

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DIMENSIONAMENTO DE UMA BARRA DE HOPKINSON PARA ENSAIOS DE ALTA
VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO EM PLÁSTICOS DÚCTEIS

por

Robinson Friedrich Kist

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho de 2014.

**DIMENSIONAMENTO DE UMA BARRA DE HOPKINSON PARA ENSAIOS DE ALTA
VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO EM PLÁSTICOS DÚCTEIS**

por

Robinson Friedrich Kist

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler

Coorientador: Prof. Dr. Tiago Becker

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Prof. Dr. Rogério José Marczak

Porto Alegre, 16 de junho de 2014.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao Prof. Jakson Vassoler e ao Prof. Tiago Becker pelo apoio e incentivo para a realização desse trabalho.

Aos meus pais, Nelson e Ana e meu irmão Alberto por todo apoio que deram durante toda essa jornada.

Aos meus amigos por todos os momentos de alegria que me proporcionaram.

KIST FRIEDRICH, Robinson. **Dimensionamento de uma barra de Hopkinson para ensaios de alta velocidade de deformação em plásticos dúcteis** 2014. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

O ensaio mecânico com barra Hopkinson (SHPB) é um dos principais ensaios mecânicos para caracterização do comportamento mecânico de materiais sob altas taxas de deformação. Sua principal característica frente aos outros ensaios é que, por meio deste, consegue-se obter a curva tensão-deformação. Através de um estudo do problema de propagação de ondas em sólidos, chegou-se ao equacionamento para a barra, bem como seus requisitos de projetos. Ao final se propõem um dimensionamento preliminar de um aparato experimental de barras de Hopkinson para uso em materiais plásticos dúcteis e este é comparado com os sistemas encontrados em literatura. Também nesse trabalho, em função do dimensionamento das barras, analisa-se as especificações mínimas para um sistema de aquisição capaz de registrar o sinal do fenômeno de propagações de onda do fenômeno.

PALAVRAS-CHAVE: Barra de Hopkinson, Alta velocidade de deformação, Dimensionamento.

KIST FRIEDRICH, Robinson. **Design of a Split Hopkinson Pressure Bar for high strain-rate experiments on ductile polymers**. 2014. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

The Split Hopkinson Pressure Bar Test is one of the main experimental measurement techniques for obtaining material properties under high strain-rate impacts. Its main advantage over other experimental techniques is that, with this apparatus, it's possible to obtain stress-strain curves of the specimen. The SHPB design was developed with aid of elastic wave propagation theory presented in the literature and using project design requirements. At the end of this case study, a SHPB design is proposed for testing ductile polymers at high strain-rates. The resulting dimensions of the designed SHPB components are then compared with the ones described in the literature. In this paper it was also analyzed the minimum frequency response of the data-acquisition system in order to measure the high-frequency signals in the SHPB experiment.

PALAVRAS-CHAVE: Hopkinson, high strain-rate, impact, design.

Conteúdo

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	1
3. BARRA DE HOPKINSON.....	1
3.1 CLASSIFICAÇÃO DE ENSAIOS PARA ALTAS VELOCIDADES DE DEFORMAÇÃO.....	1
3.2 BARRA DE HOPKINSON: CARACTERIZAÇÃO E FUNDAMENTOS.....	3
3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA CONCEPÇÃO DO APARATO.....	5
3.3.1 BARRAS.....	5
3.3.2 CORPO DE PROVA.....	5
3.3.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	5
3.3.3 PROJÉTIL.....	6
3.4 FATORES IMPORTANTES NOS RESULTADOS OBTIDOS NO EXPERIMENTO.....	6
3.4.1 EQUILÍBRIO DE TENSÕES.....	6
3.4.2 MINIMIZAÇÃO DOS EFEITOS DE ATRITO.....	6
3.4.3 MINIMIZAÇÃO DOS EFEITOS DE DISPERSÃO.....	7
3.4.4 TAXA DE DEFORMAÇÃO CONSTANTE.....	7
3.4.5 MINIMIZAÇÃO DOS EFEITOS DE INÉRCIA.....	8
3.4.6 PROPAGAÇÃO DE ONDA UNIDIMENCIONAL.....	8
4. DIMENSIONAMENTO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	8
4.1 EQUACIONAMENTO DAS BARRAS.....	8
4.2 DIMENSIONAMENTO DAS BARRAS.....	10
4.2.1 O DIMENSIONAMENTO DAS BARRAS.....	10
4.3 A ESCOLHA DAS ESPECIFICAÇÕES ADEQUADAS DO OSCILOSCÓPIO.....	11
5. CONCLUSÃO.....	14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Taxas de deformação e técnicas de experimentos (Ramesh, 2008)	2
Figura 2 - Curva tensão-deformação conforme taxa de deformação obtida por meio do ensaio de Hopkinson, Silva (2010)	2
Figura 3 - Componentes do SHPB (Silva, 2010).....	3
Figura 4 - Propagação dos pulsos de tensão no espaço-tempo (Ramesh, 2008)	3
e Pulsos obtidos pelos Strain gauges (Ramesh, 2008)	3
Figura 5- Interface barras-corpo de prova (Chen e Song, 2011)	4
Figura 6 - Pulso de onda com base retilínea e fluante(Chen e Song, 2011).....	6
Figura 7 - Filtro mecânico de cobre em um experimento de Hopkinson (Chen e Song, 2011).....	7
Figura 8 - Geração do pulso de tensão por meio do impacto do projétil (Alves, Birch e Gallina, 2003)	8
Figura 9 - Mecanismos relacionados com a formação de ondas retangulares:.....	12
Figura 10 - Fenômeno conhecido como Aliasing, (Manual Tektronics, 2014)	12
Figura 11 - Comportamento de um osciloscópio de frequência de resposta gaussiana com banda (f_{BW}) especificada na frequência de Nyquist(f_N), (Manual Agilent, 2014)	13
Figura 12- Componentes da frequência que sofrem Aliasing quando a banda do osciloscópio é da ordem de $1/4F_s$ (Manual Agilent, 2014).....	13

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados para o limite superior de taxas de deformação	11
Tabela 2: Resultados para o limite inferior de taxas de deformação.....	11

1. INTRODUÇÃO

A determinação das características mecânicas dos materiais é imprescindível para sua aplicação em projetos de engenharia. Estas informações são necessárias principalmente no cálculo de componentes mecânicos, pois com elas é possível antecipar sua falha e, dessa maneira, tomar as devidas precauções para que o projeto se torne viável, não só sob o aspecto estrutural, mas também sob o aspecto econômico.

Uma das principais informações experimentais, obtidas por meio de ensaios mecânicos, são as curvas tensão-deformação dos materiais. Nela define-se a região de deformação elástica, a região de deformação plástica, o limite de escoamento, o limite de ruptura, enfim, toda a relação entre tensão e deformação do material. Com esses dados, através de cálculos, é possível prever o comportamento do material quando aplicado em uma estrutura mecânica sujeita a um estado de tensão-deformação pré-determinado.

Geralmente as propriedades dos materiais tais como tensão de cisalhamento e tensão de escoamento listadas em tabelas e livros de engenharia são obtidas sob carregamentos quase-estáticos usando técnicas padrões de ensaio. No entanto, para garantir a qualidade e a confiabilidade de um produto quando este se encontra em uma situação de impacto - tais como colisão de veículos, queda de smartphones e tablets, impactos em capacetes de segurança - é necessário que se tenha informações precisas sobre o comportamento do material em altas velocidades de deformação.

Os ensaios mecânicos de altas velocidades de deformação mais utilizados internacionalmente são os ensaios de Charpy e Izod, que a partir do uso de um martelo deformam o corpo de prova até que ocorra sua falha. Entretanto, há dois problemas principais quando se faz uso de um martelo para determinar as propriedades de um material: a primeira, é que pouca informação útil para obtenção da curva tensão-deformação pode ser obtida deste evento. A segunda, é que as condições sob as quais o corpo de prova se encontra durante o impacto não são bem controladas (taxa de deformação, deformação, estado de tensões). Um ensaio de Charpy, por exemplo, pode produzir taxas de deformação de até 100/s, porém o dado obtido resulta apenas na energia absorvida até a falha do material, mas não uma curva tensão-deformação completa (Chen e Song, 2011).

Assim sendo, necessita-se da utilização de um ensaio mecânico que nos possibilite obter as curvas tensão-deformação, sob condições controladas, a fim de obter-se propriedades dos materiais quando submetidos a altas velocidades de deformação. Dentro das possibilidades, o sistema que tem se destacado nesta tarefa é a barra de Hopkinson (Ramesh, 2008).

2. OBJETIVO

Nesse trabalho será feito um dimensionamento e um estudo das principais características de um sistema barras de Hopkinson (SHPB - Split Hopkinson Pressure Bar), que é um dispositivo para ensaio mecânico utilizado para obter as curvas tensão-deformação de materiais quando submetidos a altas taxas de deformação. Dessa forma, serão definidas especificações de projeto que visam a caracterização de materiais plásticos dúcteis abrangendo desde o material utilizado nas barras e suas dimensões, até as especificações mínimas do sistema de aquisição de dados. Este trabalho também objetiva dar um início a estudos de maneira a possibilitar uma futura construção dessa máquina de ensaios para ser utilizada no laboratório do Gmap.

3. BARRA DE HOPKINSON

3.1 CLASSIFICAÇÃO DE ENSAIOS PARA ALTAS VELOCIDADES DE DEFORMAÇÃO

Segundo Ramesh (2008), os ensaios de altas velocidades de deformação podem ser enquadrados em quatro categorias em ordem crescente de complexidade:

1. Experimentos de altas taxas de deformação, que consistem em medir as propriedades do material quando esse se encontra sob taxas de deformação da ordem de 10^2 a $10^6 s^{-1}$.

2. Experimentos de propagação de onda, que visam entender as características da propagação de ondas no material ou estrutura; ocorrem sob taxas de deformação da ordem de 10^6 a $10^8 s^{-1}$.

3. Experimentos de falha dinâmica, os quais tratam de estudar o processo de falha dinâmica em determinado material ou estrutura.

4. Experimentos de impacto direto, que por sua vez investigam propriedades mecânicas dos materiais relacionadas à fenômenos resultantes de impacto (por exemplo, experimentos de batidas de carro)

As técnicas utilizadas para realizar experimentos variam conforme a taxa de deformação solicitada nos materiais, como mostra a Figura 1. Segundo Ramesh (2008), no grupo de máquinas servo-hidráulicas encontram-se os ensaios de tração, compressão e flexão. Já no grupo de máquinas especializadas encontram-se as torres de queda. No grupo de barras de Kolsky convencionais, nas quais encontram-se as barras de Hopkinson, que são ensaios de compressão, encontram-se também as barras de Kolsky de tração e torção. As miniaturas de barras de Kolsky são barras de Kolsky de tamanho reduzido com o objetivo de se alcançar maiores taxas de deformação. Já o Pressure-shear plate impact foi desenvolvido para estudar o comportamento do cisalhamento nos materiais sob taxas extremamente altas de deformação (Ramesh, 2008).

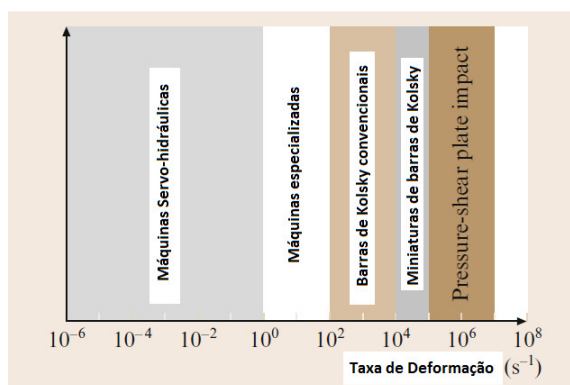


Figura 1 - Taxas de deformação e técnicas de experimentos (Ramesh, 2008)

O que distingue o experimento de Hopkinson dos demais experimentos de alta velocidade é que, mesmo em altas velocidades de deformação, é possível obter-se a curva tensão-deformação para várias taxas de deformação (figura 2), ao passo que, nos ensaios de falha dinâmica e de impacto direto, consegue-se uma informação pontual sobre o momento de falha do material.

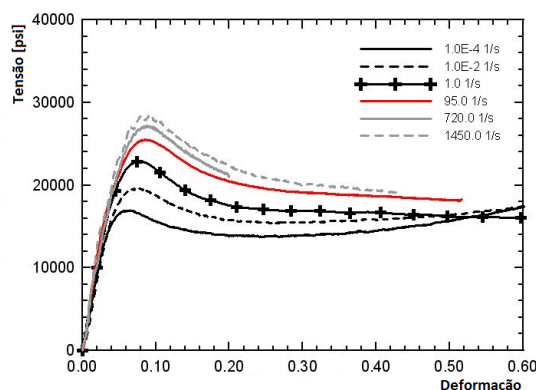


Figura 2 - Curva tensão-deformação conforme taxa de deformação obtida por meio do ensaio de Hopkinson, Silva (2010)

3.2 BARRA DE HOPKINSON: CARACTERIZAÇÃO E FUNDAMENTOS

A SHPB (Figura 3) consiste de um conjunto de duas barras alinhadas – conhecidas como barra incidente e barra transmitida - dentre as quais existe um corpo de prova. Um projétil atinge coaxialmente a face livre da barra incidente (Kaiser, 1998). Esse impacto dá origem a uma onda de tensão compressiva que se propaga pelo corpo de prova e pela barra transmitida (Kolsky, 1949).

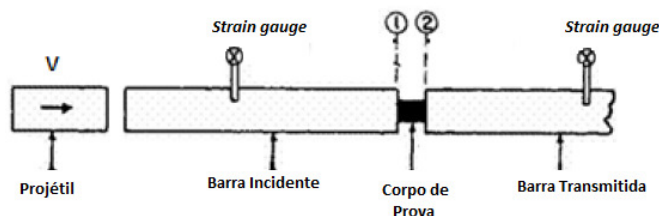


Figura 3 - Componentes do SHPB (Silva, 2010)

Strain gauges são colocados sobre as barras, para medir os pulsos de onda incidente, refletido e transmitido, com os quais, por meio de relações matemáticas, obtém-se um diagrama tensão-deformação para cada taxa de deformação em análise. Seja ε_I o pulso incidente, ε_R o pulso refletido e ε_T o pulso transmitido, a figura 4 mostra a propagação das ondas de tensão nas barras e no corpo de prova, e um exemplo de sinais obtidos pelos *Strain gauges* nas barras incidente e transmitida para um ensaio de Hopkinson para um corpo de prova de Vanádio.

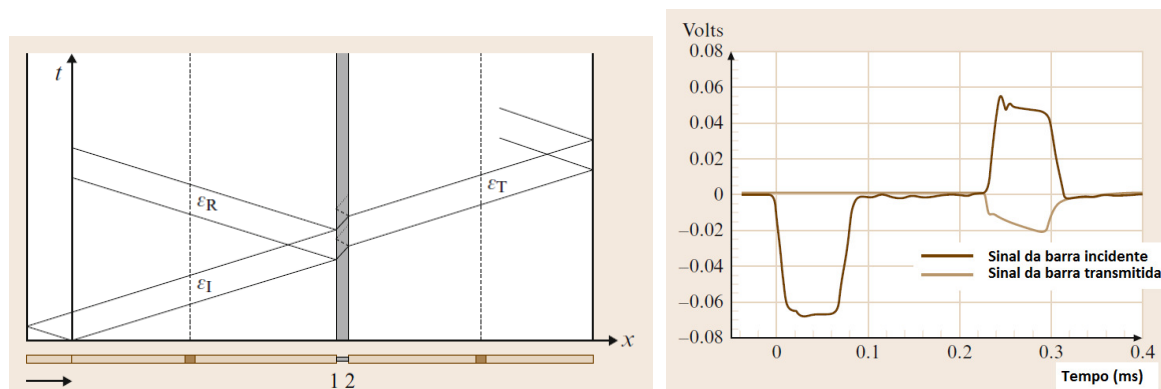


Figura 4 - Propagação dos pulsos de tensão no espaço-tempo (à esquerda) e Pulsos obtidos pelos Strain gauges (à direita) (Ramesh, 2008)

O equacionamento é facilmente obtido através de relações de propagação de ondas em sólidos. Seja $C_B = \sqrt{\frac{E_B}{\rho_B}}$ a velocidade de propagação do pulso de onda na barra, ρ_B a massa específica da barra e E_B o módulo de young da barra. Assumindo as hipóteses (Chen e Song, 2011):

1. As ondas se propagam sem dispersão nas barras incidente e transmitida;
2. Apenas tensões uniaxiais no corpo de prova.
3. Os pulsos medidos nas localizações dos *Strain gauges* representam os pulsos medidos na região de contato entre as faces das barras e o corpo de prova;
4. O corpo de prova deve estar sob equilíbrio de tensões;

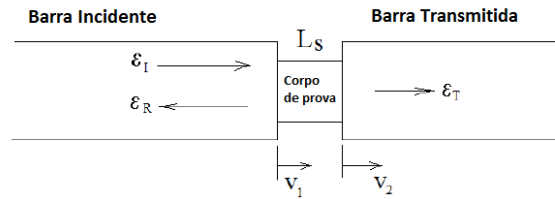


Figura 5- Interface barras-corpo de prova (Chen e Song, 2011)

A velocidade das partículas nas faces 1 e 2 do corpo de prova (Figura 5) em função dos pulsos de onda medidos é calculada por (Chen e Song, 2011) :

$$v_1 = C_B(\varepsilon_I - \varepsilon_R) \quad (3.1)$$

$$v_2 = C_B \varepsilon_T \quad (3.2)$$

Seja L_s a espessura do corpo de prova, a taxa de deformação média de engenharia e a deformação no corpo de prova são calculadas por:

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{v_1 - v_2}{L_s} = \frac{C_B}{L_s} (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_s = \int_0^t \dot{\varepsilon} dt = \frac{C_B}{L_s} \int_0^t (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) dt \quad (3.4)$$

Denotando-se A_B como a área das faces das barras e A_s como a área das faces do corpo de prova, as tensões nas faces do corpo de prova são calculadas por:

$$\sigma_1 = \frac{A_B}{A_s} E_B (\varepsilon_I + \varepsilon_R) \quad (3.5)$$

$$\sigma_2 = \frac{A_B}{A_s} E_B \cdot \varepsilon_T \quad (3.6)$$

Baseando-se na hipótese de que o corpo de prova se encontra sob o equilíbrio de tensões no experimento de Hopkinson, segue que:

$$\sigma_1 = \sigma_2 \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_I + \varepsilon_R = \varepsilon_T \quad (3.8)$$

Simplificando as equações (3.5), (3.6) e (3.8) chega-se às relações que calculam a taxa de deformação nominal, a deformação nominal e a tensão nominal no corpo de prova (Kolsky, 1949), por meio das quais - conhecendo-se a rigidez do material da barra e suas características geométricas, juntamente com as ondas incidente, refletida e transmitida - calcula-se as curvas tensão-deformação:

$$\dot{\varepsilon}_s = -2 \frac{C_B}{L_s} \varepsilon_R \quad (3.9)$$

$$\varepsilon = -2 \frac{C_B}{L_s} \int_0^t \varepsilon_R dt \quad (3.10)$$

$$\sigma = \frac{A_B}{A_s} E_B \cdot \varepsilon_T \quad (3.11)$$

As equações acima são referentes as deformações e tensões de engenharia e os esforços compressivos foram tomados como sendo de sinal positivo no equacionamento.

3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA CONCEPÇÃO DO APARATO

Atualmente tem-se feito muitas pesquisas envolvendo variações de geometrias de corpos de prova e estudos sobre os efeitos de dispersão. Woldesenbet e Vinson (1997) realizaram experimentos nos quais variavam a razão comprimento/diâmetro do corpo de prova entre 0,5 e 2, concluindo que, nesse intervalo, não havia uma influência grande na minimização de erros decorrente da presença de atrito entre o corpo de prova e as barras. Gorham e Wu (1997) fizeram experimentos envolvendo os efeitos de dispersão presentes no ensaio de Hopkinson e apresentaram uma correção baseada nas características de fase das ondas, de maneira que esse artigo contribuiu para a determinação da natureza dispersiva dos materiais.

3.3.1 BARRAS

Ramesh (2008) afirma que as barras geralmente são feitas com materiais metálicos de alta resistência mecânica, no entanto, quando o objetivo é a caracterização de matérias moles, utiliza-se materiais de menor rigidez - como o Alumínio - e menores áreas de secções transversais são requeridas a fim de obter-se uma maior amplificação do sinal. As barras geralmente são feitas do mesmo material, mesmo diâmetro e devem permanecer no regime elástico durante a realização do experimento (Chen e Song, 2011). Com o objetivo de se ter propagação de ondas de tensão predominantemente longitudinais, o conjunto deve estar precisamente alinhado e com atrito minimizado, livre para se movimentar na horizontal. Segundo Gray (1998), a barra incidente deve ser, no mínimo duas vezes maior que o projétil de maneira a eliminar o overlapping entre os pulsos incidente e refletido. Gray (1998) também afirma que para obter-se uma maior clareza nas medições das deformações e nas leituras do osciloscópio cada barra deve possuir uma razão L_B/D_B (comprimento/diâmetro) de no mínimo 20. A escolha do diâmetro das barras depende do material a ser testado e do grau de dispersão das ondas de tensão que possibilitem realizar o experimento (Ramesh, 2008). Entretanto, o diâmetro das barras em ensaios de Hopkinson geralmente se encontra entre 10 e 25mm (Chen e Song, 2011).

3.3.2 CORPO DE PROVA

Os principais fatores que influenciam o projeto de um experimento de Hopkinson são as dimensões do corpo de prova (sua espessura e diâmetro) e a escolha da velocidade de impacto do projétil de maneira a obter uma determinada taxa de deformação no corpo de prova. Outros parâmetros de projeto, como o comprimento das barras e seu diâmetro, são mais relevantes para o projeto para o sistema das barras de Hopkinson do que para um específico experimento. Os fatores mais importantes de projeto são três razões: L_B/D_B , D_B/D_s e L_s/D_s . Encontra-se em literatura L_B/D_B com valores próximos de 100 e D_B/D_s com valores de 2 a 4 (Ramesh, 2008). Por sua vez, L_s/D_s pode variar entre 0,5 a 1 (Bertholf e Karnes, 1975).

3.3.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Os *Strain gauges* devem ser posicionados no meio das barras em configuração de pontes de wheatstone (dois *strain gauges* por ponte em configuração half bridge, uma ponte por barra) de maneira que não ocorra overlapping entre os pulsos incidente e refletido (Ramesh, 2008). Normalmente no SHPB, a voltagem de saída nos *Strain gauges* possui uma amplitude muito pequena (da ordem de mili-volts), assim sendo, é necessário um amplificador de sinais para a obtenção de dados. Tanto o osciloscópio, quanto o amplificador devem possuir uma resposta de frequência suficientemente alta para gravar o sinal, que pode ter uma duração abaixo de 1 mili-segundo em um experimento de Hopkinson. Em Chen e Song (2011) afirma-se que frequência mínima de resposta de todos os componentes no sistema de aquisição de

dados deve ser de 100 kHz. Porém sabe-se que este vai depender das características construtivas da barra.

3.3.3 PROJÉTIL

O projétil deve ser feito de mesmo material, possuir diâmetro igual ao das barras e deve permanecer no regime elástico durante o ensaio (Chen e Song, 2011). É importante ressaltar que a velocidade do projétil deve ser controlada por um mecanismo estável e com alta repetibilidade. Esta velocidade geralmente é medida opticamente ou magneticamente, momentos antes do impacto. Um bom alinhamento entre o projétil e o sistema de barras durante o impacto também é importante, pois produz um perfil trapezoidal analítico e previsível para o pulso de onda (Chen e Song, 2011). Este tipo de pulso é fundamental para obter bons resultados no experimento, na figura 6 temos exemplos de um bom perfil (base retilínea) e um mal perfil (base flutuante), respectivamente.

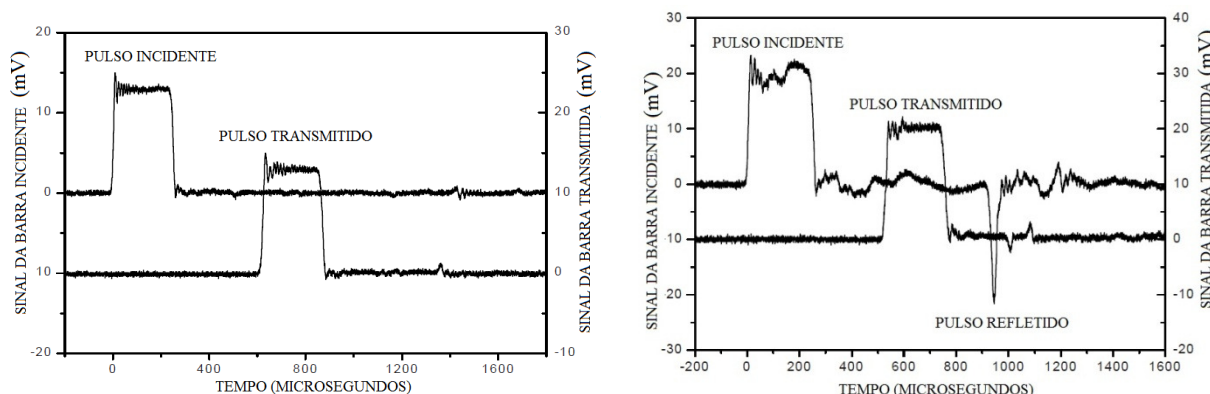


Figura 6 - Pulso de onda com base retilínea (à esquerda) e base flutuante (à direita) (Chen e Song, 2011)

3.4 FATORES IMPORTANTES NOS RESULTADOS OBTIDOS NO EXPERIMENTO

3.4.1 EQUILÍBRIO DE TENSÕES

A natureza do experimento de Hopkinson é tal que o carregamento decorrente do impacto atinge primeiro um lado do corpo de prova. Dado que as ondas se propagam dentro do corpo de prova com uma velocidade finita, o equilíbrio de tensões leva um intervalo de tempo diferente de zero para ocorrer (Ramesh, 2008). Esse equilíbrio de tensões é requerido para garantir que a tensão medida na face do corpo de prova em contato com a barra transmitida represente a tensão média no corpo de prova (Ramesh, 2008). A ausência de equilíbrio de tensões no corpo de prova durante um experimento de Hopkinson pode levar a uma drástica deformação não-uniforme no corpo de prova, o que invalidaria os resultados experimentais para caracterização das propriedades do material (Chen, Frew e Forrestal, 2002). Davies e Hunter (1963) estimaram que 3 reverberações de ondas de carregamento no corpo de prova são suficientes para garantir o equilíbrio de tensões em corpos de provas dúcteis. A capacidade de verificar se a tensão axial está equilibrada dentro do tempo de interesse é crítica para a utilização correta do método das barras de Hopkinson. Para alguns experimentos mais complexos, envolvendo materiais extremamente moles ou taxas de deformações extremamente altas, às vezes é necessária a análise computacional da propagação das ondas dentro do corpo de prova para estimar a quantidade de tempo requerida para alcançar o equilíbrio de tensões axiais (Ramesh, 2008).

3.4.2 MINIMIZAÇÃO DOS EFEITOS DE ATRITO

O atrito presente nas interfaces de contato - barras/corpo de prova – faz com que o estado de tensões deixe de ser somente uniaxial o que, por sua vez, acaba levando a resultados errôneos no experimento (Bell, 1966; Bertholf e Karnes, 1975). Diminuir a espessura do corpo de prova leva a um aumento no alcance das taxas de deformação para um determinado experimento (Ramesh, 2008). Vários pesquisadores mediram o atrito de lubrificantes sob várias taxas de deformação usando corpos de prova em formato de argola (Wang e Lenard, 1992). Essas medições nos mostraram que o atrito geralmente diminui com o aumento das taxas de deformação.

Entretanto, conforme a razão L_s/D_s se torna menor, os efeitos de atrito nas interfaces vai se torna mais substancial, se o coeficiente de atrito na interface (barras/corpo de prova) não é suficientemente baixo, o que leva a medições incorretas da tensão (Bertholf e Karnes, 1975). Para ensaios de compressão quase-estáticos, razões L_s/D_s da ordem de 1,5 a 3,0 são recomendadas em vários padrões ASTM com o uso de um lubrificante apropriado (ASTM International, 1999). Em contraste, para experimentos convencionais de Hopkinson, razões L_s/D_s de 0.5 a 1.0 são largamente usadas, conforme Bertholf e Karnes (1975). A fricção interfacial depende da qualidade acabamento superficial, do material da barra e do corpo de prova, do lubrificante usado, da velocidade de impacto e da temperatura (Ramesh, 2008).

3.4.3 MINIMIZAÇÃO DOS EFEITOS DE DISPERSÃO

Segundo Ramesh (2008), as ondas longitudinais em barras elásticas sofrem dispersão geométrica, de tal maneira que os pulsos, incidente, refletido, transmitido mudam conforme eles se propagam ao longo das barras. Entretanto, as equações mencionadas neste trabalho ignoram os efeitos de dispersão. Essa dispersão de ondas resulta do fato de que a velocidade de propagação do pulso varia conforme a frequência de excitação de onda. Assim sendo, essa diferença de velocidade induz efeitos de distorção nas deformações medidas nos *strain gauges* (Silva, 2010). Dessa maneira, quanto maior o conteúdo de frequências de um pulso de excitação (gerado pelo impacto do projétil), maior a sua dispersão.

A física do efeito de dispersão foi modelada de maneira que correções para o efeito de dispersão foram vastamente estudadas (Follansbee e Frantz 1983; Gorham 1983; Gong, 1990). A correção numérica da dispersão reduz as oscilações na curvas tensão-deformação resultantes das medições efetuadas sobre o corpo de prova em um experimento de Hopkinson. Os efeitos de dispersão de ondas podem ser fisicamente minimizados fazendo-se uso de um filtro mecânico (Figura 7). Assim, um pequeno pedaço de material pode ser colocado na face livre da barra incidente (Chen e Song, 2011).

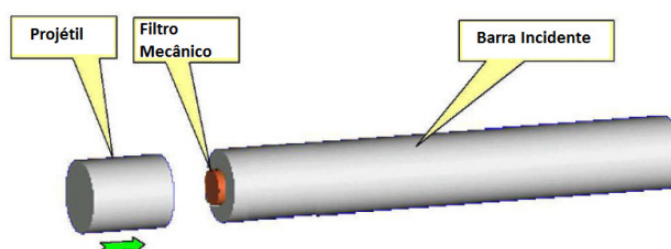


Figura 7 - Filtro mecânico de cobre em um experimento de Hopkinson (Chen e Song, 2011)

A correção por métodos numéricos não é necessária quando se faz uso de filtro mecânico e, além disso, o uso de filtro mecânico também facilita a ocorrência de uma taxa de deformação constante no corpo de prova (Chen e Song, 2011).

3.4.4 TAXA DE DEFORMAÇÃO CONSTANTE

Como já mencionado, o experimento de Hopkinson é realizado para obter-se curvas tensão-deformação para um determinado material sob investigação. Para cada curva de tensão-deformação, a taxa de deformação no corpo de prova deveria ser constante, principalmente para materiais sensíveis a pequenas variações nessas taxas. Uma taxa constante de deformação também colabora para minimizar os efeitos de inércia em pequenas deformações (Chen e Song, 2011). O pulso em forma trapezoidal gerado pelo impacto do projétil no sistema de barras não necessariamente produz uma taxa de deformação constante no corpo de prova. O pulso incidente pode ser modificado de maneira a se conseguir um equilíbrio dinâmico e uma taxa de deformação constante, e uma maneira indicada de se modificar o pulso, consiste fazer o uso de um filtro mecânico (Chen e Song, 2011).

3.4.5 MINIMIZAÇÃO DOS EFEITOS DE INÉRCIA

Há efeitos de inércia presentes tanto na direção axial como na direção radial do corpo de prova à medida que a taxa de deformação varia de zero até o valor almejado. Os efeitos de inércia devem ser minimizados por meio de um projeto adequado das dimensões do corpo de prova e das condições do experimento (Chen e Song, 2011). A inércia radial tem sido apontada como causa de geração de tensão axial extra no corpo de prova. Essa tensão axial adicional (que geralmente é da ordem de 1 MPa), devido à inércia radial, torna-se um fator importante quando pretendemos caracterizar materiais moles como borrachas, gelatinas e tecidos biológicos cujas tensões geralmente são expressas na ordem de kPa. Entretanto, esta se torna desprezível para a maioria dos materiais de engenharia quando a onda de tensão é da ordem de 102 a 103 MPa (Chen e Song, 2011).

3.4.6 PROPAGAÇÃO DE ONDA UNIDIMENSIONAL

As barras incidente e transmitida devem ser suficientemente compridas, livres de atrito e estarem precisamente alinhadas a fim de garantir propagação de onda unidimensional (Chen e Song, 2011). A amplitude máxima da tensão axial diminui na direção radial sendo máxima no centro e mínima na superfície da barra quando a barra não é suficientemente longa.

Segundo Gray (1998), a fim de obter-se propagação de ondas predominantemente longitudinais para um determinado pulso de onda, para a maioria das medições realizadas nesse tipo de experimento, o comprimento da barra deve ser no mínimo de 10 vezes o valor de seu diâmetro.

4. DIMENSIONAMENTO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Considerando-se todos estes fatores, parte-se para um dimensionamento preliminar das barras.

4.1 EQUACIONAMENTO DAS BARRAS

Para fins de equacionamento, consideremos o impacto na figura 8:

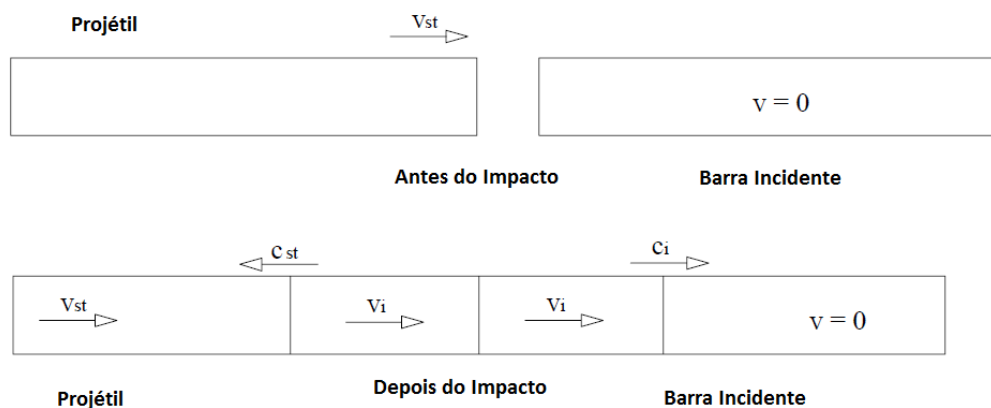


Figura 4 - Geração do pulso de tensão por impacto do projétil (Alves, Birch e Gallina, 2003)

Seja v_{st} a velocidade do projétil antes da ocorrência do impacto e suponhamos que a barra incidente esteja em repouso, logo após o impacto, pode-se considerar que as forças atuantes na barra incidente e no projétil são iguais na interface de contato, desse modo sendo σ_{st} e σ_I as tensões geradas no projétil e na barra incidente, respectivamente, tem-se:

$$A_{st}\sigma_{st} = A_B\sigma_I \quad (4.1)$$

Na qual A_{st} e A_B é são, respectivamente, secção transversal do projétil e da barra. As tensões σ_{st} e σ_I são relacionadas com a velocidade na interface de contato v_i de acordo com as equações:

$$\sigma_{st} = \rho_{st}C_{st}(v_{st} - v_i) \quad (4.2)$$

$$\sigma_i = \rho_B C_B v_i \quad (4.3)$$

onde ρ_{st} e ρ_B são as massas específicas e C_{st} e C_B são as velocidades das ondas elásticas no projétil e na barra incidente. Substituindo as equações (4.2) e (4.3) em (4.1) temos:

$$v_i = \frac{\beta v_{st}}{1+\beta} \quad (4.4)$$

$$\beta = \frac{A_{st}\rho_{st}C_{st}}{A_B\rho_B C_B} \quad (4.5)$$

Utilizando (4.5) e (4.4) em (4.2) e (4.3) é possível calcular σ_{st} e σ_I :

$$\sigma_{st} = \frac{\rho_{st}C_{st}v_{st}}{1+\beta} \quad (4.6)$$

$$\sigma_I = \frac{\rho_B C_B \beta v_{st}}{1+\beta} \quad (4.7)$$

O projétil e a barra incidente permanecem em contato até que o pulso gerado no projétil reflète de sua ponta com um pulso de tensão, se movendo em direção à interface de contato. O tempo, t_p , decorrido até que o pulso retorne para a superfície de contato é igual a:

$$t_p = \frac{2L_{st}}{C_{st}} \quad (4.8)$$

onde L_{st} é o comprimento do projétil. Dessa maneira, o comprimento do pulso gerado na barra incidente é calculado por:

$$L_p = C_B t_p = 2L_{st} \frac{C_B}{C_{st}} \quad (4.9)$$

A intensidade do pulso de tensão transmitido, σ_T , deve garantir o carregamento do corpo de prova com um nível de tensão, σ_s . O pulso refletido, σ_R , pode ser calculado como:

$$\sigma_T = \frac{A_s}{A_B} \sigma_s \quad (4.10)$$

$$\sigma_R = \frac{EL_s}{-2C_B} \dot{\epsilon}_s \quad (4.11)$$

Dessa maneira, com (3.10), (4.10) e (4.11), o pulso incidente é dado por:

$$\sigma_I = \frac{A_s}{A_B} \sigma_s + \frac{EL_s}{2C_B} \dot{\epsilon}_s \quad (4.12)$$

Substituindo a equação (4.12) na equação (4.7), tem-se:

$$v_{st} = \frac{1+\beta}{\rho C_B \beta} \left(\frac{A_S}{A_B} \sigma_s + \frac{E L_S}{2 C_B} \dot{\epsilon}_s \right) \quad (4.13)$$

Assumindo que o pulso refletido se movimenta com velocidade constante, o tempo de duração do pulso, t_p , é calculado por:

$$t_p = \frac{\epsilon_s L_S}{-2 C_B \epsilon_R} \quad (4.14)$$

A partir de (4.14) e (4.9), tem-se:

$$L_p = \frac{\epsilon_s L_S}{-2 \epsilon_R} \quad (4.15)$$

Essas são as equações necessárias para um primeiro dimensionamento das barras segundo o material ensaiado.

4.2 DIMENSIONAMENTO DAS BARRAS

4.2.1 O DIMENSIONAMENTO DAS BARRAS

A metodologia empregada para o dimensionamento das barras de Hopkinson será a mesma empregada por Alves, Birch e Gallina (2003) e, ao mesmo tempo, serão feitas considerações sobre as recomendações da literatura para a validação dos resultados obtidos por meio do equacionamento e requisitos de projeto. Este tipo de dimensionamento na realidade é muito simples, onde as dimensões da barra são escolhidas sem muita complexidade em termos de cálculo. As dimensões podem ser baseadas em critério desejáveis de projeto, bem como construtivos. Estes apenas devem satisfazer as hipóteses assumidas no equacionamento apresentado. Por outro lado, os resultados destas escolhas não é tão simples e levam podem levar a diferentes resposta do sinal a ser medido. Estes sim permitem escolher criteriosamente o sistema de aquisição mínimo, que é um fator primordial para obter os dados necessários para o cálculo da tensão e deformação.

O primeiro fator a se considerar no dimensionamento das barras de Hopkinson é o material do corpo de prova, pois a partir desde será escolhido um material para a barra, de maneira que ambos os componentes (barras e corpo de prova) possuam impedância mecânica ($Z = \rho C$) semelhante a fim de garantir a propagação de onda unidimensional (Chen e Song, 2011). Dessa maneira, as barras deverão ser dimensionadas para realizar testes em plásticos dúcteis, como PVC, PP, PS, entre outros.

Para este trabalho é usado o alumínio como o material das barras e do projétil. Este também foi utilizado em Chen e Song (2011) para experimentos de Hopkinson em plásticos, demonstrando que é uma escolha viável. Assume-se o diâmetro de 25,4 mm (1 pol) para as barras e projétil por ser usual em barras de Hopkinson e pela facilidade de se encontrar barras de alumínio com essas dimensões no mercado. A partir da afirmação de que a razão D_B/D_S geralmente assume valores entre 2 e 4 (Ramesh, 2008), define-se o diâmetro do corpo de prova como sendo de 12 mm. De modo a manter as razão $L_S/D_S = 0,5$ dentro do intervalo recomendado por (Bertholf e Karnes, 1975) - $0,5 \leq L_S/D_S \leq 1$ - o comprimento do corpo de prova, para efeitos de dimensionamento do sistema, será de 6 mm.

Segundo Alves, Birch e Gallina (2003), o SHPB possui duas condições críticas de operação: os testes de máximas e mínimas taxas de deformação, de tal maneira que o dimensionamento deve satisfazer ambas as condições. Assim sendo, segundo características desejáveis para este aparato, define-se que a máxima taxa de deformação será de 5000/s e que, nessa situação, o corpo de prova poderá de deformar até 50% e deve suportar no máximo

uma tensão de 100 MPa. A mínima taxa de deformação adotada será de 500/s e, nessa situação, a deformação máxima e a tensão máximas que poderão agir no corpo de prova serão, respectivamente, de 20% e 100 MPa. Os parâmetros de deformações e taxas de deformações foram definidos conforme Alves, Birch e Gallina (2003), já a tensão de escoamento máxima de 100 MPa foi um critério de funcionalidade desejável para o equipamento. Com estes requisitos definidos para a SHPB pode-se estimar as dimensões de uma barra de Hopkinson.

Utilizando a equação (3.9) e as equações desenvolvidas no item 4.1 deste trabalho, chega-se aos resultados apresentados na tabela 1 e 2, respectivamente, para o limite superior e inferior de taxas de deformação.

Tabela 1: Resultados para o limite superior de taxas de deformação

σ_s [MPa]	$\dot{\epsilon}_s$ [s^{-1}]	ϵ_s [-]	σ_I [MPa]	σ_R [MPa]	σ_T [MPa]
100	5000	50%	235	-213	22,3
σ_{st} [MPa]	v_{st} [m/s]	L_{st} [m]	L_p [m]	t_p [μs]	
235	33,1	0,25	0,5	100	

Tabela 2: Resultados para o limite inferior de taxas de deformação

σ_s [MPa]	$\dot{\epsilon}_s$ [s^{-1}]	ϵ_s [-]	σ_I [MPa]	σ_R [MPa]	σ_T [MPa]
100	500	20%	43,6	-21,3	22,3
σ_{st} [MPa]	v_{st} [m/s]	L_{st} [m]	L_p [m]	t_p [μs]	
43,6	6,14	1	2	400	

Comparando os resultados das Tabelas 1 e 2, percebe-se que o limite superior de taxa de deformação determina que as barras e o projétil deverão ter uma tensão de escoamento maior que 235 MPa, assim escolheu-se a liga 7075-T6 de Alumínio, cuja tensão de escoamento é da ordem de 495 MPa (Callister, 2007). As estimativas para a velocidade máxima a ser atingida pelo projétil e também seu comprimento, o que poderá posteriormente auxiliar no dimensionamento do mecanismo que impulsiona o projétil, são apresentados nas Tabelas 1 e 2. Neste caso, a velocidade máxima do projétil deve ser de 33,1 m/s e seu comprimento pode atingir até 1 m. Outro fator importante determinado pelo limite superior de taxas de deformação é o tempo mínimo de duração de pulso, o qual será fundamental no dimensionamento do sistema de aquisição de dados.

Já o limite inferior das taxas de deformação é responsável por determinar o comprimento máximo do pulso que deverá passar nas barras, determinando assim o comprimento mínimo da barra, o qual deverá ser pelo menos do tamanho do pulso. Tendo isso em vista, O valor encontrado para o comprimento da barra é de $L_B = 2m$. Vale notar que o comprimento da barra dimensionada está de acordo com o comprimento mínimo segundo Gray (1998) de que $L_B \geq 20D_B$.

4.3 A ESCOLHA DAS ESPEFICAÇÕES ADEQUADAS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Segundo Kaiser (1998), devido à natureza dinâmica das ondas presentes no experimento, seu tempo de subida pode chegar a ser da ordem de 10 a 30 μs , dessa maneira, a frequência de resposta do osciloscópio possui influência fundamental na escolha. Outro fator a ser levado em consideração é a duração do pulso de onda do experimento que pode chegar até a ordem de 100 μs , como demonstrado nos cálculos do item 4.2. Para este trabalho será considerado o uso de um osciloscópio, mas é possível montar um sistema de aquisição similar levando em consideração os fatores que serão mencionados.

Com os dados obtidos, é possível dar início à determinação da banda de operação do osciloscópio necessário para o experimento. Os osciloscópios para frequências até 1 GHz

possuem uma resposta gaussiana, na qual ocorre uma atenuação suave do sinal como mostra a figura 11. Assim, a frequência máxima medida pelo osciloscópio é normalmente determinada para o ponto em que amplitude é atenuada em -3 Db a partir do nível de referência, essa atenuação normalmente se traduz num erro de amplitude de 30%. Dessa maneira, não é possível que sejam feitas medições precisas de experimentos que possuam frequências próximas da banda do osciloscópio.

Outra especificação importante para a escolha de um osciloscópio é o tempo de subida. Segundo Whitaker (2005), osciloscópios com resposta gaussiana normalmente tem um tempo de subida de aproximadamente:

$$t_s \cong 0,35/f_{BW} \quad (4.16)$$

Um ponto fundamental para definir a banda (f_{BW}) é o fato de no experimento de Hopkinson trabalha-se com ondas retangulares, assim é necessário entender como essas ondas são formadas no osciloscópio. As ondas retangulares podem ser formadas por um número infinito de ondas senoidais: sendo a soma da frequência fundamental mais seus harmônicos ímpares.

A figura 9 mostra o processo de formação uma onda retangular a partir dos harmônicos ímpares. Segundo (Manual Sabritec, 2014) após a adição de harmônicos ímpares além do nono harmônico, muito pouco benefício é ganho, desta maneira define-se a frequência de banda para representar uma onda retangular como:

$$f_{BW} = 10f_{clk} \quad (4.17)$$

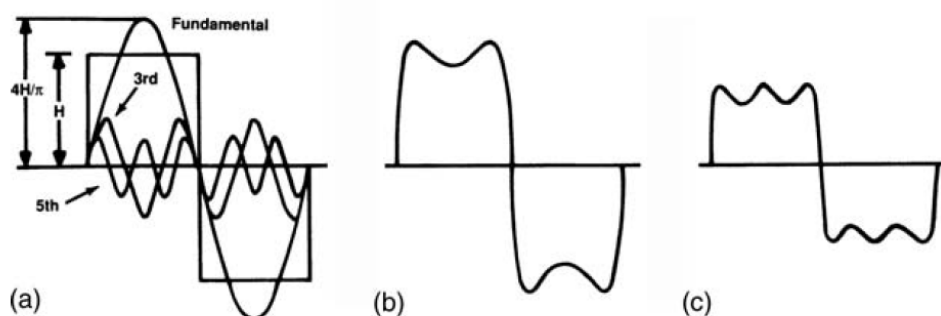


Figura 9 - Mecanismos relacionados com a formação de ondas retangulares:

- (a) Formas de onda individuais envolvidas no processo, (b) Formato de onda resultante da combinação entre a frequência fundamental e o primeiro harmônico ímpar (o terceiro harmônico), (c) Formato de onda resultante da combinação da fundamental, do primeiro, terceiro e quinto harmônico (Whitaker, 2005).

Já para determinar a quantidade de amostras por segundo, precisamos entender inicialmente um fenômeno conhecido como *Aliasing*, o qual ocorre quando o osciloscópio não consegue obter amostras do sinal rápido o suficiente para representar a onda em análise. Quando ocorre *Aliasing*, o osciloscópio mostra como resultado uma onda com uma frequência mais baixa do que a onda do sinal de entrada (figura 10) e, em alguns casos, uma onda que sequer é estável.

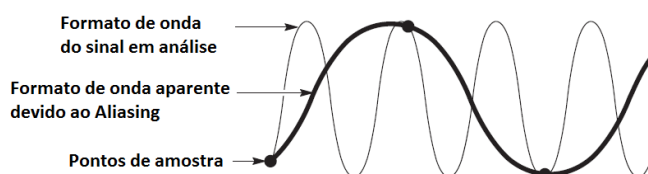


Figura 10 - Fenômeno conhecido como Aliasing, (Manual Tektronics, 2014)

Dessa maneira, precisa-se definir quantos pontos de amostragem são necessários para evitar *Aliasing*. Esse problema pode ser resolvido usando o teorema de Nyquist, o qual afirma que para um sinal com banda limitada e com máxima frequência f_{MAX} , a igualmente espaçada frequência de amostragem, f_S , deve ser maior que o dobro da máxima frequência f_{MAX} , a fim de que o sinal seja reproduzido sem *Aliasing*. No entanto, a banda (f_{BW}) de um osciloscópio não deve ser especificada exatamente na frequência de Nyquist (f_N) devido à atenuação de aproximadamente 30% (3Db) da banda de frequências e também devido a presença de *Aliasing*, como ilustrado na figura 11.

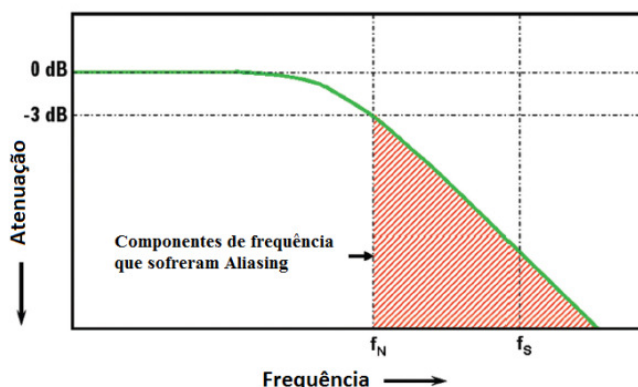


Figura 11 - Comportamento de um osciloscópio de frequência de resposta gaussiana com banda (f_{BW}) especificada na frequência de Nyquist(f_N), (Manual Agilent, 2014)

Como pode-se ver na figura 11, a proporção de taxa de amostras/largura de banda de 2:1 é insuficiente para medições confiáveis de sinais digitais. Segundo (Manual Agilent, 2014) a taxa máxima de amostragem de um osciloscópio (f_S), deve ser no mínimo de 4 a 5 vezes o valor da banda (f_{BW}) especificada no osciloscópio. Com esse critério, pode-se garantir a reprodução com precisão uma onda resultante de sinais digitais de alta velocidade. Admitido que $f_{BW} = f_S/5$, pode-se diminuir os componentes de frequência acima da frequência de Nyquist, reduzindo *Aliasing*, como pode ser visto na figura 12.

$$f_S = 5f_{BW} \quad (4.18)$$

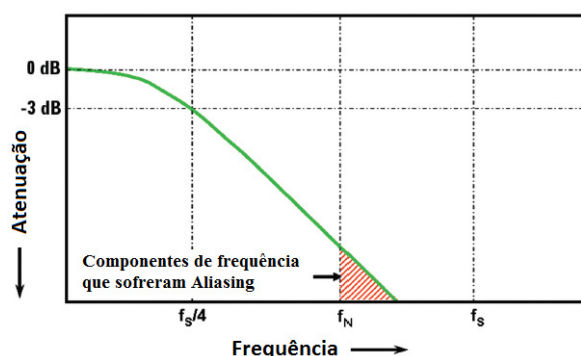


Figura 12- Componentes da frequência que sofrem Aliasing, $f_{BW} = f_S/4$. (Manual Agilent, 2014)

Tendo esses fatores em vista, fazendo uso das equações (4.16), (4.17), (4.18) e analisando duas situações críticas - a de tempo de subida mínimo de $10 \mu s$ e a de menor duração de pulso $t_p = 100 \mu s$ - determinou-se que as especificações mínimas para o sistema de aquisição são tais que: $f_{BW} = 100 \text{ kHz}$ e $f_S = 500 \frac{\text{kSa}}{\text{s}}$, que seria capaz de representar a subida do pulso com 5 pontos.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível dimensionar um aparato de barras para um experimento de Hopkinson com a finalidade da realização de ensaios em altas velocidades em materiais plásticos dúcteis. Neste trabalho foi escolhida uma faixa de operação para a taxa de deformação entre 500/s e 5000/s. Utilizando a mesma metodologia pode-se modificar facilmente esta faixa caso necessário. A partir do limite superior de taxas de deformação pode-se calcular não apenas a tensão de escoamento mínima necessária para as barras, mas também a velocidade do projétil e suas dimensões. As informações do projétil serão úteis para dimensionamento do dispositivo de lançamento do projétil. Não obstante, calculou-se o menor tempo de duração de pulso nas condições prescritas de ensaio e projeto, fator que foi fundamental na determinação das especificações mínimas de um sistema de aquisição necessário para a realização das medições no experimento. Já a partir do limite inferior das taxas de deformação foi determinado o comprimento mínimo da barra. Cabe ressaltar que a metodologia empregada para o dimensionamento fez uso de equações que descrevem o problema de uma barra e se mostrou adequada quando comparada com a literatura.

Quanto ao estudo do experimento, pode-se compreender a sua importância enquanto ensaio mecânico e sua complexidade, possuindo características que variam em função das propriedades dos materiais em ensaio.

No que diz respeito à escolha do sistema de aquisição de dados, este trabalho obteve um valor igual ao indicado por Chen e Song (2011) para a frequência de resposta mínima ($f_{BW} \geq 100 \text{ kHz}$) e, baseado nas recomendações da literatura, foi estabelecida uma frequência de taxa de amostragem de 500 kHz. Entretanto, cabe ressaltar que este valor é apenas para situar o leitor em relação à ordem de grandeza da velocidade de resposta do sistema, e que, para fins práticos, são usualmente utilizados em experimentos de Hopkinson equipamentos com frequência de resposta da ordem de MHz e, em alguns casos, até mesmo da ordem de GHz.

Uma vez construído tal aparato, sugere-se estudar os efeitos dos fatores que influenciam a resposta do sistema, uma vez que isto pode acarretar em descumprimento das hipóteses simplificativas usadas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, Marcílio.; Birch, R.S.; Gallina, Felipe.; Design of a Split Hopkinson Pressure Bar. 18^o Congresso Brasileiro de Engenharia mecânica (COBEM), Ouro preto, 2003.

Agilent. How to make accurate digital measures: Sample Rates vs. Sampling Fidelity, 2014.

ASTM: ASTM Standard E9 3.01 102: Standard test method of compression testing of metallic materials at room temperature. ASTM International, West Conshohocken, 1999.

Bell, J.F. An experimental diffraction grating study of the quasi-static hypothesis of the SHPB experiment, *J. Mech. Phys. Solids* 14, 309–327, 1966.

Bertholf, L.D.; Karnes, C.H. Two dimensional analysis of the split Hopkinson pressure bar system, *J. Mech. Phys. Solids* 23, 1–19, 1975.

Callister, William D. Jr. Materials Science and Engineering An Introduction. Nova Iorque: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

Chen, W.; Song, B. *Split Hopkinson (kolsky) Bar: Design, Testing and Applications*. Nova Iorque: Springer, 2011.

Chen, W.; Lu, F.; Frew, D. J.; Forrestal, M. J. Dynamic compression testing of soft materials. *asme trans. J. Appl. Mech.*, 69:214-223, 2002.

Davies, E.D.H.; Hunter, S.C. The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar (SHPB), *J. Mech. Phys. Solids* 11, 155–179, 1963.

Gorham, D. A.; WU, X. J. An Empirical Method of Dispersion Correction in the Compressive Hopkinson Bar Test. *Journal de Physique III*, 1997. 223-228.

Gray, G.T. III. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at very High Rates of Loading, *ASM Handbook*, Vol. 8, pp. 462-476, 1998.

Ramesh Kalit T. *High Rates and Impact experiments*. Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics, 2008.

Kaiser Michael Adam. Advancements in the Split Hopkinson Bar Test, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.

Kolsky, H. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Strain. *Procedures of Royal Physics Society*, 676-700, 1949.

Silva Luiz Felipe Marine. Projeto de uma Barra de Hopkinson para a caracterização da resposta estrutural de materiais no regime dinâmico, *São José dos Campos*, 2010.

Sabritec. High Speed Digital Tutorial, 2014.

Tektronics Users Manual. TDS 200-Series Digital Real-Time Oscilloscope, 2014.

Wang, F.; Lenard, J.G. An experimental study of interfacial friction-hot ring compression, *Trans. ASME: J. Eng. Mater. Technol.* 114, 13–18, 1992.

Warren, T.L.; Forrestal, M.J. Comments on the effect of radial inertia in the Kolsky bar test for an incompressible material. *Exp. Mech.* (in press), DOI 10.1007/s11340-009-9322-x, 2010.

Whitaker, Jerry C. *The Electronics Handbook*, second Edition, Taylor & Francis Group, 2005.

Woldesenbet, E.; Vinson, J. Effect of specimen geometry in high-strain rate testing of graphite/epoxy composites. *Structural Dynamics*, p. 927-934, 1997.