mortes violentas. Esse número representou uma queda de 6,5% em relação ao ano anterior, de acordo com o 16º Anuário Brasileiro de Segurança Pública. Apesar dessa diminuição, o país ocupa o oitavo lugar no *ranking* mundial de violência (RIBEIRO, 2022).

O Instituto de Segurança Pública do Rio de Janeiro (ISP) registrou, somente no ano de 2021, um total de 2405 homicídios cometidos com o uso de armas de fogo no estado, o que corresponde a aproximadamente sete mortes diárias (RIO DE JANEIRO, 2023). Além disso, no primeiro semestre de 2022, foram apreendidas 2857 armas de fogo no estado (RIO DE JANEIRO, 2023).

Diante desse cenário, o uso do concreto tem se mostrado uma alternativa promissora para a proteção balística. Estudos recentes têm apontado resultados satisfatórios na aplicação

do concreto em ensaios de impacto balístico (TIBÚRCIO, 2019). Além disso, várias pesquisas têm contribuído para o avanço do conhecimento nessa área. Silva e Jorge (2017) conduziram uma análise experimental de placas de concreto armado submetidas a impacto balístico, enquanto Paes *et al* (2018) investigaram a resistência ao impacto balístico de placas de concreto armado com adição de fibras de aço.

A compreensão dos danos causados pelo impacto balístico em corpos de prova de concreto é fundamental para o desenvolvimento de soluções mais eficazes. Nesse sentido, estudos como o de Freire *et al* (2015), que analisaram o comportamento balístico de painéis de concreto armado submetidos a projéteis de pequeno calibre, e o de Ribeiro e Gomes (2014), que investigaram o impacto de projéteis em placas de concreto armado com fibras de aço, têm contribuído para o avanço científico e tecnológico nessa área.

Além disso, é válido mencionar a relevância do estudo realizado por Rocha *et al* (2009), que apresentaram uma análise experimental do comportamento de placas de concreto submetidas a impacto balístico. Esses estudos fornecem subsídios importantes para a compreensão dos fenômenos envolvidos no impacto de projéteis em estruturas de concreto, contribuindo para o aprimoramento das técnicas construtivas e o desenvolvimento de materiais para blindagem de edificações.

Objetivo

Objetivo Geral

Analisar experimentalmente danos causados em corpos de prova de concreto submetidos ao impacto balístico promovido por projéteis de calibre nominal 0,40” e 5,56 mm.

Objetivo específico

Construir corpos de prova cilíndricos e prismáticos, seguindo conceitos das normas ABNT NBR 5738:2015 (Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova) e ABNT NBR 15000: 2020 (Blindagens para impactos balísticos – Classificação e critérios de avaliação).

Submeter os corpos de prova cilíndricos ao ensaio de compressão buscando a caracterização do concreto empregado no experimento, conforme os parâmetros da ABNT NBR 8953:2015 (Concretos para fins estruturais, por grupos de resistência e consistência).

Submeter ao ensaio de impacto balístico, os corpos de prova prismáticos, com utilização de projéteis de calibre 0,40” e 5,56 mm, seguindo parâmetros estipulados pela ABNT NBR 15000:2020.

Identificar e classificar os danos, causados pelos projéteis utilizados, nos corpos de prova prismáticos.

Analisar os danos tabulando dados que permitam subsidiar pesquisas futuras para a construção de sistemas de blindagem.

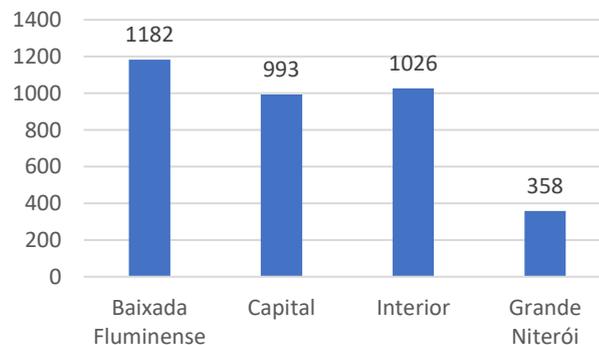
1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1. Violência e estatísticas

No transcurso do ano de 2021, o Brasil se deparou com um alarmante contingente de 47.503 mortes violentas, registrando-se, contudo, uma redução de 6,5% em relação ao período precedente, segundo o 16º Anuário Brasileiro de Segurança Pública. Apesar desse declínio, é imprescindível enfatizar que o país figura como o oitavo colocado no ranking mundial de violência, demonstrando a persistência do desafio enfrentado no âmbito da segurança pública (RIBEIRO, 2022).

No contexto particular do Estado do Rio de Janeiro, o Instituto de Segurança Pública (ISP) consignou, apenas no ano de 2022, um total de 3559 homicídios, cf. gráfico 1, perpetrados mediante o emprego de armas de fogo, o que resultou numa média aproximada de dez mortes diárias.

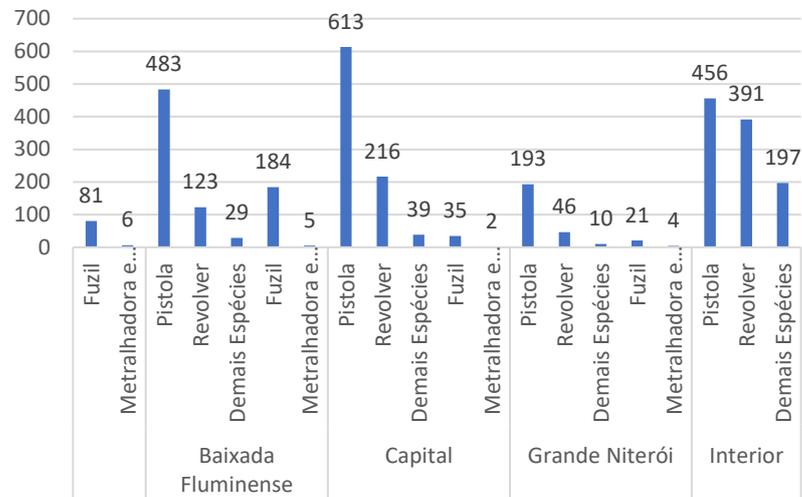
Gráfico 1 – Homicídios praticados com uso de arma de fogo no ano de 2022



Fonte: RIO DE JANEIRO, 2023

Em conjunto com as informações apresentadas, o primeiro semestre de 2023 também se deparou com apreensões significativas de armas de fogo no Estado do Rio de Janeiro, totalizando 3138 unidades, das quais 321 foram fuzis e 1748 são pistolas, cf. gráfico 2.

Gráfico 2 – Número de armas apreendidas no Estado do Rio de Janeiro no 1º semestre do ano de 2023



Fonte: RIO DE JANEIRO, 2023

Tais informações apresentam a necessidade não apenas de disseminação de políticas de segurança que visem atender e proteger de forma efetiva os cidadãos do Estado, mas também de políticas que possibilitem investimentos em sistemas de proteção que visem fornecer aparatos tecnológicos para a proteção de agentes de segurança que se veem em zonas de constante confronto.

1.2. Armas de fogo

A invenção fundamental da pólvora é atribuída aos chineses, embora sua disseminação e uso com propósitos bélicos tenham sido associados aos árabes, destacados comerciantes da Idade Média. As armas de fogo (AF) são classificadas como máquinas térmicas que utilizam a expansão dos gases para impulsionar um projétil. Na legislação brasileira, a definição de AF é estabelecida como "arma que lança projéteis empregando a força expansiva dos gases gerados pela combustão de um propelente, confinado em uma câmara geralmente conectada a um cano, que proporciona continuidade à combustão do propelente, bem como direção e estabilidade ao projétil" (BRASIL, 2000).

A classificação das armas de fogo pode variar de acordo com suas dimensões e peso. Neste estudo, adota-se a classificação com base nesses critérios, resultando em três categorias principais:

Arma não portátil: refere-se a armas que, devido às suas dimensões ou peso, não podem ser transportadas por um único indivíduo (BRASIL, 2000 - art. 3º - inciso XX).

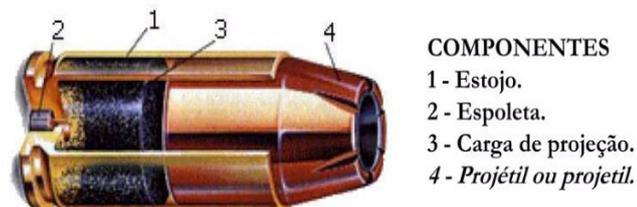
Arma de porte: abrange armas de fogo de dimensões e peso reduzidos, permitindo serem portadas por uma pessoa em um coldre, podendo ser disparadas comodamente com uma das mãos, incluindo pistolas, revólveres e garruchas (BRASIL, 2000 - art. 3º - inciso XIV).

Arma portátil: engloba armas cujo peso e dimensões possibilitam serem transportadas por um único indivíduo, embora, em condições normais, exijam o uso de ambas as mãos para eficiente realização do disparo. Nesta definição estão incluídos fuzis, carabinas, espingardas, entre outros (BRASIL, 2000 - art. 3º - inciso XXII).

1.2.1. Cartuchos

A munição, também conhecida como cartucho, é uma peça essencial no funcionamento das armas de fogo, composta por componentes distintos, conforme ilustrado na fig. 1. Esses elementos são a espoleta, responsável por iniciar o processo de disparo, a carga de projeção, o estojo que contém os demais elementos e o projétil, que é lançado em direção ao alvo.

Figura 1 – Composição do cartucho de calibre nominal 0,40”



Fonte: LISBOA, 2019

1.2.2. Funcionamento

No momento do disparo, ao ser pressionado o gatilho, o cão da arma aciona um percussor que atinge a espoleta presente no cartucho, onde se encontra uma carga iniciadora. A queima dessa carga iniciadora gera uma reação em cadeia, levando à ignição do propelente (pólvora) contido no cartucho. A queima da pólvora produz uma grande quantidade de gases de alta pressão, resultando na expansão dos gases no interior da câmara da arma.

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

1.3. **Conceitos balísticos**

A balística é uma ciência que se ocupa do estudo do movimento e comportamento dos projéteis, especialmente aqueles disparados por armas de fogo. Ela se dedica a analisar a trajetória, a velocidade, o alcance, a energia cinética, o impacto, as marcas deixadas e outros aspectos relacionados aos projéteis durante seu percurso, desde o momento em que são lançados até o momento do impacto (ROSA e RANGEL, 2011).

A balística é interdisciplinar e combina princípios da física, da química e da engenharia para entender e prever o comportamento dos projéteis. Ela é aplicada tanto em contextos militares, onde é utilizada para melhorar a precisão e eficácia das armas, quanto em contextos forenses, onde é empregada para analisar tiros, acidentes com armas de fogo e outras situações relacionadas à balística criminal (SÁ, 2014).

Essa ciência abrangente encontra-se embasada em diversos estudos que visam compreender desde a ignição da carga de projeção até a trajetória precisa dos projéteis. Em cada etapa, aspectos cruciais são investigados, incluindo a dinâmica da pólvora e sua queima, a interação com gases residuais, os efeitos do ar atmosférico e, por fim, o impacto nos alvos (BALÍSTICA, 2020).

A balística desempenha um papel crucial na análise do comportamento de projéteis, fornecendo *insights* para aprimorar as tecnologias de armamento, bem como auxiliando investigadores forenses em suas análises minuciosas. O campo da balística oferece uma

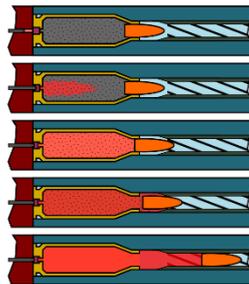
compreensão profunda e abrangente dos intrincados processos envolvidos no movimento e impacto dos projéteis, tornando-se essencial em diversas aplicações práticas.

1.3.1. Balística interna

A balística interna é a vertente do estudo balístico que concentra suas análises no comportamento do projétil enquanto este ainda se encontra no interior do cano da arma (MIRANDA, 2014). Esta fase detém relevância para o entendimento abrangente do movimento dos projéteis. A análise contempla diversos fatores, sendo especialmente destacados a pressão gerada pela ignição e o movimento inicial do projétil durante o momento do disparo (ROSA e RANGEL, 2011).

Dentro da balística interna, a análise focaliza o comportamento do projétil enquanto ele ainda está confinado ao cano da arma, cf. fig. 2. Isso abrange uma investigação detalhada da queima da carga de projeção, que fornece a energia inicial ao projétil. Além disso, destaca-se a geração de gases resultantes dessa queima, bem como a aceleração subsequente do projétil até que ele deixe o cano da arma. Esses aspectos intrincados contribuem para uma compreensão mais precisa da fase inicial do movimento balístico (ROSA e RANGEL, 2011).

Figura 2 – Balística interna



Fonte: BALÍSTICA INTERNA, 2022

1.3.2. Balística intermédia

No âmbito da balística, a fase intermédia desempenha um papel de destaque ao desvendar os complexos efeitos dos gases residuais que subsistem quando o projétil é ejetado

da arma. Esta etapa específica busca a compreensão detalhada de como tais gases podem moldar a trajetória e o comportamento do projétil. É crucial reconhecer que esses gases remanescentes possuem a capacidade de impactar de maneira substancial variáveis essenciais como a velocidade, estabilidade e precisão do projétil durante essa fase crítica do movimento balístico (ROSA e RANGEL, 2011; SÁ, 2014).

Ao cessar a influência dos gases remanescentes que agem à boca da arma, o projétil adentra a seguinte etapa, conhecida como balística externa. Durante esse período, a trajetória do projétil é predominantemente influenciada por fatores ambientais, incluindo a resistência do ar, a gravidade e outras forças interativas em seu percurso (ROSA e RANGEL, 2011).

Aprofundar a compreensão da balística intermédia detém significado prático marcante. Essa abordagem não apenas capacita a elaboração otimizada de munições e armamentos em prol da maior precisão, mas também proporciona uma visão ampliada sobre o desempenho dos projéteis sob diversas distâncias e cenários. Em última análise, a exploração minuciosa do comportamento dos projéteis ao longo de todas as etapas de sua trajetória assume um papel integral nas técnicas balísticas e na sua aplicação eficaz (ROSA e RANGEL, 2011; SÁ, 2014).

1.3.3. Balística externa

No escopo da balística, a fase da balística externa está centrada no estudo da cinemática do projétil após sua expropriação da câmara de combustão da arma. Este segmento investigativo promove uma análise pormenorizada da trajetória percorrida pelo projétil e, simultaneamente, empreende uma avaliação dos elementos ambientais que influenciam de forma conspícua seu percurso (MIRANDA, 2014).

A trajetória projetiva, um conceito central no âmbito da balística externa, é indissociavelmente delineada por uma miríade de fatores ambientais. Dentre esses, a resistência aerodinâmica exerce influência relevante sobre a cinética do projétil. É imperioso reconhecer que tais pressupostos ambientais possuem o poder de conferir uma conformação substancial à trajetória do projétil, suscitando alterações sensíveis em sua precisão e extensão (ROSA e RANGEL, 2011).

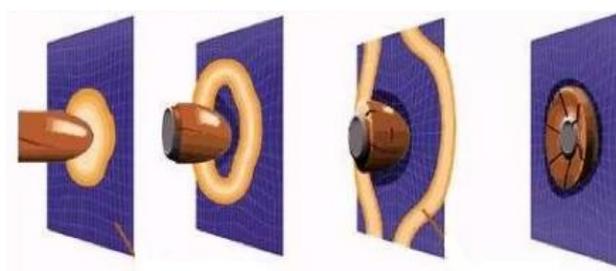
A contextualização destes elementos reveste-se de caráter essencial para a obtenção de uma apreensão completa da balística externa. A interação do projétil com o espaço circundante, mediatizada por tais variáveis ambientais, instaura-se como um vetor definidor de seu

comportamento. Nesse sentido, a análise rigorosa da balística externa constitui um esteio imprescindível para a consecução de um conhecimento integral acerca da performance projetiva no pós-disparo (ROSA e RANGEL, 2011).

1.3.4. Balística terminal

A balística terminal, inserida no domínio da balística, dedica-se à análise da dinâmica que envolve a interação entre distintos tipos de projéteis e seus respectivos alvos, no instante do impacto (ROSA e RANGEL, 2011; SÁ, 2014).

Figura 3 – Balística terminal



Fonte: TEODORO, 2023

Nesta etapa o enfoque, cf. fig. 3, direciona-se para a análise detalhada do comportamento do projétil quando atinge o alvo, considerando variáveis como a capacidade de penetração do projétil no material do alvo, a transferência de energia cinética, o subsequente trajeto do projétil após o impacto e a produção de danos no alvo (ROSA e RANGEL, 2011).

A magnitude da balística terminal permeia diversas aplicações práticas. Essa área desempenha um papel essencial na concepção e avaliação de munições para múltiplas finalidades, contribuindo para o aprimoramento da eficiência desses dispositivos (SÁ, 2014). Adicionalmente, a Balística Terminal exerce uma influência marcante na elaboração e testagem de coletes balísticos de elevado desempenho. Além disso, assume um papel destacado na área forense, proporcionando um entendimento profundo das lesões ocasionadas por armas de fogo, e conferindo suporte às investigações criminais (SÁ, 2014).

Em síntese, a balística terminal é um campo de estudo de relevância inegável, capaz de desvelar a complexa interação entre projéteis e alvos, por meio da avaliação da capacidade de penetração do projétil e da análise dos danos causados ao alvo (ROSA e RANGEL, 2011).

1.3.4.1. Tipos de alvos

A classificação dos alvos se divide em duas categorias principais: alvos duros e alvos moles, baseando-se na facilidade ou dificuldade de penetração. Alvos duros referem-se àqueles que possuem uma resistência significativa à penetração, muitas vezes devido à presença de armaduras ou couraças. Por outro lado, alvos moles são caracterizados por serem mais facilmente penetráveis (BALÍSTICA TERMINAL, 2023).

1.3.4.1.1. Alvos Duros

Alvos duros abrangem uma ampla gama de objetos, desde as robustas armaduras de tanques até os modernos coletes balísticos. Para a neutralização efetiva desses alvos, diversos tipos de munição são empregados, cada um com propriedades específicas. Os projéteis cinéticos, também conhecidos como *Armor-Piercing*, *Fin-Stabilized*, *Discarding-Sabot* (APFSDS), destacam-se pela alta densidade combinada com uma pequena área transversal, o que lhes permite atingir uma excelente capacidade de perfuração (BALÍSTICA TERMINAL, 2022). Além disso, cargas focais, como os utilizados em lançadores de granadas antitanque *Ruchnoy Protivotankoviy Granatomyot* (RPG), utilizam uma carga explosiva moldada em formato de cone. Essa configuração direciona a explosão para um único ponto, resultando em temperaturas elevadas e alta velocidade de impacto. A eficácia das armaduras contra os projéteis pode ser comprometida de várias maneiras distintas, incluindo:

Falha dúctil: O material da armadura, quando submetido a um impacto, pode sofrer deformações plásticas, o que compromete a sua eficácia de proteção (BALÍSTICA TERMINAL, 2022).

Falha por fratura: Quando a armadura é excepcionalmente dura, pode ocorrer a fratura do material sob a pressão do projétil, resultando em falha na proteção (BALÍSTICA TERMINAL, 2022).

Falha por vazamento: Em casos nos quais a armadura possui uma dureza intermediária, um projétil de ponta romba pode arrastar parte do material para dentro da superfície da armadura, resultando em perfuração (BALÍSTICA TERMINAL, 2022)

Falha por destacamento de uma face interior: Munições *High-Explosive Squash Head* (HESH), que consistem em uma carga explosiva acoplada a um projétil, podem causar a separação da camada interna da armadura devido à onda de choque gerada pela detonação da carga explosiva (BALÍSTICA TERMINAL, 2022).

Esse entendimento das possíveis formas de falha das armaduras é fundamental para o desenvolvimento de munições e estratégias eficazes no combate a alvos duros.

1.3.4.1.2. Alvos Moles

Alvos moles englobam animais e seres humanos como alvos potenciais. A utilização de explosivos é evitada, não apenas devido à desnecessidade de tamanha potência para incapacitar o alvo, mas também devido às restrições legais e éticas quanto ao uso de munições explosivas em seres humanos e animais. Na esfera da balística das feridas, as energias são categorizadas da seguinte forma:

Energia de impacto: Refere-se à energia remanescente do projétil no momento em que entra em contato com o alvo (BALÍSTICA TERMINAL, 2022).

Energia emergente: No caso em que o projétil atravessa completamente o alvo, é a energia cinética com a qual o projétil emerge do outro lado do alvo (BALÍSTICA TERMINAL, 2022).

Energia transferida: Neste caso, é a diferença entre a energia de impacto e a energia emergente. Quando o projétil permanece dentro do alvo, a energia transferida é igual à energia de impacto (BALÍSTICA TERMINAL, 2022).

O objetivo é maximizar a energia transferida, buscando evitar que os projéteis saiam do alvo ou, caso saiam, carreguem o mínimo de energia cinética possível. O conceito de "potência do impacto" é utilizado para descrever o espaço ou a profundidade da ferida resultante de um impacto específico. Uma grande potência do impacto ocorre quando, apesar da elevada energia de impacto, a ferida tem pouca profundidade. Por outro lado, altos valores de potência de impacto podem induzir estados de choque, representando uma complexa interação de efeitos fisiológicos e psicológicos que tendem a incapacitar rapidamente o indivíduo atingido.

A incapacitação de um alvo depende de vários fatores determinantes, tais como: a localização e direção do ferimento; a velocidade de impacto; a energia de impacto; a densidade energética (expressa em J/mm^2 , praticamente sinônimo de capacidade de perfuração); o desenho da ponta do projétil; a estabilidade do projétil após o impacto; a preservação da forma do projétil ao longo da perfuração. No mesmo âmbito, surgem as cavidades temporárias, espaços vazios que circundam a trajetória de um projétil em alta velocidade. Embora temporárias, essas cavidades podem ocasionar lesões em órgãos não diretamente perfurados, mas que são afetados pela compressão causada pela cavidade temporária. O tamanho da cavidade é diretamente proporcional à velocidade do projétil (WIKIPÉDIA, 2023).

1.4. Proteção balística e níveis de blindagem

Os sistemas de blindagem são tecnologias desenvolvidas para oferecer proteção contra ameaças balísticas e outras formas de agressão, visando garantir a segurança de pessoas e bens. Esses sistemas consistem em estruturas ou materiais especialmente projetados para absorver ou dissipar a energia proveniente de projéteis, explosões e impactos, reduzindo os danos causados por esses eventos.

Essa tecnologia é amplamente utilizada em diversas áreas, como na indústria automotiva, na construção civil, em equipamentos militares e em coletes balísticos. A eficácia dos sistemas de blindagem está diretamente relacionada aos materiais utilizados e ao projeto adequado da estrutura, levando em consideração o tipo de ameaça que se deseja enfrentar. Tanto a NIJ *Standart* 0101.06 do *National Institute of Justice* (NIJ) dos Estados Unidos quanto a ABNT NBR 15000:2020 estabelecem os níveis de blindagem.

A norma técnica ABNT NBR 15000:2020 é um importante referencial para o desenvolvimento e certificação de sistemas de blindagem no Brasil. Ela estabelece os critérios para a realização de ensaios balísticos em estruturas de blindagem, garantindo que esses sistemas atendam aos padrões de resistência e eficácia necessários para sua aplicação, certificando-lhes quanto ao nível de proteção balística, cf. tab. 1.

Tabela 1 – Níveis de proteção balística

Nível	Munição e projétil		Distância (m)	Velocidade (m/s)	Energia J(mv ² /2)
	Calibre	Massa (g)			
I	.22" LR	2,6	5	320	133
	.38" SPECIAL	10,2	5	254	329
II-A	9 mm LUGER	8	5	332	441
	.357" MAGNUM	10,2	5	381	740
II	9 mm LUGER	8	5	358	513
	.357" MAGNUM	10,2	5	425	921
III-A	9 mm LUGER	8	5	426	726
	.44" MAGNUM	15,6	5	426	1416
III	7,62 mm x 51 mm	9,3	15	838	3265
IV	.30" - .06	10,8	15	868	4068

Fonte: Adaptado ABNT NBR 15000, 2020

1.5. Concreto

O concreto é um dos materiais mais amplamente utilizados na construção civil devido à sua versatilidade, durabilidade e resistência. Sua composição básica consiste em cimento, agregados (como areia e brita) e água, podendo ser reforçado com fibras e aditivos para otimização de suas propriedades.

Alguns estudos, que visam a sustentabilidade, apresentam o vidro como um aditivo à pasta de concreto. Segundo Liotto *et al* (2020), “a incorporação de resíduo de vidro reduz a resistência à compressão quando esta medida é realizada até vinte e oito dias”. Luiz (2018) e Santos (2018) concluem, porém, que a adição de até 20%, em massa, de pó de vidro à pasta de

concreto não remete a alterações significativas na resistência à compressão do material quando este é comparado às características do concreto convencional.

De acordo com Neville (2011), o concreto é um material compósito que combina a resistência à compressão do cimento com a durabilidade e tenacidade dos agregados. A pasta de cimento, que é formada pela mistura de cimento Portland e água, atua como uma matriz que envolve os agregados e contribui para a resistência do material. A adição de aditivos pode modificar as propriedades do concreto, melhorando a trabalhabilidade, retardando ou acelerando o processo de cura, ou aumentando a resistência.

Os procedimentos de dosagem e preparo do concreto são aspectos críticos para assegurar sua qualidade. A ABNT NBR 12655:2015 (Preparo, controle e recebimento de concreto) estabelece diretrizes para o preparo, controle e recebimento de concreto, incluindo os métodos de dosagem dos materiais constituintes. A norma ABNT NBR 5738:2015 (Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova), por sua vez, define o procedimento adequado para a moldagem e cura de corpos de prova, fundamentais para a avaliação das características mecânicas do concreto.

Na execução de elementos de concreto, como lajes e vigas, a norma ABNT NBR 7212:2012 (Execução de concreto dosado em central – Procedimento) fornece orientações específicas para a execução de concreto dosado em central. Essa norma estabelece diretrizes para o transporte, lançamento, adensamento e cura do concreto fresco, assegurando a adequada compactação e minimizando possíveis segregações.

No âmbito do projeto de estruturas de concreto, a norma ABNT NBR 6118:2014 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento) descreve os procedimentos para o dimensionamento e detalhamento das estruturas, levando em consideração as características do concreto e as solicitações a que a estrutura estará submetida. Essa norma aborda aspectos como resistência característica do concreto, classes de agressividade ambiental e dimensionamento de seções de concreto armado.

O concreto é um material de construção que possui propriedades e comportamentos complexos. A compreensão das normas relacionadas ao concreto e a incorporação dos princípios da dosagem, preparo, execução e projeto são cruciais para garantir a durabilidade e o desempenho adequado das estruturas construídas com esse material.

Os agregados desempenham um papel fundamental nas propriedades e no comportamento do concreto. Eles constituem a maior proporção do volume do concreto e influenciam diretamente suas características físicas, mecânicas e durabilidade. A compreensão

das propriedades dos agregados é essencial para projetar e produzir um concreto de alta qualidade e desempenho.

Conforme mencionado por Neville (2011), os agregados podem ser divididos em dois tipos principais: agregados miúdos e agregados graúdos. Os agregados miúdos, também conhecidos como areia, desempenham um papel importante na ocupação dos espaços vazios entre as partículas maiores, aumentando a trabalhabilidade do concreto fresco. Por outro lado, os agregados graúdos, como a brita, proporcionam resistência ao concreto endurecido, atuando como um esqueleto interno para a pasta de cimento.

A qualidade dos agregados influencia diretamente a qualidade do concreto final. A norma ABNT NBR 7211:2005 (Agregados para concreto – Especificação) estabelece as especificações para os agregados utilizados em concreto. Ela aborda critérios como granulometria, forma, textura e propriedades físicas e mecânicas dos agregados. A seleção adequada dos agregados, de acordo com essas especificações, é crucial para evitar problemas como segregação, exsudação e variações na resistência.

A norma ABNT NBR 12655:2015 menciona os requisitos para o controle de qualidade dos agregados durante o preparo do concreto. A qualidade dos agregados afeta diretamente as propriedades do concreto fresco, como a consistência e a resistência, bem como as propriedades do concreto endurecido, como a durabilidade e a resistência mecânica.

Em termos de projeto estrutural, a norma ABNT NBR 6118:2014 destaca a importância de considerar as características dos agregados na determinação da resistência característica do concreto. A resistência dos agregados pode influenciar a resistência geral do concreto e sua capacidade de suportar cargas e tensões.

Os agregados desempenham um papel vital no comportamento e nas propriedades do concreto. O conhecimento das especificações e requisitos normativos para a seleção, uso e controle de qualidade dos agregados é essencial para garantir a qualidade e a durabilidade das estruturas de concreto.

1.5.1. Classificação do Concreto

A norma ABNT NBR 8953:2015, que trata do concreto para fins estruturais, estabelece a classificação do concreto de acordo com três critérios fundamentais: densidade, resistência à compressão e consistência.

1.5.1.1. Classificação quanto a densidade

A densidade do concreto é uma característica importante, pois afeta diretamente o peso da estrutura e suas propriedades térmicas e acústicas. A ABNT NBR 8953:2015 classifica o concreto em três grupos de acordo com sua densidade:

Concreto Leve (CL): Densidade seca inferior a 2.000 kg/m³.

Concreto Normal (CN): Densidade seca entre 2.000 kg/m³ e 2.800 kg/m³.

Concreto Pesado: Densidade seca superior a 2.800 kg/m³.

1.5.1.2. Classificação quanto a resistência à compressão

A resistência à compressão desempenha um papel fundamental na determinação da capacidade estrutural e durabilidade das construções. Ela influencia diretamente a capacidade do concreto de suportar cargas de compressão, afetando a segurança e o desempenho de uma estrutura ao longo do tempo (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Essa propriedade é relevante em aplicações de engenharia civil, como edifícios, pontes e infraestruturas, onde o concreto é usado como material estrutural. Ela determina a carga máxima que uma estrutura pode suportar sem sofrer falhas catastróficas, como colapsos (NEVILLE, 2011).

Tabela 2 – Classificação do concreto quanto a Resistência à Compressão

CLASSE DE RESISTÊNCIA GRUPO I	RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO MPa	CLASSE DE RESISTÊNCIA GRUPO II	RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO MPa
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45		
C50	50	C100	100

A ACI Comittee 318 (*Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*) apresenta ainda que a resistência à compressão está intimamente ligada à durabilidade do concreto, já que influencia sua capacidade de resistir a condições ambientais adversas, como variações de temperatura, umidade e ataques químicos. A tab. 2 apresenta a classificação, segundo a norma, do concreto em termos de sua resistência à compressão.

1.5.1.3. Classificação quanto a consistência

A consistência do concreto no estado fresco é um fator relevante na construção civil, com impacto direto na qualidade das estruturas e no processo construtivo. A ABNT NBR 7212:2012 define a importância da consistência do concreto fresco ao estabelecer diretrizes para o ensaio de abatimento do tronco de cone, também conhecido como *slump test*.

Segundo a ABNT NBR 7212:2012, o ensaio de abatimento é utilizado para avaliar a trabalhabilidade do concreto, ou seja, sua capacidade de ser moldado e conformado de acordo com as exigências do projeto. Através desse ensaio, é possível determinar a consistência do concreto e verificar se ele está adequado para ser utilizado na construção.

A trabalhabilidade do concreto está diretamente relacionada à sua consistência. Um concreto com trabalhabilidade adequada reduz a necessidade de vibrações excessivas durante a colocação, minimizando o risco de segregação e garantindo a uniformidade do material. A ABNT NBR 7212:2012 estabelece critérios específicos para diferentes classes de consistência, proporcionando orientações para garantir que o concreto atenda aos requisitos de projeto.

Os concretos têm sua classificação por consistência no estado fresco, de acordo com a ABNT NBR 8953:2015, determinado pelo ensaio de abatimento, cf. tab. 3.

Tabela 3 – Classificação quanto a classe de consistência

CLASSE	ABATIMENTO (mm)	APLICAÇÕES TÍPICAS
S10	$10 < A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	$50 < A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 < A < 160$	Elementos estruturais com lançamento convencional

S160	$160 < A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado
S220	$A > 220$	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Fonte: ABNT NBR 8953, 2015

1.6. Impacto balístico e seus efeitos sobre o concreto

O efeitos da aplicação de cargas promovidas por impactos balísticos no concreto são danos permanentes que afetam a estrutura podendo reduzir a sua propriedade de proteção balística. Estes danos, conforme estudos já realizados, são categorizados como danos locais e danos globais (BANGASH, 2009).

Os danos globais se subdividem em efeitos de deformação por flexão, cisalhamento e grandes fissuras. Os danos locais, por sua vez, correspondem à penetração, perfuração, destacamento, estilhaçamento e estilhaçamento por punção.

Ocorre a penetração, cf. fig 4a, quando o projétil, ao atingir o alvo, adentra à sua espessura sem contudo atravessa-lo completamente. Esse fenômeno, normalmente, é seguido pela formação de uma cratera, resultado do destacamento de partes do concreto da face impactada. A profundidade da cratera é dita comprimento de penetração.

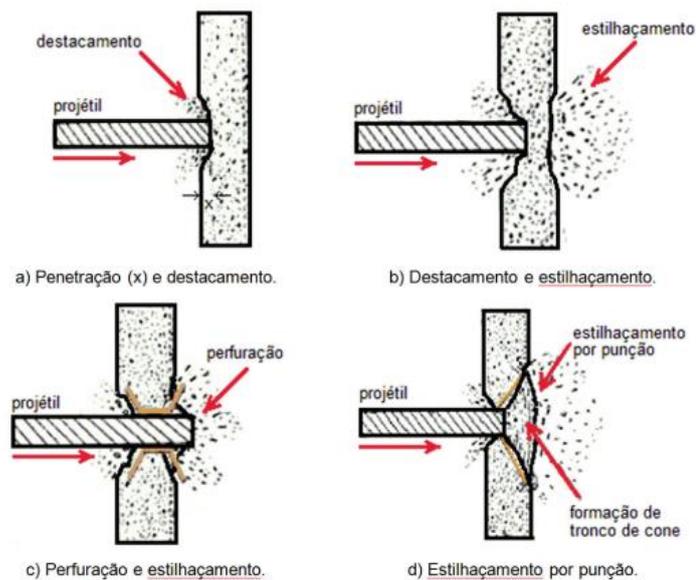
A penetração pode ser associada ao estilhaçamento. Este fenômeno resulta na fragmentação e ejeção de fragmentos de concreto, mesmo sem a observância de perfuração, na face oposta ao impacto.

A perfuração é verificada quando o projétil, ao impactar o alvo, apresenta energia suficiente para atravessar sua espessura completamente, continuando seu percurso após a saída pela face oposta, fig. 4c. Tanto o destacamento quanto o estilhaçamento podem ocorrer por associação à perfuração. A perfuração pode ainda ocasionar o estilhaçamento por punção. Este fenômeno ocorre quando uma maior quantidade de concreto, em forma de tronco de cone, se desprende da face oposta ao impacto, cf. fig. 4a e 4b.

Carlucci e Jacobson (2008) explicam ainda o mecanismo de penetração de projeteis no concreto em modelos bifásico e trifásico. No modelo bifásico de penetração, fig. 5, é verificada a formação de cratera na face de impacto seguida da formação de túnel. Já no medelo trifásico

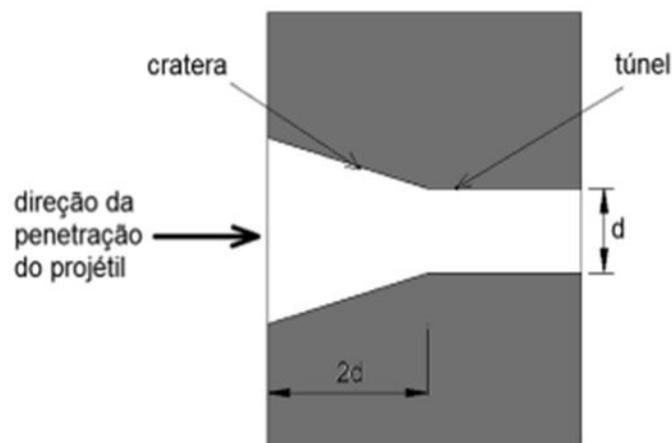
se verifica a formação de crateras na face de impacto e na face oposta, interligadas ou não pela formação de túnel, sendo este evento diretamente relacionado à espessura do alvo, cf, fig. 6a e fig. 6b, respectivamente.

Figura 4 – Danos locais



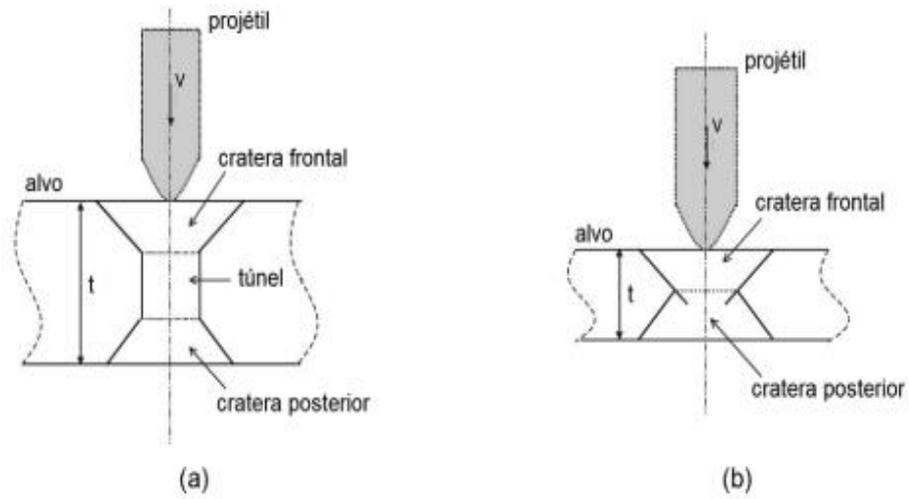
Fonte: BANGASH, 2009

Figura 5 – Modelo bifásico de penetração



Fonte: CARLUCCI e JACOBSON, 2008

Figura 6 – Modelo trifásico de penetração. (a) alvos de grande espessura; (b) alvos de pequena espessura



Fonte: LEFONE, 2014

2. METODOLOGIA

2.1. Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova utilizados neste estudo foram confeccionados com materiais amplamente empregados na construção civil e comumente encontrados em lojas do ramo. O traço do concreto foi determinado com base em uma relação de massas entre os componentes. Inicialmente o traço utilizado seguiu a proporção 1:1,5:2 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo), a/c de 43% que, conforme identifica Santiago de Oliveira *et al* (2018), apresenta uma resistência à compressão f_{ck} igual a 26,2 MPa após 28 dias de cura.

Com o embasamento na ABNT NBR 12655:2015, foram realizados ajustes empíricos até que se alcançasse aos características mínimas de resistência à compressão desejadas, que foram adquiridas com o emprego da proporção de 1:2,8:2,1 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo). Para assegurar a adequada plasticidade do concreto, foram utilizadas relações água/cimento de 34% e plastificante/cimento de 4% de plastificante, sendo empregado o Concreto Forte da marca Sika®, cf. fig. 7.

Figura 7 – Componentes utilizados para produção do concreto



Fonte: O Autor, 2023

Utilizou-se o cimento Portland Campeão ECOMAX CP-III 32 RS, sendo este e os agregados miúdo e graúdo adquiridos no mercado local. A areia foi selecionada como agregado miúdo, e a brita de número zero como agregado graúdo. Ambos os agregados passaram por um rigoroso processo de peneiramento para garantir uma granulometria adequada e a eliminação de resíduos indesejados. Além disso, o agregado graúdo foi submetido a um processo de lavagem para eliminar poeiras e obter uma classificação granulométrica uniforme com dimensões mínimas de sete milímetros, fig. 8.

Figura 8 – Processo de seleção de agregado graúdo



Fonte: O Autor, 2023

Foram confeccionados vinte e um corpos de prova cilíndricos (CPC) com dimensões de 200 mm de comprimento e 100 mm de diâmetro, de acordo com a norma ABNT NBR 5738:2015, cf. fig. 9, bem como dois corpos de prova prismáticos (CPP) com dimensões de 500 mm x 500 mm x 100 mm, conforme prescrito pela norma ABNT NBR 15000:2020, cf. fig. 10. Todos os corpos de prova passaram por um período de cura de vinte e oito dias para garantir o correto desenvolvimento das propriedades do concreto.

Figura 9 – Blocos CPC para ensaio de compressão



Fonte: O Autor, 2023

Figura 10 – Corpos de prova prismáticos



Fonte: O Autor, 2023

A formulação do traço foi submetida a um processo de mistura utilizando uma betoneira móvel, cf. fig. 11, disponibilizada pelo Laboratório de Ensaios Físicos do IPRJ. Ao longo desse procedimento, a mistura foi submetida a um processo de homogeneização, visando atingir uma consistência uniforme e coesa. Após a obtenção dessa consistência, o composto foi devidamente acondicionado em moldes.

Os CPC foram submetidos a ensaios de compressão utilizando uma prensa Solotest, fig. 12. Uma carga axial foi aplicada para determinar a resistência à compressão (f_{ck}) de cada CPC.

Os resultados foram registrados em tabelas, permitindo o cálculo da média das resistências obtidas.

Figura 11 – Processo de homogeneização com emprego de betoneira



Fonte: O Autor,2023

Os CPP foram submetidos à aferição de massa antes e após os ensaios de impacto balístico para a definição de perda de massa, através de uma balança digital de bancada da marca Toledo. Os resultados foram registrados, permitindo a estimativa de perda de massa ocasionada pelos impactos balísticos.

2.2. Identificação dos corpos de prova

Os CPP foram devidamente identificados como Corpo de Prova Prismático A (CPPA) e Corpo de Prova Prismático B (CPPB) para distinguir os diferentes ensaios de impacto balístico realizados. Essa identificação foi adotada com o propósito de garantir a precisão e a consistência dos resultados obtidos, uma vez que os ensaios envolveram o impacto de projéteis de calibres distintos. A identificação individualizada dos corpos de prova prismáticos CPPA e CPPB se torna imprescindível para a análise e comparação dos efeitos do impacto balístico em cada um deles. Essa abordagem permitiu uma avaliação precisa dos resultados e contribuiu para a correta interpretação das características de resposta do concreto frente aos diferentes calibres de projéteis utilizados nos ensaios.

Figura 12 – Ensaio de compressão em prensa Solotest



Fonte: O Autor, 2023

Ao adotar essa nomenclatura específica, o estudo busca assegurar a clareza na comunicação dos resultados obtidos e garantir a consistência ao se referir a cada corpo de prova em todas as etapas da pesquisa, desde a preparação até a análise dos resultados. O CPPA foi designado para sofrer impactos de projéteis de calibre 0,40", disparados por uma pistola modelo PT100, marca Taurus, cf. fig. 13. O CPPB foi designado para sofrer impactos de projéteis de calibre 5,56 mm, disparados por um fuzil modelo carabina M4 de marca Colt, cf. fig. 14.

A distinção entre os corpos de prova permitiu garantir a correlação dos resultados obtidos nos ensaios facilitando a análise comparativa entre as deformações causadas por cada projétil utilizado.

Figura 13 – Pistola PT 100 Taurus calibre .40 S&W



Fonte: TAURUS, 2023

Figura 14 – Carabina Colt M4 calibre 5,56 mm



Fonte: COLT, 2023

2.3. Ensaio de impacto balístico

Os ensaios de impacto balístico foram conduzidos 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.

Os corpos de prova prismáticos foram posicionados a uma distância de quinze metros da linha de disparo. Seguindo as recomendações do instrutor de tiro do estande, a fim de minimizar os riscos relacionados ao efeito de ricochete dos projéteis, os corpos de prova foram inclinados levemente, cerca de vinte graus em relação à vertical.

O CPPA foi sujeito a cinco impactos de projéteis de calibre 0,40", disparados por uma pistola da marca Taurus, modelo PT100. Por outro lado, o CPPB sofreu cinco impactos de projéteis de calibre 5,56 mm, provenientes de um carabina da marca Colt, modelo M4.

Essa abordagem experimental visa analisar os efeitos e a resposta do concreto frente a diferentes calibres de projéteis, permitindo uma avaliação comparativa entre os corpos de prova e uma compreensão mais aprofundada do comportamento do material em relação aos impactos balísticos.

Foram seguidos procedimentos de segurança e orientações do instrutor de tiro durante a execução dos ensaios, a fim de garantir a integridade física dos envolvidos e a correta realização dos disparos.

2.4. Registro de dimensões e massas pós-impacto

Após os ensaios de impacto balístico, procedeu-se ao registro das dimensões dos corpos de prova com o intuito de avaliar as deformações ocasionadas pelos eventos balísticos. Adicionalmente, as massas dos corpos de prova foram mensuradas para calcular o percentual de perda de massa resultante dos impactos balísticos.

Essas medidas são de suma importância para uma análise precisa dos danos causados ao concreto frente aos impactos sofridos, permitindo uma avaliação quantitativa das deformações ocorridas. O registro das dimensões e aferição das massas dos corpos de prova possibilitam a obtenção de dados objetivos sobre as alterações estruturais e a perda de material decorrente dos impactos balísticos.

A análise dos resultados obtidos por meio das medições dimensionais e aferições de massa contribui para o entendimento do desempenho estrutural do concreto submetido a impactos balísticos, fornecendo informações para o aprimoramento de soluções de proteção e segurança.

2.5. Análise de dados

Os dados obtidos por meio dos registros de dimensões e massas pós-impacto foram submetidos a uma análise quantitativa, visando avaliar as deformações ocorridas nos corpos de prova e calcular o percentual de perda de massa associado a cada um deles. Adicionalmente, uma avaliação qualitativa foi conduzida para examinar as deformações locais e globais, com o objetivo de obter uma compreensão dos danos causados ao material diante dos impactos promovidos pelos diferentes tipos de projéteis.

A análise quantitativa dos dados consistiu em uma análise das dimensões e das massas dos corpos de prova após os impactos balísticos. Essa abordagem permitiu uma avaliação das deformações estruturais ocorridas, bem como a quantificação da perda de massa decorrente dos eventos balísticos. Por meio dessa análise, foram obtidos dados objetivos que auxiliam na compreensão do desempenho estrutural do material frente aos impactos.

A avaliação qualitativa das deformações locais e globais foi conduzida com base em observações detalhadas das características visíveis das deformações nos corpos de prova. Essa

abordagem qualitativa proporcionou *insights* complementares sobre o desempenho do material, permitindo uma apreciação mais completa das respostas do concreto diante dos diferentes tipos de projéteis.

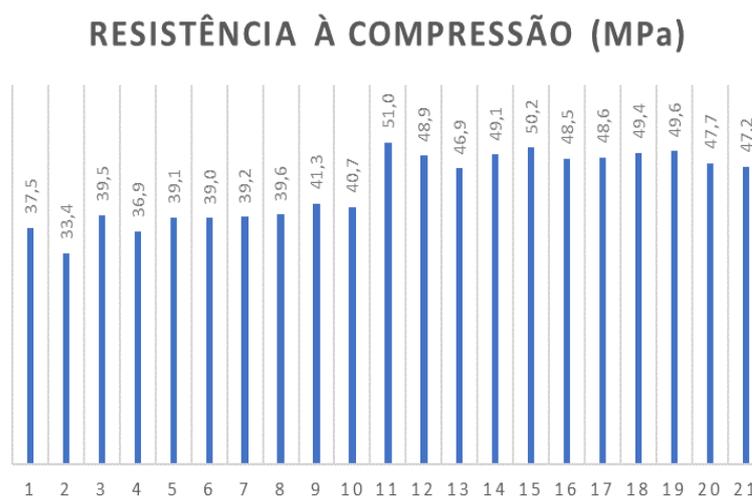
2.6. Interpretação dos resultados

Com base na análise dos dados, foram feitas interpretações dos resultados obtidos nos ensaios de impacto balístico, sendo discutido o desempenho dos corpos de prova, incluindo as deformações observadas e o percentual de perda de massa decorrente dos impactos. As conclusões serão embasadas nas análises apresentadas.

3. RESULTADOS

Foram confeccionados vinte e um CPC com dimensões de 200 mm de comprimento por 100 mm de diâmetro para avaliar as propriedades do material em questão. Os CPC foram curados por um período de vinte e oito dias para garantir a maturação adequada do material. Posteriormente, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de compressão empregando uma prensa Solotest, através da qual foram obtidos os dados apresentados no gráfico 1. A resistência à compressão média (f_{ck}) apurada foi de 44 MPa, refletindo a capacidade do material em suportar cargas sob compressão.

Gráfico 3 – Ensaio de resistência à compressão após período de cura



Fonte: O Autor, 2023

Além dos CPC mencionados, foram produzidos dois CPP com dimensões de 500 mm de lado por 100 mm de espessura. Assim como os CPC, os CPP foram submetidos ao mesmo processo de cura por vinte e oito dias, cf. ABNT NBR 5738:2015, visando assegurar a adequada hidratação do concreto.

Após o período de cura, as dimensões e massas dos CPP foram aferidas para a definição de suas massas específicas (ρ), propriedade de suma importância na caracterização do material e fundamental para diversos cálculos e projetos de engenharia, permitindo a determinação da densidade do material e suas implicações em termos de resistência, durabilidade e comportamento mecânico.

Os dados das massas específicas foram compilados na tabela 4, fornecendo uma visão das características físicas do material.

Em conjunto com os resultados dos ensaios de compressão realizados nos CPC, as massas específicas obtidas dos CPP, permitiram uma caracterização do material em estudo.

Tabela 4 – Caracterização dos corpos de prova prismáticos quanto à densidade

CPP	Massa	ρ
A	55,5 kg	2220,0 kg/m ³
B	54,7 kg	2188,0 kg/m ³
Média	55,1 kg	2204,0 kg/m ³

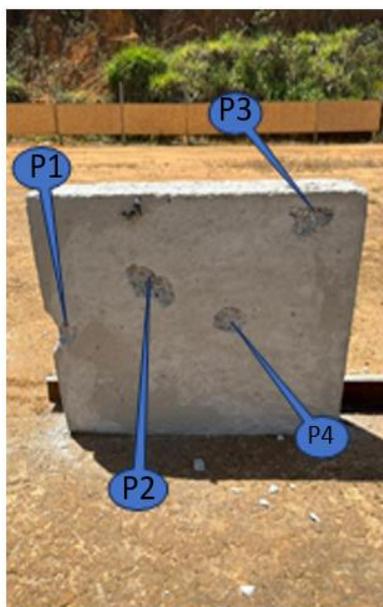
Fonte: O Autor, 2023

Dessa forma foi possível caracterizar o concreto desenvolvido segundo os padrões estabelecidos pela ANBT NBR 8953:2015, quanto a massa específica e quanto a sua resistência à compressão. Segundo a norma o material utilizado se classifica quanto a massa específica em um concreto normal (CN), ou seja, sua massa específica se encontra na faixa entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³ e, quanto a sua resistência à compressão, em um concreto de f_{ck} C40, classificando-se no grupo I na classe de resistência.

Após a realização das devidas análises de caracterização, os CPP foram submetidos aos ensaios de impacto balístico no estande de treinamento e tiro Oodaloop, situado no município de Nova Friburgo. Esses ensaios foram conduzidos sob a supervisão e colaboração de profissionais da Polícia Militar do Décimo Primeiro Batalhão de Polícia Militar do Estado do Rio de Janeiro, vinculados ao setor de Material Bélico.

Os CPP foram posicionados estrategicamente a uma distância aproximada de quinze metros da linha de disparo, sendo essa distância estipulada pela norma ABNT NBR 15000:2020 em ensaios realizados para certificação de blindagens de nível III e IV, com uma leve inclinação em relação à normal, em torno de trinta graus. Essa inclinação foi prescrita pelo instrutor de tiros do estande, tendo em vista a consideração da possibilidade do fenômeno de ricochete do projétil após o impacto.

Figura 15 – Face de impacto do CPPA. Incidência de quatro impactos de projéteis calibre nominal 0,40”



Fonte: O Autor, 2023

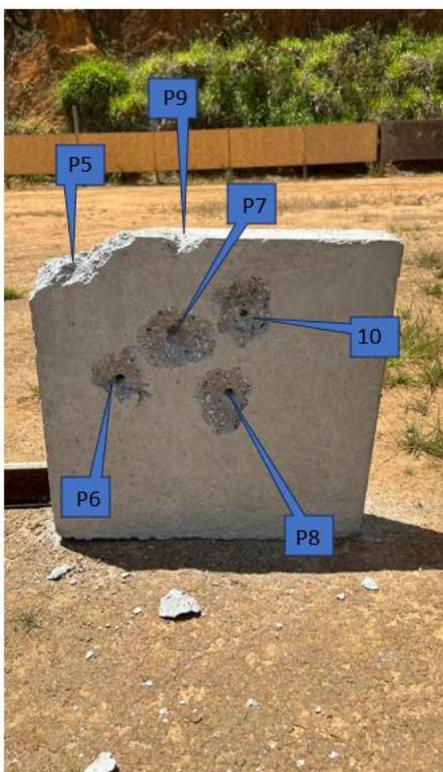
O CPPA, conforme ilustrado na fig. 15, foi submetido a um ensaio de impacto balístico, durante o qual quatro disparos foram efetuados utilizando uma pistola do modelo PT100 da marca Taurus, com calibre nominal de 0,40". Um desses disparos atingiu a borda do CPPA, ocasionando uma significativa perda de massa. Nota-se que a norma ABNT NBR 15000:2020 estabelece pontos específicos para a incidência dos projéteis, não considerando impactos nas bordas do corpo de prova. Assim, o primeiro disparo, incidente ao ponto 1 (P1), foi desconsiderado para os fins do levantamento das características dos danos locais e globais, conforme proposto no presente estudo. Importa mencionar que as dimensões laterais do CPPA não foram afetadas por esse impacto.

O ensaio conduzido com o CPPA permitiu identificar outros três pontos de incidência de projéteis: ponto 2 (P2), ponto 3 (P3) e ponto 4 (P4). A análise desses pontos revelou a ocorrência de danos locais, caracterizados pela formação de crateras, contudo, não se observou o início de formação de túnel. Não houve registro, no âmbito desse ensaio, de danos globais associados, ou seja, danos que ultrapassam os pontos específicos de incidência. Também não foi possível registrar fotograficamente a ocorrência do fenômeno de ricochete dos projéteis no decorrer o ensaio, porém, após a ocorrência dos impactos alguns projéteis deformados foram arrecadados próximo ao CP.

O CPPB, conforme ilustrado na fig. 16, foi submetido ao ensaio de impacto balístico, durante o qual seis disparos provenientes de um carabina da marca Colt, modelo M4, calibre nominal 5,56 mm, foram proferidos em sua direção. Os pontos de incidência dos projéteis foram identificados como: ponto 5 (P5), ponto 6 (P6), ponto 7 (P7), ponto 8 (P8), ponto 9 (P9) e ponto 10 (P10).

Registrou-se que os pontos de incidência P5 e P9 atingiram, respectivamente, a borda lateral direita e a borda superior do CPPB. Como a ABNT NBR 15000:2020 não prevê incidência de impactos nas bordas dos CP, estes dois disparos não foram considerados para a identificação e caracterização de danos. Registrou-se após a execução do ensaio a existência de danos locais com a formação de crateras. Foi registrada também a iniciação da formação de túnel nos pontos P6, P7, P8 e P10 sem, contudo, ocorrer a transfixação do CPPB, cf. fig. 16 e fig. 17. Nestes pontos se verifica o modelo bifásico de penetração, ou seja, a formação de cratera seguida pela formação de túnel.

Figura 16 – Face de impacto do CPPB – Incidência de seis impactos de projéteis calibre nominal 5,56 mm



Fonte: O Autor, 2023

Figura 17 – Face CPPB oposta ao impacto balístico



Fonte: O Autor, 2023

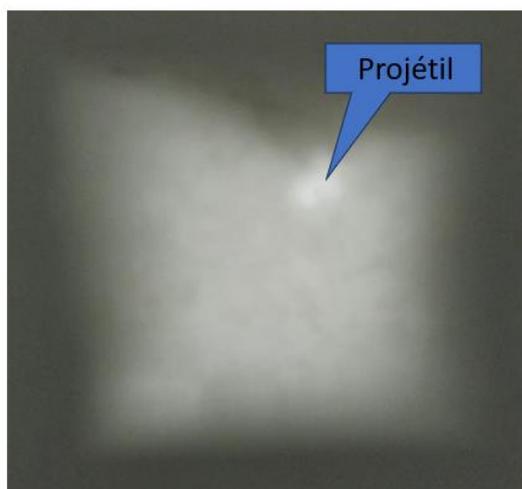
Novamente não foi possível registrar fotograficamente o fenômeno de ricochete. Porém se registrou, que ao ponto de impacto P10, não houve a ocorrência de ricochete. O que foi confirmado através da corte longitudinal, passando pelo centro da cratera, fig. 18, que demonstra a aderência do projétil ao CP. Para um melhor elucidação da ocorrência foi realizado ensaio radiológico, fig. 19, que demonstrou de forma precisa a localização do projétil na estrutura do CP.

Figura 18 – Projétil fixado à estrutura do CPPB



Fonte: O Autor, 2023

Figura 19 – Ensaio radiológico de localização de projétil



Fonte: O Autor,2023

Exceto pelo impacto incidente em P5, não houve registro de danos globais. Verificou-se, porém, perda de massa considerável em P5 que foi devidamente registrada.

Como não foi constatada a formação de túnel nos pontos de incidência dos projéteis após a execução do ensaio de impacto balístico realizada com o CPPA, não foi necessário o registro fotográfico da face oposta ao impacto deste CP. Conforme ilustrado na fig. 17, onde se registra fotograficamente a face oposta ao impacto do CPPB, não houve transfixação de projéteis em nenhum dos pontos de incidência, mesmo com a iniciação da formação de túnel.

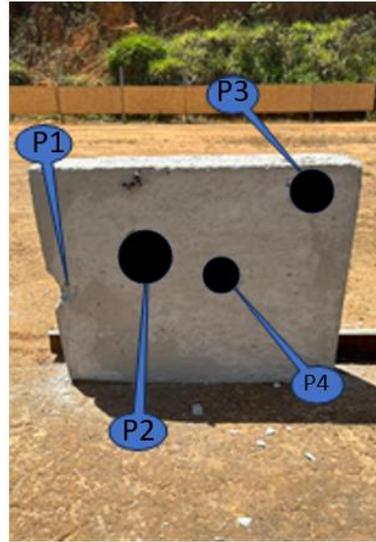
Foi verificada a aderência do projétil de calibre 5,56 mm à massa do CPPB. Uma radiografia foi elaborada para uma melhor visualização da posição onde o projétil se alojou na espessura do CP.

Verificou-se que as dimensões laterais do CPPA permaneceram inalteradas, evidenciando sua capacidade de resistência aos impactos balísticos. Já no caso do CPPB, as alterações dimensionais decorrentes da incidência dos impactos nos pontos P5 e P9 foram desconsideradas, devido aos impactos incidirem em pontos não previstos pela ABNT NBR 15000:2020.

Após a conclusão dos ensaios de impacto balístico e o registro dos danos locais observados, os CP foram encaminhados ao laboratório de Ensaios Físicos do Instituto Politécnico de Engenharia. No laboratório, procedeu-se a uma nova verificação das massas dos CP, e os resultados foram devidamente registrados cf. tabela 4. Foram ainda apuradas as dimensões das crateras, através da estimativa dos diâmetros e medição das profundidades com emprego de um paquímetro universal quadrimensional de marca Charbs com precisão de 0,05 mm, formadas em cada CPP, cf. fig. 20 e fig. 21. Esta operação possibilitou a estimativa das

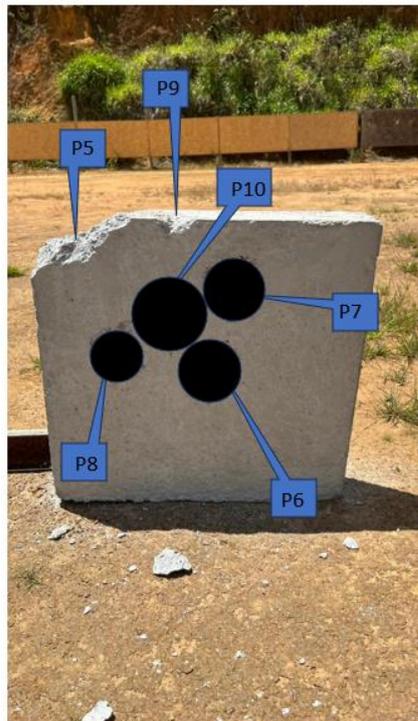
perdas de massa e volume, ocasionadas por cada cratera, conforme tabulado à Tabela 5 e 6. O volume de cada ponto foi apurado geometricamente utilizando a profundidade registrada e o diâmetro estimado da cratera.

Figura 20 – Estimativa dos diâmetros das crateras do CPPA



Fonte: O Autor, 2023

Figura 21 – Estimativa dos diâmetros das crateras do CPPB



Fonte: O Autor, 2023

Tabela 5 – Apuração dos danos locais com estimativa de perda de massa e volume

Armamento	Ponto de incidência	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)	Área (mm²)	Volume (mm³)	Massa estimada (g)
Pistola PT100 Calibre	P2	110	14	9499	44326	98,40
	P3	80	16	5024	26795	59,48
	P4	60	12	2826	11304	25,09
Carabina Colt M4 Calibre 5,56 mm	P6	120	29	11304	109272	239,09
	P7	110	26,5	9499	83903	183,58
	P8	110	28	9499	88653	193,97
	P10	120	27,8	11304	104750	229,19

Fonte: O Autor, 2023

Tabela 6 – Apuração das massas dos corpos de prova após o ensaio de impacto balístico

CPP	Massa real	Massa Apurada	Perda
A	55,5 kg	55,0 kg	0,9%
B	54,7 kg	52,5 kg	4,02%

Fonte: O Autor, 2023

Com base nas estimativas cuidadosamente registradas, realizou-se uma análise dos impactos sofridos pelos CPP, culminando no cálculo das médias das alterações ocasionadas por cada projétil empregado nos ensaios, conforme exibido na tabela 7. Por meio dessa abordagem, obteve-se uma compreensão dos efeitos dos projéteis utilizados em cada CPP, proporcionando, assim, *insights* sobre o desempenho e a resistência do material sob investigação.

Essa análise permite identificar e analisar de forma sistemática os impactos balísticos em diferentes cenários, fornecendo dados para a compreensão das propriedades mecânicas e do comportamento estrutural do material quando exposto a condições severas. Ao estabelecer uma correlação direta entre as alterações causadas pelos projéteis nos CPP, torna-se possível extrair

informações sobre a resposta do material ao impacto balístico proveniente de diferentes tipos de munição e calibres.

Tabela 7 – Estimativa de perdas causadas pelos danos registrados

CPP	Profundidade média (mm)	%	Perda	
			média de massa (g)	%
A	14,0	14%	61	0,11%
B	27,8	28%	211	0,39%

Fonte: O Autor, 2023

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se então que o concreto empregado no experimento, ou seja, com f_{ck} igual a 44 MPa alcançados aos 28 dias, apresenta a capacidade de resistir à cargas de compressão compatíveis às cargas dos projéteis utilizados no estudo. Em conformidade com a ABNT/NBR 8953 (2015), o concreto utilizado classifica-se como C40, Grupo I de resistência à compressão, com valores na faixa de 40 MPa a 45 MPa de f_{ck} .

A determinação das dimensões dos CPP possibilitou o cálculo do volume de cada CP, e a definição das massas permitiu a identificação da média das massas específicas, 2.204 kg/m³, caracterizando o material como um concreto normal (CN) com massa específica entre 2.000 kg/m³ e 2.800 kg/m³, de acordo com a ABNT NBR 8953:2015.

Em relação aos impactos balísticos, o CPPA submetido a quatro impactos de projéteis calibre nominal 0,40" revelou danos locais com a formação de crateras, mas não apresentou início de formação de túnel ou transfixação do CP. Por sua vez, o CPPB submetido a seis disparos de projéteis calibre nominal 5,56 mm demonstrou formação de crateras e início de formação de túnel nos pontos de incidência, porém sem transfixação do CP. As dimensões laterais do CPPA permaneceram inalteradas, evidenciando sua resistência aos impactos balísticos, enquanto o CPPB sofreu alterações nas dimensões laterais devido a incidência indevida de dois projéteis nas bordas, o que não foi considerado nos resultados.

Com base nas dimensões estimadas dos danos registrados, verificou-se que a profundidade alcançada pelos projéteis representa menos de 30% da espessura do CP, e as perdas de massa, considerando também os impactos nas bordas, correspondem a menos de 40% da massa total do CP.

Concluindo, os resultados indicam que o concreto desenvolvido com materiais facilmente encontrados no mercado pode ser um recurso promissor na construção de edificações com resistência ao impacto balístico. Embora os ensaios sugiram uma boa resistência aos impactos de projéteis de calibres nominais 0,40" e 5,56 mm, ensaios conforme os preceitos da ABNT NBR 15000:2020 devem ser realizados para a devida certificação.

Os achados sugerem ainda a possibilidade de redução da espessura dos CPP, considerando que os projéteis penetraram menos de 40% da estrutura. O registro das perdas de massa por cada impacto pode ser utilizado para estimar o número de impactos que a estrutura pode suportar, sendo essa informação fundamental para estimar sua vida útil.

Dessa forma, novos estudos podem ser conduzidos com o objetivo de reduzir a espessura dos CP e investigar sua relação com o número de impactos suportados pela estrutura, permitindo uma modelagem mais precisa da progressão de sua vida útil.

Assim, este estudo contribui para o entendimento da resistência balística do concreto desenvolvido e abre caminho para futuras pesquisas e aplicações práticas nessa área, considerando a relevância e potencial impacto na construção de estruturas mais seguras e eficientes.

REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-14) 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, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7212: Execução de concreto dosado em central - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8953: Concretos para fins estruturais, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12655: Preparo, controle e recebimento de concreto. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15000: Blindagens para impactos balísticos – Classificação e critérios de avaliação. Rio de Janeiro, 2020.

BALÍSTICA. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2020. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Bal%C3%ADstica&oldid=59578640>>. Acesso em: 12 out. 2020.

BALÍSTICA INTERNA. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2022. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Bal%C3%ADstica_interna&oldid=64483785>. Acesso em: 29 set. 2022.

BALÍSTICA TERMINAL. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2022. Disponível em:

<https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Bal%C3%ADstica_terminal&oldid=65519969>. Acesso em: 29 set. 2022.

BANGASH, M. Y. H. **Shock, impact and explosion: structural analysis and design**. Germany: Springer, 2009.

BRASIL. Decreto n.º 3665, de 20 de novembro de 2000. Diário Oficial da União, Brasília, DF, n.º 223-E, 21 de novembro de 2000. Seção 1, p. 1.

CARLUCCI, D. E.; JACOBSON, S. S. **Ballistics: theory and design of guns and ammunition**. USA: CRC Press, 2008.

COLT. Colt M4 Carbine. Disponível em: <[Colt's Manufacturing LLC](#)>. Acesso em: 20 de jan. de 2023.

DRESCH, A.; TUTIKIAN, B. Estudo do concreto balístico. **In: 9º SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE CONCRETOS ESPECIAIS**. Fortaleza, 2012.

DRESCH, A. B. **Desenvolvimento de placas balísticas com diferentes tipos de concretos**. Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian. 2011. 101 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

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.

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**. Orientadores: Joaquim Teixeira de Assis e José Humberto Zani. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico. Nova Friburgo, 2017.

LIOTTO, P. F.; SANTANA, G. P. O uso do vidro em concreto: revisão. *Revista Scientia Amazonia*, Manaus, v. 9, p. C1-C20, 2020.

LUIZ, A. C. R.; VILELA, D. S.; MARTINS, B. S.; SILVA NETO, G. P. **Utilização do vidro moído como agregado para produção de concreto**. COLÓQUIO ESTADUAL DE PESQUISA MULTIDISCIPLINAR e I CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA MULTIDISCIPLINAR. Mineiros, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 2. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2008.

MIRANDA, L. I. *Balística Forense - Do Criminalista ao Legista*. 1ª ed. Rio de Janeiro. Editora Rúbio, 2014.

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

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, S. A. B.; RANGEL, M. J. *Introdução à Balística: Balística Interior, Exterior e Terminal*. Campinas. Editora Millennium, 2011.

SÁ, P. P. M.. *Balística Forense: Princípios e Técnicas*. Campinas. Editora Millennium, 2014.

SANTIAGO DE OLIVEIRA, A. N.; LOPES DA SILVA, W.; CAVALIER CABRAI, S.; BOMJARDIM PORTO, T.; AMADOR SALOMÃO, P. E. **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, A. **Uso de Vidro Moído como Agregado Limita o Concreto.** Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/vidro-moido-como-agregado/>>. Acesso em: 20 de abr. 2023

SILVA, A. R.; JORGE, M. L. S. **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, A. **Tiro Policial.** Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/AdilsonTeodoro/tiro-policial-251234322>>. Acesso em: 20 mar. 2023.

TIBÚRCIO, G. D. **Análise Experimental de placas de concreto submetidas a impacto de projéteis em alta velocidade.** Prof. Dr. Jeferson Rafael Bueno. 2019. 46 f. TCC (Graduação)-Curso de Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2019.