
ESTUDO DA ENERGIA MECÂNICA NECESSÁRIA PARA A GERAÇÃO DE PULSOS MECÂNICOS EM UMA BARRA DE KOLSKY

GOMES, M. P.¹; SANTANA, M.S.¹ ROSSI, J. L.²; POLITANO, R.²

¹ Faculdade de Tecnologia de São Paulo, FATEC-SP
Praça Coronel Fernando Prestes, Bom Retiro – 011240-60 – São Paulo
m_gomes@outlook.com, matheussouza1@gmail.com

² Laboratório de Ensaios Dinâmicos
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN - CNEN/SP
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária - 05508-00 - São Paulo
jelrossi@ipen.br, politano@ipen.br

Resumo - A análise da resposta a pulsos mecânicos em materiais a serem utilizados em sistemas para transporte de substâncias radioativas é uma das condições para a sua respectiva seleção e dimensionamento. Para que se faça a caracterização da resposta dos materiais candidatos a este tipo de solicitação é necessária a construção de aparatos experimentais, sendo que neles é aplicado um pulso mecânico de forma controlada e com parâmetros conhecidos, possibilitando assim a obtenção das características mecânicas do corpo-de-provas - aparato este conhecido como barra de Kolsky. Uma parte crítica do aparato, é o alinhamento de todo o conjunto, pois o ensaio a ser realizado é considerado unidimensional. O menor desalinhamento irá causar distorções na onda mecânica de compressão, então os dados obtidos pela extensometria na superfície das barras não serão condizentes com a realidade. Portanto, o propósito deste projeto foi o de produzir um mancal que possibilitasse o alinhamento com uma maior precisão dos eixos x, y do aparato. Tal alinhamento será inicialmente feito manualmente, porém no dimensionamento e concepção do mancal foi reservado um espaço para o acoplamento de um servomotor, que futuramente irá ser utilizado para o ajuste preciso e automático do aparato.

Palavras-chave: ensaio de materiais, energia mecânica, pulsos mecânicos, barra de Kolsky.

Abstract - *The analysis of the response to mechanical pulses of materials to be used in casks for transport of radioactive substances is one of the conditions for their selection and dimensioning. In order to make the characterization of the response of candidate materials to this application, it is necessary to build an experimental apparatus is required, and it is applied a controlled mechanical pulse with known parameters, thus enabling obtaining of the mechanical characteristics of the specimen - this apparatus is known as Kolsky bar. A critical part of the apparatus is the alignment of the entire assembly because the test is considered one-dimensional. Therefore, the lowest misalignment will cause distortions in the compression mechanical wave then the data obtained by the extensometry on the surface of the bars are not consistent with reality. Therefore, the initial purpose of this project was to produce a bearing that would enable alignment with greater accuracy of the x, y-axis of the apparatus. This alignment will be done initially manually, but the size and design of the bearing can accommodate a coupling servomotor, which will be used for accurate and automatic adjustment of the apparatus.*

Keywords: test of materials, mechanical energy, mechanical pulses, Kolsky bar.

1. Introdução

A barra de Kolsky é um equipamento utilizado para a caracterização dinâmica de materiais submetidos a elevadas taxas de deformação. Só nas últimas décadas houve avanços significativos no uso deste processo como método de análise do comportamento de materiais, devido à grande evolução tecnológica. A título de exemplo, refira-se que a parte frontal de um automóvel em condições de impacto, pode gerar taxas de deformação de 300 s^{-1} . Do mesmo modo processos industriais como a extrusão a alta velocidade, estão sujeitos às mesmas elevadas taxas de deformação (Benassi, 2005).

Todos os elementos apresentados neste artigo foram com o objetivo de desenvolver um protótipo de mancal para um aparato de caracterização dinâmica de materiais utilizados no transporte de substâncias radioativas. O ensaio realizado na barra de Kolsky permite avaliar o comportamento do material sob taxas de deformação de até 10^4 s^{-1} em testes de compressão, e $5 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ para testes de tração e torção (Neves, 2013). Após o ensaio ser realizado, será escolhido o material que melhor atende as características mecânicas, normas de segurança e que sua utilização seja viável. O aparato que melhor caracteriza o material sob essas condições é a barra de Kolsky, também abordada na literatura como barra de Hopkinson, ou SHPB (do inglês *Split Hopkinson Pressure Bar*).

O funcionamento do aparato ocorre da seguinte maneira: na barra incidente e transmitida do aparato, são colocados extensômetros que vão registrar a intensidade e o tempo de passagem da onda mecânica de compressão, conforme mostrado na Fig. 1 (Benassi, 2005).

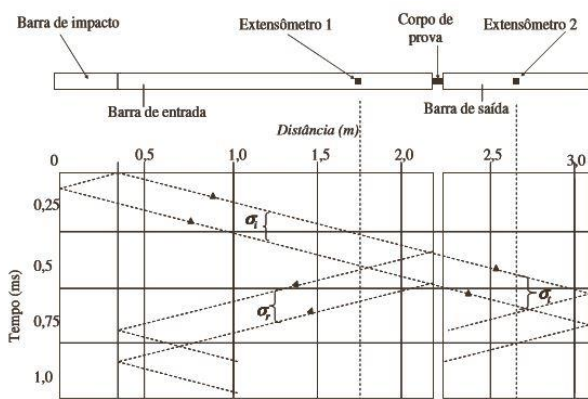


Figura 1. Propagação da onda mecânica na barra de Kolsky (Benassi, 2005).

Durante o impacto da barra de impacto na barra incidente é gerada uma onda mecânica de compressão que se propagará ao longo da barra incidente, porém quando esta onda chegar ao corpo-de-provas, devido a este possuir densidade diferente da densidade de que são constituídas as

barras, parte da onda mecânica de compressão será refletida na passagem pelo corpo-de-provas e a outra parte será transmitida à segunda barra, denominada barra transmitida, conforme mostra a Fig. 2 (adaptado de Chen, 2011).

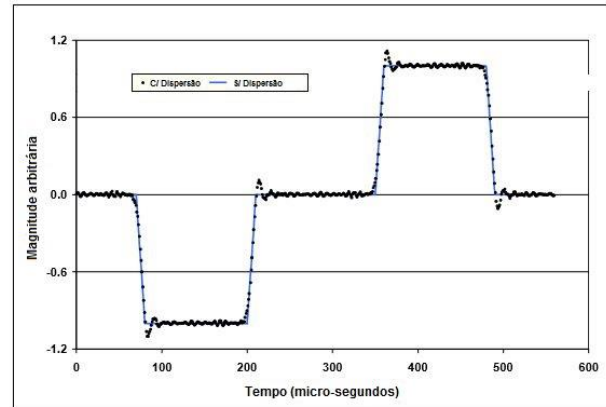


Figura 2. Representação de um sinal trapezoidal típico obtido na SHPB (adaptado de Chen, 2011).

Este aparato é produzido sob encomenda pela empresa americana *REL Inc.*, porém não é produzido industrialmente no Brasil nem mesmo possui normas regulamentadoras até então. Portanto para conseguir-se caracterizar os materiais nucleares, serão necessários o dimensionamento e a fabricação própria do aparato.

O aparato é de vital importância na área de caracterização e estudo das propriedades mecânicas de resistência ao impacto, por exemplo, do revestimento do embalado para transporte de material radioativo, em especial o Mo-99 (Hara, 2015). Além de existirem poucas barras de Kolsky no Brasil (salvo nos institutos: POLI-USP, IME, ITA), cada aparato é dimensionado para atender a certa gama de materiais, por exemplo, o ensaio de cerâmicos à base de alumina (Cardoso, 2005). Atualmente não há uma barra de Kolsky para ensaiar materiais nucleares, e mesmo que houvesse algum aparato dimensionado para a análise de elementos nucleares, o transporte destas substâncias para outros lugares para posterior análise seria um processo muito burocrático, sem contar os riscos que poderá trazer a sociedade. A Fig. 3 mostra uma barra de Kolsky (adaptado de Kaiser, 1998).

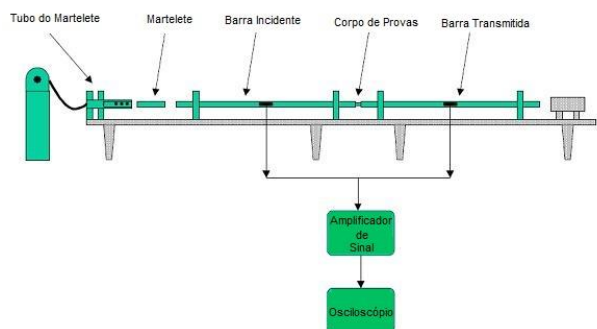


Figura 3. Ilustração da barra de Kolsky ou SHPB (adaptado de Kaiser, 1998).

Após uma série de pesquisas na literatura, verificou-se que um ponto crítico do aparato é o alinhamento de todo o equipamento, pois o ensaio realizado na barra de Kolsky é considerado unidimensional (Chen, 2011), e qualquer desalinhamento no equipamento pode resultar na distorção das ondas mecânicas de compressão geradas durante a realização do ensaio de materiais. Portanto, o ensaio não seria válido para a caracterização de materiais. Na Fig. 4 é ilustrado um dos métodos de alinhamento do equipamento, neste exemplo o alinhamento é à laser (Chen, 2011).

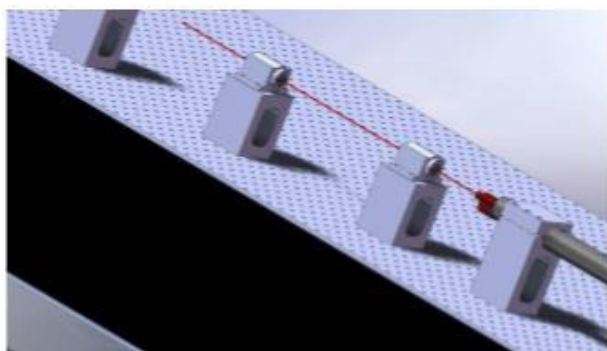


Figura 4. Desenho esquemático de um alinhamento à laser (Chen, 2011).

2. Objetivos

O objetivo deste artigo foi o de desenvolver um componente (mancal protótipo) para o suporte das barras incidente e transmitida com o menor atrito possível, por isso optou-se por utilizar pastilhas de teflon devido a seu baixíssimo coeficiente de atrito (Kaiser, 1998), e alinhamento completo da barra de Kolsky. Pois o alinhamento de todo o aparato é de vital importância para obter-se dados condizentes com a realidade. Posteriormente, estes dados podem ser utilizado para realizar o dimensionamento de peças com total confiabilidade de sua reposta mecânica. Portanto, o objetivo foi o de desenvolver um mancal que possibilite o deslizamento da barra com o menor atrito possível

na superfície em contato com o mancal e a movimentação e conseqüentemente o alinhamento com ajuste fino dos eixos x, y, de todo o aparato.

Um mancal semelhante é usado no Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impactos em Estruturas na Universidade de São Paulo, no Instituto Federal para Pesquisas e Ensaio de Materiais - BAM na Alemanha e no Centro para Tecnologias Protetoras da Universidade Nacional de Singapura, para citar alguns.

3. Metodologia

O mancal definido como o mais adequado para possibilitar a obtenção dos melhores resultados de alinhamento durante o ensaio não é encontrado há venda. Portanto, este foi o elemento desenvolvido como parte integrante e vital da barra de Kolsky.

A primeira etapa no desenvolvimento do mancal foi realizar a sua idealização com o auxílio de aplicativos de CAD, conforme ilustrado na Fig. 5.

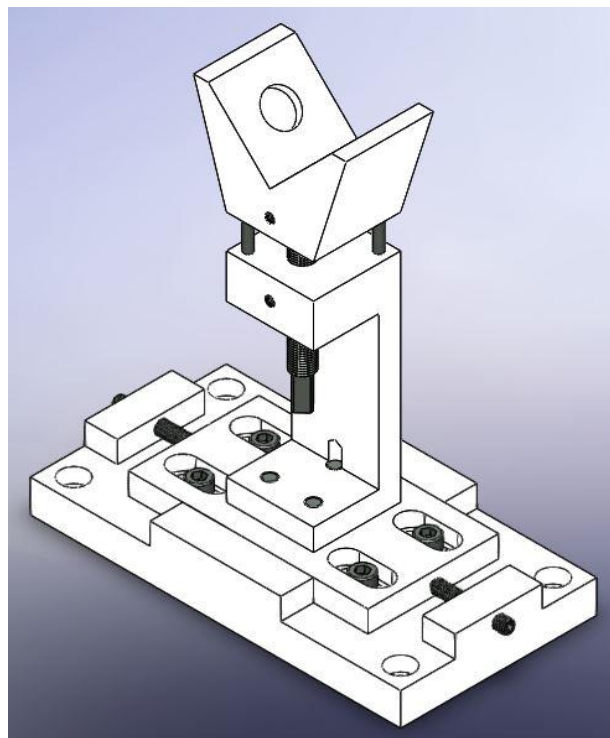


Figura 5. Perspectiva do mancal protótipo.

Durante esta etapa foram estabelecidos alguns parâmetros para a concepção do mancal, tais como: quais eram as máquinas operatrizes disponíveis nos laboratórios de usinagem e quais as ferramentas que poderiam ser utilizadas no processo de fabricação, pois como a fabricação da maioria dos elementos do mancal seria própria, foi interessante projetar o mancal de forma a utilizar os recursos já disponíveis, sem necessidade de investimentos, o que tornaria inviável a obtenção do mancal em desenvolvimento.

O próximo passo foi à escolha do material a ser

utilizado para a fabricação do mancal protótipo. O material escolhido foi o *polipropileno*, devido ao seu baixo custo, sua boa usinabilidade e por ser um material de fácil obtenção. Depois de definido todos os parâmetros necessários, foi realizada a aquisição do *blank* retangular de *polipropileno*, com as seguintes dimensões: 0,22 x 0,35 x 0,04 m, e pesando cerca de 3,5 kgf.

O material escolhido para ser utilizado nas buchas de apoio das barras foi o teflon, pois tanto o seu coeficiente de atrito estático quanto o dinâmico é muito baixo (0,4) (Kaiser, 1998).

Depois deu-se início as operações de usinagem, começando pela serra de fita vertical (vide Fig. 6), que foi utilizada para cortar o *blank* original em pedaços menores, pois este processo facilitou as operações seguintes de usinagem. Então foi obtido o *blank* de cada componente do mancal.



Figura 6. Serra de fita vertical utilizada para cortar o *blank* em partes menores.

Com o *blank* de cada componente em mãos, foi dado prosseguimento nas operações de usinagem, utilizando a máquina operatriz fresadora universal (vide Fig. 7). Foram despendidas diversas horas de usinagem somente nesta máquina, algo em torno de 90% do tempo total de fabricação.



Figura 7. Usinagem da base do mancal na fresadora universal.

Após a usinagem das peças na fresadora vertical, já era possível ter uma boa ideia de como seriam as peças e seus respectivos funcionamentos no conjunto do mancal, conforme ilustrado na Fig. 8.

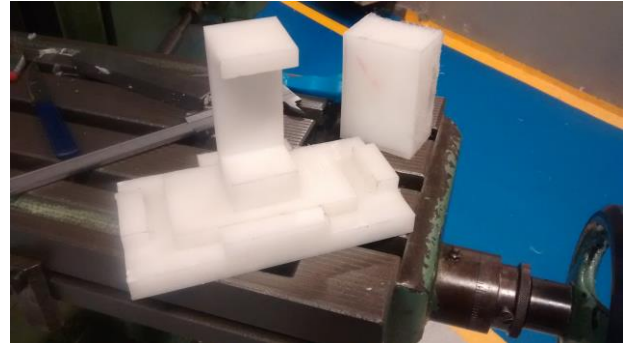


Figura 8. Componentes do mancal semi-acabados.

Depois de finalizada as operações de usinagem na fresadora universal deu-se prosseguimento nas operações de usinagem utilizando a furadeira de coordenadas (vide Fig. 9), pois devido ao seu painel de leituras digital e sua precisão milesimal este processo de furação possibilitou a obtenção de furos com grande precisão e exatidão (Bulba, 2009).



Figura 9. Furadeira de coordenadas.

A última operação foi à usinagem de dois parafusos (vide Fig. 10). As operações de usinagem realizadas nesta etapa foram as seguintes: 1º usinagem de um canal cônico em um dos parafusos para que este girasse em falso quando acionado (item 1); 2º a ponta do segundo parafuso (parafuso sem cabeça) foi usinada para obter uma forma cônica (item 2), possibilitando assim o bloqueio do movimento de translação do outro parafuso (item 1) em relação a parte superior do mancal. Estas operações foram realizadas utilizando-se o torno universal (vide Fig. 11).

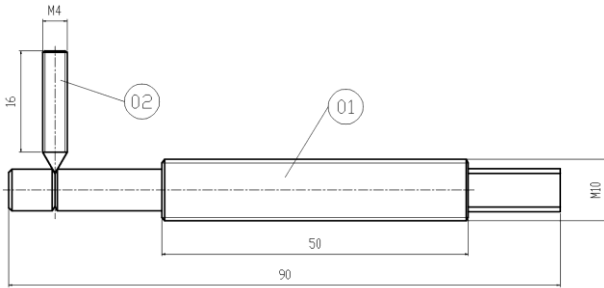


Figura 10. Representação do funcionamento dos parafusos.



Figura 11. Torno universal semi-automático.

Foi realizado um levantamento dos elementos normalizados que seriam utilizados para a montagem final do mancal, tais elementos foram: parafusos de cabeça cilíndrica com sextavado interno (DIN 912), pinos guia paralelo (ISO 2338) e parafusos sem cabeça (DIN 916). Com a lista de elementos normalizados, foi realizada a aquisição destes itens.

Após a aquisição dos elementos normalizados, foi feita a junção destes elementos com os elementos de fabricação própria, obtendo assim a montagem do mancal inicialmente projetado.

4. Resultados

O ajuste no alinhamento do aparato passível de ser obtido é muito grande, principalmente no eixo x, pois o comprimento da barra incidente e transmitida já adquirida é de 1,6m cada, e o passo dos parafusos utilizados lateralmente (item 01 da Fig. 12) é de 0,001m (1mm). Portanto, o valor do ajuste fino (AF) que pode ser obtido no eixo x, considerando apenas um mancal protótipo será: o passo do parafuso lateral (PPL) dividido pela soma dos comprimentos das barras (LT):

$$AF = \frac{PPL}{LT} = \frac{0,001 \text{ (m)}}{3,2 \text{ (m)}} = \frac{1}{3200}$$

Portanto, o alinhamento do eixo x pode ser realizado com uma precisão de 0,0003125.

O mesmo conceito se aplica ao eixo y do aparato, porém o passo do parafuso que permite este ajuste é diferente (item 02 da Fig. 12), sendo de 0,00075m (0,75mm). Portanto, o valor do ajuste fino (AF) que pode ser obtido no eixo y, considerando apenas um mancal protótipo será: o passo do parafuso vertical (PPV) dividido pela soma dos comprimentos das barras (LT):

$$AF = \frac{PPV}{LT} = \frac{0,00075 \text{ (m)}}{3,2 \text{ (m)}} = \frac{0,75}{3200}$$

Portanto, o alinhamento do eixo y pode ser realizado com uma precisão de 0,000234375.

O protótipo do mancal fabricado obteve grande semelhança em termos de controle dimensional, de forma e posição (Bulba, 2009) em relação ao mancal projetado utilizando-se aplicativos de CAD, conforme ilustrado na Fig. 12. O mancal também respondeu bem ao deslizamento das barras incidente e transmitida com baixíssimo atrito (Kaiser, 1998), pois as barras estarão em contato somente com a bucha de teflon (item 03 da Fig. 12) acoplada ao protótipo do mancal.

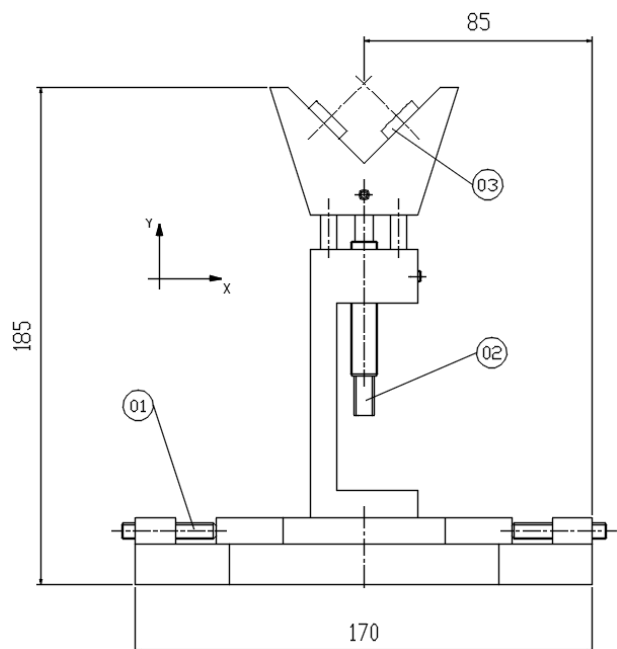


Figura 12. Desenho técnico do mancal protótipo (dimensões em milímetros).

Na Fig. 13 é ilustrada a montagem realizada com os elementos fabricados e elementos normalizados adquiridos do mancal protótipo. Esta imagem foi capturada durante a simulação prática de alinhamento das barras. E há uma imagem menor do mancal protótipo projetado, para ser feita a comparação entre o mancal fabricado e o projetado que foi obtido através de aplicativos de CAD.

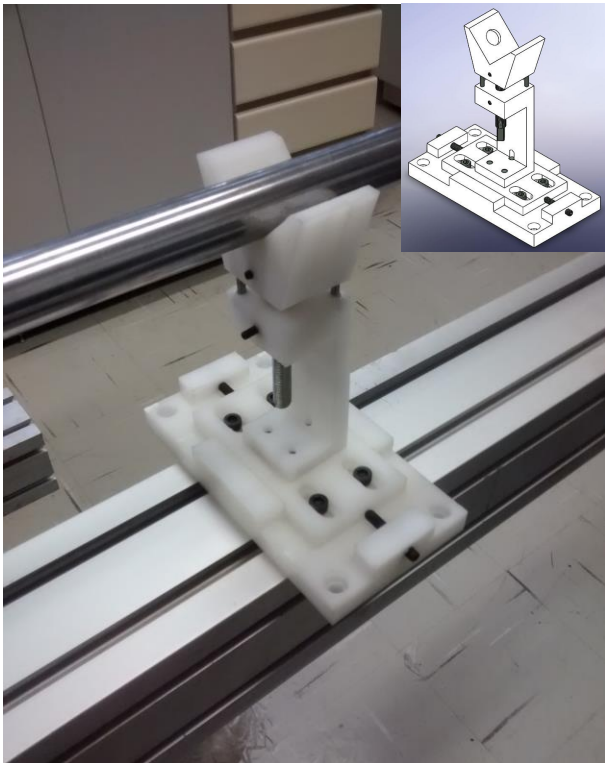


Figura 13. Montagem do mancal protótipo.

Os resultados obtidos foram bons, pois de acordo com as simulações práticas realizadas no mancal, o mesmo respondeu as expectativas esperadas. Porém para uma análise total da funcionalidade do mancal, é necessário que se construa toda barra de Kolsky.

5. Discussão

Ocorreu um problema com o mancal protótipo, pois o *polipropileno* é passível de deformação muito fácil devido a concentração interna de tensões. E devido a isto ocorreu o empenamento de uma das peças após a usinagem. Porém, o problema foi logo resolvido com o auxílio dos docentes do laboratório de usinagem.

O ensaio realizado na barra de Kolsky é considerado unidimensional (Chen, 2011). E o método mais utilizado para a verificação plena da capacidade de alinhamento do mancal, é a realização de um ensaio de caracterização dinâmica através da barra de Kolsky, porém sem a utilização de corpo-de-provas (Chen, 2011). O aparato já está em desenvolvimento para ser realizado tal ensaio. Alguns itens que compõe a barra de Kolsky, por exemplo: viga “I”, pés de suporte, reservatório de ar-comprimido e sistema de acionamento pneumático (vide Fig. 14) já foi adquirido pelo IPEN.

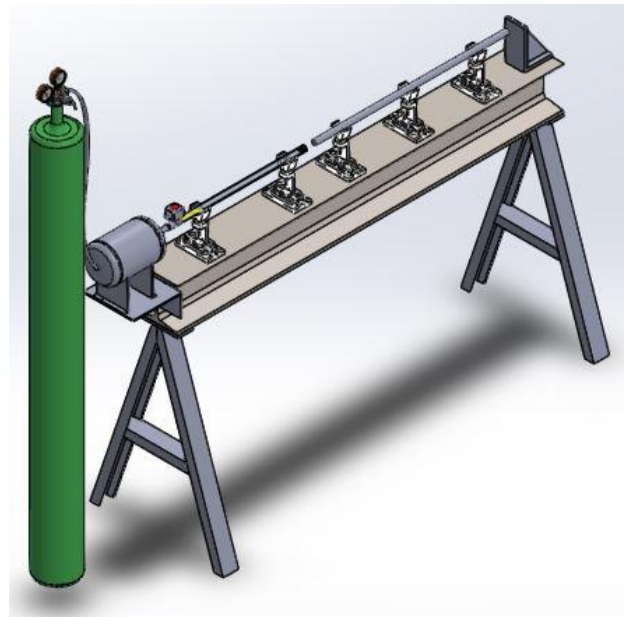


Figura 14. Perspectiva da barra de Kolsky.

Então para ter certeza do alinhamento do aparato, o ensaio é realizado sem o corpo-de-provas e os dados coletados pelos extensômetros da onda incidente, onda refletida e onda transmitida passando pelos amplificadores de sinais e posteriormente sendo transmitidos ao osciloscópio e finalmente analisado através de softwares de tratamentos de dados, devem ser de ondas trapezoidais sem distorções, como representado na Fig. 15.

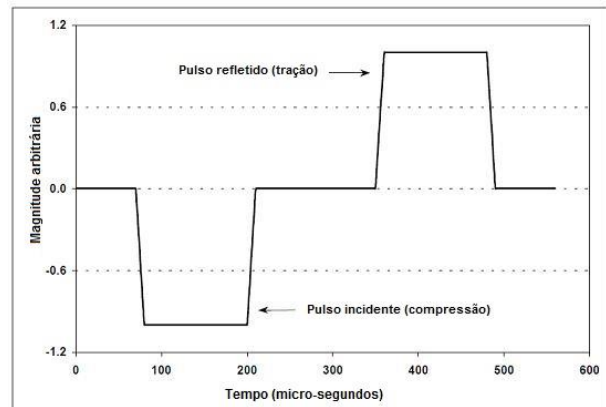


Figura 15. Representação de um sinal trapezoidal sem distorções obtido na SHPB.

O passo seguinte após obtenção do mancal protótipo e verificação de sua funcionalidade, é realizar a fabricação de um mancal definitivo, que deve ser constituído de um material com melhores propriedades mecânicas e químicas, pois ocorreram alguns problemas relativos a utilização do *polipropileno* com relação ao seu processo de obtenção e conseqüentemente defeitos em sua estrutura cristalina. A etapa de fabricação do novo mancal está em andamento e o material que

melhor atende as especificações exigidas com bom custo/benefício é o SAE 1040, e sua usinagem será realizada utilizando máquinas operatrizes CNC.

6. Conclusão

Após a fabricação e realização de simulações práticas para verificação do nível de precisão e alinhamento dos mancais, o mesmo pode ser utilizado não somente na barra de Kolsky em desenvolvimento no IPEN, mas também em qualquer barra de Kolsky em que há uma intercambiabilidade no ajuste da altura do aparato.

No decorrer do processo de fabricação, foram necessárias algumas alterações devido haver outras soluções mais simples para certos problemas técnicos. Posteriormente tais alterações realizadas no mancal foram repassadas aos desenhos desenvolvidos em aplicativos de CAD anteriormente, constituindo assim o *as built* do mancal.

O alinhamento do eixo y atualmente é realizado manualmente, através de um parafuso métrico de rosca fina. Porém, durante o dimensionamento do mancal e seu desenvolvimento, foi reservado um espaço para futuramente ser acoplado um servomotor, possibilitando assim um ajuste fino com maior precisão e também podendo ser ajustada a altura do mancal automaticamente, sendo que o acionamento do servomotor será realizada através de aplicativos, por exemplo o *Labview*.

7. Agradecimentos

Aos docentes e colaboradores do IPEN, por estarem sempre dispostos a ajudar em qualquer hipótese e pelas sugestões durante todas as fases de concepção do mancal protótipo.

Aos auxiliares docentes do laboratório de usinagem da FATEC-SP, pelo companheirismo e pelas dicas preciosas de usinagem.

8. Referências Bibliográficas

CHEN, W., SONG, B. **Split Hopkinson (Kolsky) Bar**, Design, Test and Applications, Springer Publication, New York, 2011.

KOLSKY, H. **Stress Waves in Solids**, Dover Publications, New York, 1963.

BENASSI, F. **Modulação de Pulso para Regularização da Taxa de Deformação em teste com Barra de Hopkinson**. Dissertação (mestrado). São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005.

NEVES, R. **Desempenho de Defensas Rodoviárias Sujeitas ao Impacto de Automóveis**. Dissertação (mestrado). São Paulo: Universidade de São Paulo, 2013.

HARA, D. **Seleção de Materiais para Embalado de Transporte de Mo-99**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-18082015-092143/pt-br.php>>. Acesso em: 16 set. 2015.

CARDOSO, A. **Caracterização Dinâmica por Impacto de cerâmicos à base de Alumina**. Tese (Doutoramento). Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2005.

KAISER, M. **Advancements in the Split Hopkinson Bar Test**. 1998. Dissertação (Mestrado) – Virginia Polytechnic Institute, Virginia. Disponível em: <<http://scholar.lib.vt.edu/theses/public/etd-41998-18465/materials/ETD.pdf>>. Acesso em: 22 dez. 2014.

BULBA, E. **Tolerâncias, Medições e Qualidade**, 1ª Edição, São Paulo, 2009.

REL Inc. Disponível em: <<http://www.relinc.net/split-hopkinson-bar-kolsky-bars/split-hopkinson-bar/>>. Acesso em: 16 set. 2015.

9. Nota de Responsabilidade

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.