

# AVALIAÇÃO DA ENERGIA REMANESCENTE TRANSMITIDA ATRAVÉS DE BLINDAGENS BALÍSTICAS

*António Bastos*<sup>1</sup>  
*Tenente-Coronel de Engenharia*

*Pedro Monteiro*<sup>2</sup>  
*Tenente Aluno*

*Carlos Silva*<sup>3</sup>  
*Mestre*

*Pedro Rosa*<sup>4</sup>  
*Professor Auxiliar*

*Paulo Martins*<sup>5</sup>  
*Professor Catedrático*

## RESUMO

A avaliação do desempenho de uma blindagem depende da interacção do projectil com o alvo e consiste, basicamente, na verificação qualitativa dos níveis de penetração e do dano causados pelo impacto. A quantificação da energia de impacto, que não sendo absorvida pela blindagem, é transmitida à pessoa ou equipamento, apesar da sua importância, não é geralmente considerada nestas avaliações. A contabilização dessa energia remanescente é particularmente crítica no caso dos coletes à prova de bala.

Este trabalho de investigação teve como principal objectivo contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia laboratorial que permita quantificar, para além dos indicadores tradicionais, a energia remanescente transmitida através das blindagens. A quantificação dessa energia foi realizada com base em técnicas experimentais do domínio da caracterização mecânica de materiais, baseadas na

---

<sup>1</sup> TCOR Eng.º MAT, Director do Projecto de I&D - Ensaios de Balística por Impulsão Electromagnética "MagneticGun", Director dos Cursos de Serviço de Material, professor de Balística e Tecnologia Mecânica na AM, Membro efectivo do Centro de Investigação da Academia Militar - CINAMIL.

<sup>2</sup> Tenente Aluno MAT a frequentar o Tirocínio Para Oficial (TPO).

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico.

<sup>4</sup> Professor Auxiliar do Instituto Superior Técnico, Investigador do Projecto I&D "MagneticGun".

<sup>5</sup> Professor Catedrático do Instituto Superior Técnico, Investigador Principal do Projecto I&D "MagneticGun".

análise das ondas de pressão formadas aquando do impacto do projectil contra a blindagem. Os projecteis foram impulsionados através da utilização de um disparador electromagnético, de forma a possibilitar o ajuste da energia cinética de disparo, permitindo a realização dos ensaios em ambiente laboratorial controlado com total ausência de fumo e ruído.

O trabalho experimental consistiu no desenvolvimento de um aparato experimental para a avaliação quantitativa das energias absorvidas e transmitidas através das blindagens. A metodologia desenvolvida no âmbito do trabalho foi utilizada na avaliação de alguns binómios blindagem/projectil utilizados pelo Exército Português, permitindo avaliar a sua resistência ao impacto balístico.

**Palavras-chave:** Blindagens; Energia remanescente; Caracterização mecânica; Barra de Hopkinson; Disparador electromagnético

## 1. INTRODUÇÃO

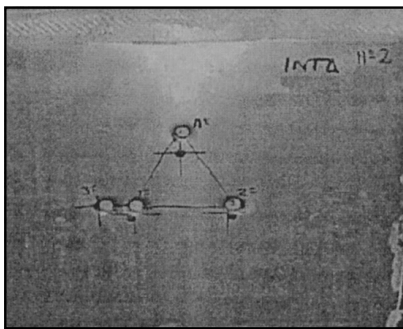
O desenvolvimento que se tem vindo a verificar, nas últimas décadas, no domínio dos materiais, ao nível do projecto e fabrico das protecções, tem vindo a fomentar o nível de protecção permitido pelas blindagens balísticas. No entanto, de forma a consubstanciar estes desenvolvimentos, ou auxiliar a selecção da blindagem mais apropriada a determinada missão, importa pois avaliar a capacidade de absorção de energia destas protecções balísticas. Neste trabalho de investigação procurou-se desenvolver uma metodologia laboratorial que permita quantificar, para além dos indicadores tradicionais, a energia remanescente transmitida através das blindagens. A quantificação dessa energia foi realizada com base em técnicas experimentais do domínio da caracterização mecânica de materiais, baseadas na análise das ondas de pressão formadas aquando do impacto do projectil contra a blindagem. Os projecteis foram impulsionados através da utilização de um disparador electromagnético, de forma a possibilitar o ajuste da energia cinética de disparo, permitindo a realização dos ensaios em ambiente laboratorial controlado com total ausência de fumo e ruído. Este sistema foi projectado de forma a permitir impulsionar projecteis de calibre 5.56 e 9 mm (NATO). A metodologia desenvolvida no âmbito do trabalho foi utilizada na avaliação de blindagens pessoais (coletes anti-bala e escudos anti-tumulto), utilizados pelo Exército Português, com elevado interesse no contexto dos conflitos actuais.

## 2. BREVE RESUMO DA AVALIAÇÃO DE BLINDAGENS

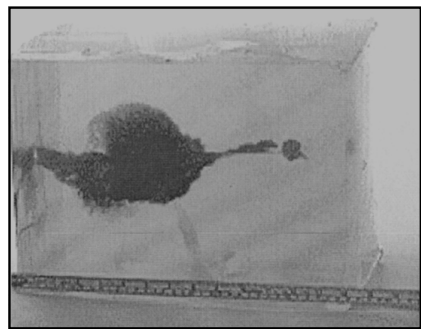
Os ensaios para avaliação de blindagens são na sua grande maioria conduzidos em campos de tiro apropriados, (Campo de tiro de Alcochete, Campo Militar de Santa Margarida, Escola Prática de Artilharia em Vendas Novas, entre outros), de acordo com as normas NEB/T E-316, NIJ Std 0108.01, STANAG 4569, entre outras. Os ensaios são em geral realizados com a execução de três disparos na blindagem, formando um triângulo (norma NATO, STANAG 4190), como representado na Figura 1.a). Os ensaios balísticos mais utilizados nos institutos de investigação balística são os que utilizam gelatina balística. Procura-se com esta gelatina modelar

experimentalmente o comportamento dos tecidos humanos, permitindo estimar o efeito da penetração de um projectil. Esta técnica é então utilizada no desenvolvimento das protecções balísticas ou no aperfeiçoamento da geometria do projectil (Figura 1.b). As conclusões deste tipo de ensaios são meramente qualitativas, ou seja, limitam-se a verificar se determinado tipo de projectil penetra ou não na blindagem. Quando tal se verifica, realiza-se a inspecção visual à gelatina balística de modo a analisar os possíveis danos causados pelo impacto.

A ausência de técnicas/métodos de análise da energia remanescente, transmitida através da blindagem, dificulta a avaliação da eficiência das blindagens. Avaliar qual o capacete, de entre um metálico e um compósito, que minimiza a energia de impacto transmitida ao crânio, torna-se uma tarefa difícil quando não quantificado o jogo de energias envolvidas, utilizando simplesmente a observação da penetração.



a)



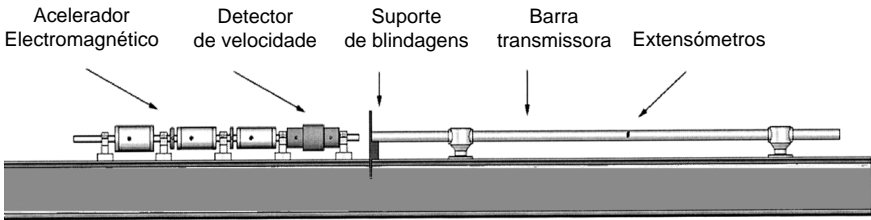
b)

**Figura 1** - Testes balísticos para avaliação de blindagens; a) Ensaio segundo norma NATO, STANAG 4190; b) Ensaio com gelatina balística (disparo realizado à distância de 5 metros em gelatina balística, com 36 cm de penetração).

### 3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

A técnica experimental de Hopkinson é tradicionalmente designada por barra de Hopkinson por utilizar células de carga de elevado comprimento sem qualquer constrangimento no seu movimento axial, as quais são

utilizadas para medir as ondas de pressão geradas durante o impacto (Davies 1948; Kolsky, 1949; Lindholm, 1971; Kaiser, 1998; Swantek, 2000). A barra de Hopkinson desenvolvida neste trabalho é composta por quatro sistemas principais, como se pode verificar na Figura 2, e foi concebida de forma a permitir quantificar a energia transmitida através de uma amostra de blindagem sob diferentes condições de energia de impacto.

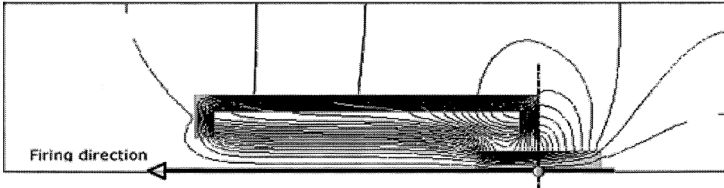


**Figura 2** - Representação esquemática do sistema de Hopkinson, com impulsão electromagnética do projectil, implementado para a avaliação da energia remanescente transmitida através de blindagens balísticas.

Todos os componentes encontram-se acoplados a uma viga de perfil I em aço, com apoios concebidos especificamente para manter todos os componentes alinhados axialmente. Estes apoios foram concebidos para fácil remoção, simplificando tarefas de manutenção ou de substituição. Uma configuração modular permite uma grande flexibilidade para posterior evolução do modelo. Os principais módulos constituintes são:

**Acelerador Electromagnético:** para a impulsão dos projecteis, foi desenvolvido e instalado um acelerador electromagnético na barra de Hopkinson, como mostrado a Figura 4.a). O objectivo deste sistema é fornecer ao projectil uma energia cinética apropriada ao ensaio balístico, podendo acelerar projecteis com calibre até 11mm. O acelerador electromagnético implementado na barra de Hopkinson é conhecido como acelerador de relutância magnética. Tais dispositivos utilizam um campo magnético gerado pela passagem de corrente eléctrica numa bobina, permitindo acelerar um projectil paramagnético (alterações permitem também materiais diamagnéticos). Sofrendo assim uma força no sentido do centro

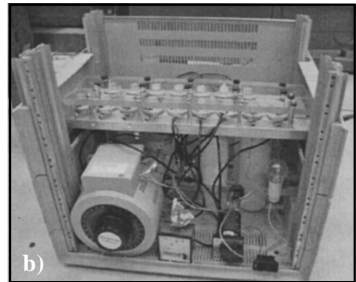
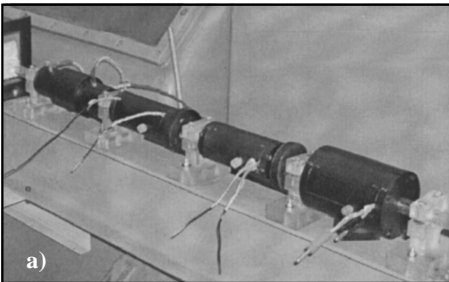
da bobina (Figura 3) com uma magnitude dada pela equação (1), onde  $N$  é o fluxo magnético,  $\phi$  o número de espiras da bobina,  $I$  a intensidade da corrente eléctrica no fio, e  $x$  a posição do projectil.



**Figura 3** - Fluxo magnético da bobina na presença do projectil

$$F \frac{1}{2} - NI \frac{d\phi}{dx} \tag{1}$$

O acelerador é constituído por três bobinas consecutivas, acopladas em torno de um tubo guia (Figura 4 a)). As bobinas têm 90 mm de comprimento e um diâmetro variável de acordo com a sua posição ao longo do tubo na direcção de impacto, consistindo num enrolamento de fio de cobre com 2 mm de diâmetro. A activação da primeira bobina é feita a partir de um interruptor de pressão, e a posterior activação sequencial das bobinas seguintes através de tiristores, activados pela passagem do projectil através de foto-diodos, posicionados antes de cada uma das duas últimas bobinas. Em torno das bobinas foi instalada uma blindagem magnética, que consiste numa camada de aço com 10 mm de espessura, onde se concentra o fluxo magnético, melhorando a transferência de energia para o projectil.



**Figura 4** - Componentes do acelerador electromagnético; a) Bobinas e detector de velocidade; b) Unidade de potência.

No intuito de criar uma corrente eléctrica necessária para gerar o campo magnético, foi instalada uma unidade de potência (Figura 4 b)). Consiste num conjunto de condensadores para cada bobina, ligados por um lado a um transformador para efectuar o carregamento, e por outro às bobinas, através dos tiristores (Figura 5), activados por meio de relés que por sua vez entram em funcionamento quando a bala interrompe os foto-diodos. Todos os contactos são placas de cobre com uma grande área de contacto de modo a minimizar a resistência eléctrica.

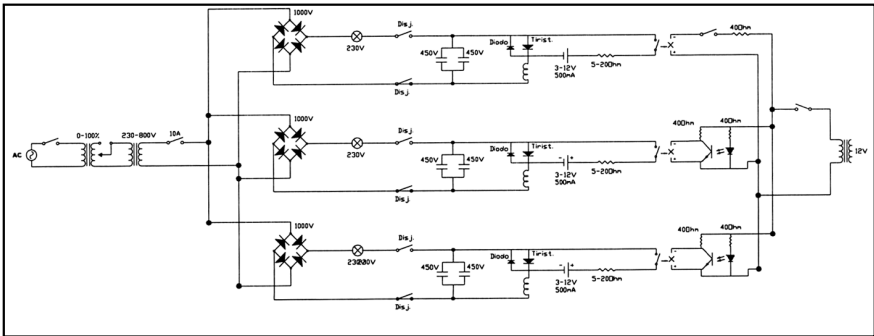


Figura 5 - Esquema eléctrico da unidade de potência

**Detector de velocidade do projectil:** utilizado na monitorização da velocidade (energia cinética) do projectil através da determinação da sua velocidade. Consiste em dois foto-diodos que cruzam a trajectória do projectil, com uma resposta de nano-segundos, gerando um impulso de 5V quando o projectil se encontra entre os foto-diodos, medido a partir de um osciloscópio;

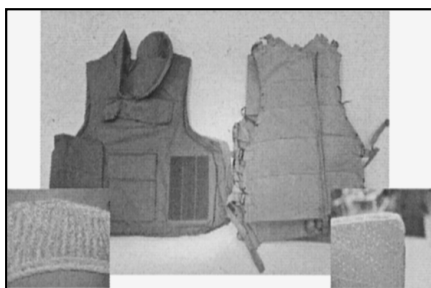
**Suporte das amostras de blindagens:** são colocadas no suporte amostras de blindagens, perpendicularmente à trajectória do projectil. Após o impacto, alguma energia cinética será absorvida, o resto irá ser transmitida ao componente final, a barra transmissora;

**Barra Transmissora:** varão de alumínio que recebe o impacto da energia remanescente, transmitida sob a forma de uma onda de pressão. Uma célula de carga incorporada na barra mede a energia da onda de pressão, através da integração numérica do tempo, recorrendo ao método trapezoidal. A

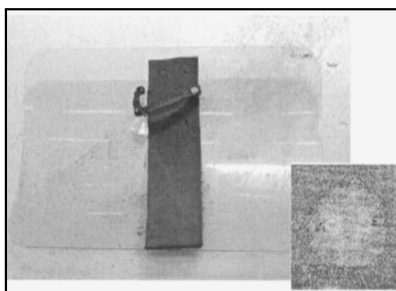
comparação entre a energia cinética e energia transmitida pela onda resulta na quantidade absorvida pela amostra da blindagem (Costa, 1996). Os extensómetros da célula de carga, todos com o mesmo valor de resistência eléctrica, são colados ao meio da barra transmissora numa configuração de ponte de Wheatstone.

#### 4. COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS BLINDAGENS

Foi seleccionado um conjunto de blindagens (Figura 6) de forma a permitir conduzir uma primeira avaliação da metodologia criada neste trabalho na quantificação da energia remanescente transmitida através dessas protecções balísticas. A avaliação do comportamento mecânico das blindagens foi baseada em disparos (contra as blindagens) mantendo a energia cinética constante em cerca de 10Joules, permitindo manter as mesmas condições nos ensaios realizados sobre as diferentes blindagens. Os ensaios consistiram na análise da onda de pressão transmitida ao longo da barra transmissora. Após a realização da primeira série de ensaios foi possível obter os resultados relativos à capacidade das blindagens em estudo de absorver o impacto dos projecteis. A Figura 7 apresenta a evolução da onda de pressão que percorre a barra de Hopkinson em função do tempo após um impacto nas amostras de blindagem proveniente dos projecteis de calibre 9 e 5.56mm respectivamente.

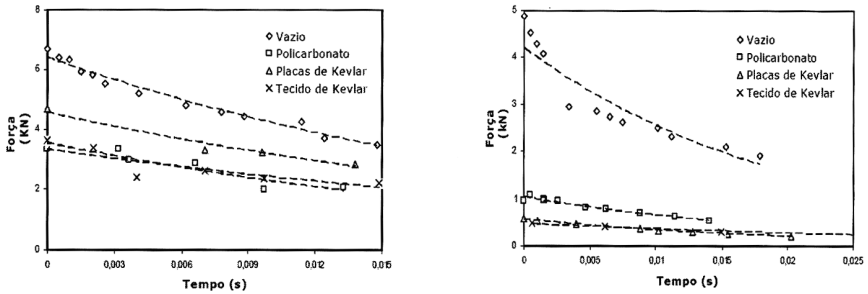


a)



b)

**Figura 6** - Blindagens usadas pelo Exército Português utilizadas nos ensaios exploratórios para a quantificação da percentagem de energia transmitida através das blindagens: a) coletes anti-bala; b) escudo anti-tumulto.

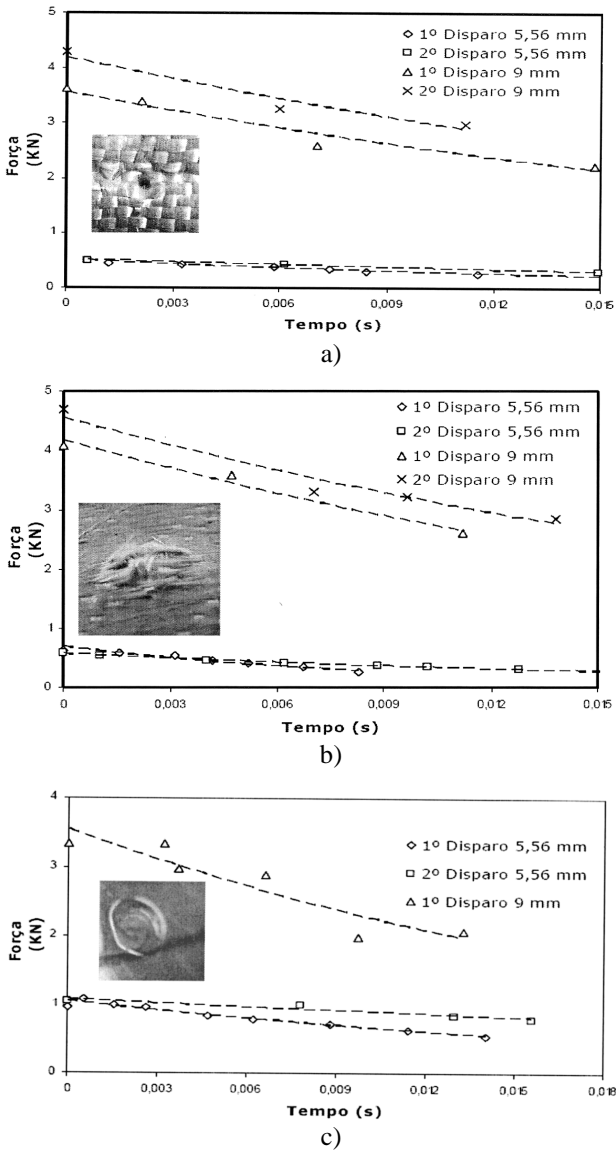


**Figura 7** - Evolução do impulso transmitido através da blindagem devido ao impacto do projectil de a) 9mm; b) 5.56mm.

Após análise dos resultados obtidos é possível verificar uma maior capacidade do Kevlar utilizado nos coletes anti-bala, tanto nas placas tácticas como nos tecidos do material de base, em absorver a força de impacto comparativamente com o policarbonato utilizado nos escudos anti-tumulto (Norma UNE-EN-1063, 2006). Relativamente aos projecteis utilizados, verifica-se que o projectil de calibre 9 mm tem uma força de impacto transmitida superior ao de 5.56 mm. Estes resultados fazem sentido considerando as funções a que cada um dos projecteis se destina. O projectil de calibre 9 mm destina-se a causar danos elevados a curtas distâncias (efeito derrubante) enquanto que o de 5.56 mm se destina a espingardas de assalto onde se pretende uma elevada capacidade de penetração a alcances elevados (efeito penetrante).

### Degradação das blindagens por múltiplos impactos

A ocorrência de impacto na mesma zona da protecção balística apresenta uma probabilidade de ocorrência relativamente baixa em condições de utilização real. No entanto, a possibilidade da sua ocorrência e o interesse científico na compreensão da degradação das blindagens quando solicitadas mais do que uma vez, motivou a realização de uma nova série de ensaios. Nesses ensaios foram disparados projecteis sobre o mesmo ponto das blindagens e observada a perda da capacidade de absorção de energia. A Figura 8 representa a onda de pressão transmitida para ambos os projecteis após o primeiro e o segundo tiro para blindagens de tecido de Kevlar, Kevlar táctil e policarbonato, respectivamente. Verifica-se uma maior fracção de energia transmitida do primeiro para o segundo impacto explicado pela degradação sucessiva das blindagens.



**Figura 8** - Evolução do impulso transmitido através da blindagem de a) tecido base de kevlar; b) placas táticas de kevlar; c) policarbonato; após os impactos dos projectéis de calibre 9 mm e 5.56 mm, com detalhe da blindagem após os múltiplos impactos de teste.

Esta degradação é no entanto diferente de blindagem para blindagem. No caso das blindagens de Kevlar (tecido de base e placas tácticas), verifica-se que estas apresentam excelentes capacidades de absorção comparativamente com o policarbonato quando sujeitas a um impacto do projectil de calibre 5,56 mm. Quanto ao impacto do projectil de calibre 9 mm, o comportamento da blindagem de policarbonato é ligeiramente melhor que as de Kevlar. Este comportamento pode ser explicado pelo facto do policarbonato empregue nos escudos anti-tumulto se destinar a receber impactos, não de projecteis, mas objectos contundentes de grandes dimensões e a baixas velocidades.

Ao analisar a energia transmitida pelo segundo impacto consecutivo no mesmo local nas blindagens, verifica-se que a perda de capacidade do kevlar é superior à do policarbonato. Tais resultados devem-se ao facto das blindagens de kevlar se destinarem a proteger o combatente de impactos de projecteis a elevadas velocidades (acima dos 650 m/s), daí a energia transmitida por estas blindagens ter sido tão reduzida, contudo estas não estão concebidas para receber um segundo impacto exactamente no mesmo local. Existe a preocupação constante do militar em evitar ser atingido. A menor degradação do policarbonato tem a ver com a aplicação prática a que se destina, receber vários impactos em qualquer local do escudo anti-tumulto.

Para obter a energia absorvida e transmitida procedeu-se ao cálculo por integração numérica das áreas contidas pelas ondas de pressão transmitidas. Na Tabela 1 é apresentada a fracção de energia transmitida pelas blindagens após os impactos realizados.

Blindagem		Calibre	
		5,56 mm	9 mm
Policarbonato	1.º Disparo	0,43	0,51
	2.º Disparo	0,48	
Kevlar base	1.º Disparo	0,17	0,55
	2.º Disparo	0,41	0,58
Kevlar placa	1.º Disparo	0,11	0,54
	2.º Disparo	0,21	0,70

**Tabela 1** - Fracção de energia transmitida pelas blindagens após os impactos realizados.

## 5. CONCLUSÕES

A realização deste trabalho permitiu mostrar que a técnica de Hopkinson pode ser aplicada com sucesso na avaliação do comportamento mecânico das blindagens balísticas, permitindo quantificar a energia remanescente, que não sendo absorvida pela blindagem é transmitida à pessoa ou equipamento. Os ensaios realizados permitiram igualmente mostrar os diferentes níveis de protecção entre as blindagens ensaiadas. Contudo estes ensaios exploratórios foram realizados para valores de energia cinética (10Joules) manifestamente abaixo da prática de tiro real, mas permitindo um melhor controlo/avaliação da metodologia em causa. Desta forma, serão realizados futuramente com este aparato experimental ensaios com energia na gama de tiro real.

Este trabalho permitiu ainda mostrar que os sistemas de impulsão electromagnética apresentam vantagens relativamente a outros sistemas de impulsão, nomeadamente uma boa repetibilidade para as mesmas condições de disparo, assim como, a ausência de ruído, libertação de fumos ou emissão de luz. Estes impulsadores electromagnéticos, devido às suas características auto-centrantes eliminam ainda o contacto do projectil com o cano da arma, tornando possível o disparo de estilhaços de forma directa. A unidade de potência desenvolvida e implementada permite regular com precisão a velocidade de disparo de qualquer projectil de armas ligeiras individuais.

## BIBLIOGRAFIA

- COSTA , J. A. M. (1996). Resistência de Materiais Compósitos ao Impacto Balístico, Tese de Doutorado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil.
- DAVIES, R.M. (1948). A critical study of the Hopkinson pressure bar, Philos, Trans. R. Soc., London, Reino Unido.
- KOLSKY, H. (1949). An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading, Proc. Phys. Soc., London, Reino Unido.
- KAISER, Michael Adam (1998). MSc Thesis, Advancements in the Split Hopkinson Bar Test, Virginia, Estados Unidos da América.
- LINDHOLM, U.S. (1971). High Strain Rate Testing, Part 1: Measurement of mechanical properties, techniques of metals research, Wiley Interscience, New York, Estados Unidos da América.
- Norma UNE-EN-1063 (2006). Blindagem transparente.
- STANAG 4569 (2004). Protection levels for occupants of logistic and light armoured vehicles, ed. 1, norma NATO.
- STANAG 4190 (1998). Test Procedures for Measuring Behind-Armour Effects of Anti-Armour Ammunition, norma NATO.
- SWANTEK, Steven David (2000). MSC Thesis, An Optical Method of Strain Measurement in the Split Hopkinson Bar, Virginia, Estados Unidos da América.

