

## INFLUÊNCIA DA BANDA DE CISALHAMENTO ADIABÁTICO NA RESISTÊNCIA DE UMA BLINDAGEM DE ALTA DUREZA \*

Ricardo Pondé Weber<sup>1</sup>  
Andersan Santos de Paula<sup>2</sup>  
Sergio Neves Monteiro<sup>3</sup>  
João Carlos Miguez Suarez<sup>4</sup>  
Suzane de Sant' Ana Oliveira<sup>5</sup>  
Elson Renato Santos Souza<sup>6</sup>

### Resumo

O objetivo desse estudo é correlacionar a diminuição da resistência balística de um aço de alta dureza (HHA – High Hardness Armor), produzido no Brasil, com as mudanças microestruturais devido ao impacto balístico. Os resultados sugerem que essa diminuição está relacionada ao surgimento da banda de cisalhamento adiabático (ASB – Adiabatic Shear Bands) com uma dureza maior que a do material original, o que produz trincas e conseqüentemente diminui a resistência balística do aço.

**Palavras-chave:** Blindagem metálica; Impacto balístico; Banda de cisalhamento adiabático; Caracterização microestrutural.

### INFLUENCE OF ADIABATIC SHEAR BANDS ON THE BALLISTIC RESISTANCE OF HIGH HARDNESS ARMOR STEEL

#### Abstract

The objective of this study is to correlate the decrease in the ballistic resistance of a high hardness armor (HHA) steel, made in Brazil, with microstructural changes due to ballistic impact. The results suggest that this decrease is associated with the appearance of adiabatic shear bands (ASB) with higher hardness than the original material, which introduce cracks and thus decrease the ballistic resistance of the steel.

**Keywords:** Armor steel; Ballistic impact; Adiabatic shear band; Microstructural characterization.

<sup>1</sup> Engenharia Mecânica, Doutor, Professor do curso de Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheira Metalurgista, D.Sc, Professora Adjunta do PGCM e da Graduação, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, Ph.D, Professor titular, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>4</sup> Engenharia Industrial e de Metalurgia, Doutor em Ciência e Tecnologia dos Polímeros, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>5</sup> Tecnologia em Processos Metalúrgicos, Mestre, Doutoranda em Ciência dos Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>6</sup> Engenharia de Materiais, Mestre, Engenheiro de Pesquisa e Desenvolvimento de Blindagens, Departamento de Ciência e Tecnologia, Exército Brasileiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A seleção de materiais para proteção balística depende da aplicação pretendida e do desempenho desejado. Possíveis opções incluem materiais metálicos, não metálicos e compostos [1-4]. Embora compósitos leves tenham sido desenvolvidos para usos como coletes, capacetes e aeronaves, os aços ainda são os materiais mais usados da indústria de blindagens, especialmente para proteção de veículos militares, devido à sua alta resistência balística e baixo custo [5-9].

Entre os aços, aqueles com alta dureza são os mais adequados para a proteção balística de munições perfuradas, uma vez que não permitem a perfuração da blindagem e não produzem fragmentação devido ao impacto [10]. No entanto, a dureza não deve atingir valores que produzam fragilização.

Ensaio balísticos são realizados para classificar o nível de proteção do material, medindo a energia de impacto, a velocidade limite (V50) e o modo de perfuração, Perfuração Parcial (PP) ou Perfuração Completa (CP) [11]. Durante esses ensaios, conforme relatado na seção a seguir, foram observadas inconsistências entre a energia de impacto e a resistência balística do material. Em alguns ensaios, a penetração foi apenas parcial, apesar de a energia de impacto ter sido maior do que em outros ensaios onde penetração completa foi observada. Estes resultados foram a força motriz deste estudo; a análise por microscopia eletrônica de varredura (SEM) e o ensaio por microindentação Vickers foram utilizados para investigar se as mudanças microestruturais associadas ao impacto poderiam ser responsáveis pela inconsistência [12].

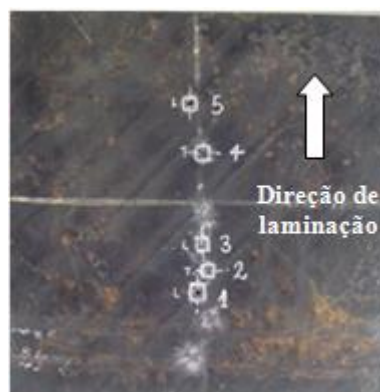
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado nesse estudo foi um aço de alta dureza (HHA – High Hardness Armor) produzido de acordo com a norma MIL-DTL-46100E, para uso em veículos militares, em chapas de 8 mm de espessura, temperadas e revenidas.

O ensaio de dureza por microindentação Vickers foi realizado em uma máquina Zwick Roell Indent com carga de 0,5 kgf. O aço HHA possuía uma dureza média de 426 HV.

Os ensaios balísticos foram realizados de acordo com a norma MIL-STD-662F [13], com a munição 7,62 x 51 mm perfurante (9,6 g), a uma distância de 15 m e 0° de obliquidade. A distância entre os impactos balísticos foi de pelo menos 3 cm.

A Figura 1 apresenta cinco impactos na blindagem, após o ensaio balístico.



**Figura 1.** Face frontal da blindagem após o impacto balístico.

As amostras metalográficas foram preparadas de acordo com a norma ASTM E-407 [14] e analisadas por MEV.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Ensaio balístico

A Tabela 1 apresenta as condições dos ensaios balísticos e as classificações de impacto de acordo com os resultados da perfuração: Penetração completa (PC) e Penetração Parcial (PP).

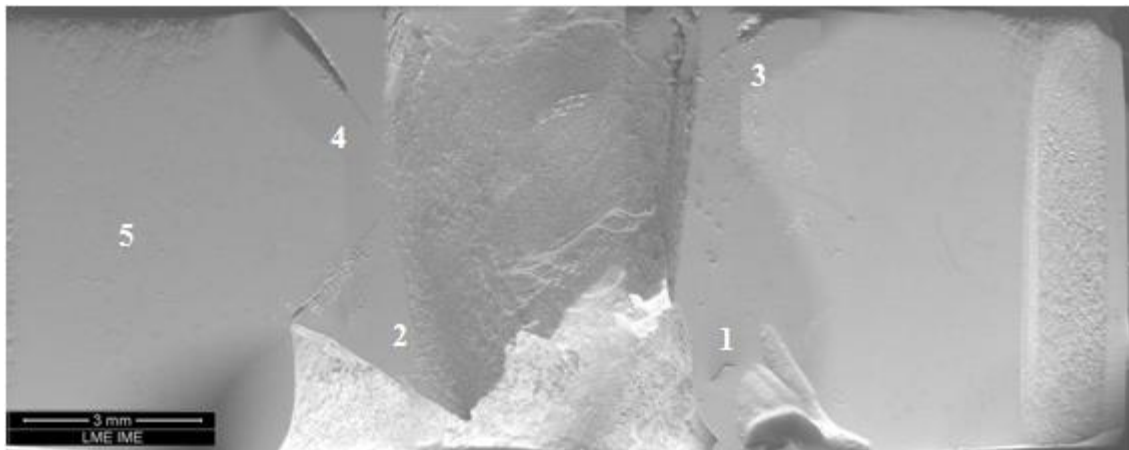
**Tabela 1.** Ensaio balístico.

Material	Munição	Número da amostra	Energia de impacto (J)	Velocidade de impacto (m/s)	Resultados
Aço HHA 8,00 mm	7.62 Perf	1	1348.32	530	PC
		2	1505.28	560	PP
		3	1384.17	537	PP
		4	1559.52	570	PC
		5	1941.58	636	PC

Conforme apresentado na tabela 1, embora os impactos nas amostras 1 e 3 tenham aproximadamente a mesma energia, o primeiro sofreu Penetração Completa (CP), enquanto o segundo sofreu somente Penetração Parcial (PP). Além disso, o impacto na amostra 2 apresentou uma energia maior do que os impactos nas amostras 1 e 3, mas produziu apenas uma PP. Essas inconsistências foram a motivação para estudar os mecanismos que produziram a diminuição da resistência balística.

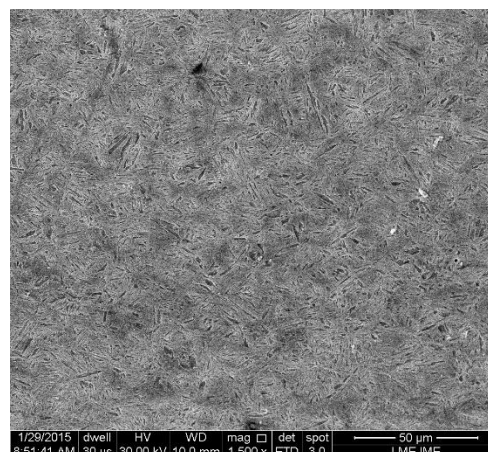
#### 3.2 Análise metalográfica

A Figura 3 apresenta a macrografia da superfície transversal da amostra 1 (CP), mostrando as cinco regiões que foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Pode-se observar uma deformação plástica severa na face de impacto e na face distal, bem como a cratera produzida pelo projétil.



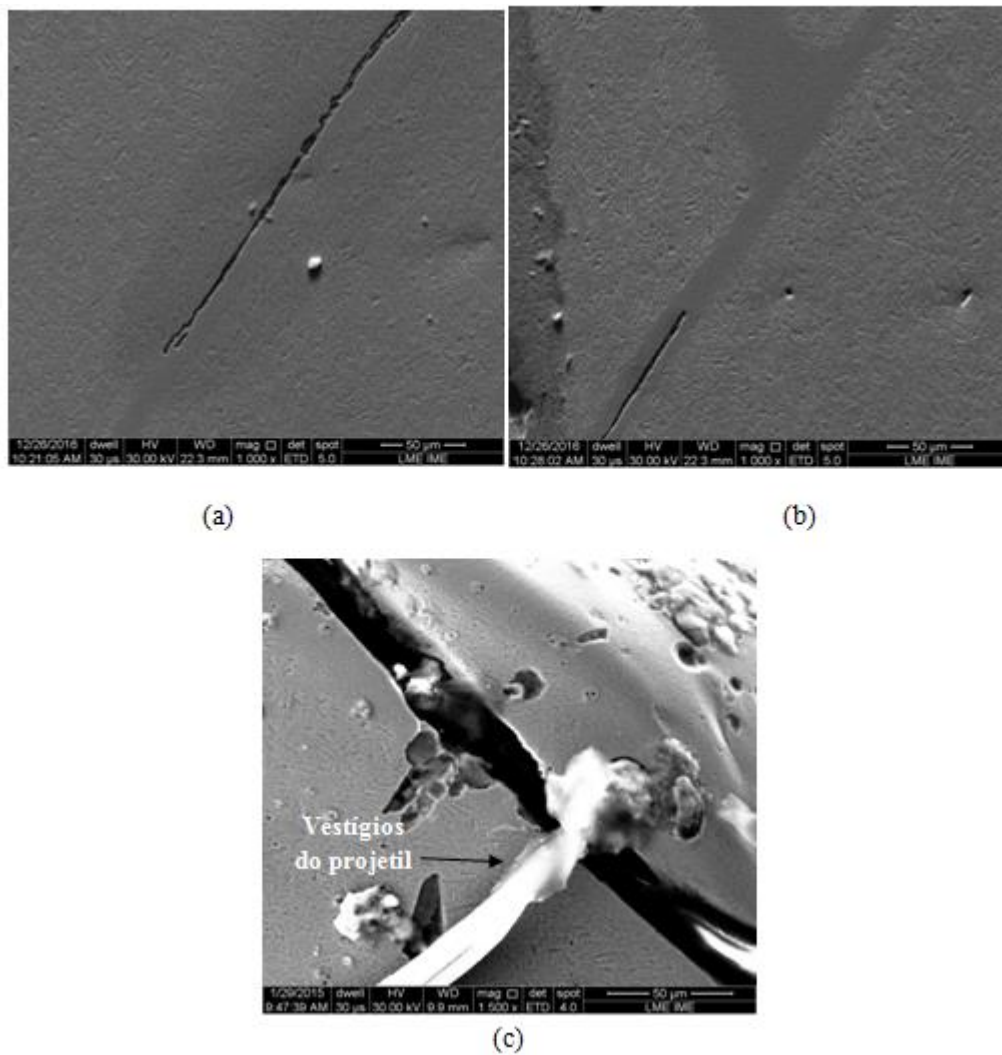
**Figura 3.** Macrografia das regiões em torno do impacto na amostra 1.

A Figura 4 mostra a imagem por MEV da região 5, distante da perfuração. A microestrutura é a de martensita temperada, consistente com o tratamento térmico realizado.



**Figura 4.** Micrografia da região 5 da amostra 1.

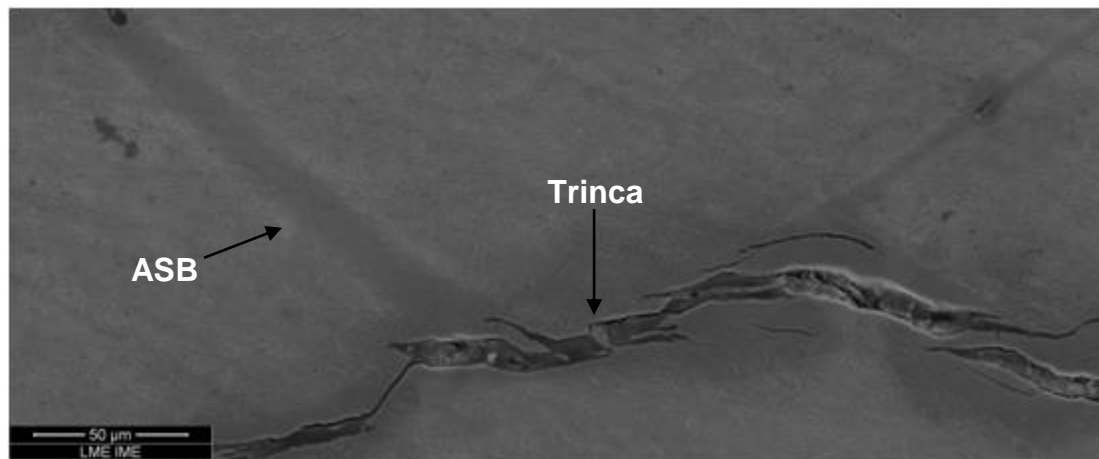
A Figura 5 apresenta micrografias das regiões 1, 2 e 3, perto da perfuração, influenciadas pela alta taxa de deformação produzida pelo impacto. Em todas essas regiões, pode-se ver bandas de cisalhamento adiabático (ASB – Adiabatic Shear Band).



**Figura 5.** Microfotografias de três regiões da amostra 1: (a) região 1; (b) região 2 e (c) região 3 (1500x).

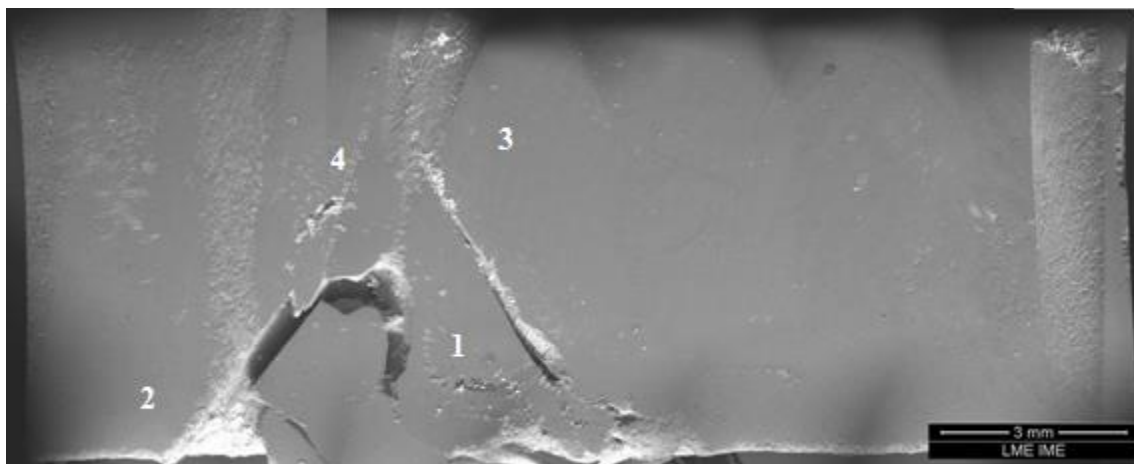
As Figuras 5a e 5b apresentam microfotografias das regiões 1 e 2, próximas ao impacto, onde ocorre a maior parte da energia de impacto. A Figura 5c mostra a região 3, perto da face distal.

A Figura 6 mostra a região 4 no meio da placa. Pode-se observar a nucleação de uma trinca em um ASB primária e sua propagação ao longo das bandas secundárias. Em todas as regiões próximas da perfuração, pode-se observar trincas no interior das bandas, sugerindo que elas são mais frágeis do que a martensita revenida [15, 16].



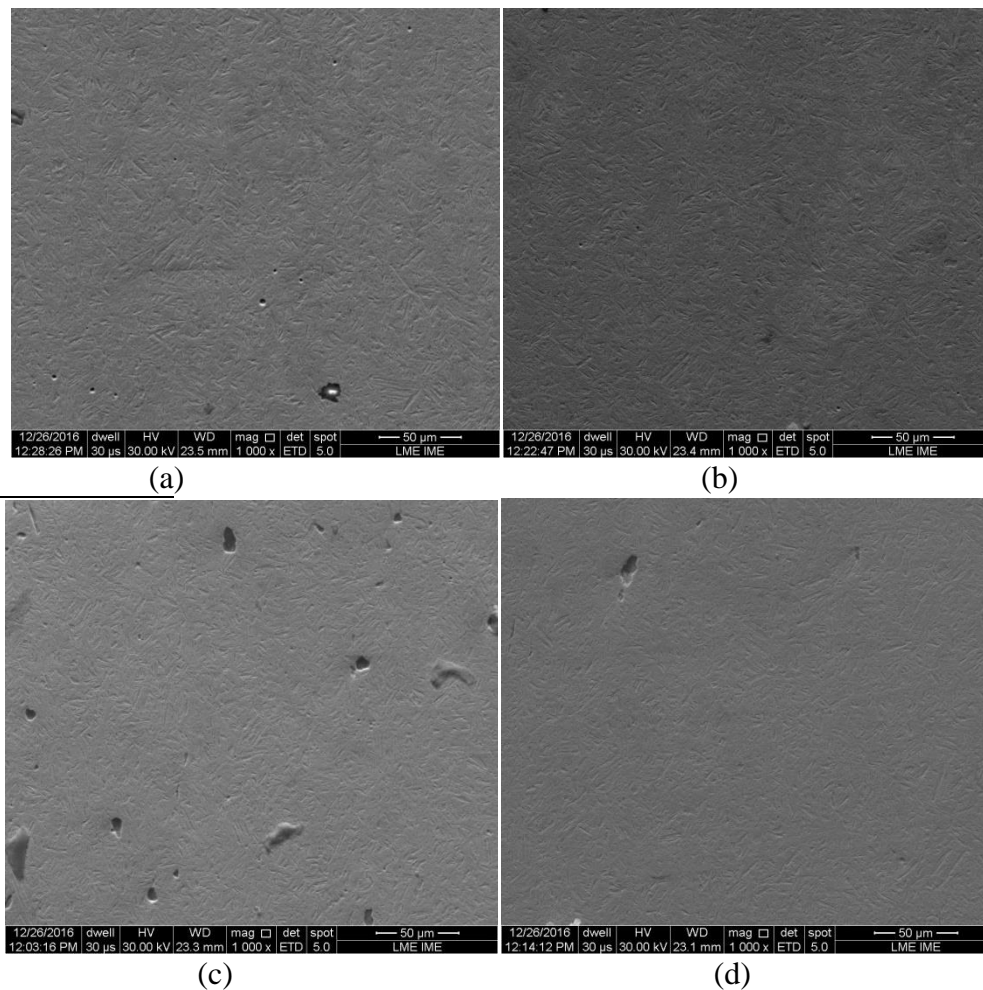
**Figura 6.** Microfotografia da região 4 do impacto 1.

A Figura 7 apresenta a macrografia da superfície transversal da amostra 3 (PP), mostrando as quatro regiões diferentes que foram analisadas por MEV.



**Figura 7.** Macrografia das regiões em volta do impacto na amostra 3.

A Figura 8 apresenta as microfotografias das regiões 1, 2, 3 e 4 da amostra 3.

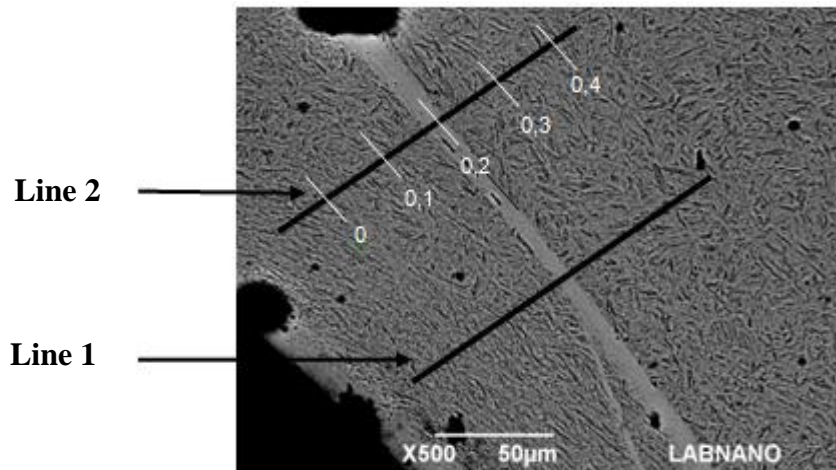


**Figura 8.** Microfotografias de 4 regiões da amostra 3: (a) região 1; (b) região 2; (c) região 3 e (d) região 4.

As figuras 8a e 8b apresentam as microfotografias das regiões 1 e 2 da amostra 3, próximas à face de impacto. Figs. 8c e d mostram as microfotografias das regiões 2 e 4, próxima ao fim da penetração do projétil. ASBs não são observadas em nenhuma dessas imagens.

### 3.3 Perfil de dureza Vickers (HV)

A Figura 9 apresenta duas regiões, em diferentes posições, em relação a ASB (linhas 1 e 2) na amostra 1, selecionadas para perfis de dureza Vickers.



**Figura 9.** Posições das linhas relativas a uma ASB da amostra 1.

A Tabela 2 mostra os perfis de dureza Vickers para estas duas linhas.

**Tabela 2.** Perfil de dureza Vickers hardness profiles nas linhas 1 e 2 apresentadas na Figura 9.

Posição	Microindentação Vickers (HV)	
	Linha 1	Linha 2
0	405	426
0.1	404	436
<b>0.2</b>	<b>472</b>	<b>489</b>
0.3	430	457
0.4	440	449

De acordo com a Tabela 2, a região ASB possui uma dureza maior que a da matriz (martensita revenida) e, portanto, mais frágil. Essa fragilidade pode favorecer o surgimento de trincas no interior da banda, diminuindo a resistência balística [17-20].

#### 4 CONCLUSÃO

Os ensaios balísticos das amostras 1 e 3 apresentaram penetração completa e parcial, PC e PP, respectivamente, com aproximadamente a mesma energia de impacto. As regiões em volta da cratera produzida pelo projétil na amostra 1 apresentaram bandas de cisalhamento adiabático, as quais não foram observadas na amostra 3. Possivelmente, o surgimento da ASB no impacto balístico está relacionado a microsegregação de impurezas e elementos de liga, indicando a necessidade de um melhor processo de refino do aço. A maior dureza dentro das regiões da ASB, conforme demonstrado pelo ensaio de dureza por microindentação Vickers, foi provavelmente o motivo das trincas observadas nas microfotografias e pelo enfraquecimento que levou a uma penetração completa. Assim, a presença de ASB e trincas parece estar associada à redução da resistência balística, levando a uma penetração completa da blindagem.



## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Exército brasileiro e às agências brasileiras CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico e Científico - concessão nº 140142 / 2016-9), CAPES (Coordenação para Melhoramento de Nível Superior ou Pessoal de Educação) e FAPERJ (Carlos Chagas Filho Fundação para Amparo para Pesquisa no Estado do Rio de Janeiro) por patrocinar esta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

1. Weber, RP, KK Chawla, and JC Miguez Suarez. "Influence of notch orientation and temperature on the impact behavior of a dual hardness steel composite. *Materials Science and Engineering:A*. 2013; 580: 279-287.
2. Souza ERS. Estudo do comportamento microestrutural e balístico de um aço de blindagem após soldagem. Dissertação, Instituto Militar de Engenharia (2014).
3. Hazell, PJ The development of armour materials. *Military Technology*. 2006; 30: 54.
4. Monteiro SN, Candido VS, Braga FO, Bolzan LT, Weber RP, & Drelich JW. Sugarcane bagasse waste in composites for multilayered armor. *European Polymer Journal*. 2016; 78: 173-185.
5. Übeyli, M, Demir, T, Deniz, H, Yıldırım, RO, & Keleş Ö. Investigation on the ballistic performance of a dual phase steel against 7.62 mm AP projectile. *Materials Science and Engineering: A*. 2010; 527: 2036-2044.
6. Jena PK, Mishra B, RameshBabu M Babu A, Singh AK, Sivakumar K, & Bhat, T. B.. Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of a high strength armour steel. *International Journal of Impact Engineering*. 2010; 37:242-249.
7. Boakye-Yiadom S, Khan A K, & Bassim N . A systematic study of grain refinement during impact of 4340 steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2014; 605:270-285.
8. Trajkovski J, Kunc R, Pepel V, & Prebil, I. Flow and fracture behavior of high-strength armor steel PROTAC 500. *Materials & Design*. 2015; 66:37-45.
9. Ryan S, Li H, Edgerton M, Gallardy D, & Cimpoeru, S. J. The ballistic performance of an ultra-high hardness armour steel: An experimental investigation. *International Journal of Impact Engineering*. 2016; 94:60-73.
10. Kılıç, N., Bedir, S., Erdik, A., Ekici, B., Taşdemirci, A., & Güden, M.. Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile. *Materials & Design*. 2014; 63:427-438.
11. UNITED STATE DEPARTMENT OF ARMY. Norma MIL-DTL-46100E (MR), Amendment 1, Detail Specification Armor Plate, Steel, Wrought, High Hardness, 2008.
12. Zhang B, Shen W, Liu Y, & Zhang R. Some factors influencing adiabatic shear banding in impact wear. *Wear*. 1998; 214:259-263.
13. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS Norma E-407 – Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, 2011.
14. UNITED STATE DEPARTMENT OF ARMY. Norma MIL-STD-662F - V50 Ballistic Test for Armor, 1997
15. Odeshi AG, Al-Ameeri S, Mirfakhraei S, Yazdani F, & Bassim MN. Deformation and failure mechanism in AISI 4340 steel under ballistic impact. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2006; 45:18-24.
16. Odeshi AG, Bassim MN, & Bolduc M. Damage mechanism in high hardness armor (HHA) steel subjected to V50 ballistic impact. In *DYMAT-International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading*. 2009; 1:563-567.
17. Murr LE, Ramirez AC, Gaytan SM, Lopez MI, Martinez EY, Hernandez D H, & Martinez E. Microstructure evolution associated with adiabatic shear bands and shear band failure in

ballistic plug formation in Ti-6Al-4V targets. *Materials Science and Engineering: A*. 2009; 516:205-216.

18. Boakye-Yiadom, S., & Bassim, M.N. Effect of prior heat treatment on the dynamic impact behavior of 4340 steel and formation of adiabatic shear bands. *Materials Science and Engineering: A*. 2011; 528:8700-8708.

19. Boakye-Yiadom, S., & Bassim, N. Effect of heat treatment on stability of impact-induced adiabatic shear bands in 4340 steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2012; 546:223-232.

20. Yiadom, S. B., Khan, A. K., & Bassim, N. (2014). Effect of microstructure on the nucleation and initiation of adiabatic shear bands (ASBs) during impact. *Materials Science and Engineering: A*. 2014; 615:373-394.