

OPTIMIZAÇÃO DE UMA BLINDAGEM BALÍSTICA CERÂMICA/COMPÓSITO BASEADO NO MODELO ANALÍTICO DE FLORENCE

Francisco Procópio Batista Neto, franciskoneto.cg@gmail.com¹

Wanderley Ferreira de Amorim Junior, engenhariabrasileira@gmail.com²

¹Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil

² Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil

Resumo: A utilização de blindagem estrutural está em constante crescimento no mercado mundial, devido a necessidade de proteção nas diversas formas de conflito em várias regiões do planeta. O mercado balístico vem cada vez mais necessitando de maior eficiência das estruturas blindadas, aumentando ao máximo a resistência da blindagem com o menor peso possível, de tal premissa existem diversas metodologias para a otimização dessas estruturas, sendo tais: Métodos Analíticos, Numéricos e Experimentais. Sendo neste trabalho utilizado o método analítico de Florence para se atingir a otimização de uma blindagem duro-dútil com os materiais disponíveis em mercado. O método analítico de Florence foi desenvolvido em ambiente MatLab® para a posterior comparação entre as várias condições de análise a fim de se chegar a estrutura de blindagem mais eficiente. O método analítico utilizado tem seu foco na relação entre velocidade residual do projétil impactado com a densidade superficial da estrutura projetada. A utilização de um método como tal é o passo inicial para o projeto de uma blindagem balística, visto que a utilização de métodos numéricos tem início demasiadamente complexo e métodos experimentais são custosos e demandam tempo de desenvolvimento. Dito isto o método analítico é a melhor forma para se iniciar um projeto de blindagem, pois tal fornece informações importantes para a utilização dos métodos numéricos e reduz de forma significativa o número de experimentos realizados, assim consequentemente trazendo redução de custos e tempo demandado na fase final do desenvolvimento.

Palavras-chave: Blindagem, Balística, Florence, Modelo Analítico

1. INTRODUÇÃO

Durante toda a história, as blindagens evoluíram em paralelo com os armamentos, sendo desde as armas brancas utilizadas na Idade antiga até armamentos de fogo atuais de alto calibre e alto poder de destruição, e para cada qual foi desenvolvido uma blindagem a fim de se evitar os danos ou ao menos reduzi-los. Com essa ideia de desenvolvimento de blindagens, o mercado bélico vem procurando cada vez mais meios de tornar as blindagens eficientes e otimizadas, seja na sua resistência contra as possíveis agressões, ou seja, no seu baixo peso e custo agregado.

O mercado bélico, em específico o mercado de blindagens cerâmicas vêm apresentando uma crescente bastante significativa nas últimas duas décadas, porém de forma bem irregular e instável, tornando os riscos das empresas desse setor bastante altos, pois a demanda em tal área é bastante cíclica e aliada fortemente a fatores ligados a acontecimentos sociais, como guerras ou locais de extremo perigo a vida humana. A instabilidade em tal área dificulta muito o investimento em novos produtos e pesquisas, assim sempre se está procurando maneiras de se reduzir os custos do desenvolvimento de novas tecnologias em blindagens também com a finalidade de se reduzir custos na fabricação de tais blindagens.

Uma blindagem que vem tendo uma ampla utilização é a blindagem duro-dútil, já amplamente comprovada sua eficiência contra agressões de média e alta intensidade. No meio bélico de desenvolvimento de blindagens se tem convencionalmente a utilização como fase dura os materiais cerâmicos e como fase dútil a utilização de alumínio, aço ou materiais compósitos poliméricos reforçados por elementos fibrosos.

O princípio do impacto de um projétil é a transferência de sua quantidade de movimento, ou seja, quando o projétil é impactado ele perderá parte da sua massa e da sua velocidade em contato com o alvo, no qual há uma transferência de energia cinética na forma de calor e fratura na placa de apoio além, segundo Amorim (2002), da geração de uma onda mecânica de tensão que se propaga através do material-alvo muito mais rápida do que a própria velocidade de penetração do projétil.

A penetração e/ou perfuração de um material-alvo por um projétil é um fenômeno mecânico e térmico transiente de duração de milissegundos, sendo, portanto um fenômeno físico complexo. Na penetração o projétil entra no alvo, no entanto sem completar sua passagem através do corpo, enquanto que na perfuração o projétil passa através de toda a espessura da blindagem (Cardoso A. L. V. et al, 1999).

A velocidade de impacto é aquela velocidade primária do projétil quando o mesmo entra em contato com a blindagem e a velocidade residual é a velocidade apresentada pelo projétil após a perfuração da proteção balística. Já o limite balístico é a menor velocidade de impacto do projétil para que o mesmo apresente velocidade residual igual a zero, ou seja, para que haja apenas penetração do projétil na blindagem.

Partindo da necessidade de se desenvolver uma blindagem que garanta a proteção desejada com o menor peso atrelado, inúmeros pesquisadores e desenvolvedores formularam métodos para a otimização de blindagens, seja na forma analítica, numérica ou até experimental a fim de se chegar ao projeto de maior rendimento possível com as ferramentas e materiais disponíveis. Partindo de tal premissa, este trabalho irá utilizar a metodologia desenvolvida por Florence (1969) e melhor trabalhada por Ben-Dor et al. (2000) para chegar a um projeto de blindagem duro-dúctil utilizando cerâmica e material compósito otimizado apenas no campo analítico, com a finalidade de ser o primeiro passo para um projeto de blindagem mais consistente que utilize também os meios numéricos e experimentais futuramente.

Para se desenvolver uma blindagem de forma eficiente e confiável, foi necessário a compreensão do comportamento dos materiais cerâmicos e compósitos sob impacto balístico, destacando as particularidades do comportamento de cada material. Com o entendimento desse comportamento, pôde-se aplicar o modelo de Florence em métodos computacionais.

2. PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

O modelo desenvolvido é idealizado para um cilindro curto, com diâmetro igual ao diâmetro do projétil, simula o projétil impactando a superfície de fase dura de forma que irá gerar um cone de fratura, propagado até a superfície oposta onde se encontra a fase dúctil. Não haverá variação de massa no modelo em questão, visto que a massa do projétil unida com a massa da fase dura fragmentada será distribuída uniformemente na seção do cone de fratura, já a distribuição de velocidade estará associada a região de contato da interface projétil-fase dura, sendo no centro a maior velocidade e nas extremidades velocidades reduzidas, segundo Hetherington (1991), “À medida que o projétil penetra na cerâmica quebrada, a placa traseira dúctil deforma e absorve a energia cinética do impacto”. De acordo a Fig. 1 a seguir.

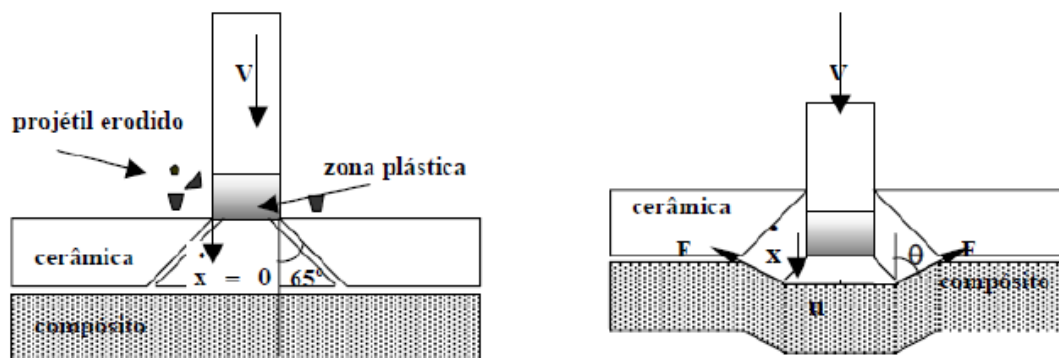


Figura 1. Mecanismo de impacto sob alta velocidade na blindagem cerâmica/compósito descrito por Torres (2005).

Tal modelo desenvolvido por Florence (1969) fornece algumas expressões relativamente simples para o cálculo das propriedades balísticas, principalmente da velocidade limite balística, que é uma medida da resistência da blindagem quanto a penetração. Tal modelo apresenta algumas outras limitações, sendo que as velocidades de impacto dos projéteis deverão ser sempre sub-hidrodinâmicas, ou seja, a velocidade de impacto do projétil nunca causará efeitos hidrodinâmicos nos materiais da blindagem, mesmo que se chegue muito próximo da sua ocorrência. Outra limitação apresentada pelo modelo é de que a relação entre o comprimento do projétil e o diâmetro do mesmo deve ser pequena, limitada em $L/D < 20$.

Os projéteis escolhidos para o estudo analítico são utilizados em fuzis, como o M107, ou em metralhadoras de grande porte que comumente utilizam os projéteis de calibre 0.50”.

Para a escolha dos materiais cerâmicos e dos compósitos se levaram em conta alguns fatores, sendo eles: A disponibilidade dos mesmos no mercado local ou regional sob preços acessíveis, as suas utilizações em aplicações que sofram impactos ou principalmente impactos balísticos e por fim, a possibilidade de se trabalhar com tais materiais futuramente nos laboratórios disponíveis, tais materiais são apresentados nas Tab. 1 e 2 a seguir.

Tabela 01. Cerâmicas utilizadas no estudo analítico

Nomenclatura	Al ₂ O ₃ (Alumina)	SiC (Carbeto de silício)	B ₄ C (Carbeto de Boro)
Densidade (g/cm ³)	3,84	3,15	2,44
Módulo de Young (GPa)	229,25	410,00	445,00
Dureza Vickers (HV)		2050,00	2800,00
Tensão de Escoamento (GPa)	7,50	5,86	8,00
Tensão de Escoamento – Fraturada (GPa)	2,82	2,82	2,82
Velocidade da onda na cerâmica	10000	11409	14500

Tabela 02. Reforços fibrosos utilizados no estudo analítico

Nomenclatura	Fibra de Aramida	Fibra de Vidro	Fibra de Carbono
Densidade do Compósito polimérico (g/cm ³)	1,98	2,54	1,82
Módulo de Young (GPa)	67,00	72,40	235,00
Elongação (%)	3,70	4,80	1,50
Tensão limite de Resistência (GPa)	1,00	3,45	3,55

Partindo das propriedades dos materiais utilizados e das condições iniciais aplicadas referentes ao projétil impactado, será otimizada a blindagem balística desejada quanto a espessura do compósito, considerando a espessura do material compósito fixo para assim ter-se um comparativo sobre qual seria a melhor espessura deste compósito para a aplicação na blindagem estrutural, partindo disso utilizou-se o material compósito como um termo fixo e o material cerâmico como um termo variável como ponto de partida para a otimização da blindagem.

Considerou-se uma blindagem constituída por uma placa de cerâmica Alumina frontal com uma placa de compósito polimérico reforçado por fibra de Aramida traseira. A análise foi feita variando a espessura da cerâmica entre 0mm e 40mm para cada condição, as condições empregadas nessa análise estão de acordo com a espessura do compósito no qual existem três espessuras de compósito diferentes e comparando as condições entre si, dever-se-á selecionar aquela que apresenta a velocidade residual nula com a menor densidade superficial e assim ter-se-á a espessura ótima da placa compósita.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A blindagem analisada inicialmente de acordo com o modelo desenvolvido por Florence é composta com uma placa frontal de material cerâmico e uma placa traseira de material compósito. A cerâmica utilizada foi a Alumina (Al₂O₃) e o compósito utilizado foi o Compósito polimérico reforçado por fibra de Aramida, ou simplesmente Kevlar. As propriedades de cada material podem ser encontradas anteriormente.

O projétil utilizado no estudo analítico do impacto balístico foi o US BALL M 33. Para se chegar as dimensões das camadas de material cerâmico e compósito que garantam a eficiência desejada, ou seja, as menores dimensões possíveis para que a blindagem não apresente perfuração em sua estrutura aplicou-se o método em questão a fim de se obter o valor da espessura do compósito.

A configuração de análise está demonstrada na Fig. 2 a seguir, na qual fixou-se a espessura do material compósito em 5mm, 8mm e 10mm (**Cota h2**) e na análise de cada espessura do compósito fixada, variou-se a espessura da cerâmica entre 0mm e 40mm (**Cota h1**).

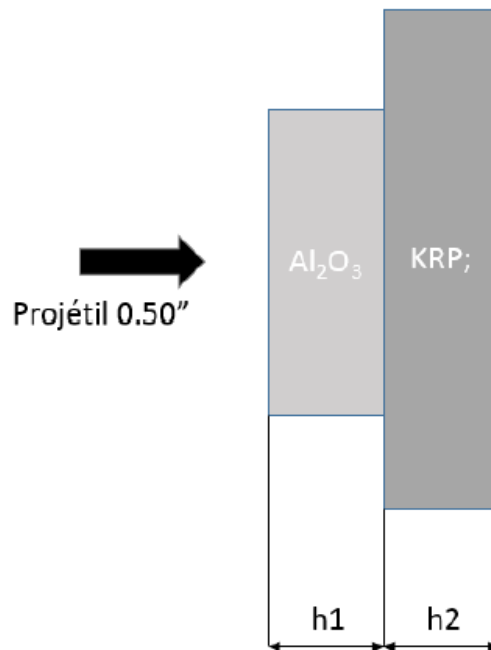


Figura 02. Blindagem Alumina/Aramida sem espessuras definidas

Com os valores de entrada já conhecidos assim como as condições a serem analisadas, foram realizados os estudos analíticos necessários e com tal pode-se fazer alguns comparativos entre as três condições analisadas.

A seguir na Fig. 3 temos uma relação entre a densidade superficial de cada condição de análise em função da espessura da placa cerâmica.

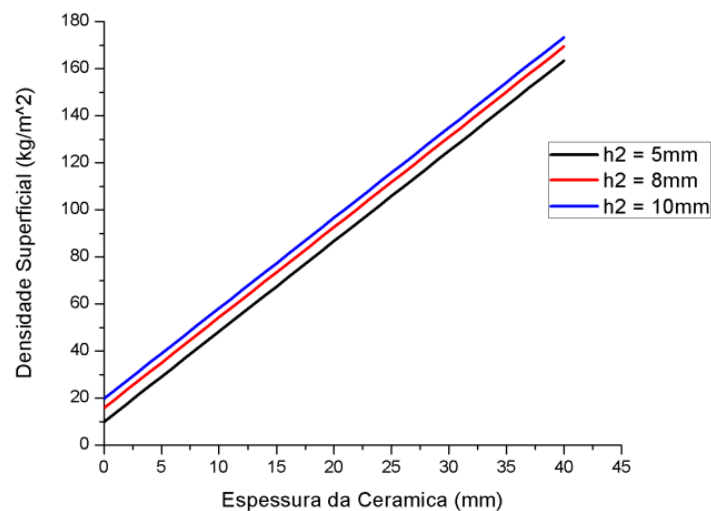


Figura 03. Curva de densidade superficial x espessura da cerâmica

Na Fig. 3 vemos a influência da espessura da cerâmica na densidade superficial da blindagem, visto que o valor da espessura do compósito será fixo em cada condição, portanto, podemos concluir que para se ter a menor densidade superficial permissível dever-se-á ter o menor valor da espessura da cerâmica possível que garanta a velocidade residual igual a zero, ou seja, que garanta apenas a penetração do projétil sem a perfuração do mesmo.

Nas Fig. 4 e 5 posteriores pôde-se relacionar o crescimento da velocidade limite balística e o decrescimento da velocidade residual do projétil com o aumento da espessura da cerâmica.

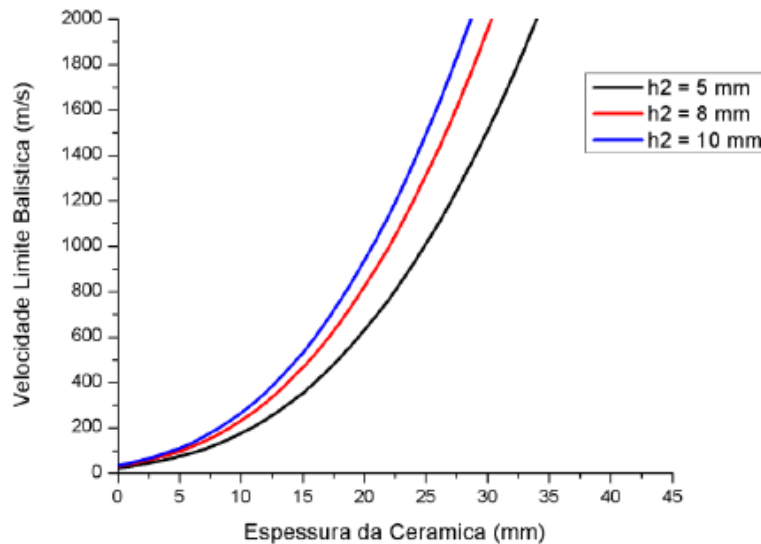


Figura 04. Curva Velocidade Limite Balística x Espessura da Cerâmica

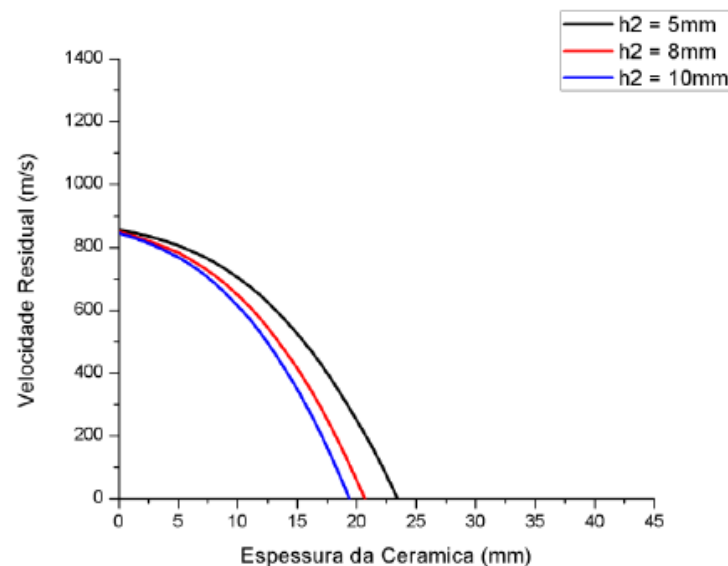


Figura 05. Curva Velocidade Residual x Espessura da Cerâmica

De acordo com as figuras anteriores, podemos ver que blindagens com uma espessura de compósito maiores geram um crescimento mais suave da espessura da cerâmica, assim, quando se aumenta a espessura do compósito se alcança espessuras de cerâmica menores. Portanto, quão mais se aumentar as espessuras da cerâmica, maior será a velocidade limite balística e menor será a velocidade residual do projétil, portanto, deve-se achar a melhor relação de espessura cerâmica-compósito que traga a menor densidade superficial, com isso reduzindo peso, custos e material utilizado no projeto da blindagem sem reduzir a eficiência desejada.

Com tal, tem-se que para uma espessura do compósito de **5mm** ter-se-á uma espessura da camada cerâmica de **23,45mm**, já para uma espessura da placa compósita de **8mm** a espessura da cerâmica otimizada será de **20,61mm** e por fim, para a espessura de **10mm** ter-se-á uma espessura da placa cerâmica de **19,31mm**.

Com as espessuras das camadas definidas e conhecendo-se previamente as massas específicas de ambos os materiais, poderemos comparar as densidades superficiais a partir do gráfico de densidade superficial x espessura da cerâmica descrito anteriormente.

Sintetizando a análise realizada, temos a Tab. 3 a seguir que traz as 3 análises sob as mesmas condições, porém variando apenas a espessura do compósito.

Tabela 03. Relação entre espessuras com a densidade superficial

Análise	Espessura – compósito	Espessura – cerâmica	Densidade Superficial
	(mm)	(mm)	(kg/m ²)
1	5,00	23,45	99,95
2	8,00	20,61	94,98
3	10,00	19,31	93,95

De acordo com a tabela anterior, quão maior a espessura do compósito menor será a densidade superficial, então de acordo com as condições analisadas, conclui-se que a **condição 03** é aquela que apresenta o menor peso específico, ou seja, tal condição atenderá o critério de projeto do projétil não possuir velocidade residual após o impacto com o menor peso possível.

4. CONCLUSÃO

A utilização do método de Florence se mostrou de forma satisfatória com os objetivos traçados, que seria a aplicação de um modelo analítico na predição de um projeto de blindagem balística, caracterizando-se por ser o primeiro passo no desenvolvimento do mesmo. Comparando a variação de espessura da camada cerâmica e da camada compósita, concluiu-se que a alteração de ambas isoladamente causa redução ou aumento na velocidade limite balística e consequentemente, o efeito inverso na velocidade residual.

Gálvez (1998) também utilizou o modelo de Florence nas suas análises, porém desta vez ele utilizou como critério de projeto a fixação do valor da camada cerâmica em 6,35mm, no qual a cerâmica era especificada como uma Alumina com 85% de pureza. Assim, houve a variação da espessura da camada de material compósito Kevlar 29, no qual com o aumento da espessura da placa traseira, houve o aumento da velocidade limite balística, assim como esperado. Considerando uma espessura de 12mm para a camada compósita, a velocidade limite balística seria de aproximadamente 300 m/s, valor relativamente baixo em comparação a configurações atingidas em outras aplicações do Modelo de Florence, isso demonstra que um aumento na espessura do material cerâmico resulta em um aumento significativo na velocidade limite balística.

De acordo com as análises realizadas, o projétil M33 variará a sua velocidade de impacto de 880 m/s até 0 m/s em 27,3µs considerando uma blindagem com espessura total de 24 mm, se mostrando mais eficiente do que predições de Gálvez (1998) que chegou a um tempo inferior a 20µs para a variação de 900m/s até 530m/s utilizando um projétil 7.62mm em uma blindagem de Alumina e Kevlar com apenas 30 kg/m² de densidade superficial.

Diante de tudo, o modelo analítico empregado atingiu o resultado esperado, visto que o objetivo era de se otimizar analiticamente uma estrutura de blindagem a partir de materiais selecionados previamente.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela BCA Ballistic Protection, que ofereceu todo subsídio necessário para o desenvolvimento do mesmo.

6. REFERÊNCIAS

- AMORIM, W. F. J. **Estudo de um compósito para blindagem balística**. 2002. 147f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.
- BEN-DOR, G.; DUBINSKY, A.; ELPERIN, T.; FRAGE, N. **Optimization of two component ceramic armor for a given impact velocity**. Theoretical and applied Fracture Mechanics, v. 33, p. 185-190, 2000.
- BENLOULO, I. S. C.; SÁNCHEZ-GALVÉZ, V. **A new analytical model to simulate impact onto ceramic/composite armors**. Int. J. Impact Engng, Great Britain, v. 21, n. 06, p. 461-471, jan./1998.
- DA SILVA, M. V.; STAINER, D.; AL-QURESHI, H. A.; HOTZA, D. **Blindagens cerâmicas para aplicação balística: uma revisão**. Cerâmicas, v. 60, p. 323-331, 2014.
- FLORENCE, A. L. **Interaction of projectiles and composite armor. Part II**. California. Stanford Research Institute, 1969.
- HETHERINGTON, J. G.; RAJAGOPALAN, B. P. **An investigation into the energy absorbed during ballistic perforation of composite armours**. Int. J. Impact Engng, Great Britain, v. 11, n. 01, p. 33-40, ago./1991.
- SÁNCHEZ-GÁLVEZ, V.; DÍAZ-RUBIO, F. **Ballistic impact on ceramic/composite armours**. WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering, v. 32, p. 673-681, 1998.
- TORRES, M. F. C. **Simulação do desempenho balístico de blindagem mista cerâmica/compósito**. 2005. 95f. Dissertação de mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”

OPTIMIZATION OF A CERAMIC BALLISTIC / COMPOSITE BASED ON THE ANALYTICAL FLORENCE MODEL

Francisco Procópio Batista Neto, francisconeto.cg@gmail.com¹

Wanderley Ferreira de Amorim Júnior, engenhariabrasileira@gmail.com²

¹Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil

² Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil

Abstract. *The use of structural shielding is constantly growing in the world market due to the need for protection in the various forms of conflict in various regions of the planet. The ballistic market is increasingly requiring greater efficiency of the armored structures, increasing to the maximum the resistance of the armor with the lowest possible weight, of such premise there are several methodologies for the optimization of these structures, such as: Analytical, Numerical and Experimental Methods. In this work, Florence's analytical method was used to achieve the optimization of a hard-ductile shield with the materials available in the market. The Florence analytical method was developed in MatLab® environment for the subsequent comparison between the various analysis conditions in order to reach the most efficient shielding structure. The analytical method used focuses on the relation between the residual velocity of the impacted projectile and the surface density of the projected structure. The use of such a method is the initial step for the design of a ballistic shield, since the use of numerical methods starts too complex and experimental methods are costly and time consuming to develop. That said the analytical method is the best way to start a shielding project, as this provides important information for the use of numerical methods and significantly reduces the number of experiments performed, thus consequently reducing cost and time demanded in the phase development.*

Keywords: *Shielding, Ballistics, Florence, Analytical Model*