

Análise Experimental de Placas de Concreto Submetidas a Impacto de Projéteis em Alta Velocidade

Gabriela Dutra Tibúrcio¹, Aline Viana Pereira², Jeferson Rafael Bueno³

^{1,2}Acadêmica de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CM), Campo Mourão/PR – Brasil

³Professor orientador, curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CM), Campo Mourão/PR - Brasil

Resumo – Em muitas edificações e infraestruturas se faz necessário um cuidado especial no projeto das alvenarias e dos elementos estruturais. Esse 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 com teores de fibras de aço de 45 e 60 kg/m³ foram moldadas. Essas placas foram submetidas à teste balístico. Em decorrência desse ensaio, os resultados revelaram que as placas com maiores teores de fibra e atingidas por disparos mais próximos do centro da amostra, se comportaram de maneira mais eficiente. Portanto a teoria de que as fibras aumentariam a resistência à impacto balístico das placas foi corroborada.

Palavras-Chave - Impacto, Fibras de aço, Ensaio balístico.

I. 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 [1]. 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 artigo tem por objetivo apresentar os conceitos básicos na área de impacto em estruturas e os resultados de uma investigação sobre o comportamento de placas de concreto que foram submetidas a cargas impulsivas, oriundas de disparos de armas de fogo. Assim, apresenta-se e discute-se 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, nacionais e estrangeiras, sobre a temática e pode-se ser dividido em duas etapas: confecção das amostras e ensaio balístico.

II. IMPACTO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

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 [2].

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 [3].

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 [4].

Nos casos de impacto em alta velocidade, a energia é transmitida no material por meio de ondas de choque. Então, quanto maior a impedância do material, melhor seu desempenho para essa finalidade [5].

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 [6], [7].

A penetração é a profundidade da cratera que se forma no alvo na zona de impacto. A perfuração consiste na passagem completa do projétil por toda a espessura do alvo podendo existir ou não velocidade de saída.

O destacamento é a ejeção de material da face do alvo que foi atingida pelo projétil e a escarificação, também chamada de estilhaçamento, é a ejeção de material da face oposta à que sofreu o impacto.

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 [8].

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 1. Isso leva à ruptura frágil do concreto [9], [10], [11].

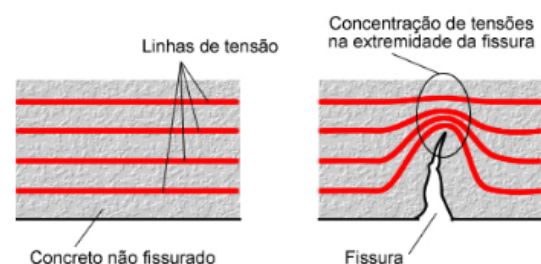


Fig. 1. Concentração de tensões no concreto sem adição de fibras [9].

Quando há fibras de aço no concreto, elas agem como elementos de transferência de tensões de tração, o que reduz a concentração de tensões na ponta da fissura, conforme esquematizado na Figura 2.

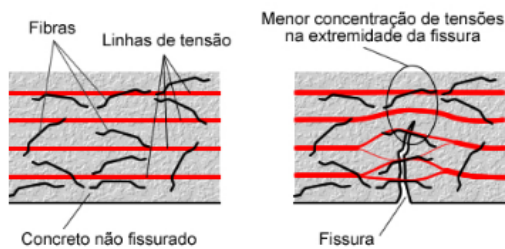


Fig. 2. Concentração de tensões no concreto com adição de fibras [9].

No ensaio balístico de [10] foi observado que as fibras auxiliaram na diminuição do comprimento de penetração. 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 obtiveram melhores resultados [10].

III. MÉTODO

Foram moldadas 12 placas e 3 cilindros de concreto cujo traço está especificado na Tabela I. Após a concretagem, os elementos de concreto permaneceram submersos durante 28 dias e em seguida foram armazenados em laboratório durante mais 7 dias.

O cimento utilizado foi o CPV-ARI. A equipe decidiu utilizar um material que permitiria atingir maiores porcentagens da máxima resistência em um curto prazo a fim de aumentar o tempo disponível para realizar os ensaios balísticos afinal, estes dependiam de agentes externos.

A areia utilizada tinha dimensão máxima de 1,2 mm e massa específica de 2,62 g/cm³, a brita utilizada tinha dimensão máxima de 19 mm e massa específica de 1,64 g/cm³. O aditivo superplastificante empregado foi o CQ Flow, a sílica foi da marca *Dow Corning* e as fibras Dramix 3D 45/30 BL.

TABELA I. TRAÇO E CONSUMO DE MATERIAIS.

<i>Materiais</i>	<i>Traço (massa)</i>	<i>Consumo (kg/m³)</i>
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

O resultado do ensaio de resistência à compressão axial mostrou que o concreto teve uma resistência média de 43,48 MPa e o ensaio de módulo de elasticidade mostrou que o concreto teve um módulo de elasticidade de 45,85 GPa.

O ensaio balístico foi realizado aos 35 dias do concreto e os equipamentos foram posicionados segundo a Figura 3. Das 12 placas que foram confeccionadas, 4 delas não continham fibras de aço (SF), 4 delas continham um consumo de 45 kg/m³ de fibras de aço (CF-) e 4 delas continham um consumo de 60 kg/m³ de fibras de aço (CF+).

A norma utilizada como base para a realização dos ensaios balísticos foi a NIJ 0108.01 [12].

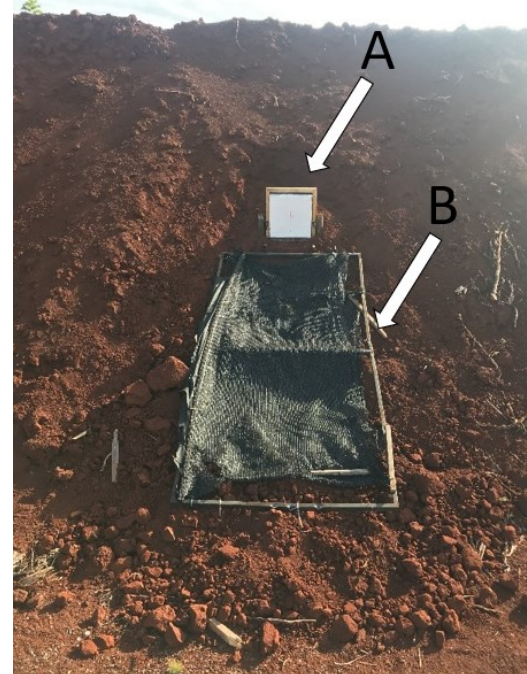


Fig. 3. Posicionamento dos equipamentos.

É possível observar na Figura 3, em A o conjunto composto pelo suporte, pela placa de testemunha e pela amostra e em B uma tela.

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. Abaixo do suporte foi colocada uma rede para coletar o material estilhaçado.

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 II. Também se observa o armamento utilizado em cada placa e as informações sobre a munição e a velocidade do projétil.

TABELA II. DADOS DO ENSAIO BALÍSTICO.

Amostra	Disparos	Armas	Calibre	Velocidade (m/s)	Energia (joule)
SF01	1	Fuzil 7,62	7,62x51 mm	858	3372
CF01-	1				
CF01+	1				
SF02	4	Fuzil 5,56	5,56x45 mm	995	1762
CF02-	5				
CF02+	5				
SF03	1	Espingarda	12	420	2822
CF03-	2				
CF03+	2				
SF04	5	Submetralhadora MT9	9x19 mm	338	459
CF04-	10				
CF04+	5	Submetralhadora MT40	.40 S&W	355	653
	5				
	1	Espingarda	12	420	2822

* Dados de velocidade e energia obtidos através de [13].

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.

IV. RESULTADOS

Nas placas atingidas por disparos de Fuzil 7,62 ($E = 3372$ J), a influência da fibra de aço na blindagem da placa foi clara (Figura 4). O exemplar sem fibras rompeu, o exemplar com um teor inferior de fibras foi perfurado e o exemplar com um teor superior de fibras sofreu apenas destacamento e escarificação.

Os resultados foram apresentados na Tabela III. Nas figuras 4, 5, 6 e 7, as imagens (a) reproduziram as placas sem adição de fibras, as imagens (b) exibem as placas com adição de 45 kg/m^3 e as imagens (c) mostram as placas com adição de 60 kg/m^3 .



Fig. 4. Placas SF01, CF01- e CF01+ atingidas pelo Fuzil 7,62.

Como observado na Figura 5 as 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 confirma o trabalho de [9], já citado anteriormente, que expõe que as fibras funcionam como “pontes” para as tensões, distribuindo o impacto na extensão da placa e não na espessura.



Fig. 5. Placas SF02, CF02- e CF02+ atingidas pelo Fuzil 5,56.

Com as placas atingidas por disparos de espingarda ($E = 2822$ J) percebeu-se que o desempenho nas extremidades não é tão eficaz como no centro visto que as placas atingidas por disparos de fuzil 7,62 se comportaram melhor. Esse desempenho pode ter decorrido do modo que foi despejado o concreto (do balde para a forma, concentrando o despejo no centro da forma). Como as fibras tendem a ser mais pesadas, existe a possibilidade de terem se concentrado em maior quantidade na porção central das placas.



Fig. 6. Placas SF03, CF03- e CF03+ atingidas pela Espingarda.

Comparando a SF04 com a CF04-, viu-se que com o dobro de disparos, a placa que continha fibras teve uma profundidade de penetração 25% superior. A placa CF04+ foi atingida por 3 munições diferentes, apesar disso não houve perfuração nem escarificação, porém teve um destacamento bastante superior às outras placas que sofreram menos impacto o que reafirma o trabalho de [9].

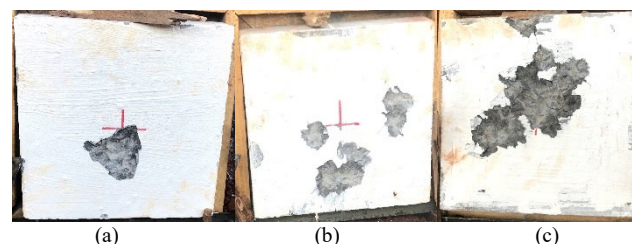


Fig. 7. Placas SF04, CF04- e CF04+ atingidas pela MT9, MT40 e Espingarda.

Apesar de algumas placas terem sido rompidas ou perfuradas, a placa de testemunha que se encontrava atrás do suporte permaneceu intacta. O que significa que nenhum projétil ou estilhaço a atingiu. Percebeu-se que os projéteis que foram encontrados depois dos disparos, ricochetearam.



Fig. 8. Placa de testemunha (*witness plate*).

TABELA III. SÍNTESE DOS RESULTADOS.

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

As amostras SF02 e CF02- sofreram rompimento, porém o suporte manteve as partes juntas, o que possibilitou a medição da escarificação.

V. CONCLUSÃO

Analisando a Tabela III 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, o que pode estar vinculado com o modo de despejamento do cimento na forma. Essa investigação tornou possível confirmar o que foi visto em outras pesquisas: a fibra de aço melhora as propriedades de resistência à impacto de projéteis em alta velocidade do concreto.

Também é possível constatar 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.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua gratidão ao 16ª Subdivisão Policial Civil e ao 11º Batalhão da Polícia Militar de Campo Mourão – PR, pelo auxílio durante o ensaio experimental. Também, agradecem ao DACOC-CM, a COECI-CM e a UTFPR-CM pelo apoio e incentivo.

REFERÊNCIAS

- [1] L. Daudeville, Y. Malécot, “Concrete structures under impact”, *Eur J Environ Civ Eng*, vol. 15, p. 101–140, 2011.
- [2] J. Gere, “Mecânica dos Materiais”, 5ed. São Paulo, Brasil: Thomson, 2003.
- [3] R. M. Santos, “Comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com CFC sujeitas a carga de impacto”, 2008, p.149.
- [4] P. D. Smith, “Blast and ballistic loading of structures”. Boston: Butterworth-Heinemann, 1994.
- [5] N. Boukovalas, H. Wiebeck, F. Valenzuela-Diaz, C. Xavier, “Desenvolvimento de compósito cerâmica/polímero resistente a impactos balístico de projéteis de fuzil”, *An Do 45º Congr Bras Cerâmica*, 2001.
- [6] M. Bangash, “Shock, impact and explosion”. Londres, Reino Unido: Springer, 2009.
- [7] C. Junior, “Concreto armado reforçado com fibras sob cargas de impacto para a segurança de vias públicas”, 2012, p. 159.
- [8] 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: 17/11/2018.
- [9] A. Barros, “Avaliação do comportamento de vigas de concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço”, 2009.
- [10] D. Gaspar, L. Carneiro, A. Teixeira, “Estudo de placas de concreto com fibras de poliolefina submetidas a impacto balístico”, vol. 33, p.57-62, 2016.
- [11] E. Garcez, “Análise teórico experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto”, p.141, 2005.
- [12] U. S. Department of Justice, National Institute of Justice, “NIJ 0108.01 – Ballistic Resistant Protective Materials”, 1985.
- [13] CBC, “Munições e cartuchos para uso policial”, p.1-8, 2018.