

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GABRIELA DUTRA TIBÚRCIO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE PLACAS DE CONCRETO  
SUBMETIDAS A IMPACTO DE PROJÉTEIS EM ALTA VELOCIDADE**

CAMPO MOURÃO

2019

GABRIELA DUTRA TIBÚRCIO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE PLACAS DE CONCRETO  
SUBMETIDAS A IMPACTO DE PROJÉTEIS EM ALTA VELOCIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, para obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Rafael Bueno

CAMPO MOURÃO

2019



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Campo Mourão  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Departamento Acadêmico de Construção Civil  
Coordenação de Engenharia Civil



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **Trabalho de Conclusão de Curso**

**Análise experimental de placas de concreto submetidas a impacto de projéteis  
em alta velocidade**

**por**

**Gabriela Dutra Tibúrcio**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 09h00min do dia 24 de Junho de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Dr. Fabiana Goia Rosa de Oliveira**

( UTFPR )

**Prof. Me. Candido Ricardo Tomazoni  
Coreia**

( UTFPR )

**Prof. Dr. Jeferson Rafael Bueno**

(UTFPR)  
***Orientador***

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

**Prof. Dr(a). Paula Cristina de Souza**

*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.*

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de dedicar esse trabalho e agradecer grandemente aos meus pais, Luciana e Valter, pelo amor e apoio incondicionais que, em incontáveis momentos, foram fatores decisivos para a minha continuidade nessa caminhada. Assim como quero agradecer toda a minha família, por todos os momentos alegres que me proporcionaram.

Também devo minha gratidão a todos os meus amigos, por toda a ajuda e paciência em todo o período da graduação. Especialmente ao Eduardo e ao Gabriel, que contribuíram demasiadamente para o andamento desse trabalho em tempos de dificuldades.

Meu sincero agradecimento também aos professores e funcionários da UTFPR, principalmente ao professor Jeferson Rafael, pela orientação e pelo empenho dedicado à elaboração desse trabalho. Muito obrigada também à Aline, minha parceira de pesquisa, por toda a ajuda durante esse período.

Do mesmo modo gostaria de agradecer aos membros da 16ª Subdivisão da Polícia Civil de Campo Mourão - PR e do 11º Batalhão da Polícia Militar de Campo Mourão, por aceitarem fazer parte dessa pesquisa. A contribuição destes foi essencial para a realização do teste balístico, o qual foi executado de maneira primorosa.

Agradeço também ao Alessandro Augusto Zahdi Gonçalves, presidente da Associação de Tiro Esportivo de Campo Mourão, por disponibilizar o local e por facilitar o contato com a Polícia Civil e Batalhão da Polícia Militar.

Bem como desejo agradecer o técnico do laboratório de Concreto da UTFPR, Fábio Rodrigo Krüger, por não ter medido esforços para a realização das minhas ideias (nem sempre tão normais).

Quero agradecer também à empresa Concretos Itaipú, pela doação de material.

## RESUMO

Em muitas edificações e infraestruturas se faz necessário um cuidado especial no projeto das alvenarias e dos elementos estruturais. Este cuidado em muitos casos se refere à capacidade da construção de resistir à disparos de armas de fogo. Dessa forma, esta pesquisa buscou contribuir nesta área de engenharia protetiva ao analisar experimentalmente o comportamento de placas de concreto ao impacto de projéteis em alta velocidade. Para alcançar esse objetivo, foi delineado um estudo experimental no qual 12 placas de concreto foram moldadas e submetidas à teste balístico realizado pela 16ª Subdivisão Policial Civil e pelo 11º Batalhão da Polícia Militar, ambos de Campo Mourão. Foi avaliada a eficiência das placas com variados teores de fibra de aço comparando-se os resultados dessas placas com os advindos de placas de concreto convencional sem a adição de fibras.

**Palavras chave:** Concreto. Impacto. Fibras de aço. Ensaio balístico.

## **ABSTRACT**

Many buildings and infrastructures require some special attention to the masonry and structural elements design. In many cases, this caution refers to the capability of the construction on withstanding gunfire from firearms. For that reason, this essay seeks to contribute on this field of protective engineer by experimentally analyzing the behavior of concrete slabs to the impact of high-speed projectiles. In order to achieve this goal, an experimental study was outlined, in which 12 concrete slabs were shaped and submitted to ballistic tests performed by the 16<sup>a</sup> civil police subdivision and by the 11<sup>o</sup> military police battalion, both from Campo Mourão. Efficiency were evaluated through comparing the results of slabs with different levels of steel fibers and the results from slabs made from conventional concrete without any fibers. The result from this test showed that slabs with higher levels of steel fiber and hit by shots closer to the center of the sample had a best behavior. Therefore, the theory that the steel fiber would improve the slabs' impact resistance was confirmed.

**Key words:** Concrete. Impact. Steel fibers. Ballistic test.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura do trabalho.....	5
Figura 2: Carregamento de impacto em viga bi apoiada. ....	6
Figura 3: Extensômetro elétrico de resistência de fio.....	7
Figura 4: Métodos de teste de acordo com a taxa de deformação. ....	8
Figura 5: Penetração (x) e destacamento. ....	11
Figura 6: Ábaco Velocidade x Coeficiente C1. ....	11
Figura 7: Efeito local da perfuração. ....	12
Figura 8: Escarificação em alvos de concreto. ....	12
Figura 9: Mecanismo bifásico. ....	13
Figura 10: Mecanismo trifásico.....	13
Figura 11: Concentração de tensões (concreto sem adição de fibras).....	15
Figura 12: Concentração de tensões (concreto com adição de fibras). ....	15
Figura 13: Frasco de Chapman.....	19
Figura 14: Especificações do aditivo superplastificante. ....	19
Figura 15: Especificações das fibras de aço.....	20
Figura 16: Fibras de aço. ....	20
Figura 17: Dimensões das placas de concreto. ....	21
Figura 18: Moldagem das placas. ....	22
Figura 19: Placas de concreto. ....	23
Figura 20: Corpos de prova submersos. ....	23
Figura 21: Suporte para o ensaio balístico nas placas de concreto.....	24
Figura 22: Força x Tempo CP1.....	26
Figura 23: Força x Tempo CP2.....	26
Figura 24: Força x Tempo CP3.....	27
Figura 25: Posicionamento dos equipamentos. ....	29
Figura 26: Ensaio balístico.....	29
Figura 27: Amostra SF01.....	31
Figura 28: Amostra SF02.....	32
Figura 29: Amostra SF03.....	32
Figura 30: Amostra SF04.....	33
Figura 31: Amostra CF01- (placa com adição de 45 kg/m <sup>3</sup> ). ....	34
Figura 32: Amostra CF02-.....	35
Figura 33: Amostra CF03-.....	35
Figura 34: Amostra CF04-.....	36
Figura 35: Amostra CF01+ (placa com adição de 60 kg/m <sup>3</sup> ). ....	37
Figura 36: Amostra CF02+ (placa com adição de 60 kg/m <sup>3</sup> ). ....	38
Figura 37: Amostra CF03+.....	38
Figura 38: Amostra CF04+.....	39
Figura 39: Placa testemunha.....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação entre fenômenos físicos e velocidades de impacto. ....	9
Tabela 2: Comprimentos de penetração (P). ....	17
Tabela 3: Traço e consumo de materiais. ....	21
Tabela 4: Massa das placas. ....	24
Tabela 5: Dados dos corpos de prova. ....	25
Tabela 6 - Dados provenientes dos ensaios. ....	27
Tabela 7: Dados do ensaio balístico. ....	30
Tabela 8: Resumo dos resultados. ....	40



## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAR	Concreto de Alta Resistência
CRC	Concreto de Resistência Convencional
NBR	Norma Brasileira
NIJ	National Institute of Justice
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>3</b>
1.1.1 Objetivo Geral.....	3
1.1.2 Objetivos Específicos.....	3
<b>1.2 Justificativa .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Estrutura do trabalho.....</b>	<b>4</b>
<b>2 O FENÔMENO DE IMPACTO EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS .....</b>	<b>6</b>
<b>3 O EFEITO DO IMPACTO EM ELEMENTOS DE CONCRETO .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Penetração.....</b>	<b>10</b>
<b>3.2 Perfuração.....</b>	<b>12</b>
<b>3.3 Destacamento e escaificação .....</b>	<b>12</b>
<b>3.4 Mecanismo bifásico e mecanismo trifásico .....</b>	<b>13</b>
<b>4 A EFICÁCIA DA FIBRA DE AÇO NA ATENUAÇÃO DOS EFEITOS DE IMPACTO BALÍSTICO EM PLACAS DE CONCRETO.....</b>	<b>15</b>
<b>5 MÉTODO E MATERIAIS .....</b>	<b>18</b>
<b>5.1 Materiais empregados .....</b>	<b>18</b>
<b>5.2 Moldagem dos corpos de prova .....</b>	<b>21</b>
<b>5.3 Ensaio preliminares .....</b>	<b>25</b>
<b>5.4 Ensaio balístico.....</b>	<b>28</b>
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>31</b>
<b>6.1 Amostras sem adição de fibras de aço.....</b>	<b>31</b>
<b>6.2 Amostras com adição de 45 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço .....</b>	<b>33</b>
<b>6.3 Amostras com adição de 60 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço .....</b>	<b>36</b>
<b>6.4 Placa testemunha (<i>witness plate</i>).....</b>	<b>39</b>
<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>41</b>
<b>7.1 Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>41</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>43</b>

# **1 INTRODUÇÃO**

A maioria das técnicas existentes para dimensionamento de estruturas de concreto sujeitas à impacto são baseadas em fórmulas empíricas e experimentos em versão ampliada (DAUDEVILLE; MALÉCOT, 2011). Pesquisar alternativas para encontrar materiais que sejam mais eficientes a esse tipo de carregamento impulsivo são fundamentais para a economia de recursos no ideal dimensionamento desses elementos, que estão cada dia mais demandados devido à crescente taxa de violência.

A fim de contribuir para o desenvolvimento desse seguimento na área da engenharia, o presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem por objetivo analisar experimentalmente o comportamento de placas de concreto ao impacto de projéteis em alta velocidade. Para alcançar este objetivo, o presente trabalho analisou teoricamente os conceitos básicos na área de impacto em estruturas e, com isso, avaliou o comportamento do concreto quando submetido a cargas impulsivas e, dessa forma, apresentou e discutiu sobre a contribuição da fibra de aço em adição à massa de concreto na atenuação dos efeitos do impacto.

O método experimental de investigação foi embasado em normas sobre a temática (apresentadas ao longo do texto), e contou com duas fases: a confecção das amostras e o ensaio de impacto balístico.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Analisar experimentalmente o comportamento de placas de concreto ao impacto de projéteis em alta velocidade.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Estudar o fenômeno de impacto em placas;
- Investigar o efeito de impacto em elementos de concreto;
- Realizar ensaio balístico em placas de concreto com adição de fibras de aço.

## 1.2 Justificativa

A crescente taxa de criminalidade aumenta a demanda por estruturas blindadas, o que torna relevante estudar o impacto de projéteis em alta velocidade em placas de concreto. Essa afirmação se justifica pelo contato realizado com a superintendência da polícia civil de Campo Mourão em que foi concluído que a força policial necessita de estruturas capazes de resistir a ataques hostis como, por exemplo, projéteis de armas de fogo.

O concreto possui baixa eficiência quando solicitado dinamicamente, devido a inversão de esforços, assim é necessário procurar materiais que reforcem sua resistência à tração. Isto é necessário em estruturas de defesa, pois em seu projeto considera-se que as mesmas podem ser solicitadas por diferentes carregamentos (NAAMAN; GOPALARATNAM, 1983).

Um exemplo são as barreiras de proteção que estão sujeitas a carregamentos excepcionais como impacto de veículos e impacto de projéteis de armas de fogo. Em relação a este último, o correto dimensionamento dos elementos que sofrerão impacto balístico é importante para evitar o desperdício de material sem comprometer a segurança que a estrutura deve oferecer.

De acordo com o Ministério da Justiça (2011), estabelecimentos penais admitem qualquer tipo de sistema construtivo, caso atenda limites mínimos de resistência para cada nível de segurança de construção. Isso possibilita uma liberdade para pesquisar alternativas mais eficientes com o propósito de melhor proteger os ocupantes da instalação.

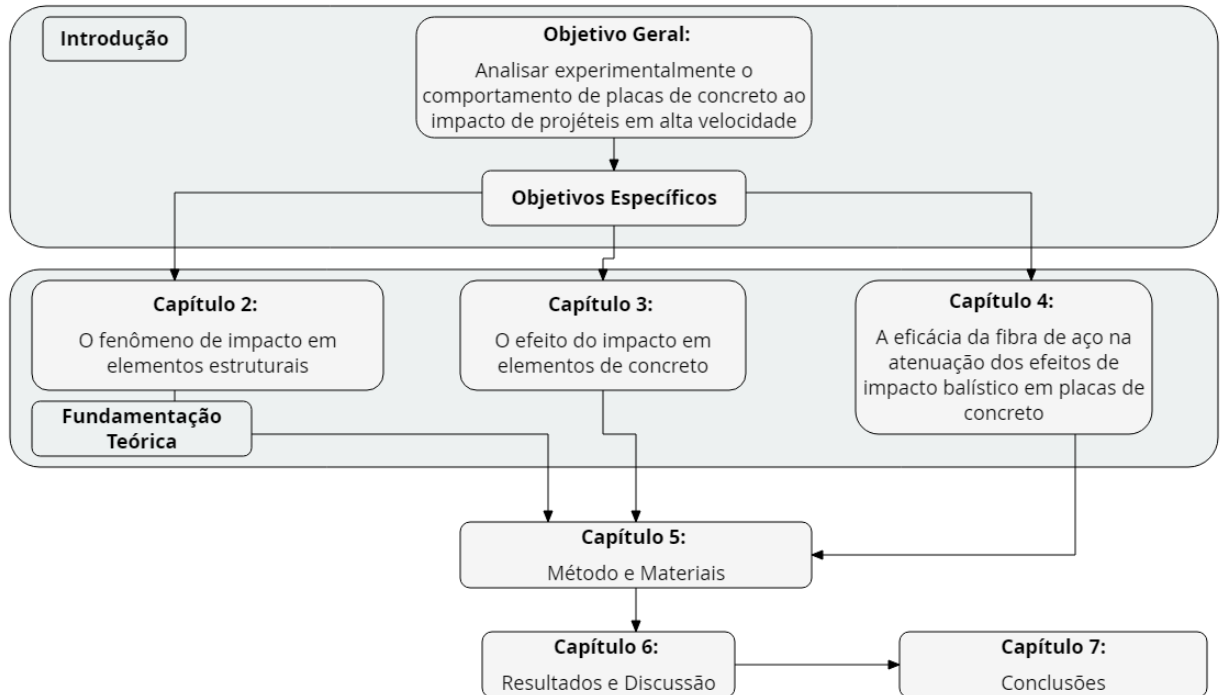
Existem inúmeros registros de ataques contra bases policiais e presídios atualmente (Soares, 2016). A análise de diferentes materiais que possam melhorar o desempenho de placas de concreto nesse quesito tem potencial para melhorar a segurança desse tipo de construção e fomentar uma linha de pesquisa sobre estruturas de defesa.

## 1.3 Estrutura do trabalho

Na Figura 1 mostra-se a estrutura que foi utilizada para a organização do presente trabalho. A partir do objetivo geral, foram traçados os objetivos específicos que originaram três capítulos de revisão bibliográfica. E esses capítulos foram

utilizados para a elaboração da metodologia que, por fim, contribuiu para a obtenção dos resultados e para a escrita das conclusões.

**Figura 1:** Estrutura do trabalho.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

O capítulo 1 consiste na introdução do trabalho e contém os objetivos gerais e específicos e a justificativa apontando a relevância do tema.

O capítulo 2 é o primeiro capítulo de revisão bibliográfica e explica o fenômeno do impacto em elementos estruturais. Os capítulos 3 e 4 também são de revisão e consistem, respectivamente, em um resumo sobre o efeito do impacto em elementos de concreto e pontos importantes sobre a eficácia da fibra de aço na atenuação dos efeitos de impacto balístico em placas de concreto

No capítulo 5 explica-se e detalha os procedimentos e materiais que serão utilizados para a realização desse trabalho.

No capítulo 6 expõe-se os resultados obtidos.

No capítulo 7 apresenta-se as conclusões do trabalho.

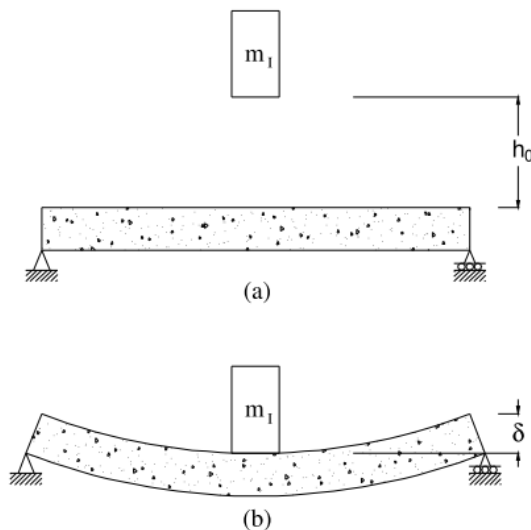
## 2 O FENÔMENO DE IMPACTO EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Segundo Gere (2003), o carregamento de impacto é um tipo de carga dinâmica que é aplicada e removida subitamente, e é gerado no caso de dois objetos colidirem ou de um objeto atingir uma estrutura.

As ondas de tensão plásticas e elásticas produzidas pelos carregamentos dinâmicos se espalham pela estrutura e podem, dependendo de sua intensidade, resultar em sua ruptura. Nesse tipo de carga, a taxa de carregamento é quase imediata. A estrutura reagirá dependendo da energia de impacto, da rigidez da estrutura e do objeto que provoca impacto e das propriedades mecânicas dos materiais (SANTOS, 2008).

Nesse tópico foram estudados alguns conceitos importantes para o entendimento do fenômeno de impacto em elementos estruturais. Toma-se como exemplo um objeto de massa  $m_1$ , em repouso inicialmente, caindo em direção à uma viga bi apoiada, como mostrado na Figura 2.

**Figura 2:** Carregamento de impacto em viga bi apoiada.



**Fonte:** Santos (2008).

Na Figura 2 (a) mostra-se o bloco sendo liberado, quando sua energia potencial gravitacional é convertida em energia cinética. Já na Figura 2 (b) representa-se o momento em que a viga atinge a máxima deflexão e a energia cinética é convertida em energia de deformação o que a faz retornar a ser nula. Esse é o momento em que é possível igualar a energia de deformação ao trabalho realizado pelo peso do bloco.

Quando submetida a carregamentos, a estrutura pode reagir transladando ou deformando (DALLY; RILEY, 1991). Segundo Alves (2009) a deformação é geralmente expressa em percentual. A deformação longitudinal ( $\varepsilon$ ) se dá quando uma fibra de um componente estrutural sofre uma variação de comprimento, e é fixada pela equação (1):

$$\varepsilon = \left( \frac{l - l_0}{l} \right) * 100 \quad (1)$$

em que:

- $\varepsilon$  - deformação longitudinal (%);
- $l$  - comprimento final da fibra (m);
- $l_0$  - comprimento inicial da fibra (m).

Na análise experimental, existe a possibilidade de serem usados extensômetros, que garantem um alto grau de precisão. Extensômetros (Figura 3) convertem alterações nas dimensões em variações equivalentes em sua resistência elétrica (ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO, 2004).

**Figura 3:** Extensômetro elétrico de resistência de fio.



**Fonte:** Andolfato, Camacho e Brito (2004).

O impulso (força do impacto), resulta a mudança da quantidade de movimento ( $Q$ ), determinada pela equação (2),

$$Q = m * v \quad (2)$$

sendo:

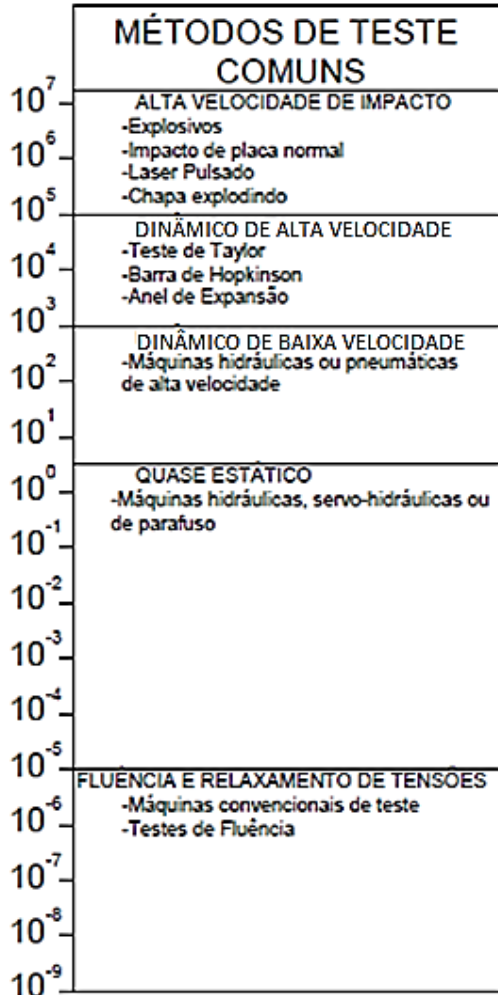
- $m$  - massa do objeto em kg;
- $v$  - velocidade do objeto em m/s.

A taxa de deformação (variação da deformação no tempo) provocada na estrutura também pode ser um critério para classificação, sendo definida por,

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3)$$

e classificada de acordo com a Figura 4.

**Figura 4:** Métodos de teste de acordo com a taxa de deformação.



**Fonte:** Adaptado de Meyers (1994).

Jones (1997) classifica os carregamentos de impacto em impacto quase-estático de baixa velocidade (até 10 m/s) e dinâmico de alta velocidade (maior que 10 m/s). Já Justo (1996) caracteriza o impacto como sendo de baixa velocidade quando  $v < 250$  m/s, de alta velocidade quando  $0,5 \text{ km/s} < v < 2 \text{ km/s}$  e de hipervelocidade quando  $v > 2 \text{ km/s}$ .

Porém, Justo (1996) admite que essa classificação é falha pelo fato de que a variação de material pode alterar os valores descritos. Na tentativa de aperfeiçoar a definição desses conceitos, Zukas (1982) relacionou as velocidades de impacto com fenômenos físicos como exposto na Tabela 1.



**Tabela 1:** Relação entre fenômenos físicos e velocidades de impacto.

<b>Faixa de velocidade</b>	<b>Velocidade da deformação</b>	<b>Velocidade de impacto</b>	<b>Efeitos</b>	<b>Causa</b>
<b>1</b>	$10^8$ /s	>12 km/s	Impacto explosivo com vaporização	-
<b>2</b>	$10^6$ a $10^7$ /s	3 a 12 km/s	Impacto hidrodinâmico compressível	Aceleração por explosão
<b>3</b>	$10^4$ a $10^6$ /s	2 a 3 km/s	Comportamento como fluido.	“Canhão” de gás ou detonador sólido
<b>4</b>	$10^2$ a $10^4$ /s	0,5 a 2 km/s	Resposta viscosa ainda significativa	“Canhão” com detonador sólido
<b>5</b>	1 a 100/s	0,5 a 0,005 km/s	Comportamento plástico	Mecânica ou arma de ar comprimido
<b>6</b>	<1/s	<0,005 km/s	Comportamento elástico com plasticidade localizada	Mecânica ou arma de ar comprimido

**Fonte:** Adaptado de Justo (1996) apud Zukas (1982).

Na faixa de velocidade 4, a reação global da estrutura tem pouca influência na análise do desempenho do local impactado. Na faixa de velocidade 3, seriam observadas tensões muito maiores do que as resistências dos materiais devido às pressões locais. Na faixa de velocidade 1, ocorre a vaporização dos materiais.

Smith (1994) cita que o impacto de um projétil em alta velocidade resulta em um alto índice de deformação. São produzidas ondas de tração e compressão tanto no projétil quanto na estrutura atingida. O alastramento dessas ondas pode resultar em vários fenômenos, entre os quais é possível citar deformação plástica, fratura e derretimento.

### 3 O EFEITO DO IMPACTO EM ELEMENTOS DE CONCRETO

Zielinski, Reinhardt e Kormeling (1981) estudaram a reação do concreto ao carregamento de tração uniaxial de impacto e suas conclusões expõem aumento da resistência à tração e do módulo de elasticidade em tração uniaxial em consequência da alta taxa de tensão. A analogia entre resistência à tração estática e de impacto varia entre 1,33 e 2,34.

Nos experimentos realizados por Zielinski, Reinhardt e Kormeling (1981) também foi observado que a resistência ao impacto de tração uniaxial do concreto aumenta no caso de serem utilizados agregados com diâmetros máximos menores. Corpos de prova rompidos perpendicularmente à direção em que foram moldados mostraram um desempenho superior nesse quesito também.

A redução do diâmetro máximo do agregado aumenta a área de superfície de agregado e diminui a exsudação (migração de água no concreto fresco que resulta em zonas de ligação pobres e poros próximos das partículas do agregado).

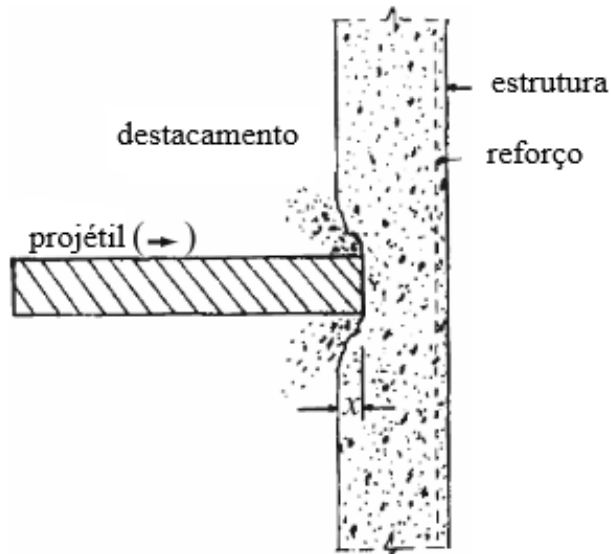
Conforme Bangash (2009) no caso de impacto em concreto, é necessário examinar o dano local e a resposta global da estrutura em termos de flexão e cisalhamento. O dano local pode ser classificado entre penetração, perfuração, escarificação e destacamento (*penetration, perforation, scabbing and spalling*) e esses índices podem variar dependendo do tipo de projétil que atingirá o alvo.

Também é possível classificar quanto ao mecanismo de penetração do projétil em alvos de concreto, como citam Lefone et al. (2015), em bifásico e trifásico.

#### 3.1 Penetração

A penetração é a profundidade da cratera que se forma no alvo na zona de impacto (BANGASH, 2009) conforme mostrado na Figura 5.

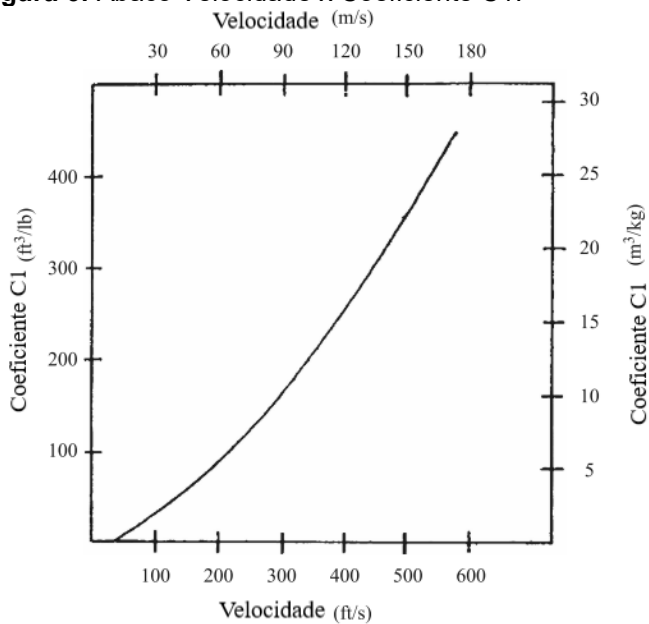
**Figura 5:** Penetração (x) e destacamento.



**Fonte:** Adaptado de Bangash (2009).

O trabalho de Bangash (2009) contém ábaco que possibilita encontrar a espessura mínima para não ocorrer penetração ou lascamento, conforme mostrado na Figura 6, onde o coeficiente C1 é dado em volume por massa. Tendo as dimensões do alvo de concreto consegue-se calcular a espessura necessária para impedir que esses danos ocorram.

**Figura 6:** Ábaco Velocidade x Coeficiente C1.

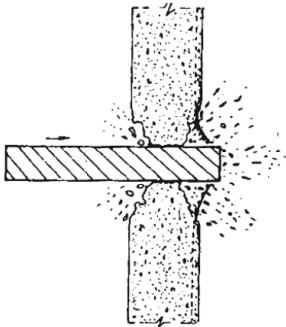


**Fonte:** Adaptado de Bangash (2009).

### 3.2 Perfuração

A perfuração ( $t_p$ ) consiste na passagem completa do projétil por toda a espessura do alvo podendo existir ou não velocidade de saída, como esquematizado na Figura 7.

**Figura 7:** Efeito local da perfuração.

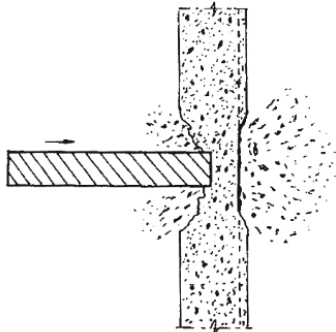


**Fonte:** Adaptado de Bangash (2009).

### 3.3 Destacamento e escarificação

O destacamento ( $t_{sp}$ ) é a ejeção de material da face do alvo que foi atingida pelo projétil como esquematizado na Figura 5 e a escarificação ( $t_{sc}$ ), também chamada de estilhaçamento, é a ejeção de material da face oposta à que sofreu o impacto como mostra a Figura 8.

**Figura 8:** Escarificação em alvos de concreto.

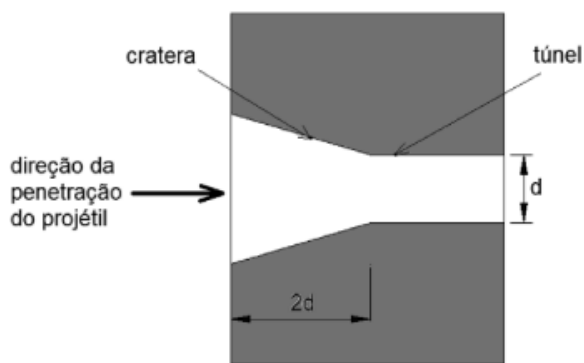


**Fonte:** Adaptado de Bangash (2009).

### 3.4 Mecanismo bifásico e mecanismo trifásico

De acordo com Forrestal et al. (1994) o processo de penetração no mecanismo bifásico se divide em duas fases. Na fase de formação de cratera o projétil penetra na face de ataque do alvo e percorre uma distância que corresponde a duas vezes o diâmetro do projétil. A formação de túnel ocorre logo após a fase de formação de cratera e termina na penetração máxima do projétil.

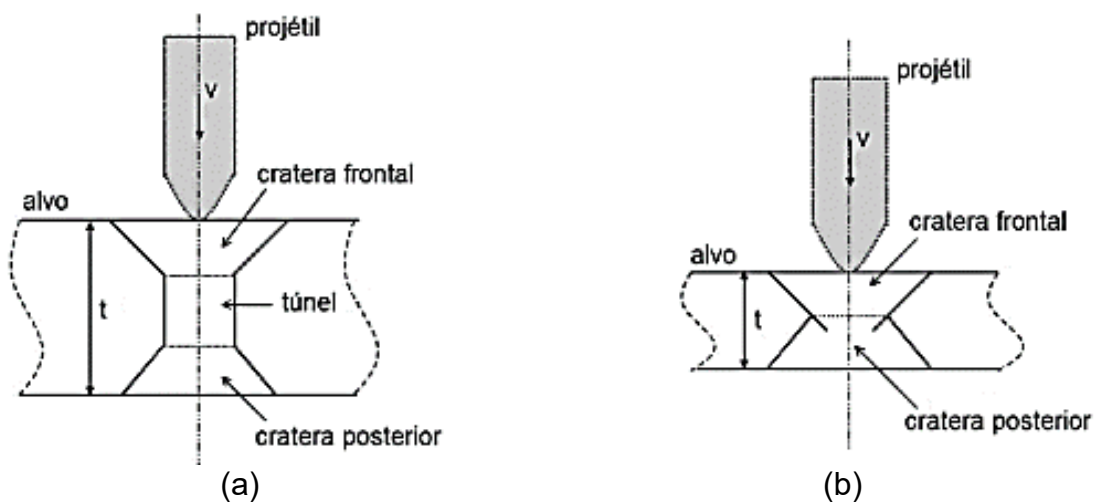
**Figura 9:** Mecanismo bifásico.



**Fonte:** Carlucci e Jacobson (2008).

No mecanismo trifásico, além das duas fases supracitadas, ocorre também a fase de cisalhamento da espessura restante de concreto, o que origina o desenvolvimento de uma cratera posterior.

**Figura 10:** Mecanismo trifásico.



**Fonte:** Lefone et al. (2015) apud Chen et al. (2004).

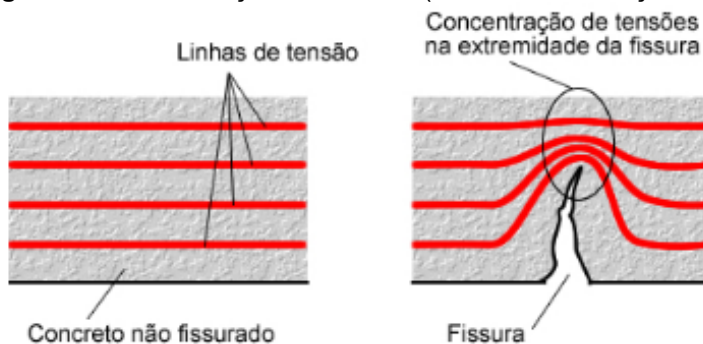
Quando a espessura do alvo for reduzida, em ambos os mecanismos, ainda existe a possibilidade de a fase de formação de túnel não ocorrer, como indica a Figura 10 (b).

#### 4 A EFICÁCIA DA FIBRA DE AÇO NA ATENUAÇÃO DOS EFEITOS DE IMPACTO BALÍSTICO EM PLACAS DE CONCRETO

A adição de fibras de aço no concreto além de aumentar a resistência ao impacto, aumenta a resistência à fadiga, aprimora a ductilidade e eleva o controle de fissuração na estrutura (ARCELORMITTAL; 2016).

Conforme estudado por Barros (2009) no concreto sem adição de fibras de aço, a tensão que existia no local antes de ocorrer a fissuração, se desloca para uma região próxima que possibilite sua propagação, o que resulta numa concentração de tensões na extremidade da abertura conforme a Figura 11. Isso leva à ruptura frágil do concreto.

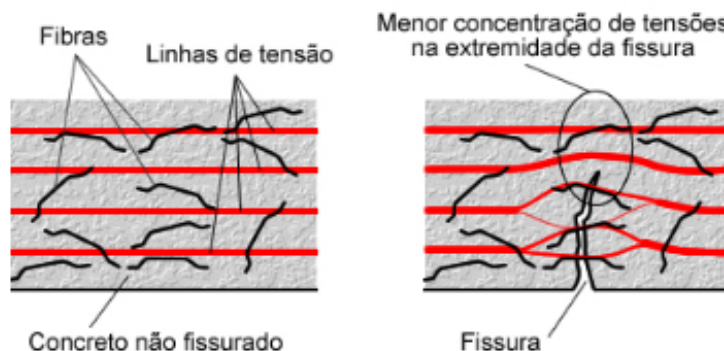
**Figura 11:** Concentração de tensões (concreto sem adição de fibras).



**Fonte:** Barros (2009).

Barros (2009) também cita que quando há fibras de aço no concreto, elas agem como “pontes” de transferência de tensões, o que reduz a concentração de tensões na ponta da fissura, conforme esquematizado na Figura 12.

**Figura 12:** Concentração de tensões (concreto com adição de fibras).



**Fonte:** Barros (2009).

Conforme comenta Garcez (2005), as fibras de aço diminuem a propagação de fissuras após a incidência dos carregamentos, o que confere um desempenho superior quando comparados com concretos simples no quesito resistência à cargas de impacto.

Dancygier e Yankelevsky (1996) estudaram a resposta ao impacto de projéteis em concretos com resistência entre 95 e 110 MPa, reforçados com armadura convencional ou com fibras de aço. Os resultados revelaram amostras com menores crateras na face que sofreu o impacto e uma menor profundidade de penetração nos corpos de prova com adição de fibras.

Porém o trabalho de Mehta e Monteiro (1994) comprova que são necessários mais ensaios padronizados de resistência ao impacto para avaliar a real magnitude da melhora provocada pela inserção das fibras.

Gaspar, Carneiro e Teixeira (2016) conduziram um experimento em que eram testadas placas de 300mmx300mmx150mm de concreto de alta e baixa resistência, com e sem adição de fibras. As amostras eram submetidas à impacto balístico e os ensaios foram feitos de acordo com a norma NIJ 0108.01, (1985) para nível de proteção III, além de ser testada a resistência à compressão.

Como resultado, observaram que as amostras com adição de fibras de aço tiveram resultados de 2,2% a 23,2% melhores na resistência inicial média à compressão axial. Nenhuma das placas sofreu perfuração o que quer dizer que as placas absorveram 100% da energia cinética produzida pelo projétil. Na Tabela 2 mostra-se os resultados dos ensaios balísticos, onde:

CRC – Concreto de resistência convencional;

CAR – Concreto de alta resistência;

S/F – Sem fibra;

+0,5% - Adição de 0,5% de fibra;

+1,0% - Adição de 1% de fibra;

+1,5% - Adição de 1,5% de fibra.

No ensaio balístico de Gaspar, Carneiro e Teixeira (2016) foi observado que as fibras auxiliaram na diminuição do comprimento de penetração, como é constatado na Tabela 2. Nos concretos de alta resistência, a adição de fibras reduziu o comprimento



de penetração em até 24% e nos concretos de resistência convencional, esse comprimento foi reduzido em até 28,6%.

**Tabela 2:** Comprimentos de penetração (P).

COMPOSIÇÃO	P (mm)		P médio (mm)
	Placa 1	Placa 2	
<b>CRC - S/F</b>	40,48	43,14	41,81
<b>CRC+0,5%</b>	36,34	36,62	36,48
<b>CRC+1,0%</b>	35,53	35,43	35,48
<b>CRC+1,5%</b>	32,49	30,41	31,45
<b>CAR-S/F</b>	39,12	37,41	38,27
<b>CAR+0,5%</b>	34,41	30,45	32,43
<b>CAR+1,0%</b>	27,59	27,06	27,33
<b>CAR+1,5%</b>	27,14	27,55	27,35

Fonte: Adaptado de Gaspar, Carneiro e Teixeira (2016).

Os autores já citados, concluíram que as placas foram superdimensionadas, pois todos os comprimentos de penetração foram bem menores do que a espessura. As fibras melhoraram consideravelmente a capacidade de blindagem das placas e o nível de dano foi muito menor. O aumento no teor volumétrico das fibras também diminuiu os comprimentos de penetração e os concretos com maior resistência inicial à compressão (CAR) obtiveram melhores resultados.

O trabalho de Junior (2012), também sobre impacto de projéteis em alvos de concreto, concluiu que a utilização da fibra de aço diminuiu os danos nas faces anterior e posterior, além da perda de massa das placas de concreto.

A partir desses estudos, é possível afirmar que a fibra de aço é um material que agregará positivamente ao estudo, podendo aumentar a capacidade de blindagem das placas e diminuir o dano.

## **5 MÉTODO E MATERIAIS**

O método utilizado neste trabalho está apresentado ao longo deste capítulo e dividido em quatro partes para melhor entendimento dos procedimentos, conforme itens 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4. No item 5.1 apresentam-se os materiais que foram utilizados. No item 5.2 apresentam-se os procedimentos utilizados para a moldagem dos corpos de prova. No item 5.3 são comentados os ensaios preliminares sobre as propriedades mecânicas do concreto utilizado. E no item 5.4 apresenta-se os procedimentos utilizados no ensaio balístico em placas de concreto.

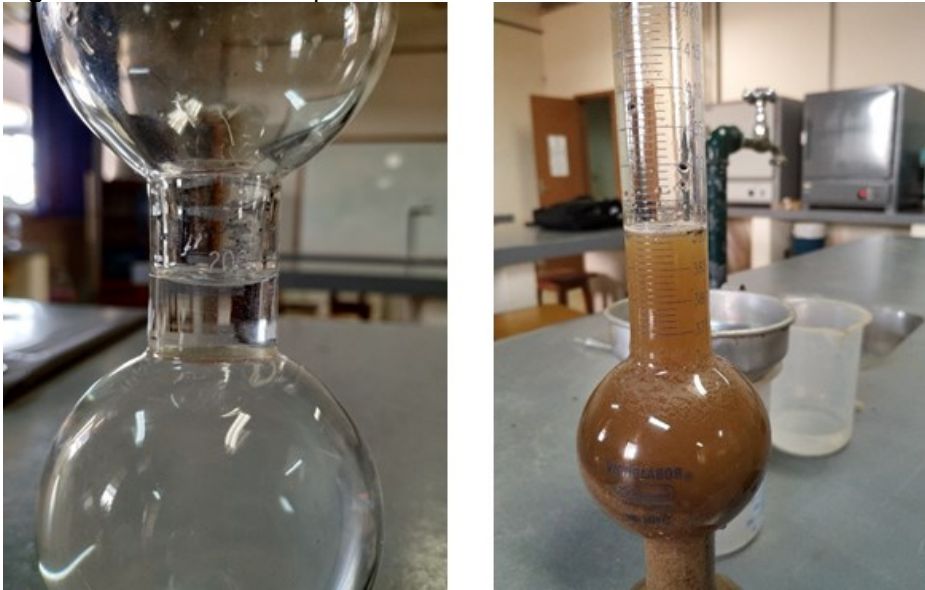
### **5.1 Materiais empregados**

O material aglomerante utilizado foi o cimento Portland do tipo CPV – ARI da marca Cauê, cujas características físicas e químicas descritas na embalagem se enquadram na ABNT NBR 5733:1991.

O agregado graúdo utilizado no concreto em questão é de origem basáltica, foi doado pelo laboratório da universidade e submetido aos ensaios de determinação da composição granulométrica segundo a ABNT NBR 7217: 1982 e de determinação da massa específica aparente seca do agregado graúdo segundo a ABNT NBR NM 53:2009. Foi concluído com esses ensaios que o material se caracteriza como Brita 1, a dimensão máxima característica é 19,00 mm, o módulo de finura é de 6,84 e a massa específica é de 1,64 g/cm<sup>3</sup>.

O agregado miúdo utilizado foi areia lavada de rio. Foram realizados os ensaios de determinação da composição granulométrica do agregado miúdo, segundo a ABNT NBR 7217:1982 e de determinação da massa específica real ou absoluta do agregado miúdo por meio do frasco de Chapman, segundo a ABNT NBR 99776:1987. Esses ensaios determinaram que o material pode ser classificado como fino, sua dimensão máxima característica é de 1,20 mm, o módulo de finura é de 1,67 e sua massa específica é de 2,62 g/cm<sup>3</sup>.

**Figura 13:** Frasco de Chapman



Fonte: Autoria própria (2019).

O aditivo superplastificante utilizado foi o CQ Flow da empresa Camargo Química, doado pela empresa Concreto Itaipú Ltda da cidade de Campo Mourão, que é compatível com todas as classes de cimento Portland. Ele foi utilizado com o intuito de aumentar a trabalhabilidade das misturas com fibras, sem elevar a relação água-cimento.

**Figura 14:** Especificações do aditivo superplastificante.



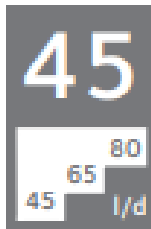
Fonte: Autoria própria (2019).

A sílica ativa utilizada foi da marca Dow Corning, o desmoldante DESMOL da marca VEDACIT. As fibras empregadas no concreto são da marca Dramix 3D 45/30 BL, que foram disponibilizadas pela UTFPR. As formas de madeira utilizadas na concretagem foram confeccionadas no laboratório de estruturas da UTFPR.

**Figura 15:** Especificações das fibras de aço.

## DRAMIX® 3D 45/30 BL

### • Geometria



Fator de  
Forma  
(l/d): 45



Comprimento: 30 mm



Diâmetro: 0,62 mm

13.420 fibras/kg

Dosagem mínima: 30 kg/m<sup>3</sup> (de acordo com a EN 14889-1)

Resistência à tração:

- do arame: valor nominal 1.270 N/mm<sup>2</sup>

- baixo carbono conforme a: -DIN 17 140-D9 -EN 10016-2 -C9D

**Fonte:** ArcelorMittal (2018).

**Figura 16:** Fibras de aço.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

O traço 1:1,59:2,27:0,35 (cimento: areia: brita: água) foram definidos com base no trabalho de Junior (2012), cujo objetivo foi de estudar cargas de impacto em concreto armado reforçado com fibras de aço. Na Tabela 3 é possível observar o traço e o consumo em kg/m<sup>3</sup> de cada material.

**Tabela 3:** Traço e consumo de materiais.

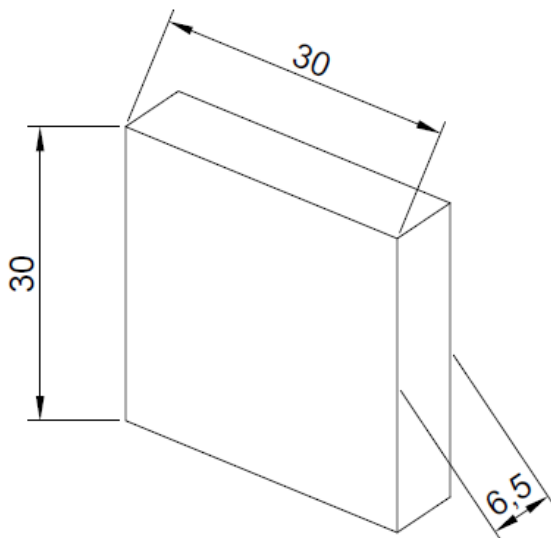
MATERIAL	TRAÇO (MASSA)	CONSUMO (KG/M <sup>3</sup> )
CIMENTO	1,00	457
AREIA	1,59	726
BRITA 0	2,27	1039
SÍLICA ATIVADA	0,10	46
SUPERPLASTIFICANTE	0,02	9,1
ÁGUA	0,35	160

Fonte: Autoria própria (2019).

Das 12 placas que foram confeccionadas, 4 delas não continham fibras de aço (SF), 4 delas continham um consumo de 45 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço (traço de 0,10 e teor de 1,81% - CF-) e 4 delas continham um consumo de 60 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço (traço de 0,13 e teor de 2,40% - CF+).

## 5.2 Moldagem dos corpos de prova

Por terem sido moldados poucos corpos de prova, foi possível realizar toda a concretagem utilizando apenas uma betoneira de concreto, em que as fibras foram adicionadas conforme a necessidade de cada tipo de placa (no momento da moldagem). Foram moldadas 12 placas de dimensões 30x30x6,5 (em cm), conforme a Figura 17 e 3 corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

**Figura 17:** Dimensões das placas de concreto.

Fonte: Autoria própria (2019).

Para a produção do concreto foram utilizados: 1 balança com capacidade de 100 kg  $\pm$  20 g, 1 balança com capacidade de 5 kg  $\pm$  0,01 g, recipientes para pesar e mover os materiais, 1 betoneira, 1 carro de mão, 1 concha metálica, 3 moldes cilíndricos e 12 formas de madeira.

Antes da concretagem foi passado desmoldante em todas as formas e moldes. Primeiramente foram colocados 91,62 kg de agregado graúdo e 4,7 litros de água na betoneira que foram misturados durante aproximadamente 3 minutos a fim de molhar toda a brita.

Foram adicionados 40 kg de material aglomerante, 4,05 kg de sílica ativa e 4,7 litros de água e a betoneira foi ligada por mais 3 minutos para que a brita fosse envolvida pela pasta de cimento. Depois foram colocados 64,02 kg de agregado miúdo e 0,80 kg de aditivo superplastificante dissolvido em 4,70 litros de água, e a betoneira foi ligada por 5 minutos para a completa homogeneização do concreto.

Com o concreto sem fibras foram preenchidas 4 formas de madeira (Figura 18) e 3 moldes cilíndricos. Em seguida foram adicionados 2,27 kg de fibra de aço manualmente de forma lenta e uniforme e misturou-se por 3 minutos. Com esse concreto foram preenchidas 4 formas de madeira.

**Figura 18:** Moldagem das placas.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

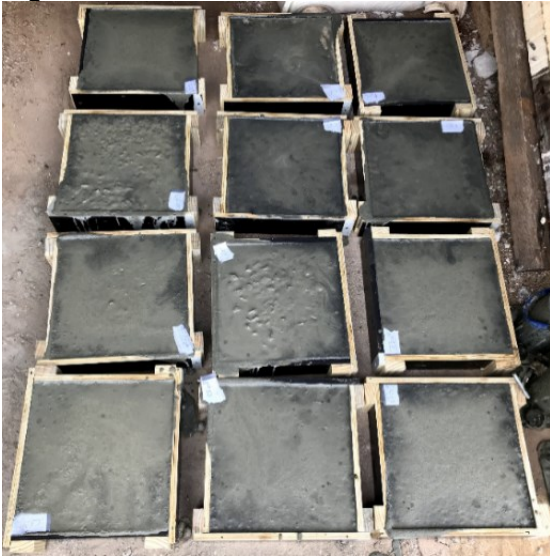
Com o concreto sem fibras foram preenchidas 4 formas de madeira (Figura 18) e 3 moldes cilíndricos. Em seguida foram adicionados 2,27 kg de fibra de aço



manualmente de forma lenta e uniforme e misturou-se por 3 minutos. Com esse concreto foram preenchidas 4 formas de madeira.

Posteriormente foram incorporados 0,376 kg de fibra de aço manualmente e de forma lenta e uniforme, e a betoneira foi ligada por 3 minutos. Foram preenchidas as 4 formas restantes e o concreto remanescente foi descartado.

**Figura 19:** Placas de concreto.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

Os corpos de prova foram desmoldados 24 horas após a concretagem e colocados submersos em um tanque por 28 dias. Em seguida foram armazenados nas condições ambientes do laboratório por mais 7 dias até o dia dos ensaios.

**Figura 20:** Corpos de prova submersos.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

Anteriormente ao ensaio balístico, as placas foram pesadas (Tabela 4) e foi aplicada uma camada de gesso em uma das faces de cada placa para facilitar a visualização do raio de influência do impacto. Também foi marcado o centro das placas para auxiliar no processo de mira.

A fim de facilitar a distinção das placas, cada uma recebeu uma nomenclatura. As que foram feitas a partir do concreto sem a fibra foram designadas SF, as que foram feitas a partir do concreto com adição de 45 kg/m<sup>3</sup> de fibra, CF- e as que foram feitas a partir do concreto com adição de 60 kg/m<sup>3</sup>, CF+. Depois dessa sigla, foram numeradas de acordo com a ordem em que foram sendo moldadas.

**Tabela 4:** Massa das placas.

<b>AMOSTRA</b>	<b>MASSA (KG)</b>
SF01	14,70
SF02	14,75
SF03	14,50
SF04	15,35
CF01-	14,45
CF02-	15,80
CF03-	14,40
CF04-	14,75
CF01+	13,95
CF02+	15,35
CF03+	14,65
CF04+	16,00

**Fonte:** Autoria própria (2019).

O suporte (Figura 21) também foi confeccionado no laboratório de estruturas da UTFPR.

**Figura 21:** Suporte para o ensaio balístico nas placas de concreto.



**Fonte:** Autoria própria (2019).



O objetivo do suporte, utilizado para sustentar as placas, foi de possibilitar com que as placas ficassem com todas as bordas apoiadas durante o ensaio.

Todos os procedimentos contidos nessa seção foram supervisionados e auxiliados pelo técnico de laboratório da UTFPR, que garantiu que todas as técnicas fossem realizadas da maneira mais otimizada possível.

### 5.3 Ensaios preliminares

Os ensaios de resistência à compressão e de determinação do módulo de elasticidade à compressão em questão foram realizados aos 48 dias. Os três corpos de prova cilíndricos, dos quais um foi destinado ao ensaio de resistência à compressão e dois foram destinados ao ensaio de módulo de elasticidade, foram feitos com concreto sem fibras.

Figueiredo (2011) aponta uma falta de consenso por parte de várias pesquisas que testaram a influência da fibra de aço na resistência à compressão do concreto. Foi optado por não utilizar concreto com adição de fibras de aço nos corpos de prova cilíndricos porque a resistência à compressão não era o foco do trabalho, apesar de haver a necessidade de testar a eficiência do traço utilizado.

Preliminarmente, os corpos de prova foram retificados. Em seguida foram coletados os dados de cada um, conforme a Tabela 5. As amostras cilíndricas foram levadas ao laboratório de madeiras da UTFPR, onde o CP3 foi submetido ao ensaio de compressão segundo a ABNT NBR 5739:1994 e o CP1 e CP2 foram submetidos ao ensaio de módulo de elasticidade, segundo a ABNT NBR 8522:2017.

**Tabela 5:** Dados dos corpos de prova.

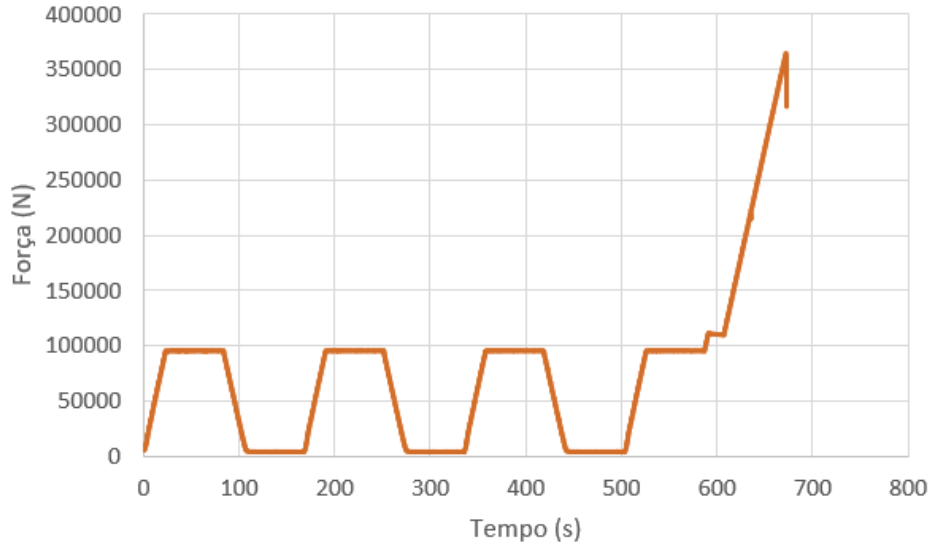
Amostra	Massa (kg)	Diâmetro (mm)	Área da superfície de contato (mm <sup>2</sup> )	Altura (mm)	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )
CP1	2,855	100,10	7869,70	193,70	18,37
CP2	3,017	100,10	7869,70	194,10	19,37
CP3	3,589	100,35	7909,06	193,95	22,95

**Fonte:** Autoria própria (2019).

O resultado do ensaio de compressão resultou em uma força máxima de 319,42 kN e uma resistência efetiva à compressão de 40,39 MPa, conforme mostra a Figura 24. O ensaio de módulo de elasticidade no CP1 concluiu que a força máxima foi de 364,14 kN, a resistência efetiva foi de 46,27 MPa com módulo de elasticidade de 55,4

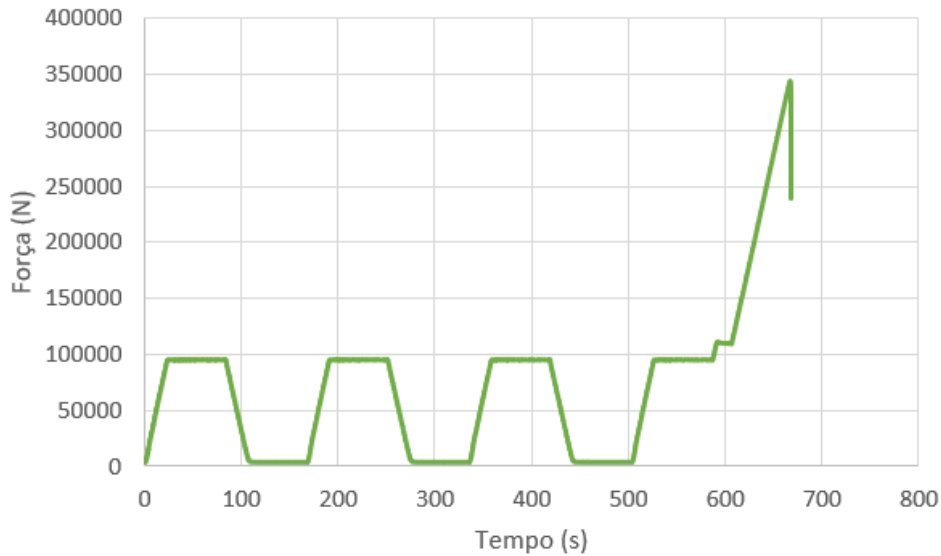
GPa de acordo com a Figura 22. No ensaio de módulo de elasticidade do CP2, foi concluído que a força máxima foi de 344,50 kN, a resistência efetiva à compressão foi de 43,78 MPa e o módulo de elasticidade foi de 36,3 GPa, segundo a Figura 23.

**Figura 22:** Força x Tempo CP1.

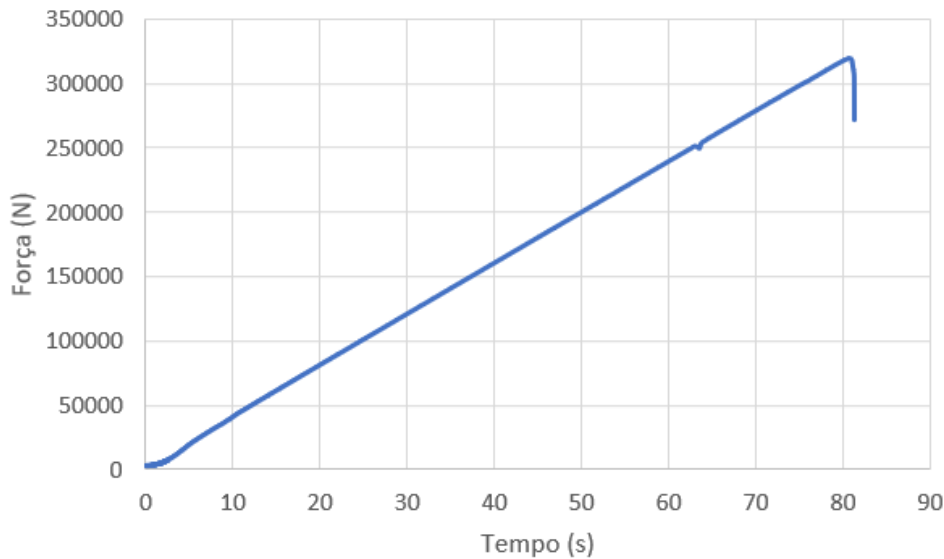


**Fonte:** Autoria própria (2019).

**Figura 23:** Força x Tempo CP2.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

**Figura 24:** Força x Tempo CP3.

**Fonte:** Autoria própria (2019).

Para melhor entendimento os resultados foram reunidos na Tabela 6.

**Tabela 6** - Dados provenientes dos ensaios.

Parâmetro	CP1	CP2	CP3
Força Máxima (kN)	364,14	344,50	319,42
Resistência à compressão (MPa)	46,27	43,78	40,39
Módulo de elasticidade (GPa)	55,4	36,3	-
Taxa de incremento de tensão (MPa/s)	0,5	0,5	0,5

**Fonte:** Autoria própria (2019).

A ABNT NBR 6118:2014 permite realizar uma estimativa da resistência à compressão axial do concreto ao longo do tempo, a partir da seguinte fórmula:

$$\beta_1 = e^{s\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)} \quad (4)$$

onde,  $\beta_1$  é o coeficiente que relaciona a resistência à compressão aos 28 dias ( $f_{ck}$ ), que representa 100% da capacidade, com a resistência à compressão de qualquer outro momento ( $f_{ckj}$ ),  $s$  é um coeficiente que é igual a 0,20 para o CPV – ARI e  $t$  é o tempo em dias.

No caso deste trabalho, o ensaio balístico ocorreu aos 35 dias e o ensaio à compressão aconteceu aos 48 dias. A média das resistências à compressão dos três corpos de prova cilíndricos foi igual a 43,48 MPa.

Aplicando essas informações à equação (4), encontramos que  $\beta_1$  para os 48 dias (ensaio de resistência à compressão) é igual a 1,048. Isso significa que nesta data o concreto resistiu a 104,8% da resistência de referência.

Efetuada o mesmo procedimento para os 35 dias (ensaio balístico), o  $\beta_1$  que encontramos é igual a 1,021 (102,1%). Como  $\beta_1 = f_{ckj}/f_{ck}$ , temos que o  $f_{ck}$  é igual a 41,49 MPa. Repetindo o procedimento, temos que  $f_{ckj}$  aos 35 dias é de 42,37 MPa.

Em resumo, segundo a ABNT NBR 6118:2014, aos 28 dias o concreto confeccionado para esse trabalho tinha uma resistência à compressão axial média de 41,49 MPa e aos 35 dias de 42,37 MPa.

#### **5.4 Ensaio balístico**

O ensaio balístico foi realizado aos 35 dias no Clube de tiro do município de Campo Mourão - PR por representantes da 16ª Subdivisão Policial Civil de Campo Mourão - PR e do 11º Batalhão da Polícia Militar de Campo Mourão. As armas e munições utilizadas no evento foram cedidas pelas organizações, assim como os equipamentos de segurança individual. O suporte onde foram apoiadas as placas foi acomodado no talude que cerca o local em que são disparados os tiros e foi colocada uma tela logo abaixo do suporte para não serem deixados detritos das placas no local.

Atrás do suporte, foi posicionada uma placa de testemunha (*witness plate*) para determinar o nível de blindagem das placas. Qualquer dano na placa de testemunha significa que o material não tem capacidade de blindagem.

**Figura 25:** Posicionamento dos equipamentos.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

A distância utilizada entre o atirador e o alvo foi definida como 15 metros com base nos procedimentos descritos na norma NIJ 0108.01:1985 para armamento do tipo III. A NIJ 0108.01:1985 é a norma norte americana que estabelece um padrão para a resistência balística de materiais de proteção.

**Figura 26:** Ensaio balístico.



**Fonte:** Autoria própria (2019).

O número de disparos em cada placa foi definido de acordo com o rompimento das mesmas e com a disponibilidade de munição, e pode ser observado na Tabela 7. Também se observa o armamento utilizado em cada placa e as informações sobre a munição e a velocidade do projétil.

**Tabela 7:** Dados do ensaio balístico.

Amostra	Nº de disparos	Arma	Calibre (mm)	Munição* (gr)	Velocidade (m/s)	Energia (joule)
SF01	1					
CF01-	1	Fuzil 7.62	7.62x51	144	858	3.372
CF01+	1					
SF02	4					
CF02-	5	Fuzil 5.56	5.56x45	55	995	1.762
CF02+	5					
SF03	1					
CF03-	2	Espingarda	12	32	420	2.822
CF03+	2					
SF04	5					
CF04-	10	Submetralha dora MT9	9x19	124	338	459
	5					
CF04+	5	Submetralha dora MT40	.40 S&W	160	355	653
	1	Espingarda	12	32	420	2.822

\* Unidade utilizada para munição: *grain* (1 gr = 6,48e-5 kg).

**Fonte:** Autoria própria (2019).

Os dados de velocidade e energia foram retirados do Informativo Técnico n°32 – Munições e cartuchos para uso policial (CBC, 2018). Após cada disparo as placas eram inspecionadas para conferir a situação.

A mira da espingarda estava descalibrada no momento do ensaio e como consequência, os projéteis não atingiram o centro da placa. A amostra CF02+ sofreu todos os tiros em sequência e pelo mesmo atirador, o que diminuiu a distância dos pontos de impacto se comparado com as outras placas.

No final do ensaio as placas CF04- e CF04+ foram utilizadas para uma sessão de disparos livre e, por consequência, receberam mais tiros que as demais.



## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo foram apresentados os resultados obtidos através do ensaio balístico realizado. Para melhor apresentação dos mesmos o conteúdo sobre as placas de concreto será dividido em três itens: amostras sem adição de fibra, amostras com adição de 45 kg/m<sup>3</sup> de fibras e amostras com adição de 60 kg/m<sup>3</sup> de fibras. Além das informações sobre as placas, também foram dispostas informações sobre o impacto que as atingiu para fins de comparação.

### 6.1 Amostras sem adição de fibras de aço

Na Figura 27 (a) é possível observar que o impacto fragmentou a placa SF01 em várias partes. Na Figura 27 (b) apresenta-se o tipo de armamento e a quantidade de energia correspondentes. Não se esperava nenhum nível de blindagem dessa placa.

**Figura 27:** Amostra SF01.



(a) Placa sem adição de fibra.

**Fonte:** Autoria própria (2019).



Fuzil 7.62  
Calibre 7.62x51mm  
E = 3372 J

(b) Arma utilizada.

Observa-se na Figura 28 (a) que a placa SF02 também foi partida, porém como o suporte segurou as partes juntas foi viável determinar que o diâmetro máximo de destacamento de aproximadamente 9,7 cm. Como a energia do armamento utilizado nessa amostra foi consideravelmente inferior à da amostra anterior, já se esperava um desempenho melhor.

**Figura 28:** Amostra SF02.



(a) Placa sem adição de fibra.

**Fonte:** Autoria própria (2019).



Fuzil 5.56  
Calibre 5.56x45mm  
E=1.762J

(b) Arma utilizada.

Considerando a Figura 29, observa-se que o disparo também partiu a amostra SF03, o que pode ser justificado pelo fato de o disparo ter atingido o quadrante superior direito. Na Figura 29 (b) mostra-se o armamento utilizado e sua energia de impacto. Quando observados o armamento utilizado e os resultados das placas SF01 e SF02, é possível tirar a conclusão que o desempenho da SF03 seria semelhante.

**Figura 29:** Amostra SF03.



(a) Placa sem adição de fibra.

**Fonte:** Autoria própria (2019).



Espingarda  
Calibre 12  
E=2.822J

(b) Arma utilizada.



Não houve perfuração do concreto da placa SF04, conforme a Figura 30 o corpo de prova não cedeu e também não houve escarificação na face posterior da placa. O comprimento de penetração máximo foi de 4 mm e o diâmetro máximo de destacamento foi de 8,7 cm.

**Figura 30:** Amostra SF04.



(a) Placa sem adição de fibra.



Submetralhadora MT9  
Calibre 9x19mm  
E=459J

(b) Arma utilizada.

**Fonte:** Autoria própria (2019).

Os resultados das placas sem fibra foram obtidos para servir como referência para o resultado das placas com fibra. Ou seja, a partir dessa repercussão foi determinado se as fibras de aço alteram a capacidade de blindagem do concreto.

## 6.2 Amostras com adição de 45 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço

Segundo a figura Figura 31 a placa CF01- foi perfurada, porém não se fragmentou. Observa-se um diâmetro máximo de escarificação na face posterior de aproximadamente 18,5 cm e um diâmetro máximo de destacamento de aproximadamente 10,6 cm. O comportamento da mesma foi superior ao da placa SF01, o que confirma a influência das fibras de aço.

**Figura 31:** Amostra CF01- (placa com adição de 45 kg/m<sup>3</sup>).



Fonte: Autoria própria (2019).

Constata-se, a partir da Figura 32, que a placa CF02- rompeu devido aos tiros que se aproximaram da parte inferior. Porém observa-se um diâmetro máximo de destacamento de 15,9 cm e não houve escarificação. O desempenho da mesma foi, como esperado, superior ao desempenho da SF02.



**Figura 32:** Amostra CF02-.(a) Placa com adição de 45 kg/m<sup>3</sup>.**Fonte:** Autoria própria (2019).Fuzil 5.56  
Calibre 5.56x45mm  
E=1.762J

(b) Arma utilizada.

Repara-se na Figura 33 que a amostra CF03- foi atingida no quadrante superior esquerdo, e sofreu ruptura. É possível interpretar esse fato admitindo que a resistência das placas na região mais próxima ao perímetro é inferior. Não é viável comparar a mesma com a placa SF03 pela diferença entre os locais de impacto. O impacto desse disparo rompeu uma das ligações do suporte, que precisou ser consertado.

**Figura 33:** Amostra CF03-.(a) Placa com adição de 45 kg/m<sup>3</sup>.**Fonte:** Autoria própria (2019).Espingarda  
Calibre 12  
E=2.822J

(b) Arma utilizada.

Não houve perfuração nem escarificação na placa CF04-, conforme mostrado na Figura 34. Ela apresentou um diâmetro máximo de destacamento de aproximadamente 7,8 cm e penetração máxima de 6 mm. Se comparada com a placa

SF04 e considerando que recebeu o dobro de disparos, percebe-se que o desempenho foi melhor.

**Figura 34:** Amostra CF04-.



(a) Placa com adição de 45 kg/m<sup>3</sup>.



Submetralhadora MT9  
Calibre 9x19mm  
E=459J

(b) Arma utilizada.

Fonte: Autoria própria (2019).

### 6.3 Amostras com adição de 60 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço

Verifica-se, na placa CF01+ (Figura 35), que ela não foi perfurada. A profundidade de penetração foi de 8 mm, o diâmetro máximo de destacamento foi de aproximadamente 10,87 cm e o diâmetro máximo de escarificação foi de aproximadamente 20,19 cm. Vê-se claramente no resultado obtido com essa placa, que as fibras de aço influenciam positivamente na resistência à impacto de projéteis em alta velocidade do concreto.

A placa de referência se partiu, a placa com um nível inferior de fibras foi perfurada e a placa com um nível superior de fibras sofreu apenas escarificação e destacamento.



**Figura 35:** Amostra CF01+ (placa com adição de 60 kg/m<sup>3</sup>).



**Fonte:** Autoria própria (2019).

A amostra CF02+ foi nitidamente perfurada como observa-se na Figura 36. Sofreu um diâmetro máximo de destacamento de aproximadamente 16,83 cm e um diâmetro máximo de escarificação de aproximadamente 20,89 cm. O resultado foi inferior ao das outras placas em que foram atiradas com Fuzil 5.56, mas o diferencial foi que os disparos não foram feitos pausadamente.

Como todos os projéteis foram atirados pela mesma pessoa e em um intervalo de tempo menor, os disparos atingiram praticamente o mesmo lugar todas as vezes.

**Figura 36:** Amostra CF02+ (placa com adição de 60 kg/m<sup>3</sup>).



Fonte: Autoria própria (2019).

Constata-se na Figura 37 que na amostra CF03+, o disparo também atingiu a parte superior e a amostra foi rompida. Em comparação com as outras duas amostras atingidas pela espingarda, a diferença de atuação delas foi bem pouca, porém não é viável equipará-las porque elas foram atingidas em locais distintos.

**Figura 37:** Amostra CF03+.



(a) Placa com adição de 60 kg/m<sup>3</sup>.

Fonte: Autoria própria (2019).

(b) Arma utilizada.



Conforme mostrado na Figura 38, a placa CF04+ foi atingida por 3 munições diferentes. Apesar disso, não houve perfuração nem escarificação. O diâmetro máximo de destacamento foi de 14,71 cm e a profundidade máxima de penetração foi de 14 mm. Não é possível compará-la com as outras placas de número 04 porque a quantidade de vezes que cada uma foi atingida foi diferente.

**Figura 38:** Amostra CF04+.



(a) Placa com adição de 60 kg/m<sup>3</sup>.

Fonte: Autoria própria (2019).

Submetralhadora MT9  
Calibre 9 mm 9x19mm  
E=459J

Submetralhadora MT40  
Calibre .40 S&W  
E=653J

Espingarda  
Calibre 12  
E=2.822J

(b) Armas utilizadas.

#### 6.4 Placa testemunha (*witness plate*)

Apesar de algumas placas terem sido rompidas ou perfuradas, a placa testemunha que se encontrava atrás do suporte permaneceu intacta. O que significa que nenhum projétil ou estilhaço a atingiu.

**Figura 39:** Placa testemunha.

**Fonte:** Autoria própria (2019).

Com essa informação, podemos afirmar que, apesar de o número de disparos não estar em conformidade com as normas sobre o assunto, para essa quantidade de disparos, todas as placas podem ser consideradas blindadas. Na Tabela 8 apresenta-se um resumo dos resultados para melhor visualização.

**Tabela 8:** Resumo dos resultados.

<i>Amostra</i>	<i>Rompimento</i>	<i>Perfuração</i>	<i>Comprimento de penetração (mm)</i>	<i>Diâmetro máximo de destacamento (mm)</i>	<i>Diâmetro máximo de escarificação (mm)</i>
<i>SF01</i>	Sim	-	-	-	-
<i>CF01-</i>	Não	Sim	300	106	185
<i>CF01+</i>	Não	Não	8	109	202
<i>SF02</i>	Sim	-	-	97	-
<i>CF02-</i>	Sim	-	-	159	0
<i>CF02+</i>	Não	Sim	300	168	208
<i>SF03</i>	Sim	-	-	-	-
<i>CF03-</i>	Sim	-	-	-	-
<i>CF03+</i>	Sim	-	-	-	-
<i>SF04</i>	Não	Não	4	87	0
<i>CF04-</i>	Não	Não	6	78	0
<i>CF04+</i>	Não	Não	14	147	0

**Fonte:** Autoria própria (2019).

Contrapondo todos os resultados, é possível afirmar que a fibra influencia o desempenho do concreto quando submetido à impacto de projéteis em alta velocidade e que a resistência das placas é maior no centro.



## 7 CONCLUSÃO

Verificou-se que para as placas atingidas por disparos de fuzil 762, cuja energia cinética é de 3372 J, a influência da fibra de aço na blindagem da placa foi significativa. O exemplar sem fibras rompeu-se, o exemplar com um teor inferior de fibras foi perfurado e o exemplar com um teor superior de fibras sofreu apenas destacamento e escarificação.

Das placas atingidas por disparos de fuzil 5.56 ( $E = 1762$  J) observou-se que as amostras que romperam tiveram um diâmetro máximo de destacamento menor do que a que não rompeu, o que corrobora com as verificações de Barros (2009). No qual, observou que as fibras funcionam como “pontes” para as tensões, distribuindo o impacto na extensão da placa e não na espessura.

Foi observado nos resultados das placas atingidas por disparos de espingarda ( $E = 2822$  J) que o desempenho tende a piorar quando a placa é atingida nas extremidades, visto que, as placas com fibras atingidas por disparos de fuzil 7.62 ( $E = 3372$  J) não romperam.

Quando se comparou as placas SF04 (sem fibras) e CF04- (teor de fibras de aço de  $45 \text{ kg/m}^3$ ), foi visto que com o dobro de disparos, a placa que continha fibras teve uma profundidade de penetração 25% superior. A placa CF04+ (teor de fibras de aço de  $60 \text{ kg/m}^3$ ) teve um destacamento bastante superior às outras placas que sofreram menos impacto o que reafirma o trabalho de Barros (2009).

Portanto, constata-se que quanto maior o teor de fibras de aço, maior a capacidade de blindagem da placa. Também se observa que as placas que sofreram o impacto fora do centro tiveram um desempenho inferior se comparado com as placas que sofreram um impacto de maior velocidade no ponto central. Essa investigação tornou possível confirmar o que foi visto em estudos registrados no capítulo 4: a fibra de aço melhora as propriedades de resistência à impacto de projéteis em alta velocidade do concreto.

### 7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para novas pesquisas deixa-se as seguintes:

- Utilizar diferentes traços de concreto com maiores resistências à compressão;

- Utilizar filmagem para registro dos ensaios a fim de reduzir o tempo de inspeção de placas entre os ensaios;
- Utilizar cronógrafo para medição da velocidade dos projéteis;
- Utilizar adição de diferentes materiais na composição do concreto como borrachas, fibras e materiais com alto teor de absorção de impacto;
- Buscar parcerias com empresas que poderiam se beneficiar dos resultados dessa pesquisa como bancos, agências lotéricas, correios e clubes de tiro.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217: Determinação de composição granulométrica dos agregados.**Rio de Janeiro, Brasil, 1982.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 99776: Determinação da massa específica real ou absoluta do agregado miúdo por meio do frasco de Chapman.**Rio de Janeiro, Brasil, 1987.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial.**Rio de Janeiro, Brasil, 1991.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**Rio de Janeiro, Brasil, 1994.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53:2009: Agregado graúdo: Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.**Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 - Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento 2014. Seção 4, p. 225.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**Rio de Janeiro, Brasil, 2017.
- ALVES, Gilvania Terto. **Avaliação de Absorção de Energia de Impacto Uma Abordagem Baseada em Testes Com Estruturas Similares**Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- ANDOLFATO, Rodrigo Piernas; CAMACHO, Jefferson Sidney; BRITO, Gilberto Antônio De. **Extensometria Básica**Ilha Solteira, 2004.
- ARCELORMITTAL. **O uso de fibras de aço no concreto.** 2016. Disponível em: <<http://blog.arcelormittal.com.br/o-uso-de-fibras-de-aco-no-concreto/>>. Acesso em: 17 nov. 2018.
- ARCELORMITTAL. **Dramix** 2018.
- BANGASH, M. Y. H. **Shock, Impact and Explosion.** Londres, Reino Unido: Springer, 2009.
- BARROS, Alexandre Rodrigues De. **Avaliação do comportamento de vigas de concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço**Maceió, Brasil, 2009.

- CARLUCCI, D. E.; JACOBSON, S. S. **Ballistics: theory and design of guns and ammunition**. Boca Raton, EUA: CRC Press, 2008.
- CBC. **Munições e Cartuchos para Uso Policial**Ribeirão Pires, 2018.
- DALLY, James W.; RILEY, William F. **Experimental stress analysis**. 4. ed. [s.l: s.n.].
- DANCYGIER, A. N.; YANKELEVSKY, D. Z. **High Strength Concrete Response to Hard Projectile Impact**International Journal of Impact EngineeringHaifa, Israel, 1996.
- DAUDEVILLE, Laurent; MALÉCOT, Yann. **Concrete structures under impact**European Journal of Environmental and Civil EngineeringGrenoble, France, 2011.
- FIGUEIREDO, Antonio Domingues De. **Concreto Reforçado Com Fibras**São Paulo, Brasil, 2011.
- FORRESTAL, M. J. et al. **An empirical equation for penetration depth on ogive-nose projectiles into concrete targets**International Journal of Impact EngineeringDayton, EUA, 1994.
- GARCEZ, Estela Oliari. **Análise teórico experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto**Porto Alegre, Brasil, 2005.
- GASPAR, Daniel H.; CARNEIRO, Luiz A. V; TEIXEIRA, Ana M. A. J. Estudo de placas de concreto com fibras de aço e de poliolefina submetidas a impacto balístico. Praia Vermelha, Brasil, v. 33, p. 57–62, 2016.
- GERE, James M. **Mecânica dos Materiais**. 5. ed. São Paulo, Brasil: Thomson, 2003.
- JONES, N. **Structural Impact**. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 1997.
- JUNIOR, Cap Francisco Lopes de Magalhães. **Concreto armado reforçado com fibras sob cargas de impacto para a segurança de vias públicas**Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- JUSTO, Jorge Manuel Costa da Fonseca. **Estudo do comportamento ao impacto de alta velocidade de estruturas em materiais compósitos**Porto, Portugal, 1996.
- LEFONE, Renato Cancherini et al. **Concretos especiais para blindagem de estruturas de defesa**Praia Vermelha, Brasil, 2015.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.
- MINISTÉRIO DA JUSTIÇA. Diretrizes Básicas para arquitetura penal2011.

NAAMAN, A. E.; GOPALARATNAM, V. S. **Impact properties of steel fibre reinforced concrete in bending***International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*Chicago, EUA, 1983.

SANTOS, Roberto Machado Dos. **Comportamento de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com CFC Sujeitas a Carga de Impacto**Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

SMITH, P. D. **Blast and Ballistic loading of structures**. Boston: Butterworth-Heinemann, 1994.

SOARES, Denise. Ataques foram comandados por 4 detentos do maior presídio de MT. Cuiabá, p. 1, 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/mato-grosso/noticia/2016/06/ataques-foram-comandados-por-4-detentos-do-maior-presidio-de-mt.html>>

U. S. DEPARTMENT OF JUSTICE; NATIONAL INSTITUTE OF JUSTICE. NIJ 0108.01 - Ballistic Resistant Protective MaterialsUnited States of America, 1985. p. 16.

ZIELINSKI, A. J.; REINHARDT, H. W.; KÖRMELING, H. A. Experiments on concrete under uniaxial impact tensile loading. **Matériaux et Constructions**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 103–112, 1981. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF02547644>>

ZUKAS, Jonas A. **Impact Dynamics**. Michigan.