

Ondas de Choque em Metais Policristalinos

MARC A. MEYERS⁽¹⁾
CARLOS A. O. SOARES⁽²⁾
MILTON S. CARVALHO⁽³⁾

São apresentadas as técnicas experimentais para obtenção de ondas de choque que melhor se adaptam às condições brasileiras. Descrevem-se experiências que foram realizadas com o intuito de fazer variar a configuração da frente da onda de choque, usando-se diferentes tamanhos de grãos de chapas de proteção lisas e ranhuradas. Por intermédio de cálculos matemáticos aproximados e simulação por computação para uma situação hipotética, mostra-se que as ondas de choque apresentam irregularidades na pressão de pico, posição da frente e reflexões. Conseqüentemente, microscopicamente a onda é "ondulada" e não plana; e como os mecanismos de deformação operam em escala microscópica, propõe-se que são afetados pelas irregularidades da onda.

1. INTRODUÇÃO

Ondas de choque podem produzir em metais diversas alterações estruturais e subestruturais, como geração de defeitos de ponto⁽¹⁾, discordâncias e maclas⁽²⁾, transformações de fase⁽³⁾ e precipitação⁽⁴⁾. Conseqüentemente as propriedades dos metais são alteradas. O estudo dos efeitos de ondas de choque reveste-se de grande importância porque:

- Há um potencial tecnológico apreciável na utilização de processamento por choque visando o aumento da resistência de metais.
- Ondas de choque estão presentes nos processos de soldagem e conformação por explosão e é importante saber-se seu efeito sobre as propriedades residuais.
- O impacto de um projétil contra uma blindagem, gera nesta uma onda de choque parcialmente responsável pelos danos. O estilhaçamento da superfície interna da blindagem é produzido pela interação das ondas de choque diretas (compressivas) com as refletidas (trativas). Pode-se daí depreender a importância do conhecimento das ondas de choque em impacto balístico.
- Ondas de choque são utilizadas como ferramenta metalúrgica; pode-se produzir uma subestrutura homogênea com elevada densidade de discordâncias sem que seja alterada a forma dos grãos (5, 6).

Ondas de choque podem ser introduzidas em sólidos pelo impacto com um outro objeto, pela pressão de gás produzida por um explosivo em detonação, ou pela deposição subita de radiação. Para seu estudo sistemático, procura-se usar geometrias e configurações de ondas as mais simples possíveis evitando-se, na medida do possível, reflexões. O impacto de um projétil plano com uma superfície paralela a ele provê a situação mais facilmente tratável. O projétil plano pode ser acelerado de diversos modos⁽⁷⁾. A técnica que requer menor investimento de capital é a de aceleração de placa por explosivos. O estudo apresentado nesta contribuição teve por objetivo a determinação

dos efeitos da policristalinidade de um metal sobre a onda de choque. A anisotropia de propriedades mecânicas e velocidade sônica dos grãos individuais faziam pressupor que o comportamento de uma onda de choque em um metal policristalino seria diferente de em um monocristal.

2. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

O desenvolvimento de um sistema experimental visando a obtenção de ondas de choque requereu alguma experimentação com os diferentes explosivos disponíveis no Bra-

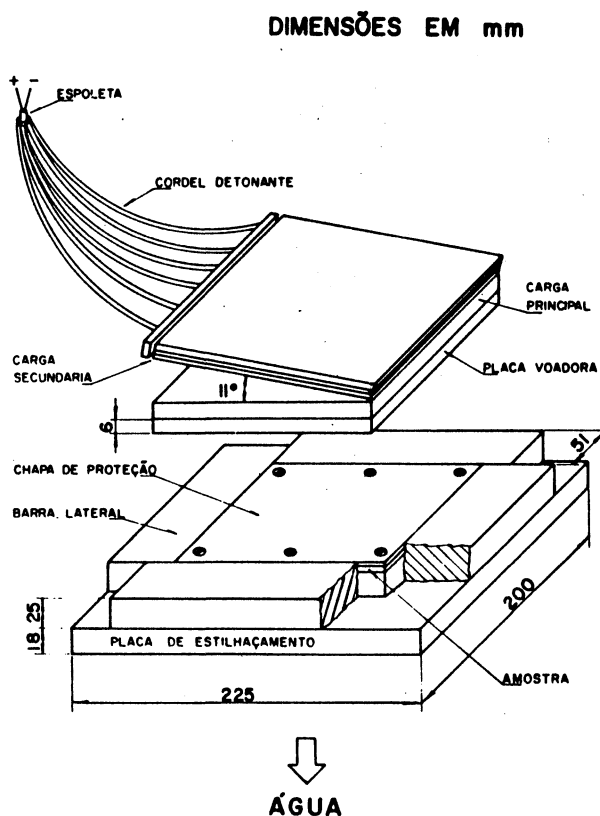


Fig. 1 — Sistema experimental usado.

Contribuição Técnica n.º 1.335. Apresentada ao XXXI Congresso Anual da ABM; Ouro Preto e Belo Horizonte MG; julho de 1976.

- (1) Membro da ABM; Engenheiro M.Sc., Ph.D., Professor Adjunto do Instituto Militar de Engenharia; Rio de Janeiro RJ.
(2) Engenheiro Operacional; Pesquisador Auxiliar do Centro de Pesquisa de Materiais do IME; Rio de Janeiro RJ.
(3) Aluno de Graduação de Engenharia e Ciência dos Materiais do IME; Rio de Janeiro RJ.

sil. Resultou um sistema explosivo ligeiramente diferente daquele usado por Meyers^(8,9) nos E.U.A. Como local de ensaio, usou-se o Campo de Provas de Marambaia, no qual foi instalado o Laboratório de Conformação e Soldagem por Explosão do Instituto Militar de Engenharia. A figura 1 mostra esquematicamente um sistema típico das explosões executadas neste laboratório. Uma espoleta elétrica, ao ser detonada, transmite a explosão a seis segmentos de cordel detonante de igual comprimento, que vão ter ao gerador de onda linear. Este consiste da carga explosiva secundária e de uma placa de vidro e está posicionado a um ângulo de 11° com a carga principal, que por sua vez está colocada sobre a placa voadora. Os seus cordéis detonantes transmitem simultaneamente a explosão à carga secundária, e o ângulo de 11° foi calculado de tal maneira que os estilhaços de vidro alcancem a carga principal ao mesmo tempo; esta "chuva" de estilhaços inicia a detonação da carga principal. Esta, lança para baixo a placa voadora, que mantém o paralelismo com o sistema porta-amostras durante toda a trajetória. O sistema porta-amostras tem por objetivo proteger a amostra para estudo futuro nas três dimensões. Assim, há quatro barras laterais, uma chapa de proteção acima da amostra, uma placa inferior (que sofre estilhaçamento) e uma placa menor à qual a amostra (em forma de chapa) está parafusada. As barras laterais e placas de estilhaçamento têm por função absorver as ondas de reflexão. Este sistema permite que a amostra seja atravessada exclusivamente por uma única onda "plana" compressiva. Todos os componentes devem ter impedâncias sônicas bem próximas à amostra, de tal modo a evitar reflexões internas. Os componentes do sistema são mantidos unidos por cola Araldite. Ao receber o impacto da placa voadora, o sistema é lançado em um tanque com água para que seja rapidamente resfriado.

A tabela I mostra os explosivos usados nas diversas experiências executadas. Todos possuem velocidade de detonação bem elevada; seu calor de detonação, que dá uma idéia da energia liberada, é também elevado. A sensibilidade ao impacto (medida pelo aparelho padrão do Bureau of Mines, e a sensibilidade decrescente com o aumento no número de centímetros) varia; PETN é o mais sensível e TNT o menos. O explosivo que melhor se prestou foi Plastex P. Trata-se de um explosivo laminado com 77% de PETN e 23% de plastificante recentemente desenvolvido por Rocha⁽¹¹⁾ na Fábrica Presidente Vargas. As cargas principais de Pentolite e Composição B fundidos também apresentaram resultados satisfatórios; e geradores de onda linear de PETN e RDX em pó foram usados com sucesso.

TABELA I — Características dos explosivos empregados (valores nominais)

Explosivos	Velocidade de detonação m/s	Calor de detonação cal/g	Sensibilidade ao impacto ⁽⁸⁾ (Aparelho BM, cm)
TNT (fundido)	6900	1090	100
Composição B	8000	1240	75
Pentolite	7500	1220	29
Plastex P	7200	990	100
RDX	8350	1490	33
PETN	8300	1510	17

A onda de choque mostrada na figura 2 é caracterizada por três parâmetros: a pressão máxima P , a duração de pulso x e a taxa de retorno à pressão atmosférica. Estes três parâmetros podem ser variados independentemente, variando-se as dimensões e tipo de placa voadora e explosivo. A velocidade da placa voadora determina a pressão; sua espessura a duração de pulso e o material de que é feito a taxa de retorno ao normal. Orava e Wittman⁽¹²⁾ apresentam os métodos para se calcular estes parâmetros, assim como as outras dimensões do sistema experimental.

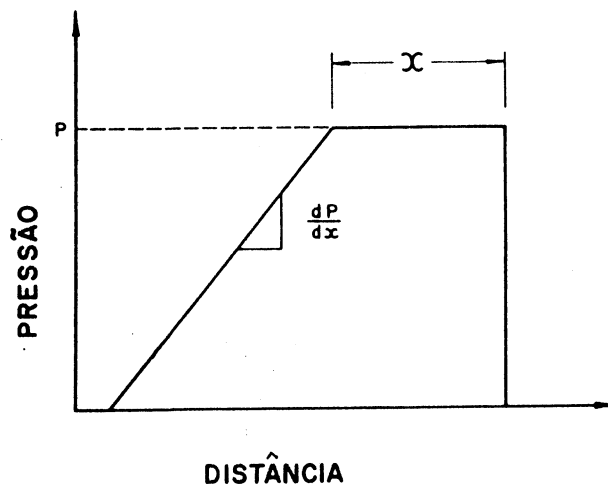


Fig. 2 — Perfil esquemático de uma frente de choque.

3. RESULTADOS

Com o intuito de se mostrar o efeito da anisotropia dos grãos individuais sobre o formato da onda de choque, idealizaram-se algumas experiências e executaram-se alguns cálculos matemáticos elucidativos, descritos adiante.

Experiências — Uma onda de choque plana sendo diferente de uma onda de choque irregular, assim o deveriam também ser as subestruturas residuais resultantes. Ora, a subestrutura afeta a resistência, e esta deveria portanto depender da forma da onda. Com este objetivo⁽¹³⁾, foi preparado um sistema experimental de aço inoxidável AISI 304 submetido a uma pressão de 31,5 GPa (315 Kbar) e duração de 1 μ s por uma placa voadora de cobre. Um lado da placa de proteção foi mantido plano, enquanto que no outro foi usinada por uma plaina uma rede de ranhuras perpendiculares. Estas ranhuras tinham profundidade de 0,5 mm e espaçamento de 1 mm. Observou-se que a dureza do material do lado ranhurado era superior à do lado liso; o mesmo ocorreu com o limite de resistência de corpos de tração retirados da placa-amostra. A tabela II apresenta os resultados. Pode-se daí depreender que o lado ranhurado, introduzindo uma onda de choque mais irregular, produziu um encruamento maior.

Foi também estudado o efeito de tamanho de grão⁽¹⁴⁾, em aço inoxidável AISI 304, sobre o aumento de resistência residual. Empregou-se para tal uma pressão de 10 GPa (100 Kbar) e duração de pulso de 2 μ s, produzidas por uma placa voadora de cobre. Por meio de tratamentos apropriados fez-se variar o tamanho de grão de 23 a 187 μ m. Os resultados estão apresentados na figura 3.

TABELA II — Propriedades mecânicas do lado liso e ranhurado da chapa — amostra.

Propriedades Mecânicas	Lado	
	Liso	Ranhurado
Limite de resistência (MN/m ²)	760	790
Along. Total (90)	36	34
Dureza após choque (Rockwell)	C26,2	C28,8
Desvio-padrão da dureza após choque	1,3	1,1
Dureza antes do choque (Rockwell)	B79,6	B80,0
Desvio-padrão da dureza antes do choque	0,4	0,3

Trata-se de um gráfico de Hall-Petch⁽¹⁵⁾ e as condições recozida e laminada (a uma redução que produziu uma deformação cisalhante máxima igual à deformação cisalhante introduzida por choque) exibem uma dependência linear da raiz quadrada do diâmetro médio dos grãos. Contudo o material chocado se comporta de maneira distinta: à medida que o tamanho de grão aumenta, a tensão de escoamento a 1% cai mais rapidamente que para o material laminado e recozido. Isto quer dizer que a eficiência de choque é maior para tamanhos de grão menores. Encontrou-se, além de outras irregularidades⁽¹⁶⁾, diferentes quantidades de martensita α e ϵ para as diferentes condições chocadas. Logo, o tamanho do grão teve um efeito sobre a transformação. Os resultados sugerem que a configuração da onda de choque em metais policristalinos depende do tamanho de grão.

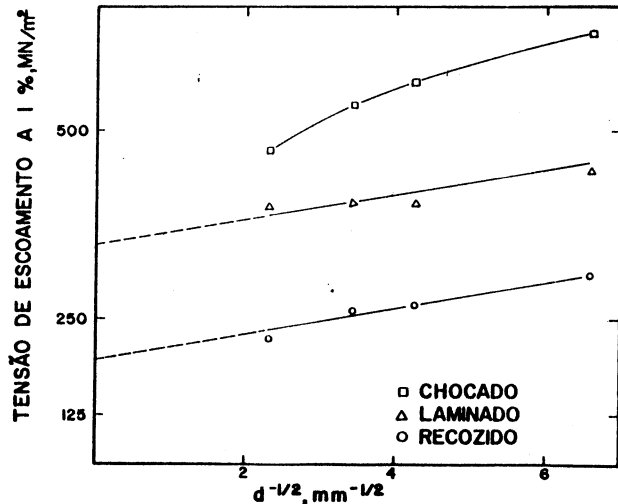


Fig. 3 — Gráfico de Hall-Petch (tensão de escoamento a 1% X $d^{-1/2}$) para as condições recozida, laminada e chocada. Aço inox. AISI 304.

Cálculos Matemáticos — Uma onda de choque atravessando um metal produz alterações na pressão e densidade e induz uma velocidade aos átomos dentro dela. Para pressões não muito baixas é comum tratar-se o problema introduzindo a simplificação hidrodinâmica⁽¹⁷⁾, isto é, considerando-se que o material não resiste a tensões cisalhantes. Usam-se então as equações da elasticidade, com a condição de módulo de cisalhamento nulo. Se se desejar conhecer o efeito da policristalinidade sobre a onda de

choque, é necessário determinar-se a anisotropia de velocidade e de pressão. Ghatak e Kothari⁽¹⁸⁾ apresentam as velocidades de ondas longitudinais elásticas nas três orientações cristalográficas $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ e $\langle 111 \rangle$ em função das rigidezas elásticas C_{11} , C_{12} e C_{44} e da densidade do material, para estruturas cúbicas. As velocidades de ondas plásticas são obtidas admitindo-se que o material não pode resistir a tensões de cisalhamento, isto é, que $C_{44} = 0$. As equações de Ghatak e Kothari⁽¹⁸⁾ tornam-se (há erros no artigo original⁽¹⁸⁾):

$$U^p_{\langle 100 \rangle} = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} \quad (1)$$

$$U^p_{\langle 110 \rangle} = \sqrt{\frac{C_{11} + C_{12}}{2\rho}} \quad (2)$$

$$U^p_{\langle 111 \rangle} = \sqrt{\frac{C_{11} + C_{12}}{3\rho}} \quad (3)$$

Podem-se fazer os cálculos para uma situação hipotética: por exemplo, níquel com tamanho de grão médio de $10 \mu\text{m}$, submetido a uma onda com pressão de 30 GPa (300 Kbar). Os cálculos estão apresentados em outro artigo⁽¹⁹⁾, e será aqui somente dada uma rápida descrição. Admitiram-se exclusivamente grãos cúbicos e somente três orientações: $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ e $\langle 111 \rangle$. Cada orientação esteve presente proporcionalmente a seu fator de multiplicidade. Isto equivale a dizer que um mínimo de textura foi admitido, levando em consideração as três orientações existentes. As três velocidades diferentes resultaram em tempos de trânsito distintos para as três orientações. Estes, e as probabilidades de cada orientação, são dados na tabela III. Para se determinar a função de distribuição de probabilidades dos tempos de trânsito após penetração de 10 grãos, pode-se colocar estatisticamente o problema como: qual é a distribuição de probabilidades de 10 eventos indistinguíveis de três tipos com probabilidades $p_{\langle 100 \rangle}$, $p_{\langle 110 \rangle}$, $p_{\langle 111 \rangle}$ e valores $t_{\langle 100 \rangle}$, $t_{\langle 110 \rangle}$ e $t_{\langle 111 \rangle}$? A figura 4 apresenta a configuração. As probabilidades foram grupadas em intervalos de $0,2 \times 10^{-9}$ s. Há duas abscissas. A abscissa superior fornece a distribuição de posição da onda quando a média atravessou 10 grãos; ela é somente aproximativa e foi obtida considerando-se uma velocidade média e multiplicando-a pelo tempo. A figura 4 mostra claramente que a frente de choque não é plana. Desvios com ordem de grandeza de $5 \mu\text{m}$ tem uma probabilidade elevada.

TABELA III — Velocidades, tempos de trânsito e probabilidade para as três orientações, em níquel com tamanho de grão de $10 \mu\text{m}$ chocado a 30 GPa.

Orientação	Velocidade (cm/s)	Tempo de trânsito (s)	Probabilidade
100	$5,01 \times 10^5$	$2,00 \times 10^{-9}$	0,461
110	$4,48 \times 10^5$	$2,23 \times 10^{-9}$	0,231
111	$4,29 \times 10^5$	$2,31 \times 10^{-9}$	0,308

De maneira semelhante, verificou-se o efeito da anisotropia cristalina sobre a pressão de pico. Os cálculos e as hipóteses simplificadoras são dados alhures⁽¹⁹⁾. Obtiveram-se pressões de 275, 308 e 332 Kbar para as orienta-

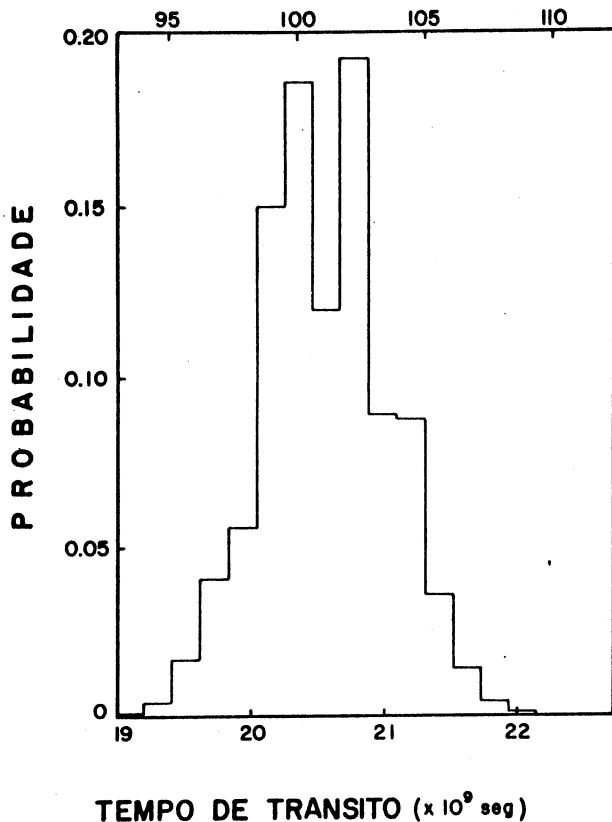
POSIÇÃO APROXIMADA DA FRENTE (μm)

Fig. 4 — Distribuição de tempos de trânsito e posições da frente de onda para uma penetração média de 10 grãos.

ções $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ e $\langle 111 \rangle$, respectivamente. À medida que a onda penetra no material, forma-se uma distribuição que progressivamente se alarga, em torno destes valores. Além disto, as diferentes impedâncias de choque das diferentes orientações são responsáveis pela produção contínua de ondas de reflexão. Estas podem ter amplitude até 67 Kbar e podem ser refletidas por sua vez.

Com base nas anomalias de velocidade, pressão e reflexão, pode-se propor um modelo esquemático para a onda de choque. Para o caso hipotético considerado, a uma penetração média de 10 grãos ($100 \mu\text{m}$) tem-se a representação da figura 5. Como a duração de pulso é de $1 \mu\text{s}$, não há efeitos de rarefação. Ao longo do eixo de penetração podem ser vistas cinco irregularidades; elas correspondem às ondas refletidas.

Com o intuito de verificar a variação das irregularidades nas posições da frente da onda com a penetração, desenvolveu-se um programa de computador⁽²⁰⁾ para o caso hipotético descrito anteriormente. Determinou-se o desvio-padrão na posição da frente de choque, para diferentes penetrações. Os resultados estão apresentados na figura 6, até uma penetração de $1500 \mu\text{m}$. Nota-se claramente que a frente se torna mais irregular à medida em que penetra mais profundamente no material.

Cabe ressaltar que os métodos matemáticos aplicados às ondas plásticas^(19,20) podem também ser usados em ondas elásticas; sua aplicação aos precursores elásticos serviu

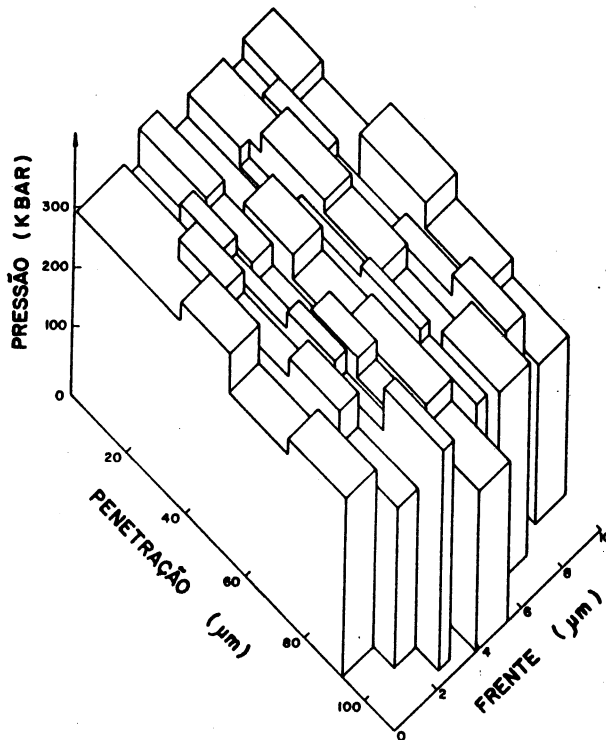


Fig. 5 — Configuração esquemática da onda de choque, após uma penetração média de 10 grãos.

para explicar o efeito de tamanho de grão no intervalo de subida da frente, para ferro⁽²¹⁾.

4. CONCLUSÕES

Tanto a evidência experimental quanto cálculos matemáticos indicam que as ondas de choque não são planas, mas possuem irregularidades. O modelo da figura 5 é somente uma aproximação de uma situação real. Em um metal policristalino real, em que existe uma distribuição contínua de orientação e os contornos de grão não são mutuamente perpendiculares a onda de choque seria ligeiramente diferente. As variações seriam contínuas, e não discretas e resultaria uma *onda ondulada*.

As irregularidades na onda de choque introduzem fortes tensões cisalhantes ao longo de planos inclinados em relação à frente de onda. A duração destas tensões pode produzir taxas de deformação muito mais baixas que as encontradas na frente da onda. Conseqüentemente o estado de tensões na frente de onda de metais policristalinos é bem diverso do estado de deformação uniaxial comumente aceito. Portanto, mesmo que em uma escala macroscópica os metais possam ser considerados isotrópicos e ondas de choque planas, tal hipótese não pode ser feita em uma escala microscópica. E como os mecanismos de deformação operam em escala microscópica, o encruamento dos metais deve ser afetado pelas irregularidades da onda.

Agradecimentos

Os autores agradecem a colaboração prestada pela Fábrica Estrela, Fábrica do Realengo, Fábrica Pres. Var-

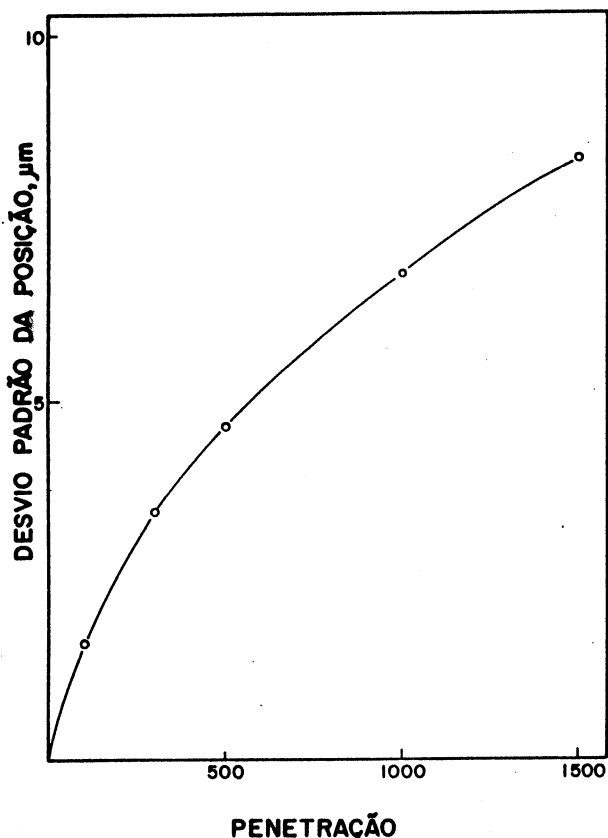


Fig. 6 — Variação do desvio padrão da posição da frente de choque com a distância de penetração da onda no material.

gas e Indústria Química Mantiqueira na obtenção dos explosivos e a J. R. Rocha o desenvolvimento de Plastex-P. Agradecem também a ajuda prestada pelo Campo de Provas da Marambaia na execução das explosões. Este trabalho foi financiado pelo Ministério do Exército, MEC, FINEP e BNDE.

BIBLIOGRAFIA

1. KRESSEL, H. e BROWN, N. — J. Appl. Phys., vol. 33, pg. 33, 1967.
2. BRILLHART, D.C.; DE ANGELIS, R.J.; PREBAN, A.G.; COHEN, J.B. e GORDON, P. — Trans. AIME, vol. 239, pg. 836, 1967.
3. SMITH, C.S. — Trans. AIME, vol. 212, pg. 574, 1958.
4. STEIN, C. — Scripta Meta., vol. 9, pg. 675, 1974.
5. GUIMARÃES, J.R.C.; GOMES, J.C. e MEYERS, M.A. — Proc. First JIM Int. Symposium, Kyoto, Japão, 1976.
6. CHAWLA, K.K.; GUIMARÃES, J.R.C. e MEYERS, M.A. — Metallography, aceito para publicação, 1976.
7. CABLE, A.J. — High-Velocity Impact Phenomena, Editor Kinslow, R., pg. 1, Academic Press, New York, 1970.
8. MEYERS, M.A. — Tese de Doutorado, U. of Denver, Colorado, E.U.A., 1974.

9. MEYERS, M.A. — Metalurgia, vol. 32, n.º 221, pg. 249/54, 1976.
10. Military Explosives, Department of the Army and the Air Force TM9 — 1300 — 214/TO 11A — 1 — 34, p. 5-4, 1967.
11. ROCHA, J.F. — Fábrica Presidente Vargas, Piquete, S.P., Comunicação Pessoal, 1975.
12. ORAVA, R.N. e WITTMAN, R.H., Proceedings of 5th Int. Conf. on High Energy Rate Fabrication, Denver Research Institute, E.U.A., 1975.
13. MEYERS, M.A. — Scripta Met., vol. 9, pg. 667, 1975.
14. KESTENBACH, H.J. e MEYERS, M.A. — Met. Trans. A, aceito para publicação, 1976.
15. PETCH, N.J. — J. Iron Steel Inst., vol. 174, pg. 25, 1953.
16. MEYERS, M.A. — Scripta Met., vol. 10, pg. 255, 1976.
17. DIETER, G.E. — Strengthening Mechanisms in Solids, ASM, Capítulo 10, p. 279, 1962.
18. GHATAK, A.K. e KOTHARI, L.S. — An Introduction to Lattice Dynamics, Addison-Wesley, pg. 67, 1972.
19. MEYERS, M.A. — Proc. of the 5th Int. Conf. on High Energy Rate Fabrication, Denver Research Institute, E.U.A., 1975.
20. MEYERS, M.A. — Mat. Sci. and Eng., vol. 24, pg. 131, 1976.
21. MEYERS, M.A. — Acta. Met., submetido para publicação, 1976.

DEBATE

JOSÉ FERREIRA ROCHA (1) — Foram citadas no trabalho experiências sob determinadas condições de pressão. Foi utilizado um dispositivo experimental para a medição da pressão resultante do impacto? Em caso afirmativo, que recursos foram utilizados?

M.A. MEYERS — Não fizemos até o presente momento nenhuma medição. As pressões são calculadas mediante cálculos termo-dinâmicos envolvendo as curvas Hugoniot. Pretendemos, no futuro, determinar a pressão e também as velocidades das placas voadoras mediante o uso de transdutores especiais.

PEDRO PAULO MEYERS (2) — Qual o efeito do modelo apresentado sobre projéteis balísticos.

M.A. MEYERS — Sendo a onda de choque afetada pelos grãos individuais do metal, e sendo, conseqüentemente afetada a estrutura residual, então materiais com diferentes tamanhos de grão seriam atravessados diferentemente para ondas de choque. A textura também é importante. As condições especiais de estilhaçamento interno também seriam afetadas pela anisotropia dos grãos. Uma blindagem com elevada textura e uma sem textura poderiam se comportar de maneira distinta ante um impacto por projétil.

(1) Membro da ABM. Engenheiro do Instituto de Pesquisas Tecnológicas; São Paulo SP.
 (2) Membro da ABM. M.Sc., Engenheiro Mecânico; Lurgi do Brasil; Rio de Janeiro RJ.