

ESTUDO DO APORTE TÉRMICO DE SOLDAGEM NO COMPORTAMENTO BALÍSTICO DE UM AÇO DE ALTA DUREZA (HHA – HIGH HARDNESS ARMOR)*

Elson Renato Santos Souza¹
Ricardo Pondé Weber²
João Carlos Miguez Suarez³
Sergio Neves Monteiro⁴
Suzane de Sant' Ana Oliveira⁵

Resumo

Foi estudado a influência do aporte térmico, de soldagem, sobre a resistência balística de um aço de alta dureza (HHA) temperado e revenido (HHA), utilizando o processo de soldagem a arco. O aço HHA, temperado e revenido, foi caracterizado por análise metalográfica, ensaios mecânicos e ensaios balísticos. Os resultados mostram que o aporte térmico da soldagem teve influência significativa nas propriedades mecânicas da Zona de Fusão (ZF) e da Zona Termicamente Afetada (ZTA), ocasionando mudanças na resistência balística. O melhor desempenho balístico do material soldado foi obtido para a soldagem de baixo aporte térmico.

Palavras-chave: Blindagem de aço; Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW); Zona de fusão (ZF); Zona termicamente afetada (ZTA).

EFFECT OF WELDING HEAT ON THE BALLISTIC RESISTANCE OF A HIGH HARDNESS ARMOR (HHA) STEEL

Abstract

A study was carried out to evaluate the influence of the amount of welding heat on the ballistic resistance of a Brazilian quenched and tempered (Q&T) high hardness armor (HHA) steel welded by an arc-welding method. The Q&T HHA steel was characterized by metallographic examination, mechanical tests and ballistic tests. The results showed that the amount of welding heat had a significant influence on the mechanical properties of the fusion zone (FZ) and the heat-affected zone (HAZ), leading to changes in the ballistic resistance. The best ballistic performance was observed for the least heat input.

Keywords: Armor steel; Shielded metal arc welding (SMAW); Fusion zone (FZ); Heat affected zone (HAZ).

¹ Engenharia de Materiais, Mestre, Engenheiro de Pesquisa e Desenvolvimento de Blindagens, Departamento de Ciência e Tecnologia, Exército Brasileiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² 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.

³ 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.

⁴ Engenheiro Metalurgista, Ph.D, Professor titular, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

⁵ 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.

1 INTRODUÇÃO

Os aços utilizados como blindagem balística requerem alta dureza, para evitarem a penetração nas blindagens, bem como uma boa tenacidade, para evitar o estilhaçamento do mesmo, após o impacto [1]. O meio para alcançar ambas as propriedades, além de um tratamento térmico, é adicionar elementos de liga que aumentam a capacidade de endurecimento do material [2]. No caso dos aços de alta dureza (HHA), os principais aditivos químicos são cromo, níquel e molibdênio. No entanto, o aporte térmico durante a soldagem pode alterar significativamente as propriedades mecânicas do material, possivelmente comprometendo a proteção balística [3-6].

As propriedades de um aço HHA foram estudadas para dois tipos de aportes térmicos de soldagem, utilizando o processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW). Ensaios mecânicos (de impacto Charpy e dureza) foram realizados nessas duas condições. Ensaios balísticos foram realizados na ZF e na ZTA, medindo a energia de impacto, bem como o limite balístico (V_{50}) e o modo de perfuração - Perfuração parcial (PP) ou Perfuração Completa (PC). Os resultados para os dois aportes de calor foram comparados para avaliar a influência do aporte térmico da soldagem no desempenho balístico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho foi o aço de alta dureza (HHA) desenvolvido e fabricado de acordo com a norma MIL-DTL-46100E por uma empresa brasileira. Foi fornecido em placas laminadas de 8 mm de espessura. O tratamento térmico (tempera e revenido) produziu uma dureza de 480 HB.

A composição química deste material é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço HHA.

Elemento	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	P+S
%	0.31	0.42	0.93	0.57	0.76	0.30	0.05	0.03	0.009

O limite balístico ou V_{50} do material base, que é a velocidade a qual a probabilidade de perfuração é de 50%, medida de acordo com a norma MIL-DTL-46100E [7] e MIL-STD-662F [8], é de 585 m/s.

O metal de adição utilizado para produzir as amostras soldadas foi o eletrodo ferrítico de baixo teor de hidrogênio classificado como AWS 7018-1 [9].

O processo de soldagem utilizado foi o SMAW em chapas chanfradas de 500x250 mm como mostrado esquematicamente na Figura 1

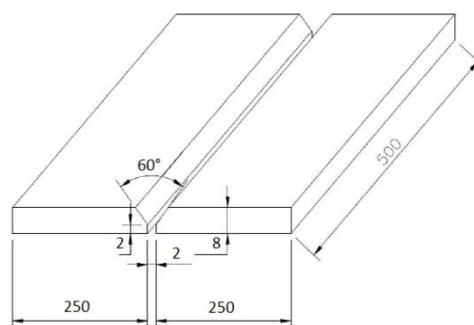


Figura 1. Amostra soldada.

Foram investigados dois aportes térmicos diferentes: um considerado como alto aporte térmico e outro como baixo aporte térmico. Os diferentes aportes térmicos foram obtidos usando eletrodos com parâmetros de soldagem distintos, como mostrado na Tabela 2.

Tabela2. Parâmetros da soldagem.

Diâmetro do eletrodo (mm)	Corrente elétrica (I)	Voltagem medida (V)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Aporte térmico (kJ/cm)
2.5	68.1	21	10.6	8.1(Baixo)
3.25	84.7	21	8.91	11.98 (Alto)

O perfil de dureza por microindentação Vickers do cordão de solda nas condições de alto e baixo aporte está esquematicamente representado na Figura 2.

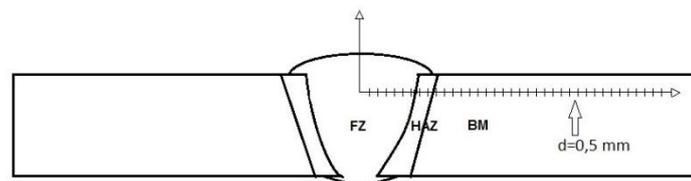


Figura 2. Perfil de dureza por microindentação Vickers.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio de impacto Charpy

As energias médias do ensaio de impacto são apresentadas na Tabela 3. O cordão de solda apresenta uma maior absorção de energia do que o MB, indicando que o cordão de solda possui uma dureza maior que o MB. No entanto, pode-se ver que o alto aporte térmico resulta em maior resistência no cordão de solda, provavelmente devido à ampla região amolecida da ZTA [11], aumentando a absorção de energia no impacto.

Tabela3. Valores de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy a temperatura ambiente.

Propriedade	Amostra		
	MB	Alto aporte térmico	Baixo aporte térmico
Energia de Impacto (J)	29	68,75	53,25

3.2 Perfil de dureza por microindetação Vickers

O perfil de dureza ao longo da junção entre o cordão de solda e o metal base, em ambas as condições de soldagem, está apresentado na Figura 3.

Pode-se ver em ambas as condições de soldagem quatro (4) regiões diferentes:

- 1ª região: região de baixa dureza consistindo da zona de fusão (ZF), onde o metal de adição é predominante e tem uma microestrutura dúctil de ferrita acicular;
- 2ª região: localizada perto da interface ZF / ZTA com alta dureza como resultado da martensita grosseira e fina;
- 3ª região: conhecida como ZTP localizada no final da ZTA, mostrando uma diminuição acentuada da dureza devido à presença da martensita, ferrita e bainita;
- 4ª região: um aumento contínuo da dureza devido às temperaturas mais baixas atingidas nesta região. Ela apresenta a mesma microestrutura que a 3ª região, mas com menor porcentagem de bainita e ferrita.

Estes resultados estão de acordo com o comportamento mecânico do cordão de solda. A soldagem de alto aporte térmico tem a menor dureza, bem como a maior absorção de energia e a menor resistência à tração no cordão de solda.

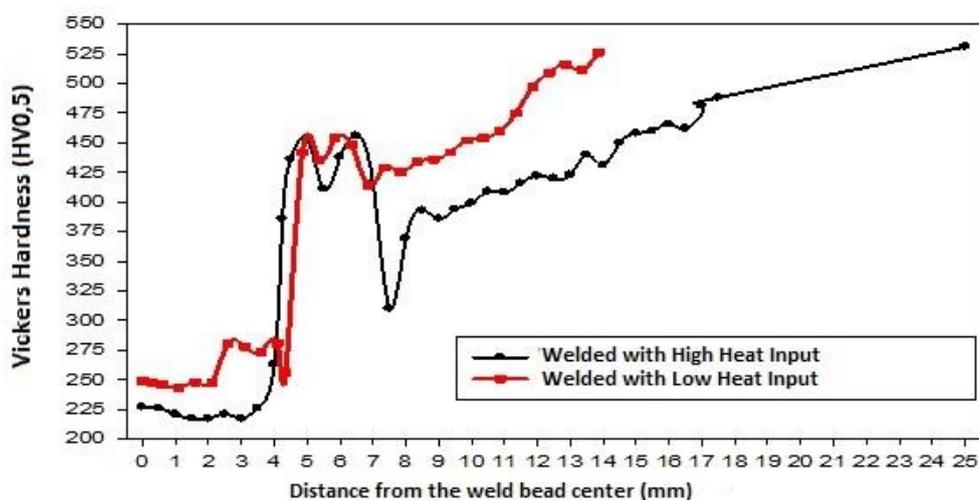


Figura 3. Perfil de dureza do cordão de solda.

3.3 Ensaio balístico

A Figura 4 apresenta as amostras após o ensaio balístico.

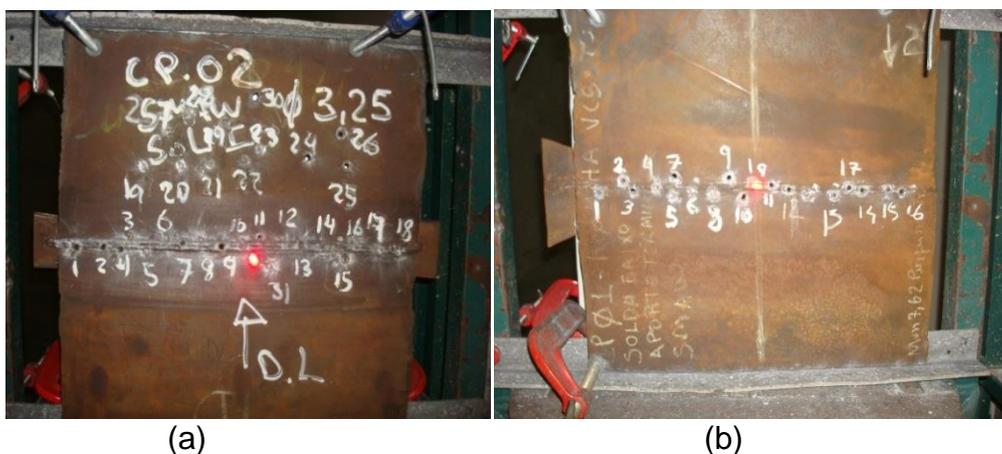


Figura 5. Ensaio balístico nas amostras soldadas (a) com alto aporte térmico e (b) com baixo aporte térmico.

A Tabela 4 mostra os resultados do ensaio balístico para ambas as condições, com alto aporte térmico e baixo aporte térmico.

Tabela 4. Resultado balístico das amostras soldadas.

Aporte Térmico	Impacto		Velocidade de impacto (m/s)	Energia de impacto (J)	Resultado
	Nº	Região			
Alto aporte	1	ZF	552	1462	PC
	2		529	1343	PP
	3		494	1171	PP
	4		551	1457	PC
			V50 = 532	EV50=1359	
	1	ZTA	607	1768	PP
	2		616	1821	PC
	3		597	1710	PP
	4		670	2154	PC
			V50= 622	EV50=1359	
Baixo aporte	1	ZF	627	1887	PP
	2		543	1415	PC
	3		500	1200	PP
	4		556	1484	PC
			V ₅₀ = 556	E _{V50} =1496	
	1	ZAT	682	2232	PC
	2		663	2110	PP
	3		665	2129	PC
	4		661	2097	PP
			V ₅₀ = 668	E _{V50} = 2142	

Pode notar-se que, em ambas as condições, alto e baixo aporte térmico, o limite balístico V_{50} da zona de fusão (ZF) é inferior ao do metal base (585 m/s). Por outro lado, o limite balístico V_{50} da ZTA é maior que o do metal base em ambas as condições. Isso indica que, independentemente do aporte térmico, a ZTA mantém uma resistência balística maior que a do metal base.

A resistência balística para a soldagem de baixo aporte térmico é maior do que a soldagem de alto aporte térmico, independentemente da região considerada (ZF ou ZTA). Esses resultados estão de acordo com os ensaios de tração, impacto e dureza.

A pior resposta do comportamento balístico na ZF em relação à ZTA está relacionada à microestrutura da ferrita acicular, que produz menor dureza e menor resistência à penetração em comparação com a microestrutura martensítica da ZTA. A melhor resistência balística na ZF da soldagem de baixo aporte térmico, quando comparada com a soldagem de alto aporte térmico, está relacionada ao tamanho de grão menor na microestrutura de ferrita acicular.

4 CONCLUSÃO

- A absorção de energia após o ensaio de impacto foi modificada pelo alto aporte. Quanto maior a entrada de calor, maior a absorção de energia.

- O perfil de dureza em ambas as condições de aporte térmico mostrou uma ZTA mais estreita para o baixo aporte e uma menor dureza da ZF para o alto aporte.
- O ensaio balístico revelou que o limite balístico V_{50} nas regiões ZF e ZTA é maior para a amostra de baixa aporte térmico, sugerindo que esta condição produz o melhor desempenho balístico.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Exército brasileiro e às agências financeiras nacionais (CNPq, CAPES e FAPERJ) por patrocinar esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 Jena P, 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 Armor Steel. *International Journal of Impact Engineering*. 2010; 37:242–249.
- 2 Costa e Silva, ALV da; Mei, PR. *Aços e Ligas Especiais*. 2. ed. São Paulo, ed Edgard Blucher, 2006
- 3 Balakrishnan M, Balasubramanian V, Madhusuhan G R, Sivakumar K, Effect of Buttering and Hardfacing on Ballistic Performance of Shielded Metal Arc Welded Armour Steel Joints, *Materials and Design*. 2011; 32(1): 469–479.
- 4 Madhusudhan GR, Mohandas T. Ballistic Performance of High-strength Low-Alloy Steel Weldments, *Journal of Materials Processing Technology*. 1996; 57(1): 23-30.
- 5 Madhusudhan GR, Mohandas T, Papukutty KK. Effect of Welding Process on the Ballistic Performance of High-Strength Low-Alloy Steel Weldments, *Journal of Materials Processing Technology*. 1996; 74(1): 27–35.
- 6 Edwards MR. e A Mathewson. The Ballistic Properties of Tool Steel as a Potential Improvised Armour Plate. *Journal of Impact Engineering*, Shirvinham, Condado de Swindon. 1997;19(4): 297 309.
- 7 U S Army. MIL-DTL-46100E (MR), Amendment 1, Detail Specification Armor Plate, Steel, Wrought, High-Hardness, 2008
- 8 U.S. Department of Army. Standard MIL-STD-662F - V50 Ballistic Test for Armor, 1997
- 9 Weber, RP, Chawla, KK, B, Miguez, JC Suarez, Influence of notch orientation and temperature on the impact behavior of a dual hardness steel composite. *Materials Science & Engineering, A*. 2013; 580: 279–287.