

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MATERIAIS PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE DEFORMAÇÃO: APLICAÇÃO AO CHUMBO TECNICAMENTE-PURO

Carlos M.A. da Silva, carlosalves_silva@hotmail.com¹

Pedro A.R. Rosa, pedro.rosa@ist.utl.pt¹

Paulo A.F. Martins, pmartins@ist.utl.pt¹

¹IDMEC, Instituto Superior Técnico, TULisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

Resumo: *Este trabalho insere-se num projecto de investigação que tem como objectivo principal desenvolver uma infra-estrutura experimental para a determinação do comportamento mecânico de materiais numa gama alargada de extensões e velocidades de deformação. O artigo desenvolve-se em torno da apresentação de uma barra de Hopkinson de características inovadoras que recorre à energia disponibilizada por um campo magnético para efectuar ensaios de caracterização mecânica numa gama alargada de velocidades de deformação que se situa várias ordens de grandeza acima da que é habitualmente alcançada nas máquinas universais de ensaios. A metodologia apresentada constitui uma base de trabalho para futuros desenvolvimentos no domínio da experimentação e da modelação numérica de processos de fabrico onde a sensibilidade dos materiais à velocidade de deformação possa ser considerada relevante para a compreensão dos mecanismos de deformação plástica. A opção de limitar a apresentação de resultados ao chumbo tecnicamente-puro explica-se pela importância deste material na realização de trabalhos de investigação fundamental. A lei de comportamento mecânico obtida através da barra de Hopkinson é comparada com valores de referência determinados em condições quasi-estáticas e os valores obtidos são posteriormente utilizados na simulação numérica dos respectivos ensaios em condições próximas das experimentais.*

Palavras-chave: *Barra de Hopkinson; Actuador Electromagnético; Caracterização Mecânica; Velocidade de Deformação;*

1. INTRODUÇÃO

A escassez de informação sobre o comportamento mecânico dos materiais nas condições de extensão e velocidade de deformação análoga às dos processos de fabrico é uma das principais fontes de erro na simulação numérica de processos de deformação plástica. De facto, é frequente ver os utilizadores de programas de simulação numérica recorrer a leis de comportamento mecânico de materiais obtidas por intermédio de ensaios de tracção uniaxial (os quais, se encontram limitados a valores máximos de extensão na ordem de grandeza de 0.2 a 0.3) e extrapolar os resultados desses ensaios para valores consideravelmente mais elevados de extensão. Mesmo os utilizadores que recorrem a ensaios de compressão (que permitem obter curvas tensão-extensão verdadeira até valores de extensão próximos de 0.8 a 1.0) se vêem muitas vezes na contingência de extrapolar os resultados dos ensaios de caracterização mecânica de modo a poderem simular processos de deformação plástica em que os materiais alcançam valores mais elevados de extensão. O efeito da velocidade de deformação é ainda mais crítico do que o da extensão na medida em que a generalidade dos utilizadores usa curvas tensão-extensão verdadeira obtidas por intermédio de máquinas de ensaios que operam a velocidades de actuação várias ordens de grandeza abaixo das velocidades características das máquinas-ferramenta que são utilizadas nos processos de deformação plástica. Nestas circunstâncias não é possível avaliar correctamente o efeito da extensão e da velocidade de deformação no comportamento mecânico dos materiais que estão associados às condições reais de fabrico.

De entre as várias técnicas que se encontram actualmente disponíveis para a determinação do comportamento mecânico dos materiais a elevadas velocidades de deformação merece destaque a utilização de barras de pressão. A ideia de usar uma barra de pressão para determinar o comportamento mecânico dos materiais foi apresentada pela primeira vez em 1872 por John Hopkinson. O conceito original (habitualmente designado por barra de Hopkinson em homenagem a John Hopkinson e esquematicamente representado na Figura (1)) foi sendo progressivamente aperfeiçoado ao longo da primeira metade do século passado. Merecem destaque as contribuições de Bertram Hopkinson (1913), que desenvolveu uma metodologia para determinação das relações temporais que se encontram associadas à propagação de uma onda de pressão elástica numa barra e de Kolsky (1949), que introduziu extensómetros, técnicas de aquisição e registo de resultados experimentais com base em osciloscópios e que modificou o conceito

original de John Hopkinson de modo a utilizar um conjunto de duas barras de pressão que comprimem o material a caracterizar entre elas. Esta modificação do conceito original proposta por Kolsky é designada por 'Split Hopkinson Bar' na terminologia Inglesa e é actualmente empregue na generalidade dos equipamentos instalados nas universidades e centros de investigação internacionais.

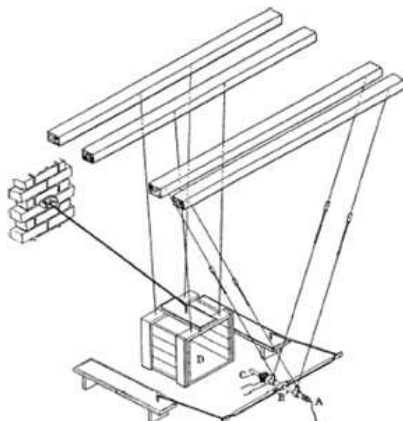


Figura 1. Representação esquemática da barra de pressão construída por Bertram Hopkinson para determinar as propriedades mecânica de um arame de ferro por intermédio do impacto de um peso (Salisbury, 2001).

A barra de Hopkinson continuou a ser aperfeiçoada durante a segunda metade do século XX. Lindholm e colaboradores (1964, 1968) desenvolveram um sistema mecânico para o disparo da barra projectil e introduziram as primeiras técnicas para registo de resultados experimentais baseadas em modernos sistemas de aquisição de dados. Mais recentemente foram desenvolvidos sistemas de disparo da barra projectil baseados na utilização de ar comprimido e aplicados materiais avançados no fabrico das barras de pressão. Sugere-se a consulta de Follansbee (1985) para uma leitura mais detalhada sobre o conceito e a tecnologia intrínsecos às barras de Hopkinson.

A generalidade das barras de Hopkinson que se encontram actualmente em funcionamento é accionada por intermédio de sistemas de disparo de ar comprimido a alta pressão em que a velocidade de deformação do ensaio é obtida a partir do controlo da pressão. As principais desvantagens decorrentes deste tipo de concepção residem na necessidade de se utilizarem pressões elevadas para se conseguirem alcançar elevadas velocidades de deformação, na dificuldade em assegurar a repetibilidade das condições de ensaio, no ruído elevado que resulta da abertura da válvula e da rápida expansão do ar e na necessidade de conceber equipamentos muito compridos.

Este artigo apresenta uma concepção inovadora para o projecto e fabrico de barras de Hopkinson (Silva e colaboradores, 2008a, 2008b) em que se recorre a um campo magnético para promover o disparo da barra projectil. A substituição da tradicional descarga de ar comprimido, efectuada a partir de um reservatório de alta pressão, por uma impulsão de natureza electromagnética tem por objectivo aumentar o controlo e desempenho global da barra de Hopkinson. Na barra de Hopkinson de impulsão electromagnética o disparo da barra projectil é facilmente controlado e infinitamente ajustável; uma vez o equipamento ajustado para um determinado tipo de ensaio, a única variável extra que deve ser tida em consideração é o material a caracterizar. Por outro lado, o comprimento necessário para a aceleração da barra projectil num sistema de impulsão electromagnética é substancialmente inferior ao das barras com sistemas de disparo de ar comprimido o que permite reduzir o comprimento total do equipamento.

A primeira parte do artigo centra-se na concepção, projecto e fabrico dos principais componentes constituintes da barra de Hopkinson de impulsão electromagnética. A segunda parte desenvolve-se em torno da aplicação deste equipamento de características inovadoras na avaliação do comportamento mecânico do chumbo tecnicamente-puro para elevadas velocidades de deformação. A opção de limitar a apresentação dos resultados ao chumbo tecnicamente-puro justifica-se pelo facto deste material permitir realizar trabalhos experimentais de modelação física, à temperatura ambiente, que reproduzem o comportamento mecânico de alguns materiais de engenharia (os aços, por exemplo) em gamas mais elevadas de temperatura e velocidade de deformação. A utilização do chumbo tecnicamente-puro reveste-se igualmente de grande interesse quando se pretende aferir as estimativas decorrentes de procedimentos analíticos baseados em modelos de comportamento rígido-perfeitamente plásticos com resultados experimentais. A lei de comportamento do chumbo tecnicamente-puro caracterizada por intermédio da barra de Hopkinson de impulsão electromagnética é comparada com valores de referência determinados em condições quasi-estáticas e os valores obtidos são posteriormente utilizados para efectuar a simulação numérica dos respectivos ensaios em condições próximas das experimentais.

2. CONCEPÇÃO, PROJECTO E FABRICO

A Figura (2) apresenta um esquema simplificado do princípio de funcionamento de uma barra de Hopkinson. O ensaio consiste em disparar uma barra projectil (Fig. (2 a)), com velocidades geralmente compreendidas entre os 2.5 e os 25 m/s, de encontro a uma barra incidente. O impacto resultante provoca uma onda de pressão elástica que se propaga ao longo da barra incidente até à interface com o material a ensaiar, provocando a sua deformação. Parte dessa onda é transmitida para a barra transmissora e uma outra parte é reflectida para a barra incidente. A propagação das ondas de pressão ao longo das barras é monitorizada através da utilização de extensómetros (A e B), os quais medem as deformações elásticas das barras. Os sinais adquiridos pelos extensómetros estão esquematicamente ilustrados na Fig. (2 b) onde a linha azul representa a evolução da onda de pressão na barra incidente e a linha vermelha na barra transmissora. Os sinais obtidos são seguidamente amplificados e apresentados num osciloscópio. Através da manipulação matemática das medições de extensão nas barras é possível determinar a curva tensão-extensão do material (Gray, 1997).

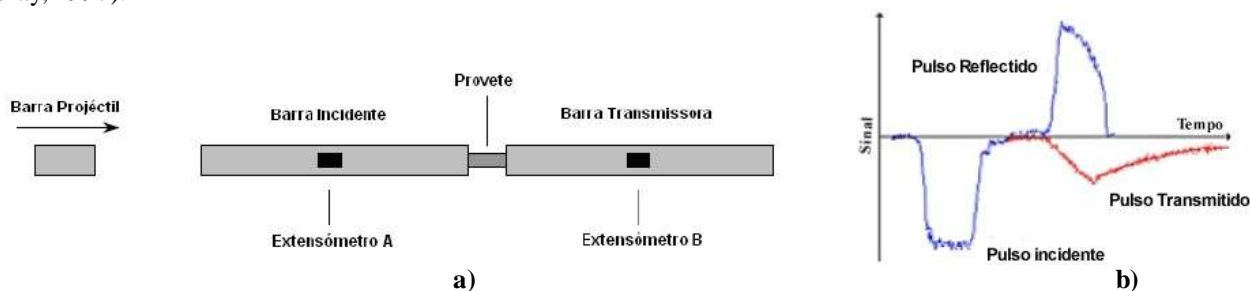


Figura 2. Princípio de funcionamento de uma barra de Hopkinson. (a) Esquema simplificado do equipamento, (b) Monitorização típica dos sinais obtidos nos extensómetros.

A Figura (3) apresenta um esquema da barra de Hopkinson de impulsão electromagnética que foi desenvolvida pelos autores. Os componentes principais do equipamento podem ser classificados em três grupos distintos: (i) a estrutura, (ii) os sistemas mecânicos e pneumáticos e (iii) os sistemas eléctricos e electromagnéticos.

A estrutura destina-se à montagem dos sistemas mecânicos, pneumáticos e electromagnéticos da barra de Hopkinson tendo sido concebida e projectada de uma forma modular de modo a possibilitar a realização de variantes ao ensaio de Hopkinson convencional. Os sistemas mecânicos e pneumáticos são constituídos pelas barras cilíndricas (transmissora e incidente), chumaceiras de ar, dissipador da energia remanescente do ensaio e pelos suportes, cuja concepção poderá variar consoante o tipo de ensaio e de material a caracterizar. Os sistemas eléctricos e electromagnéticos incluem os componentes que fornecem energia eléctrica ao actuador electromagnético, tais como os circuitos eléctricos para carga e descarga do banco de potência (capacitivo), que ao fornecer energia às bobinas vai por sua vez gerar o campo magnético que impulsiona a barra projectil (dentro do actuador electromagnético) de encontro à barra incidente.

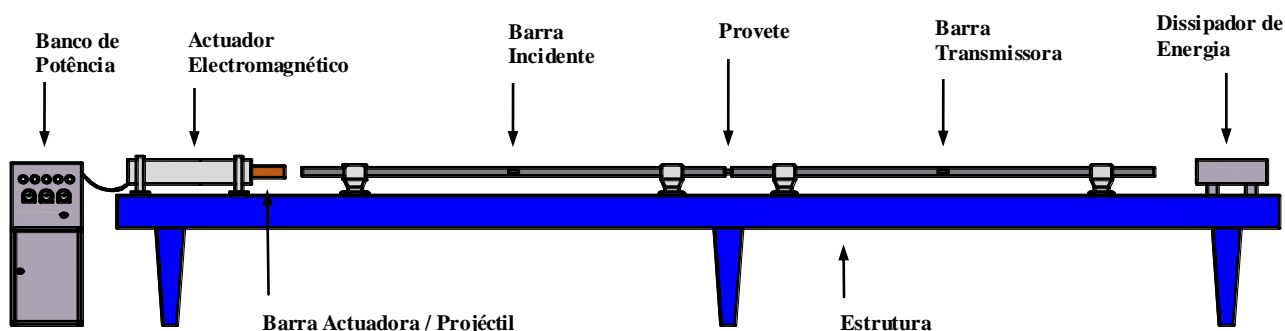


Figura 3. Esquema da barra de Hopkinson de impulsão electromagnética instalada no Instituto Superior Técnico.

Estrutura

A estrutura é essencialmente constituída por uma viga de perfil em I com 5 metros de comprimento e três apoios que serve para a montagem dos diversos componentes constituintes da barra de Hopkinson. A rigidez do perfil em I é adequada para a estrutura da barra uma vez que a propagação da onda de compressão ocorre preferencialmente na direcção longitudinal das barras e a sua massa é adequada para absorver as vibrações remanescentes que são geradas durante o ensaio. O comprimento total da viga está relacionado com a possibilidade de expansibilidade do sistema, seja através da realização de variantes ao ensaio de Hopkinson, seja pela introdução de novos sistemas de impulsão com o objectivo de aumentar a velocidade e a energia cinética da barra projectil. Os suportes da viga são utilizados para fixar a viga a uma parede de betão de modo a garantir uma boa estabilidade estrutural do equipamento.

Sistemas Mecânicos e Pneumáticos

As barras incidente e transmissora devem possuir um rácio comprimento/diâmetro elevado de modo a estabilizar e eliminar as interferências entre as ondas incidente e reflectida que são geradas no decorrer dos ensaios. Na barra de Hopkinson de impulsão electromagnética instalada no Instituto Superior Técnico (Figura (3)) as barras incidente e transmissora têm 1,4 m de comprimento e 25 mm de diâmetro. A escolha dos materiais a utilizar no fabrico das barras é função do material que se pretende ensaiar. Em linhas gerais, o material da barra deve ter um módulo de elasticidade suficientemente baixo para aumentar a relação sinal/ruído e a sensibilidade às variações de deformação mais reduzidas. O material a utilizar no fabrico das barras deve ainda assegurar que a respectiva deformação permanece em regime elástico durante a totalidade do ensaio pelo que a tensão limite de elasticidade das barras deve ser superior ao nível de tensões máximas atingidas durante o ensaio. No trabalho de caracterização mecânica do chumbo tecnicamente-puro foi escolhido um par de barras de uma liga de alumínio AA 6082-T651.

As chumaceiras asseguram o apoio e o alinhamento longitudinal da totalidade do sistema (Fig. (4.a)). São constituídas por um suporte de aço inoxidável austenítico AISI 304L com um furo central para admissão de ar (Fig. 4.b)) onde se monta um casquilho de acrílico. O casquilho de acrílico é perfurado (Fig. (4.c)) de modo a permitir a passagem do fluxo de ar que se destina a formar uma fina camada de ar pressurizado que evita o contacto entre a superfície das barras e a das chumaceiras. A opção por este tipo de solução construtiva revelou-se mais vantajosa do que o recurso a rolamentos tradicionais de contacto (rolamentos de esferas, casquilhos de teflon, etc...) e permite reduzir substancialmente o atrito estático, as perdas de energia cinética por atrito e a geração de vibrações residuais nas barras.

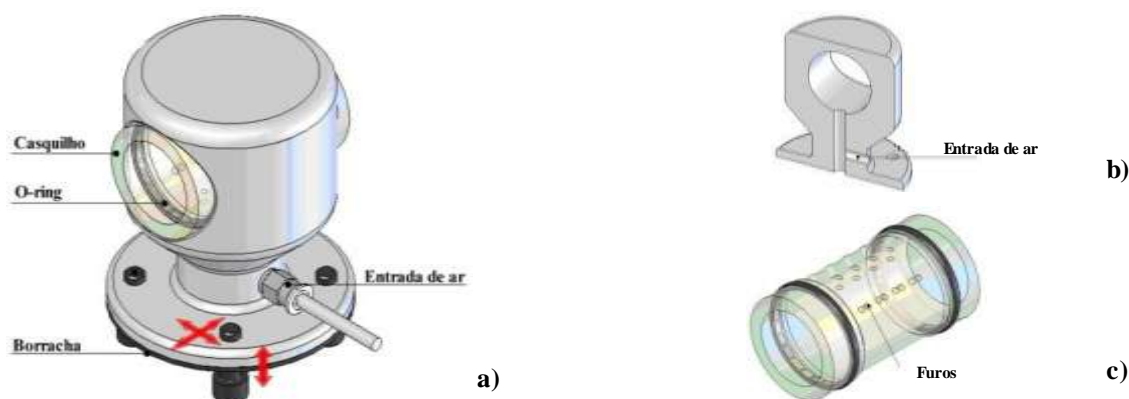


Figura 4. Representação esquemática das chumaceiras de ar utilizadas na barra de Hopkinson de impulsão electromagnética. a) Representação em perspectiva, b) Vista em corte e c) Casquilho de acrílico.

A localização dos furos para passagem de ar foi escolhida após a realização de ensaios experimentais em que foi medida a força de atrito estático do sistema para diferentes configurações e pressões de fornecimento do fluxo de ar. A Figura (5) representa a evolução da força de atrito estático em função da pressão e da localização dos furos no casquilho. Observa-se que os casos 1 e 2 conseguem assegurar baixos valores de atrito estático para pressões na ordem de grandeza de 1 a 2 bar enquanto que o caso 3 se revela mais adequado para valores da pressão de ar superior a 3,5 bar. Os autores optaram pelo caso 3 de modo a viabilizar um patamar de atrito mínimo na gama alargada de pressões que se encontra disponível no laboratório onde se encontra instalado o equipamento (de 3.5 até 5 bar).

Sistemas eléctricos e electromagnéticos

A impulsão do projectil na barra de Hopkinson electromagnética baseia-se na interacção entre o campo magnético gerado pela bobine e o núcleo ferromagnético que ao ser magnetizado adquire uma polarização inversa à do campo da bobina (Fig. (7 b)). O pólo induzido é atraído pelo pólo contrário da bobina, resultando numa aceleração do núcleo na direcção do centro da bobina, independentemente do sentido da corrente (princípio da relutância magnética).

O actuador de impulsão electromagnética desenvolvido pelos autores baseia-se numa concepção modular que assegura o controlo dos principais parâmetros operativos dos ensaios de caracterização mecânica (velocidade e energia) e que permite escolher dois tipos distintos de impulsão; (i) a impulsão electromagnética simultânea e (ii) a impulsão electromagnética sequencial, Figura (6). O primeiro tipo de configuração do actuador de impulsão electromagnética (Fig. (6 a)) permite realizar ensaios a baixa velocidade com energia cinética suficientemente alta para garantir a deformação plástica total do provete de compressão (exemplo, massa da barra projectil de 5 kg e velocidade de disparo de 5 m/s), enquanto que o segundo tipo de configuração (Fig. (6 b)) é utilizado para velocidades de deformação mais elevadas (exemplo, massa da barra projectil de 0.5 kg e velocidade de disparo de 25 m/s). No primeiro caso a descarga da corrente eléctrica nas bobines pode ser controlada por tiristores ou por IGBT's (*insulated gate bipolar transistors*), enquanto no segundo caso a descarga deve ser preferencialmente controlada por intermédio de IGBT's de modo a garantir a aceleração sequencial da barra projectil ao longo da totalidade do actuador electromagnético.

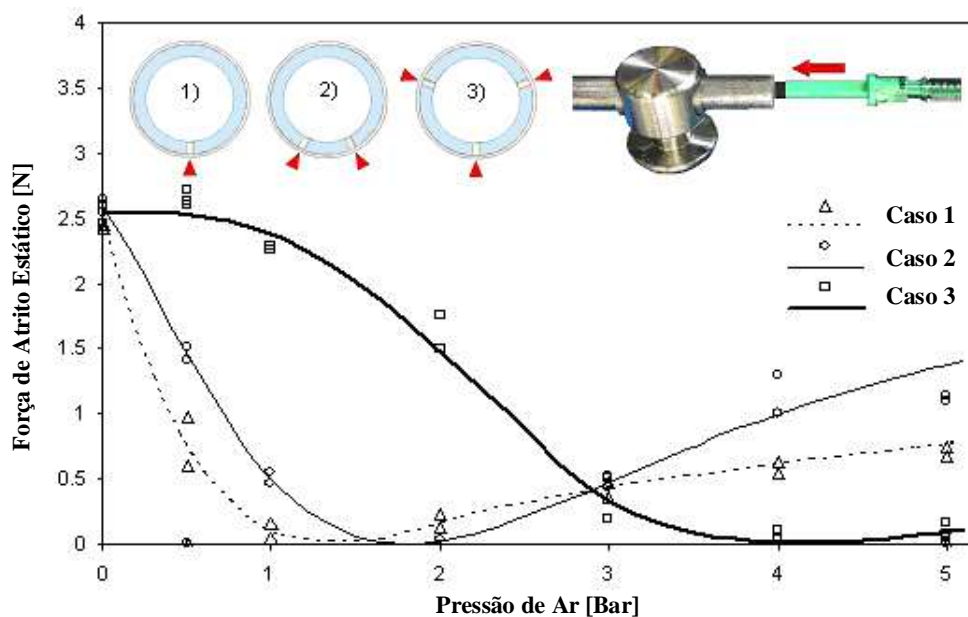


Figura 5. Evolução da força de atrito estático na barra transmissora em função da pressão de ar, para três casos distintos de localização dos furos de passagem de ar no casquilho.

Para cumprir os objectivos do trabalho e facilitar a comparação da caracterização mecânica do chumbo tecnicamente-puro obtida por intermédio da barra de Hopkinson de impulsão electromagnética com os valores de referência do ensaio de compressão realizado em condições quasi-estáticas, foi seleccionado o primeiro tipo de configuração (Fig. (6.a)).

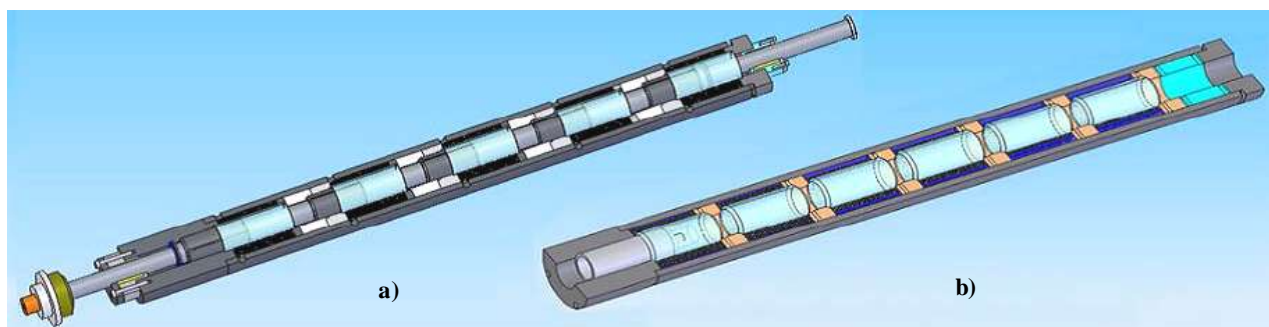


Figura 6. Representação esquemática das duas configurações possíveis para o actuador de impulsão electromagnética. a) Impulsão simultânea e b) Impulsão sequencial.

O actuador de impulsão electromagnética simultânea utilizado neste trabalho baseia-se na combinação de um conjunto de bobinas em série, que fornecem energia em simultâneo a um conjunto de núcleos ferromagnéticos (aço DIN St52.3) montados sobre a barra projectil (alumínio AA 6082-T651) de modo a potenciar a sua aceleração (Fig. (7)). São utilizados separadores dieléctricos para minimizar a interferência electromagnética entre as bobinas, junto das quais um concentrador magnético permite direccionar, aumentando o gradiente de fluxo magnético, as linhas de campo de cada bobina (Fig. (7 b)) para o núcleo ferromagnético correspondente. Outra particularidade deste sistema de impulsão encontra-se na barra projectil que ao ser apoiada apenas em dois rolamentos permite eliminar a interacção dos núcleos com o tubo da bobina, eliminando desta forma qualquer atrito entre os componentes. Finalmente, interessa referir que o sistema apresenta a vantagem e a flexibilidade resultantes da possibilidade de se poder substituir facilmente a barra projectil uma vez que o disparador electromagnético pode ser aberto na parte posterior, sem prejuízo do desempenho, facilitando a sua troca e, desta forma, a adequação da massa da barra projectil às características do ensaio.

A Figura (8) apresenta o circuito de carga e descarga do banco de potência do actuador de impulsão electromagnética simultânea. Para efectuar a carga dos condensadores, é utilizada corrente monofásica alternada de 230 V cuja tensão pode ser aumentada através de um transformador variável até 1000 V e posteriormente rectificada. Quando os condensadores estão carregados para efectuar o disparo, os circuitos de carga são fechados e os interruptores (tiristores) são activados em simultâneo de modo a que a descarga seja efectuada da totalidade dos condensadores para cada uma das bobinas correspondentes.

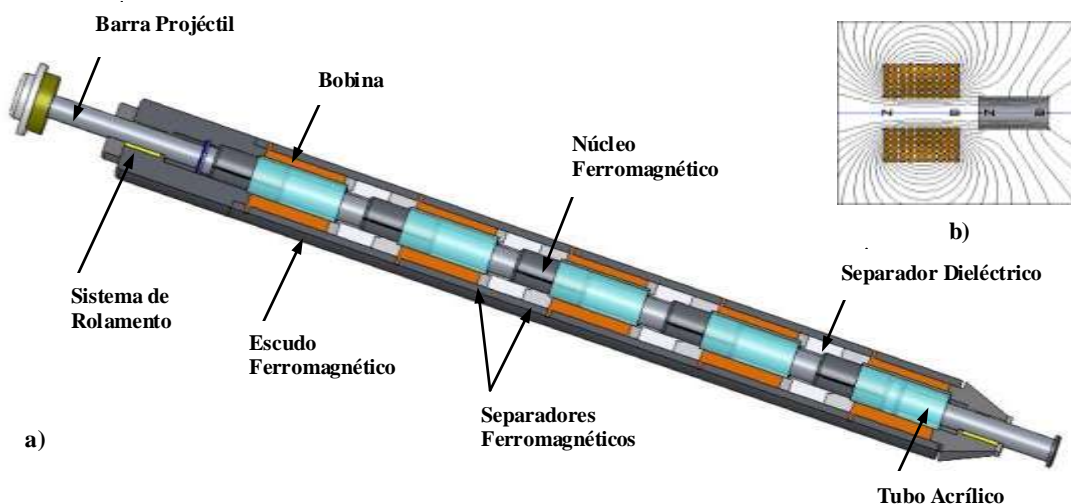


Figura 7. Actuador de impulsão electromagnética simultânea. a) Representação tridimensional mostrando os principais elementos constituintes e b) Interação das linhas de campo magnético com a barra projectil.

As bobinas cilíndricas com 80 mm e 42 mm de diâmetro exterior e interior e com um comprimento de 90 mm são construídas a partir de fio de cobre com 4 mm de diâmetro enrolado à volta de tubo de acrílico. O impulso de corrente que passa nas bobinas dura poucos milissegundos, tempo suficientemente baixo para impedir a desaceleração que os núcleos sofrem ao passarem na segunda metade da bobine, uma vez que com a utilização de tiristores não é possível fazer a interrupção da descarga eléctrica. A Figura (9) apresenta uma visão global da barra de Hopkinson instalada no Instituto Superior Técnico da Universidade Técnico de Lisboa.

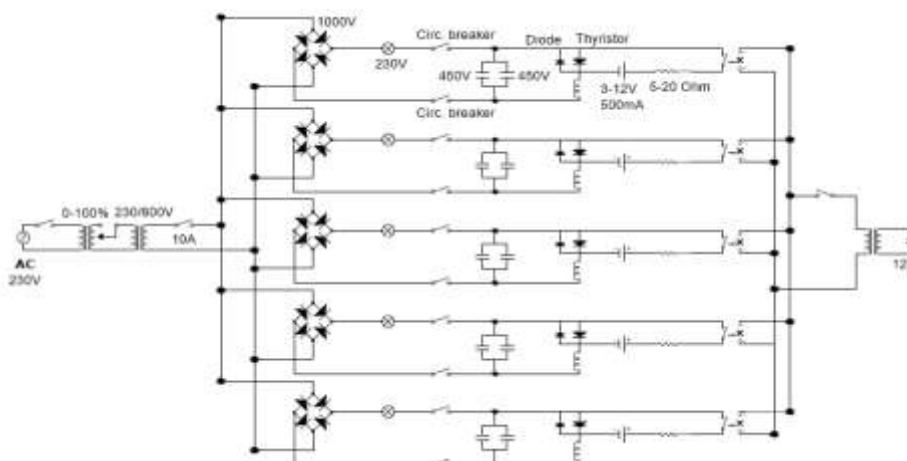


Figura 8. Banco de potência do actuador de impulsão electromagnética simultânea.



Figura 9. Barra de Hopkinson de impulsão electromagnética instalada no Instituto Superior Técnico.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A barra de Hopkinson de impulsão magnética foi utilizada na caracterização mecânica do chumbo tecnicamente-puro para velocidades de deformação compreendidas entre os 200 e os 3000 s^{-1} . Para avaliar a influência da velocidade de deformação no comportamento mecânico do chumbo tecnicamente-puro foram igualmente realizados ensaios de caracterização mecânica em condições quasi-estáticas numa prensa hidráulica de controlo numérico (com velocidades de deformação na gama de 0.02 a 2 s^{-1}). Todos os ensaios foram realizados em provetes cilíndricos lubrificados com PTFE, que possuíam um diâmetro inicial de $D_0 = 8$ mm e uma relação altura/diâmetro iniciais de $D_0/H_0 = 1$.

A Figura (10) apresenta a curva tensão-extensão para as diferentes velocidades de deformação características dos diferentes tipos de ensaios de caracterização mecânica. Os resultados obtidos serviram de base à determinação da equação tensão-extensão do material tendo para o efeito sido seleccionado o modelo Voce devido ao baixo valor do encruamento e à existência de tensões de saturação.

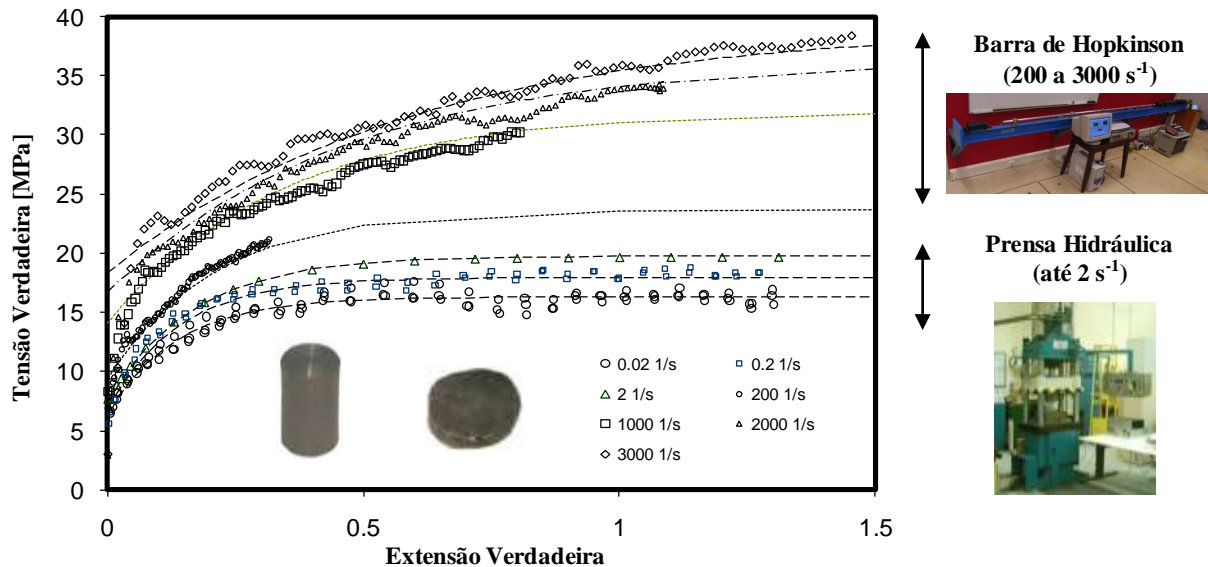


Figura 10. Curva tensão-extensão verdadeira do chumbo tecnicamente-puro para diferentes velocidades de deformação.

Para facilitar a compreensão dos resultados obtidos com os diferentes tipos de ensaio procede-se à representação tridimensional da Figura (11) em que se consegue avaliar a influência combinada da extensão e da velocidade de deformação na tensão de escoamento do material. Importa a este propósito referir que a curva tensão-extensão do chumbo tecnicamente-puro que foi obtida neste trabalho apresenta uma boa correlação com os valores encontrados na literatura da especialidade apesar de, tanto quanto se conhece, os resultados conhecidos estarem limitados às baixas velocidades de deformação.

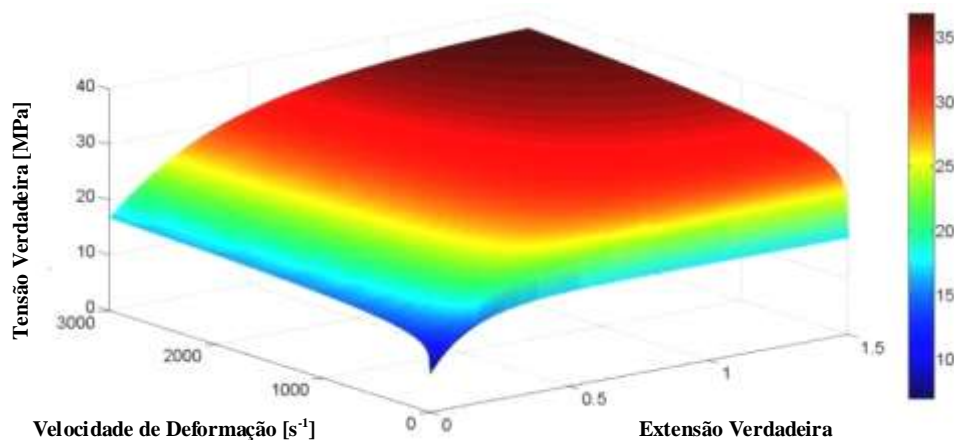


Figura 11. Representação tridimensional da influência da extensão e da velocidade de deformação na tensão de escoamento do chumbo tecnicamente-puro.

A equação tensão-extensão-velocidade de deformação resultante da aplicação do modelo de Voce aos resultados experimentais apresentados nas Figuras (10) e (11) foi introduzida no programa de elementos finitos (I-Form2) para proceder à simulação numérica dos ensaios de compressão em condições análogas às experimentais. A análise dos resultados apresentados na Figura (12) permite verificar que a metodologia de caracterização do comportamento mecânico do material e a estratégia de construção do modelo de Voce a partir dos resultados experimentais permite obter estimativas numéricas idênticas à dos resultados experimentais. Nestas condições pode-se afirmar que estão criadas as bases para a caracterização experimental do comportamento mecânico dos materiais para elevadas velocidades de deformação que são indispensáveis para a compreensão fenomenológica e para a simulação numérica dos processos de deformação plástica que ocorrem em alguns processos de fabrico (caso por exemplo do corte por arranque de apar e do forjamento em martelos de queda ou prensas de fusão).

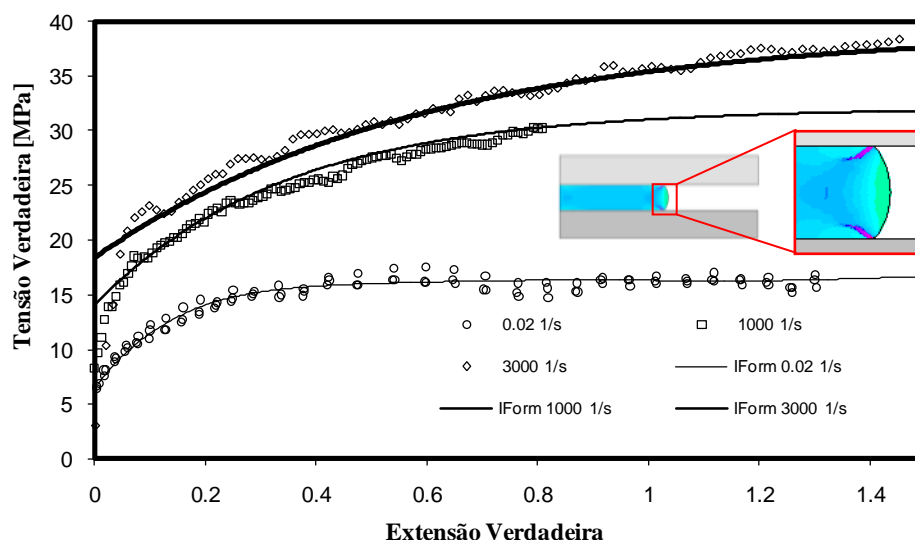


Figura 12. Estimativas numéricas e experimentais da tensão e extensão efectivas durante ensaios de compressão de chumbo tecnicamente-puro realizados para diferentes velocidades de deformação.

4. CONCLUSÕES

O artigo apresenta uma barra de Hopkinson de características inovadoras que recorre à impulsão electromagnética para efectuar o disparo da barra projectil. O sistema apresentado permite efectuar ensaios de caracterização mecânica de materiais numa gama de velocidades de deformação que se situa várias ordens de grandeza acima da que é habitualmente obtida nas máquinas universais de ensaios. De entre as principais vantagens do sistema de impulsão electromagnético relativamente à concepção tradicional baseada no disparo de ar a pressões elevadas destacam-se; (i) a possibilidade de ajuste da velocidade de actuação com precisão e repetibilidade elevadas através do controlo dos parâmetros eléctricos do banco de potência capacitivo, (ii) a diminuição das vibrações decorrente da ausência de actuação brusca de válvulas pneumáticas e da eliminação das ondas de pressão derivadas da expansão do ar comprimido e do contacto entre a barra projectil e o sistema de disparo pneumático, (iii) a possibilidade de escolher e ajustar os sistemas de impulsão electromagnética mais adequados para a realização dos ensaios (podendo ser contempladas velocidades de actuação baixas ou altas) e (iv) a redução do comprimento total do equipamento devido ao facto do sistema de disparo electromagnético permitir obter acelerações mais elevadas da barra projectil.

Os resultados obtidos permitem concluir que a caracterização do chumbo tecnicamente-puro em condições quasi-estáticas apresenta um afastamento muito significativo relativamente aos resultados obtidos para velocidades de deformação mais elevadas. Acresce o facto que a barra de Hopkinson de impulsão electromagnética com disparador simultâneo também permite alcançar velocidades de deformação próximas das que se obtêm com equipamentos de características quasi-estáticas sendo os resultados obtidos para a curva tensão-extensão muito próximos dos que tinham sido previamente determinados com esse tipo de equipamentos. Esta particularidade reforça a flexibilidade e aumenta significativamente o domínio de aplicabilidade do sistema desenvolvido pelos autores (Silva e colaboradores, 2008a, 2008b).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores querem agradecer o apoio financeiro do POCI-2010 e do projecto PTDC/EME-TME/64575/2006, FCT Portugal.

6. REFERÊNCIAS

- Follansbee P. S., 1985, "The Hopkinson bar mechanical testing, ASM Handbook, American Society for Metals, Vol. 8, pp.198-203.
- Gray, George, T. (Rusty) III, 1997, "High Strain-Rate Testing of Materials: The Split Hopkinson Bar. Methods in Materials Research", John Wiley Press.
- Hopkinson, B., 1914, "A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets", Philos. Trans. R. Soc. (London) A, Vol. 213, pp. 437-456.
- Kolsky H., 1949, "An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading", Proc. Phys.Soc. (London) B, Vol. 62, pp. 676-700.
- Lindholm, U. S., 1964, "Some experiments with the split-Hopkinson pressure bar", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 12, pp.317-335.
- Lindholm, U. S., Yeakley, L. M., "High strain rate testing: tension and compression", Exp. Mechanics, Vol. 8, 1968, p.1-9.
- Salisbury, C., 2001, "Spectral Analysis of Wave Propagation Through a Polymeric Hopkinson Bar", MSC Thesis, University of Waterloo, Ontario (Canada).
- Silva C. M. A., Martins P. A. F., Rosa P. A. R. e Bastos J. R., (2008a), "Actuador linear simultâneo de relutância magnética", Pedido de patente PT 104165 / INPI.
- Silva C. M. A., Martins P. A. F., Rosa P. A. R., (2008b), "Máquina de ensaios de Hopkinson de impulsão electromagnética", Pedido de patente PT 104167 / INPI.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

MECHANICAL BEHAVIOUR OF TECHNICALLY-PURE LEAD UNDER DIFFERENT STRAIN-RATE CONDITIONS

Carlos M.A. da Silva, carlosalves_silva@hotmail.com¹

Pedro A.R. Rosa, pedro.rosa@ist.utl.pt¹

Paulo A.F. Martins, pmartins@ist.utl.pt¹

¹IDMEC, Instituto Superior Técnico, TULisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

Abstract: *This paper proposes an innovative design for the compressive split Hopkinson bar that makes use of the intense pressure created in a transient magnetic field formed by the passage of a pulse of electric current through a series of coils. The magnetic field behaves like air being relief from a high pressure vessel and is capable of properly accelerating the striker bar against the incident bar. However, because the propulsion is purely electromagnetic, its overall performance can be easily controlled and nearly infinitely adjustable. The operation conditions are very highly repeatable and, once the equipment has been set up for a particular testing method and the only extra variable to be taken into account is the material to be characterized*

The proposed equipment and the overall experimental methodology are presented as a basis for the characterization of the mechanical behaviour of materials under the high rates of loading that are commonly found in several manufacturing processes. The choice of technically-pure lead for performing the experimental investigation is due to the importance of this material in physical modelling and in fundamental research studies where analytical models, that were set-up under rigid-perfectly plastic conditions, need to be assessed against experimental results. The stress-strain curves obtained by means of the proposed electromagnetic compressive split Hopkinson bar are compared against reference values taken from the literature.

Keywords: *Hopkinson bar; electromagnetic; mechanical characterization; high strain rates;*