

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

ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE MATERIAIS SUBMETIDOS A ALTAS  
TAXAS DE DEFORMAÇÃO UTILIZANDO A BARRA DE HOPKINSON

por

Gustavo Fontoura de Aguiar

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, Novembro 2018

ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE MATERIAIS SUBMETIDOS A ALTAS  
TAXAS DE DEFORMAÇÃO UTILIZANDO A BARRA DE HOPKINSON  
por

Gustavo Fontoura de Aguiar

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. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Comissão de Avaliação:

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Rogério José Marczak

Porto Alegre, Novembro 2018

AGUIAR, G. F. de. **Estudo da Caracterização Dinâmica de Materiais Submetidos à Altas Taxas de Deformação Utilizando a Barra de Hopkinson**. 2018. 24p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## RESUMO

Materiais como polímeros e ligas metálicas estão presentes na construção de máquinas e estruturas que podem estar sujeitas a condições de deformação em altas taxas (acima de  $10^2 \text{ s}^{-1}$ ) como impacto, que podem chegar a taxas de deformação de uma ordem de grandeza de  $10^4 \text{ s}^{-1}$ . Para o correto projeto, dimensionamento, ou mesmo para realizar qualquer estimativa da resposta mecânica de componentes mecânicos e estruturais em tais situações, é necessária a informação da curva tensão-deformação do material obtidas em altas taxas de deformação. O aparato de *Split-Hopkinson Pressure Bar* (SHPB) é o dispositivo mais utilizado para essa finalidade. Devido ao fenômeno dinâmico envolvido e instrumentação utilizada, diversos parâmetros do ensaio ainda não estão consolidados e são alvo de estudos. Neste contexto, este trabalho apresenta uma investigação de duas propostas para obtenção das curvas de um metal e de um termoplástico. Para isto, foram realizados ensaios em corpos de prova de alumínio e polioximetileno (POM), onde são apresentadas as curvas tensão deformação utilizando o método de uma e três ondas. Com o aparato utilizado, os resultados demonstraram que o método de uma onda são compatíveis com os encontrados na literatura, enquanto o de três ondas apresenta problemas em sua caracterização.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Split-Hopkinson Pressure Bar, Altas taxas de deformação, ensaio de compressão.*

AGUIAR, G. F. de. **Study of the Dynamic Characterization of Materials Submitted to High Strain Rates Using the Hopkinson Bar**. 2018. 24p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## ABSTRACT

Materials such as polymers and metal alloys are present in the construction of machines and structures that may be subject to deformation conditions at high rates (above  $10^2 \text{ s}^{-1}$ ) as impact, which can reach deformation rates of an order of magnitude of  $10^4 \text{ s}^{-1}$ . For the correct design, sizing, or even to perform any estimation of the mechanical response of mechanical and structural components in such situations, it is necessary to provide information on the stress-strain curve of the material obtained at high deformation rates. The Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB) is the most widely used device for this purpose. Due to the dynamic phenomenon involved and instrumentation used, several parameters of the test are not yet consolidated and are still being studied. In this context, this work presents an investigation of two proposals for obtaining the curves of a metal and a thermoplastic. For this, tests were carried out on aluminum and polyoxymethylene (POM) specimens, where the stress strain-curves were presented using the one and three wave method. With the apparatus used, the results demonstrated that the method of one wave is compatible with those found in the literature, whereas the results of three wave method present problems in its characterization.

**KEYWORDS:** *Split-Hopkinson Pressure Bar, High strain rates, Compression test.*

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVO .....	1
3. ENSAIOS PARA ALTA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO .....	1
3.1 SHPB .....	2
3.2 Formas de Análise.....	4
3.2.1 Análise de três ondas: .....	5
3.2.2 Análise de uma onda: .....	5
3.3 Observações sobre o experimento .....	5
4. METODOLOGIA .....	7
4.1 Descrição do aparato.....	7
4.2 Descrição da instrumentação .....	8
4.3 Descrição do procedimento de operação.....	8
4.4 Descrição do código .....	8
5. ANÁLISE DOS DADOS.....	9
5.1 Resultados Alumínio.....	9
5.2 Resultados POM .....	12
6. CONCLUSÃO .....	14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14
APÊNDICES .....	16

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema da Barra de Kolsky adaptado de (Ramesh, 2008) .....	2
Figura 2 – Teste corpo de prova de alumínio .....	3
Figura 3 – SHPB GMAp .....	7
Figura 4 – Exemplo de seleção dos pulsos pelo código .....	9
Figura 5 – Taxa de deformação de um corpo de prova de alumínio comercial .....	10
Figura 6 – Curva tensão-deformação de alumínio comercial pelo método de uma onda .....	10
Figura 7 - Curva tensão-deformação alumínio pelo método de três ondas .....	11
Figura 8 – Diferença de forças nas interfaces do corpo de prova de alumínio .....	11
Figura 9 – Curvas médias de uma e três ondas .....	12
Figura 10 – Sinal do teste de compressão de um corpo de prova de POM .....	12
Figura 11 – Taxa de deformação de um corpo de prova de POM .....	13
Figura 12 - Curva tensão-deformação para POM pelo método de uma onda .....	13

## 1. INTRODUÇÃO

Materiais poliméricos e ligas metálicas são utilizados na fabricação de componentes mecânicos usados em condições de operação dinâmica como em carros e aeronaves, que podem estar sujeitos a impactos. Alguns desses materiais são extrudados em alta velocidade, assim suportando elevadas taxas de deformação (Lee et al., 2008). Além disto, existe interesse de aplicação militar no desenvolvimento de blindagem leve e eficiente em dissipar energia de impacto a baixo custo (Chen e Luo, 2004), que impulsionam estudos no tema.

Ligas de alumínio comerciais são utilizadas devido a sua elevada resistência mecânica em relação ao seu peso aliada a uma alta resistência a corrosão (Winzer e Glinicka, 2011). Por exemplo, na construção civil, essas estruturas estão sujeitas a ventos e terremotos que podem gerar taxas de deformação na ordem de  $10^4 \text{ s}^{-1}$ , mostrando necessário o conhecimento das propriedades dinâmicas nessas condições.

Estudos mostram que as características mecânicas de diversos materiais poliméricos e ligas metálicas tem comportamento alterado com a faixa da taxa de deformação, como apresentado nos trabalhos de Nakai e Yokoyama (2012) e Winzer e Glinicka (2011). A determinação da resposta mecânica desses materiais nessas condições de deformação é essencial para o correto projeto e dimensionamento de estruturas, máquinas e veículos (Li et al., 2018), pois representa situações reais de engenharia como em acidentes e atentados ou processos de fabricação.

A resposta mecânica de diversos materiais em condições de alta velocidade normalmente não está disponível na literatura, e necessita de aparato específico para sua realização. Quando necessário, essa caracterização é comumente realizada com o aparato *Split-Hopkinson Pressure Bar* (SHPB), conhecido como barra de Hopkinson. No entanto, a aquisição acurada da resposta dinâmica de um material na condição de elevadas taxa de deformação, e seu processamento, não é trivial e necessita de maiores cuidados.

Uma investigação de técnicas para caracterização de materiais em alta taxa de deformação com barra de Hopkinson mostra-se importante para a validação de dados experimentais, principalmente devido ao fato que a validade de sua resposta está diretamente relacionada a necessidade de respeitar as restrições impostas no equacionamento para obtenção das curvas de tensão-deformação.

## 2. OBJETIVO

Esse trabalho tem como principal objetivo estudar técnicas para obtenção de curvas de tensão-deformação, aplicando-as em dados obtidos da realização de ensaios experimentais de material metálico e polimérico em altas taxas de deformação utilizando o aparato Split-Hopkinson Pressure Bar. Para isto, duas formas propostas na literatura para a obtenção da curva tensão-deformação serão estudadas e seus resultados discutidos. Para essa investigação serão realizados testes experimentais com corpos de prova de polioximetileno (POM), termoplástico cristalino de alta rigidez, e liga de alumínio comercial.

## 3. ENSAIOS PARA ALTA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO

Propriedades de materiais geralmente são obtidas em ensaios quase estáticos em testes padronizados. Contudo, propriedades em condição de impacto podem ser necessárias em diversas situações reais de engenharia. Teste de impacto de martelo (Pêndulo Charpy) simula uma situação de impacto, no entanto é difícil a aquisição dos dados e controle do corpo de prova para obtenção de propriedades do material (Chen e Song, 2011).

### 3.1 SHPB

O comportamento de diversos materiais em altas taxas de deformação não é disponível em literatura, principalmente na faixa acima de  $10^2 s^{-1}$ . Para resolver esse problema, Kolsky (1949) propôs um método de ensaio baseado em um sistema que permite a medição indireta da resposta mecânica de um corpo de prova, possibilitando o controle da taxa de deformação. A proposta original sofreu alterações até evoluir ao que se conhece hoje como *Split-Hopkinson Pressure Bar* (SHPB), ou barra de Hopkinson.

O aparato consiste de um projétil que colide face com face em uma barra, chamada de incidente. Geralmente projétil e barra são do mesmo material e diâmetro, variando apenas seu comprimento. A onda do impacto então se propaga pela barra até atingir o corpo de prova, que nessa interface tem parte da onda refletida e parte transmitida para a próxima barra. A medição da onda de impacto que passa no corpo de prova é realizada de forma indireta nas barras e não sobre o material a ser testado. *Strain gauges* são posicionados no centro de cada barra para medição da onda propagada. São de interesse 3 pulsos (ondas), o pulso incidente que chega à primeira barra, o pulso refletido que volta para primeira barra e o pulso transmitido que passa pela segunda barra (Ramesh, 2018). A Figura 1 mostra esquematicamente um arranjo clássico de uma Barra de Hopkinson para ensaio de compressão.

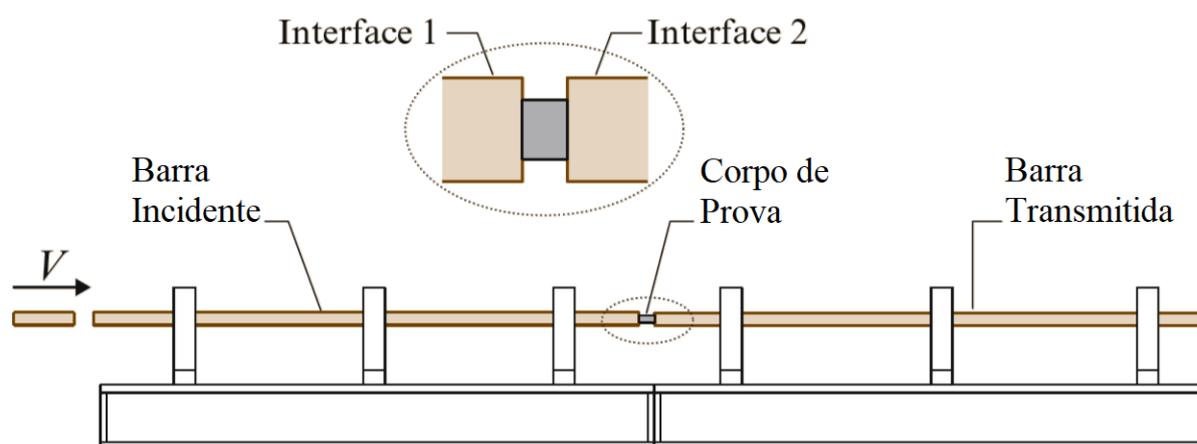


Figura 1 – Esquema da Barra de Kolsky adaptado de (Ramesh, 2008)

A forma do pulso incidente, dimensões das barras, corpo de prova, e escolha de materiais são essenciais para a correta caracterização do material estudado, como pode ser visto no trabalho de Kist (2014) feito para dimensionar o aparato utilizado para esse trabalho. No arranjo clássico, pressupõe-se que se trata de um problema de propagação de ondas unidimensional (1D) em meio contínuo elástico e a onda que viaja a barra incidente é uma onda compressiva trapezoidal, que passará pelo corpo de prova e posteriormente será transmitida (totalmente ou parcialmente) para a segunda barra.

A velocidade de propagação da onda na barra e no corpo de prova pode ser descrita de acordo com a equação a seguir, onde  $E$  é o módulo de elasticidade e  $\rho$  a massa específica.

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.1)$$

Para um comprimento de projétil  $L$ , o período do pulso pode ser estimado como:

$$T = \frac{2L}{C_{\text{projétil}}} \quad (3.2)$$

Chen e Song (2011) mostram que o tempo do início do pulso incidente  $T_I$  é obtido por inspeção dos dados. Já o tempo de início do pulso refletido  $T_R$  e o tempo do pulso transmitido  $T_T$  podem ser estimados como:

$$T_R = T_I + \frac{2L_0}{C_{\text{barra}}} \quad (3.3)$$

$$T_T = T_I + \frac{L_0 + L_1}{C_{\text{barra}}} + \frac{L_{CP}}{C_{CP}} \quad (3.4)$$

Onde  $L_{CP}$  é o comprimento do corpo de prova,  $L_0$  e  $L_1$  a distância do strain gauge da barra incidente e barra de transmissão até a interface com o corpo de prova.

Com a determinação dos tempos é possível isolar os pulsos do sinal adquirido em pulso incidente, pulso refletido e pulso transmitido. A deformação é convertida do sinal de tensão elétrica proveniente dos *strain-gauges* conforme a seguinte relação para uma meia ponte de Wheatstone:

$$\varepsilon = \frac{2U_o}{G_F U_I} \quad (3.5)$$

Onde  $U_o$  é o sinal de tensão,  $U_I$  a tensão da fonte e  $G_F$  o *gauge factor*.

A onda de compressão quando chega ao corpo de prova (pulso incidente), propaga-se até a interface com a segunda barra. Nesse contato, corpo de prova/barra, geralmente existe uma diferença de impedância mecânica que faz com que parte da onda seja refletida (pulso refletido) e continue compressiva no espécimen e parte seja transmitida para segunda barra (pulso transmitido). Esse efeito é repetido até que a tensão compressiva seja suficiente para deformar plasticamente o corpo de prova. Com o início da deformação plástica pode-se negligenciar a propagação dentro do corpo de prova, sendo assim o estado de equilíbrio é atingido e considera-se a tensão uniforme durante todo corpo de prova.

A Figura 2 mostra o sinal de um teste realizado com corpo de prova de alumínio de 10 mm de diâmetro e 5 mm de espessura. Foi utilizado um projétil de 200 mm com uma pressão de abertura de 0,5 bar manométrica e uma frequência de aquisição de 0,5 MS/s por barra.

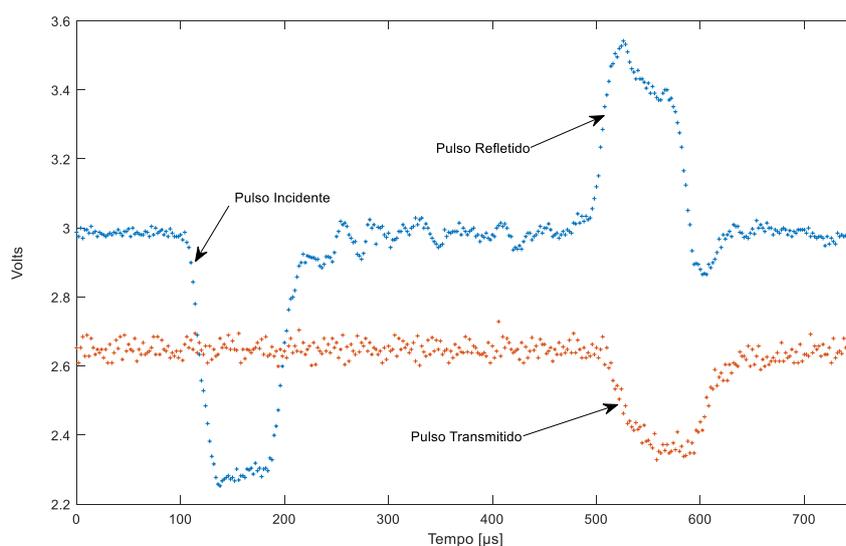


Figura 2 – Teste corpo de prova de alumínio

Nota-se que nesse exemplo são mostrados os sinais para a primeira barra (contém pulso incidente e refletido) e segunda barra (pulso transmitido). Não é requisito que os sinais estejam sincronizados no momento da aquisição, pois essa questão é tratada no momento da análise dos dados.

Se a tensão for uniaxial, a condição de equilíbrio de tensões for atingida, o contato barra/corpo de prova tiver atrito desprezível e não houver dispersão da onda durante a propagação então se pode escrever que a soma realizada ponto a ponto dos pulsos incidente e refletido é igual ao pulso transmitido (Ramesh, 2008):

$$\varepsilon_I + \varepsilon_R = \varepsilon_T \quad (3.6)$$

A força normal  $P$  nas interfaces (ver figura 1) do corpo de prova e barras é calculada como:

$$P_1 = E_{\text{barra}}(\varepsilon_I + \varepsilon_R)A_{\text{barra}} \quad (3.7)$$

$$P_2 = E_{\text{barra}}(\varepsilon_T)A_{\text{barra}} \quad (3.8)$$

A velocidade de propagação  $v$  da onda unidimensional nas interfaces (ver figura 1) corpo de prova e barras é escrita como:

$$v_1 = C_{\text{barra}}(\varepsilon_I - \varepsilon_R) \quad (3.9)$$

$$v_2 = C_{\text{barra}}(\varepsilon_T) \quad (3.10)$$

As premissas para correta caracterização de materiais utilizando um aparato SHPB são o equilíbrio dinâmico de tensões e taxa de deformação constante. Entretanto, como o experimento parte do repouso, existe um intervalo de tempo finito em que tais condições não são observadas. É necessária a determinação do limite superior da taxa de deformação que o material pode ser ensaiado, pois se esse valor for ultrapassado o material irá falhar durante o incremento da taxa de deformação, invalidando o experimento. Chen e Song (2011) propõe que esse valor seja:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{cr} C_S}{n L_S} \quad (3.11)$$

Onde  $C_S$  é a velocidade da onda no espécimen,  $n$  o número de reflexões necessárias para atingir o equilíbrio dinâmico no corpo de prova e  $L_S$  seu comprimento. Já  $\varepsilon_{cr}$  é o valor de deformação crítico no qual o primeiro evento que necessita de uma taxa de deformação constante ocorre. Como visto por Soroushian e Choi (1987) no estudo sobre propriedades mecânicas de aço em diferentes taxas de deformação, a região elástica do aço não mostra dependência com a taxa de deformação. Logo, o valor de deformação crítica pode ser usado como o início da deformação plástica. Para o caso de um espécime de alumínio com 5 mm de espessura, módulo de elasticidade de 120 GPa, densidade de 2700kg/m<sup>3</sup>, se o interesse são os valores acima de 2% de deformação, os valores de taxa devem ficar abaixo dos 26000 s<sup>-1</sup> se o equilíbrio é atingido com uma reflexão.

### 3.2 Formas de Análise

Existem diferentes formas de obter os valores de tensão, deformação e taxa de deformação a partir das ondas obtidas pelo sistema de aquisição. Algumas delas são baseadas

em hipóteses de equilíbrio que podem não se mostrar adequadas em algumas situações (Xu et al., 2018).

### 3.2.1 Análise de três ondas:

Se forem utilizados diretamente os dados medidos dos três pulsos, (incidente, refletido e transmitido) a análise é conhecida como de três ondas (Francis et al., 2016). Para  $A_{s0}$  como a área da seção transversal inicial do corpo de prova e  $L_0$  o comprimento inicial, temos que:

$$\bar{S}_{s3}(t) = \frac{P_1 + P_2}{2 A_{s0}} = \frac{E_{\text{barra}} A_{\text{barra}}}{2 A_{s0}} (\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)) \quad (3.12)$$

$$\dot{e}_{s3}(t) = \frac{v_1 - v_2}{L_0} = \frac{C_{\text{barra}}}{L_0} (\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)) \quad (3.13)$$

$$e_s(t) = \int_0^t \dot{e}_s(\tau) d\tau \quad (3.14)$$

Onde  $\bar{S}_{s3}$  é a tensão média no corpo de prova e  $\dot{e}_{s3}$  a taxa de deformação no corpo de prova, ambos para análise de três ondas. Já  $e_s$  é a deformação no corpo de prova.

### 3.2.2 Análise de uma onda:

Alternativamente, as equações 3.11 e 3.12 podem ser reduzidas utilizando a simplificação descrita na 3.6, resultando nas equações da análise de uma onda, como mostra Ramesh (2008).

$$\bar{S}_{s1}(t) = \frac{E_{\text{barra}} A_{\text{barra}}}{A_{s0}} \varepsilon_T(t) \quad (3.17)$$

$$\dot{e}_{s1}(t) = -\frac{2C_{\text{barra}}}{L_0} \varepsilon_R(t) \quad (3.18)$$

Onde  $\bar{S}_{s1}$  é a tensão média no corpo de prova e  $\dot{e}_{s1}$  a taxa de deformação no corpo de prova, ambos para análise de uma onda.

Contudo, esses são os valores calculados utilizando a área e comprimento inicial do corpo de prova, conhecidos como valores de engenharia. Para obtenção dos valores verdadeiros, que consideram a variação no tempo da geometria do corpo de prova, Ramesh (2008) escreve as transformações:

$$\varepsilon_s(t) = -\ln[1 - e_s(t)] \quad (3.19)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{\dot{e}_s(t)}{1 - e_s(t)} \quad (3.20)$$

$$\sigma_s(t) = S_s(t)[1 - e_s(t)] \quad (3.21)$$

## 3.3 Observações sobre o experimento

Diferentemente de um ensaio estático que é amplamente aceito e possui protocolos consolidados, a barra de Hopkinson ainda é muito investigada por diversos pesquisadores devido a suas características não convencionais. Devido à natureza dinâmica do evento (pressuposição

de propagação unidimensional de um pulso trapezoidal idealizado), e a dependência geométrica e material entre aparato e corpo de prova, várias considerações devem ser levadas em conta. Aqui apresentam-se apenas algumas considerações de interesse deste trabalho.

Em geral, ligas metálicas se comportam de forma adequada à concepção clássica do experimento sendo possível adquirir sinais que representam a resposta do metal em altas taxas de deformação. No entanto, no caso ensaio de materiais poliméricos, ainda pode ser necessário considerar sua natureza visco elástica ou abaulamento durante o carregamento inicial, que invalidaria a suposição que a força na interface com a barra incidente é igual à com a barra de transmissão. Escolhas geométricas podem auxiliar na minimização de erros. Para reduzir discordâncias do gênero, e reduzir erros na resposta mecânica, cuidados devem ser tomados sobre qual janela de intervalo do experimento entrega resultados condizentes com as premissas estabelecidas. Como o tempo de propagação da onda é proporcional ao tamanho do corpo de prova, um corpo de prova mais fino pode ser utilizado para reduzir esse efeito. No entanto, ao reduzir o comprimento, aumenta o efeito do atrito nas interfaces, assim dificultando a obtenção do estado uniaxial de tensões, hipótese assumida nas equações de propagação de ondas. Para mais detalhes ver Chen e Song (2011). Chen e Song (2011) calculam o máximo diâmetro do corpo de prova para uma determinada barra e deformação desejada  $\varepsilon_E$ , garantindo que a seção transversal do espécimen não seja maior que a da barra em nenhum momento do experimento por:

$$d_0 = d_{\text{bar}} \sqrt{1 - \varepsilon_E} \quad (3.22)$$

Por sua vez, a condição de equilíbrio pode ser difícil de ser atingida durante a aquisição do sinal. Um critério é proposto por Chen e Song (2011) para considerar equilíbrio dinâmico no corpo de prova quando a seguinte relação é atingida:

$$R(t) = \left| \frac{\Delta\sigma(t)}{\sigma_m(t)} \right| \leq 0,05 \quad (3.23)$$

Onde a relação entre a diferença de tensão nas interfaces do corpo de prova  $\Delta\sigma$  e o valor médio  $\sigma_m$  deve ser menor que 5%. Sendo assim, a janela escolhida para análise do sinal deve coincidir com o intervalo de tempo em que essa condição é verdadeira.

Para evitar efeito de inércia no corpo de prova, como tensões radiais, pode-se modelar o pulso incidente de forma adequada. É sugerido um incremento do pulso mais lento, na ordem de 100 microssegundos, e então um *plateau* para manter uma taxa de deformação constante (Chen e Song, 2011). Porém, é utilizado por Lee et al. (2008) o seguinte critério para minimizar os efeitos inerciais longitudinais e radiais:

$$\frac{L}{D} = \sqrt{\frac{3\nu_s}{4}} \quad (3.24)$$

Onde L e D são o comprimento e diâmetro do corpo de prova e  $\nu_s$  seu coeficiente de Poisson.

Outro ponto importante é relacionado a reflexão de ondas. Se forem utilizadas barras de aço para caracterização de materiais com baixa impedância mecânica, espera-se que o pulso incidente seja quase totalmente refletido. Dessa forma o sinal transmitido tem um elevado ruído comparado com seu valor absoluto. Formas de tratar o problema são descritos por Omar et al. (2011), que propõe o uso de um modelador de pulso para induzir a obtenção do equilíbrio mais rapidamente, ou a utilização de uma barra polimérica de baixa impedância para transmitir os pulsos.

Em alguns trabalhos também propõe-se utilizar modeladores de pulso na interface projétil-barras para obter melhores resultados frente ao equacionamento. São diversas as técnicas para modelar o pulso incidente, como modificação da superfície de impacto do projétil, inserção

de um filtro mecânico, variação das dimensões do projétil e perfil de pressão utilizado em seu disparo, todas com o intuito de adequar o pulso ao formato trapezoidal idealizado. Por exemplo, Lee et al. (2008) utilizam um modelador de pulso para obter resultados de deformação dinâmica de polioximetileno e polipropileno e analisam os dados pelo método de uma onda. No trabalho foram comparados resultados experimentais com e sem modelador de pulso utilizando a técnica de uma onda, onde argumenta-se que os modeladores ajudam a obter um período com taxa de deformação constante, entretanto que ainda necessita um maior estudo na sua escolha.

Visto que neste trabalho não se propõe mudanças no projeto da barra, como mudança do material das barras (impedância) ou de projeto de modeladores, cuidados adicionais podem ser tomados nas escolhas das geometrias dos corpos de prova.

## 4. METODOLOGIA

Para este estudo, foi realizado uma bateria de testes na barra de Hopkinson do Grupo de Mecânica Aplicada (GMAp) da UFRGS. Para isto foram ensaiados quatro corpos de prova de polioximetileno e quatro de alumínio comercial. Os sinais foram adquiridos em uma taxa de  $0,5 \times 10^6$  pontos por segundo em cada barra, como descrito em seguida.

### 4.1 Descrição do aparato

A barra de Hopkinson presente no GMAp foi dimensionada por Kist (2014) e consiste de um arranjo clássico. Duas barras de dois metros de comprimento de aço SAE 1020 com 20 mm de diâmetro são apoiadas por quatro mancais revestidos com teflon para redução do atrito. Um tubo com 28 mm de diâmetro interno é conectado a um tanque de pressão por uma válvula solenoide de acionamento rápido OMEGA-FLO modelo SV6004 de 3/4" adaptada para disparo manual com tempo de abertura entre 200 e 500 ms (dependendo da pressão). O corpo de prova é colocado entre as duas barras com uma fina camada de lubrificante multiuso Tekbond. O projétil é do mesmo material e diâmetro das barras e tem dois anéis de teflon em sua extremidade para permitir o deslocamento internamente no tubo com baixo atrito em direção à barra incidente. A Figura 3 mostra o aparato. Cada barra é suportada por quatro mancais que possuem um anel de Teflon lubrificado para permitir deslizamento com o mínimo de atrito possível, reproduzindo uma propagação de onda unidimensional.

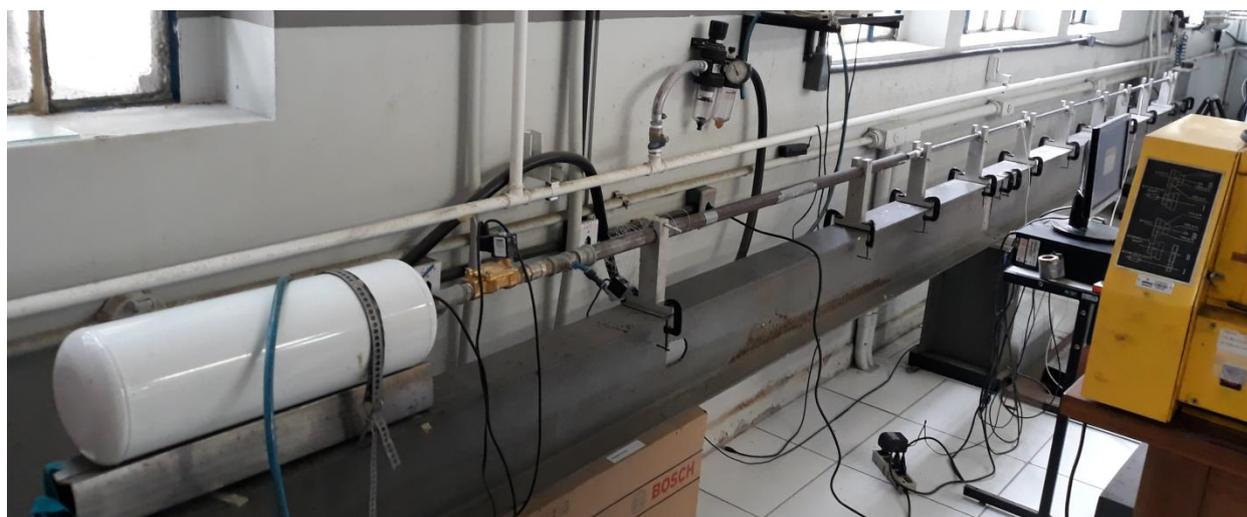


Figura 3 – SHPB GMAp

## 4.2 Descrição da instrumentação

Para a aquisição do sinal de deformação as duas barras foram instrumentadas em meia ponte de Wheatstone com dois *strain gauges* lineares OMEGA SGD-3/350-LY11 em cada barra, diametralmente opostos e localizados no ponto médio do comprimento. Os extensômetros têm resistência de  $350\Omega$ , *gauge factor* de 2,13 e tolerância de  $\pm 0,35\%$ . A meia ponte de Wheatstone foi completada com dois *strain gauges* iguais e alimentada com 12V. O sinal de cada barra passa por um amplificador Tacuna Systems modelo EMBSGB200-M configurado para um ganho de 110 e é adquirido por um DAQ (dispositivo de aquisição) OMEGA modelo OM-USB-1208HS com resolução de 13 bits e aquisição máxima de 1MS/s em  $\pm 10V$ .

De acordo com Chen e Song (2011), tanto o amplificador como o dispositivo de aquisição devem ter uma resposta de frequência superior a 100 kHz, pois o sinal geralmente tem menos de 1 ms.

## 4.3 Descrição do procedimento de operação

Os passos para a realização de um ensaio são descritos a seguir:

- 1) Realizar lubrificação e alinhamento das barras;
- 2) Conectar alimentação dos dispositivos de aquisição e verificar o funcionamento dos sensores;
- 3) Selecionar e posicionar o projétil dentro do tubo;
- 4) Verificar a integridade do anteparo;
- 5) Abrir válvulas para pressurização do tanque;
- 6) Realização de um disparo com as duas barras em contato sem corpo de prova para verificação do alinhamento analisando o pulso refletido;
- 7) Se verificado correto alinhamento e funcionamento do aparato, reposicionar projétil no tubo e colocar corpo de prova entre as barras com uma fina camada de lubrificante nas suas interfaces e realizar disparo;
- 8) Após completar todos os disparos, fechar todas as válvulas e despressurizar o tanque. Desconectar a alimentação dos sensores.

## 4.4 Descrição do código

Para o processamento e análise dos dados foi utilizado o código *open source* desenvolvido por Francis, (2016). A ferramenta foi escrita em MATLAB e conta com uma interface gráfica para separação dos pulsos e transformação dos sinais de deformação na curva de tensão-deformação do material utilizando métodos variados de cálculo.

A ferramenta permite controle completo da análise, possibilitando ajuste fino do sinal, ajuste de dispersão, escolha do equacionamento utilizado e opção de otimização da seleção da janela dos três pulsos. O processo de otimização roda um algoritmo genético que minimiza a diferença de forças nas interfaces do corpo de prova, como descrito pelas equações 3.7 e 3.8, auxiliando o operador na busca dos melhores parâmetros. Todos os dados geométricos e de materiais e sinais pode ser salvos juntamente com os sinais de tensão elétrica pré-processamento.

A Figura 4 mostra a parte da interface para seleção dos pulsos. Nesse exemplo foram selecionados os pulsos referentes ao sinal da Figura 2.

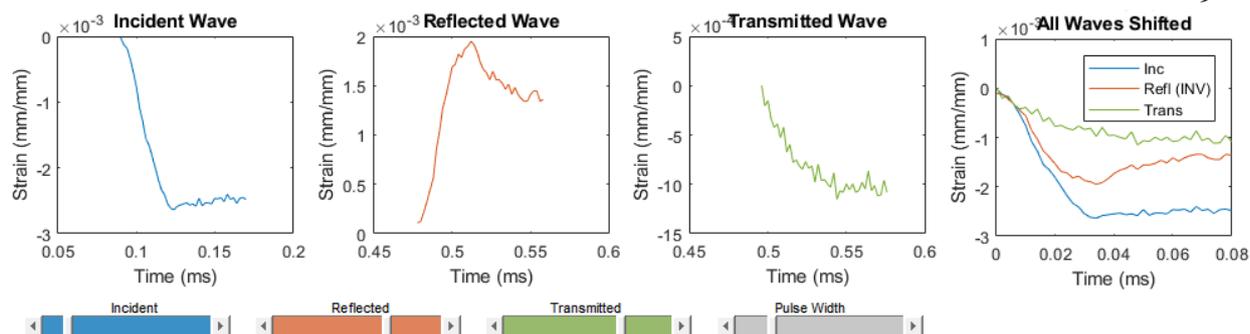


Figura 4 – Exemplo de seleção dos pulsos pelo código

## 5. ANÁLISE DOS DADOS

Para a análise dos dados e discussão, são apresentados, além das curvas tensão-deformação, os dados das ondas e demais informações envolvidas na obtenção das curvas. Essas informações geralmente não são encontradas em literatura juntamente com a curva do material e são de grande importância para análise dos resultados.

### 5.1 Resultados Alumínio

Foram ensaiados quatro corpos de provas de alumínio comercial (ver apêndice A, figura A.1) de 5 mm de espessura e 10 mm de diâmetro (ver apêndice A, figura A.6). Considerou-se as recomendações do trabalho de dimensionamento feito por Kist, (2014) de uma razão de 2 entre o diâmetro das barras e corpo do prova. Outra razão utilizada é de relação entre o comprimento do espécimen e seu diâmetro igual a 0,5 (equação 3.24). O projétil de 200 mm foi impulsionado utilizando uma pressão manométrica de 1 bar.

No trabalho de Hall e Guden (2003) é testado o efeito de diversas formas de lubrificação das interfaces do corpo de prova para redução do efeito do atrito, demonstrando que o lubrificante leva a resultados de maior acurácia. O corpo de prova foi posicionado entre as barras com uma aplicação de lubrificante líquido multiuso Tekbond em suas interfaces.

A Figura 5 mostra a taxa de deformação em função da deformação para os quatro testes realizados utilizando o método de uma onda. É apresentada a média de aproximadamente  $3000 \text{ s}^{-1}$  de taxa de deformação para os quatro testes no intervalo em que é estabelecido um “plateau”, conforme realizado pela literatura.

Para a determinação das curvas tensão-deformação foram utilizados os pulsos transmitido e refletido para o método de uma onda (Figura 6) e o a relação dos três pulsos para o método de três ondas (Figura 7), conforme descrito com as equações 3.12-3.18. Os valores mostrados nas figuras são os valores de engenharia, como convencionado na literatura. Na Figura 6 e 7 são incluídas as curvas médias dos quatro testes calculada ponto a ponto. Deve-se notar que a curva é apresentada até o limite de deformação definido pelo comprimento do projétil e não devido a características do material ensaiado. A curva referente à taxa de deformação de  $3000 \text{ s}^{-1}$  apresenta tensão de aproximadamente 350 MPa para uma deformação de 20%, como observado na Figura 6.

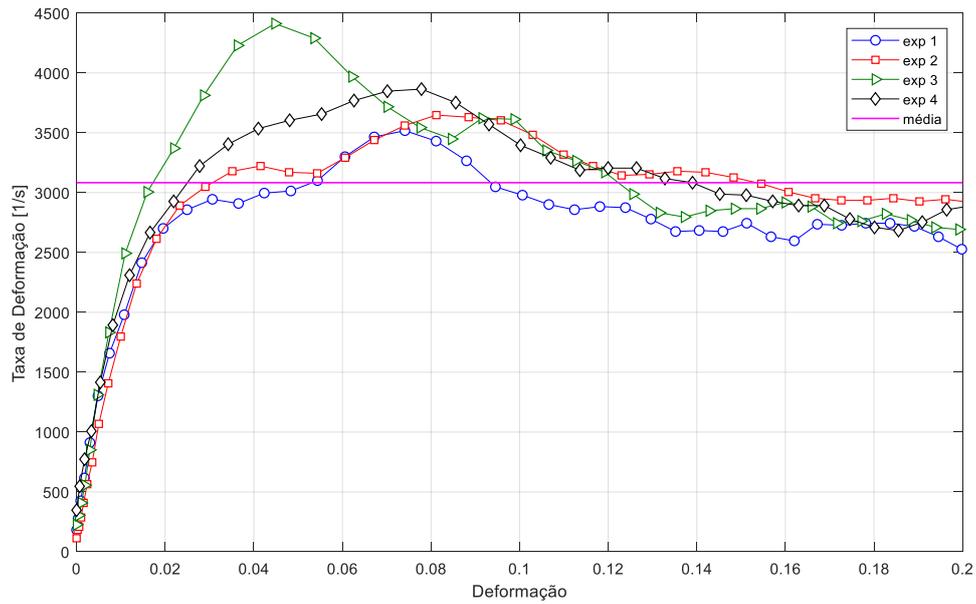


Figura 5 – Taxa de deformação de um corpo de prova de alumínio comercial

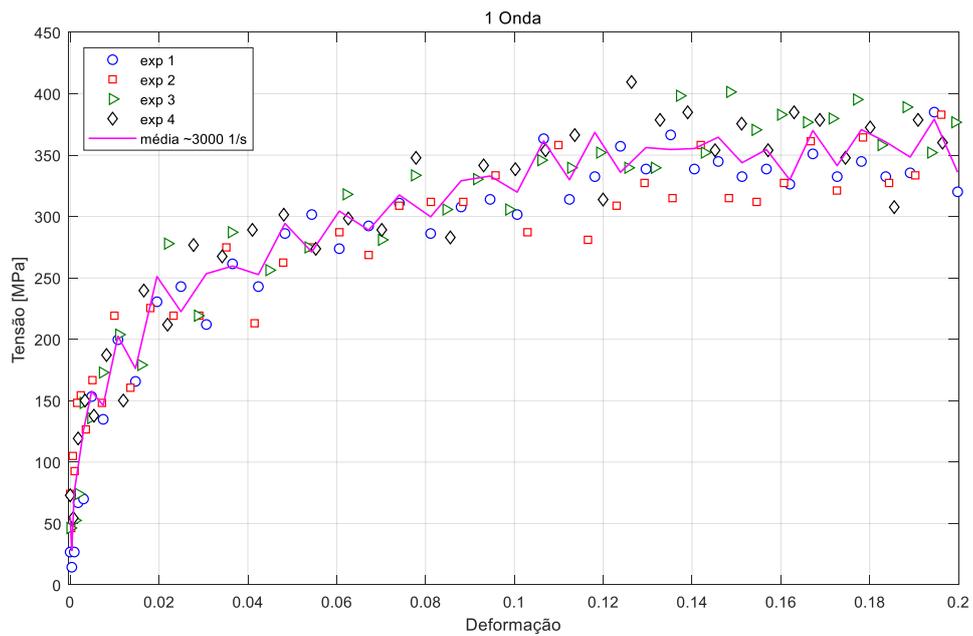


Figura 6 – Curva tensão-deformação de alumínio comercial pelo método de uma onda.

Observando a Figura 7, é evidenciada uma elevada dispersão nos resultados para baixas deformações em todos os quatro ensaios, e uma tendência senoidal.

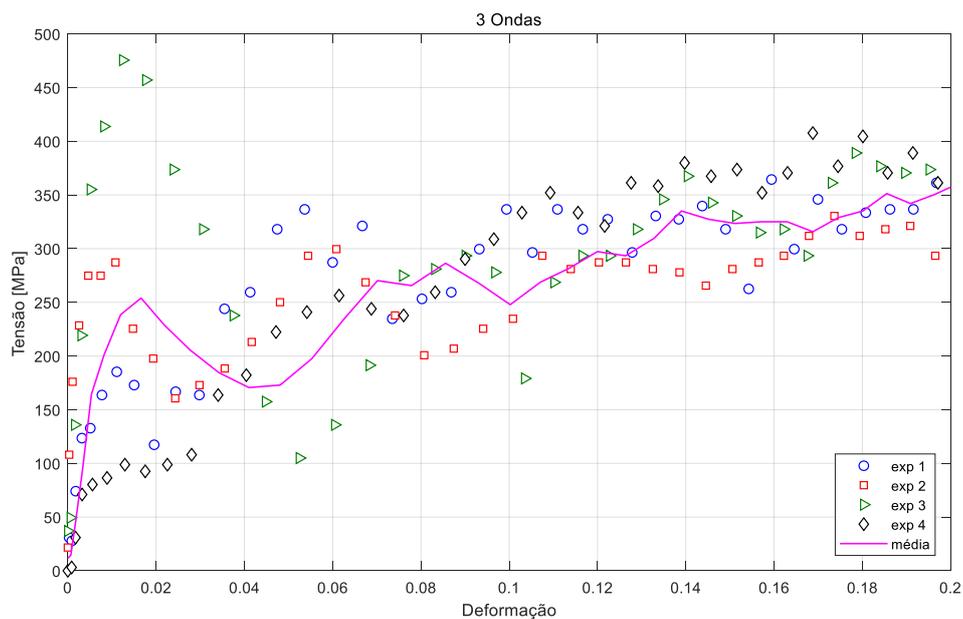


Figura 7 - Curva tensão-deformação alumínio pelo método de três ondas

Por fim, para melhor avaliar os dados, a Figura 8 mostra a diferença entre a força na interface do corpo de prova com a segunda barra e a força na interface do corpo de prova com a barra incidente. Nota-se uma tendência de equilíbrio de forças como o avanço da deformação no corpo de prova. Porém, no trato inicial, também se nota um acentuado desequilíbrio que pode ser atribuído ao incremento da taxa de deformação ate sua região constante. Essa informação é importante para análise de três ondas, pois as duas forças (na interface com a primeira e segunda barra) são utilizadas no cálculo. Já para análise de uma onda é assumido que existe o equilíbrio e é utilizado apenas a força normal referente a interface com a segunda barra.

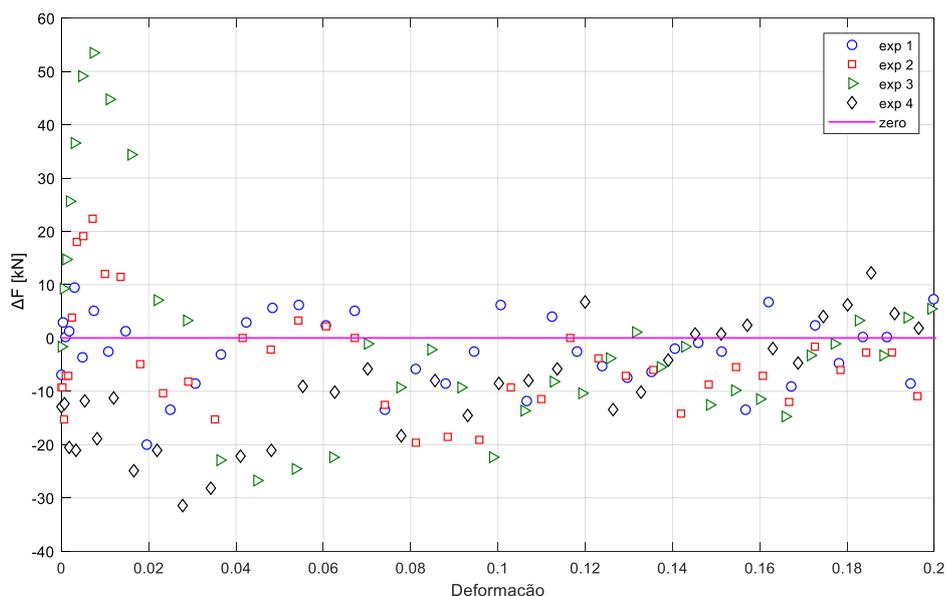


Figura 8 – Diferença de forças nas interfaces do corpo de prova de alumínio

A Figura 9 mostra a comparação das curvas tensão-deformação de uma e três ondas. Ambas curvas mostram a mesma tendência e possuem valores próximos, indicando que as técnicas produzem respostas similares, sendo a de uma onda, normalmente mais utilizada na literatura, tem menor dispersão.

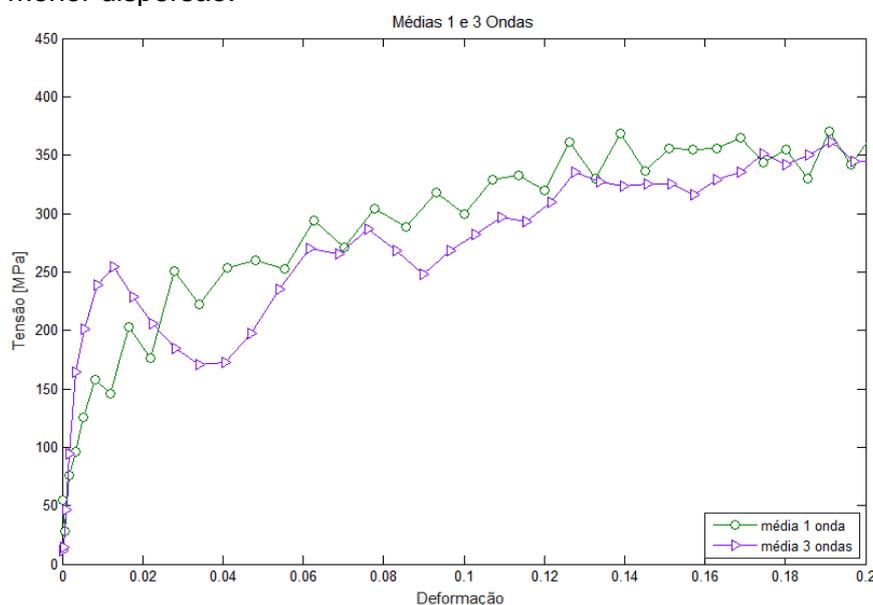


Figura 9 – Curvas médias de uma e três ondas

## 5.2 Resultados POM

Para os testes de POM foram utilizados quatro corpos de prova (ver apêndice A, figura A.2) com espessura de 5 mm e 10 mm de diâmetro. Foi utilizado um projétil de 100 mm com uma pressão de 0,5 bar manométrica. O ganho foi modificado para 1100 vezes no amplificador da segunda barra para facilitar a visualização do pulso transmitido. A Figura 10 mostra o sinal do primeiro teste com POM. O comprimento do pulso transmitido tem uma duração estendida na ordem de quatro vezes. Esse efeito de retardo do pulso é comentado por Nakai e Yokoyama (2012) como característico de polímeros.

Como discutido anteriormente, é posposto um incremento mais lento do pulso incidente para facilitar o equilíbrio dinâmico do corpo de prova polimérico na ordem de  $100\mu\text{s}$ . Na Figura 10 é possível ver que o pulso demora por volta de  $40\mu\text{s}$  para chegar ao *plateau*.

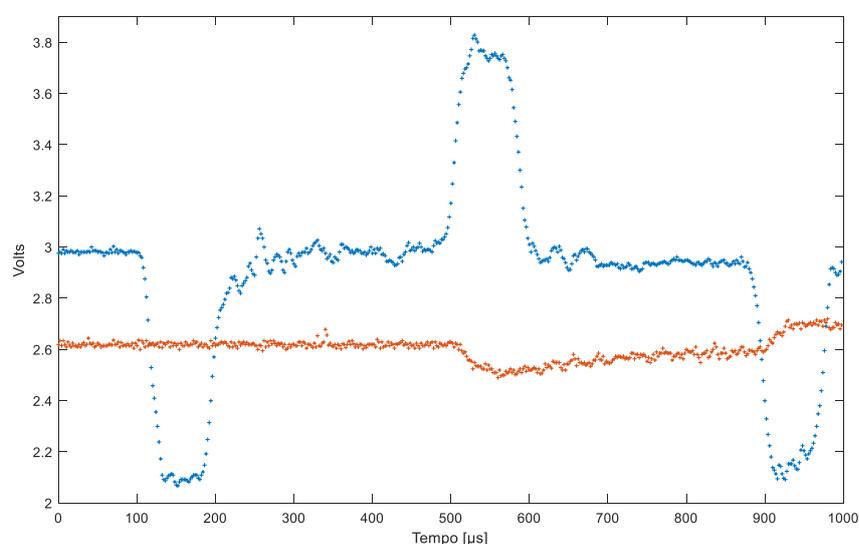


Figura 10 – Sinal do teste de compressão de um corpo de prova de POM

A figura 11 mostra a taxa de deformação em função da deformação do corpo de prova obtida pelo método de uma onda nos quatro testes realizados.

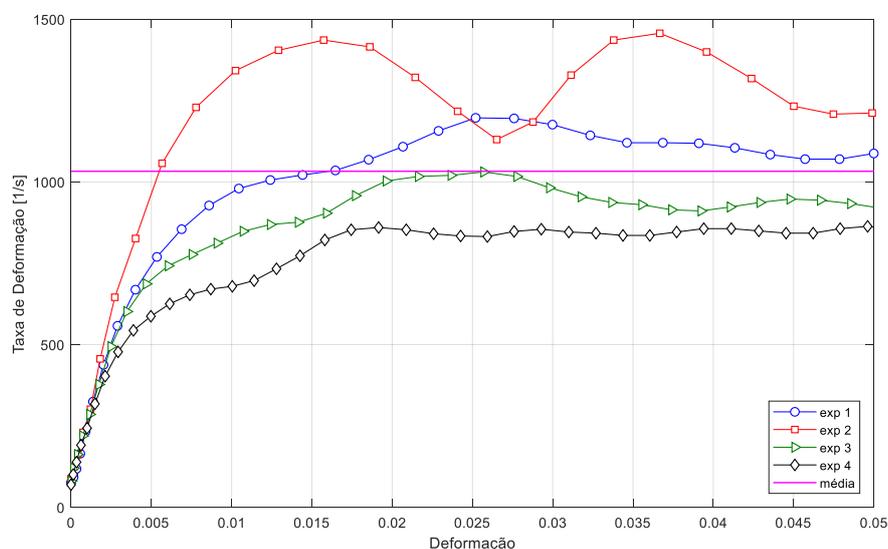


Figura 11 – Taxa de deformação de um corpo de prova de POM

A Figura 12 mostra a curva tensão-deformação para POM para a taxa de deformação média de  $1000 \text{ s}^{-1}$  que apresenta um valor próximo de 50 MPa para os 2% de deformação.

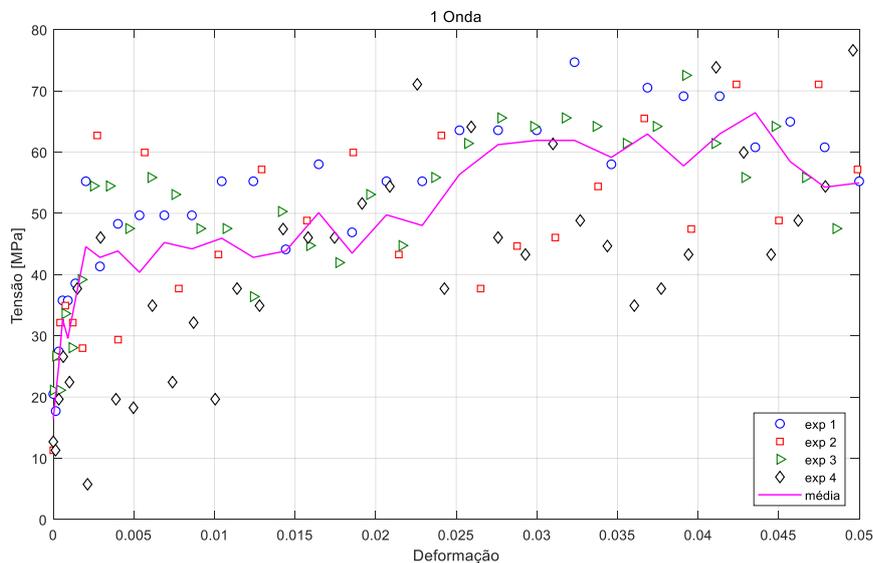


Figura 12 - Curva tensão-deformação para POM pelo método de uma onda.

Os resultados para POM apresentaram uma dispersão maior quando comparado com os dados obtidos com alumínio, não caracterizando a boa precisão e acuracidade obtida com o ensaio de alumínio usando a técnica de uma onda. A provável causa disso é a maior diferença de impedância mecânica entre barra e corpo de prova que gera uma elevada relação de ruído em relação a sua amplitude do sinal para o pulso transmitido como discute Lee et al. (2008). A análise de três ondas, por sua vez, (Figura A.3, Apêndice A) não apresentou resultados satisfatórios. Para diferença de forças e comparativo dos métodos de uma e três ondas ver apêndice A, figuras A.4 e A.5.

Não existe na literatura resultados para análises comparativas, com a mesma taxa de deformação obtida neste trabalho. Porém, uma boa indicação pode ser obtida com uma comparação em uma ordem de magnitude similar. No trabalho de Nakai e Yokoyama (2012) é ensaiado POM em diferentes taxas de deformação e é verificada a dependência da curva tensão-deformação com a velocidade de deformação. Neste é apresentado o valor de 60 MPa em compressão para uma deformação de 2% em uma taxa de deformação de  $540 \text{ s}^{-1}$ , que está na mesma ordem de grandeza deste trabalho, apesar da grande dispersão obtida.

Vale comentar que em Lee et al. (2008) é estudado o efeito de um modelador de pulso para caracterização de POM degradado por temperatura, com um disco de cobre Cu-11000 de 1,5 mm de espessura e 10 mm de diâmetro inserido na barra incidente na interface com o projétil. É evidenciado que essa técnica consegue aumentar o tempo de desenvolvimento do pulso em até 20  $\mu\text{s}$  nessas condições. É visto também que flutuações no histórico da taxa de deformação como os presentes na Figura 10 para experimento 2 são suavizados com o mencionado modelador de pulso, indicando que o modelador poderia ser usado futuramente para melhorar as flutuações obtidas no ensaio de polímeros como o POM.

## 6. CONCLUSÃO

Foi possível com esse trabalho investigar e se aprofundar nas técnicas para obtenção de curvas tensão-deformação de materiais com a barra de Hopkinson.

Os quatro testes do material alumínio, com taxa de deformação média de  $3000 \text{ s}^{-1}$ , apresentaram resultados similares e tiveram suas respectivas curvas de tensão-deformação apresentadas utilizando as metodologias de uma onda e três ondas. Os resultados do alumínio apresentaram uma boa repetitividade das curvas com a técnica de uma onda, indicando precisão e acuracidade nos resultados.

Por sua vez, os testes para caracterização do POM, que tiveram uma taxa média de  $1000 \text{ s}^{-1}$ , tiveram uma dispersão significativa com ambas técnicas. Apesar disto, a curva média de tensão-deformação com a técnica de uma onda apresentou um comportamento suave e condizente com a literatura. A curva tensão-deformação pelo método de uma onda apresenta resultados com a mesma ordem de magnitude daqueles os da literatura. Já a análise de três ondas não produziu a mesma tendência da análise de uma onda, observando-se um alto ruído na parte inicial.

Por fim, com a aplicação das técnicas de uma onda e três ondas, foi possível obter curvas de tensão-deformação, onde observou-se que o uso da técnica de uma onda produziu resultados mais suaves e com menos dispersão.

Para trabalhos futuros é proposto um estudo da influência de modeladores de pulso. A inclusão de diferentes discos metálicos na interface entre o projétil e primeira barra influencia no formato do pulso incidente e homogeneidade do patamar obtido da curva taxa de deformação-deformação. Esse artifício pode trazer melhorias para análise de uma onda e possibilitar o estudo da análise de três ondas. Além disto, sugere-se aumentar a taxa de aquisição de dados para avaliar sua correlação com a dispersão dos resultados.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHEN, W; LUO, H. Dynamic Compressive Responses of Intact and Damaged Ceramics from a Single Split Hopkinson Pressure Bar Experiment. In: CHASIOTIS, Ioannis (Ed.). **Experimental Mechanics**. Kluwer Academic Publishers, 2004. p. 295-299.

CHEN, Weining; SONG, Bo. **Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications**. New York: Springer, 2011. 388 p.

FRANCIS et al. Split Hopkinson Pressure Bar Graphical Analysis Tool. In: CHASIOTIS, Ioannis. **Society for Experimental Mechanics**. New York: Springer Us, 2016. p. 179-183.

HALL, I. W.; GUDEN, M.. Split Hopkinson Pressure Bar compression testing of an aluminum alloy: Effect of lubricant type. **Journal Of Materials Science Letters**. p. 1533-1535. 2003.

JING, Lin et al. Compressive strain rate dependence and constitutive modeling of closed-cell aluminum foams with various relative densities. **Journal Of Materials Science**. p. 14740-14757. jul. 2018.

KIST, Robinson Friedrich. **Dimensionamento de uma Barra de Hopkinson para Ensaios de Alta Velocidade de Deformação em Plásticos Dúcteis**. 2014. 22 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, GMAp, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

KOLSKY, H. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at very High Rates of Loading. In: SOCIETY, Physical (Org.). **Proceedings of the Physical Society. Section B**. 62. London, 1949. p. 676-700.

LEE, Ouk Sub et al. Dynamic deformation of hot temperature degraded POM and PP using a modified SHPB with pulse shaper technique. In: CHO, Maenghyo (Ed.). **Journal of Mechanical Science and Technology**. Korean Society Of Mechanical Engineers, 2008. p. 1691-1698.

LI, Xiudi et al. A SHPB Experimental Study on Dynamic Mechanical Property of High-Damping Rubber. In: SORACE, Stefano (Ed.). **Shock and Vibration**. Beijing: Hindawi, 2018. p. 1-10.

NAKAI, K.; YOKOYAMA, T.. High strain-rate compressive behavior and constitutive modeling of selected polymers. **Epj Web Of Conferences**. p. 1-6. 2012.

OMAR, Modh Firdaus et al. Mechanical Properties of Nanosilica/Polypropylene Composites Under Dynamic Compression Loading. **Polymer Composites**. p. 565-575. fev. 2011.

RAMESH, Kaliat. High Rates and Impact Experiments. In: SHARPE, William. **Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics**. New Delhi: Springer, 2008. Cap. 33. p. 929-959.

SOROUSHIAN, Parviz; CHOI, Ki-bong. Steel Mechanical Properties at Different Strain Rates. **Journal Of Structural Engineering**. Reston, p. 663-672. abr. 1987.

WINZER, R.; GLINICKA, A.. The Static and Dynamic Compressive Behaviour of Selected Aluminium Alloys. **Engineering Transactions**. Warsaw, p. 85-100. 2011.

XU, Peibao et al. SHPB experiment research on dynamic property of expanded polystyrene foam. In: BROWN, Roger et al (Ed.). **Polymer Testing**. 69. ed. New York: Elsevier, 2018. p. 431-436.

ZHANG, Jun-fa et al. The Research on Compressive Properties of Polytetrafluoroethylene at High Strain Rate. **Defence Technology**. p. 181-185. out. 2013.

## APÊNDICES

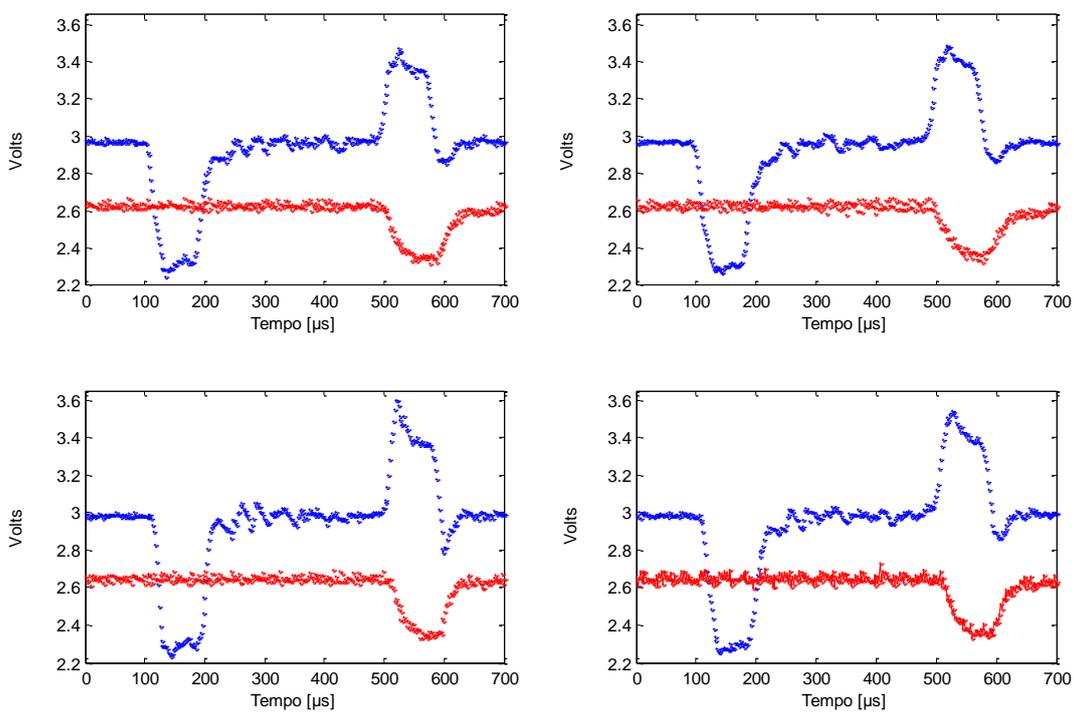


Figura A.1 – Sinais de ensaio de alumínio comercial

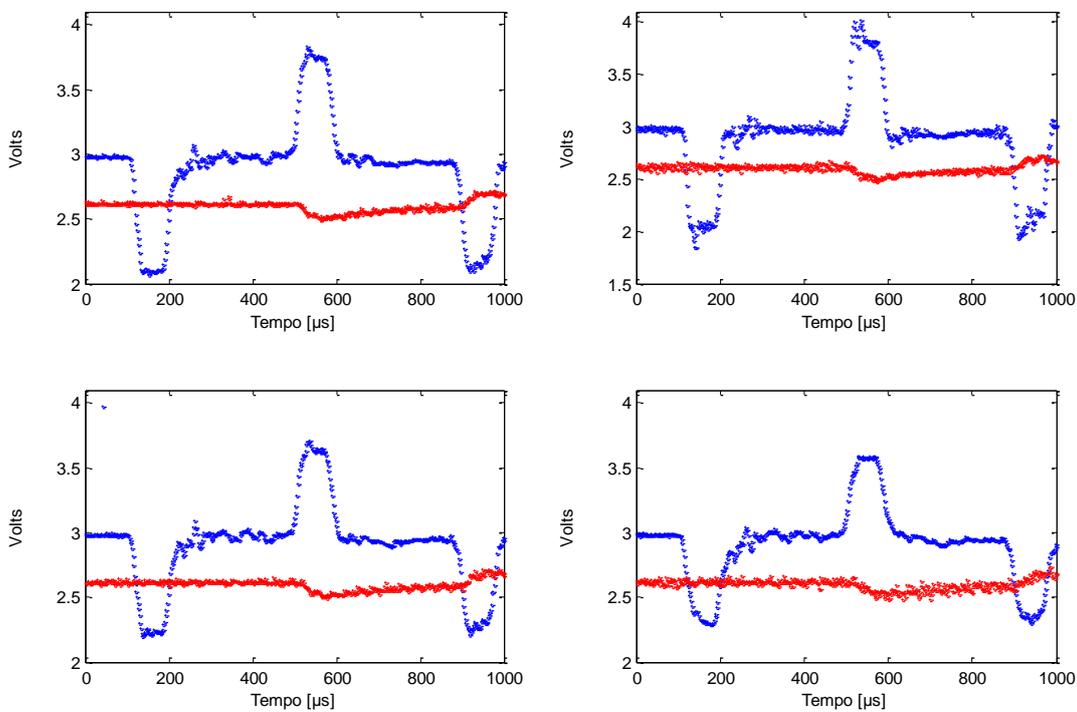


Figura A.2 – Sinais de ensaio de POM

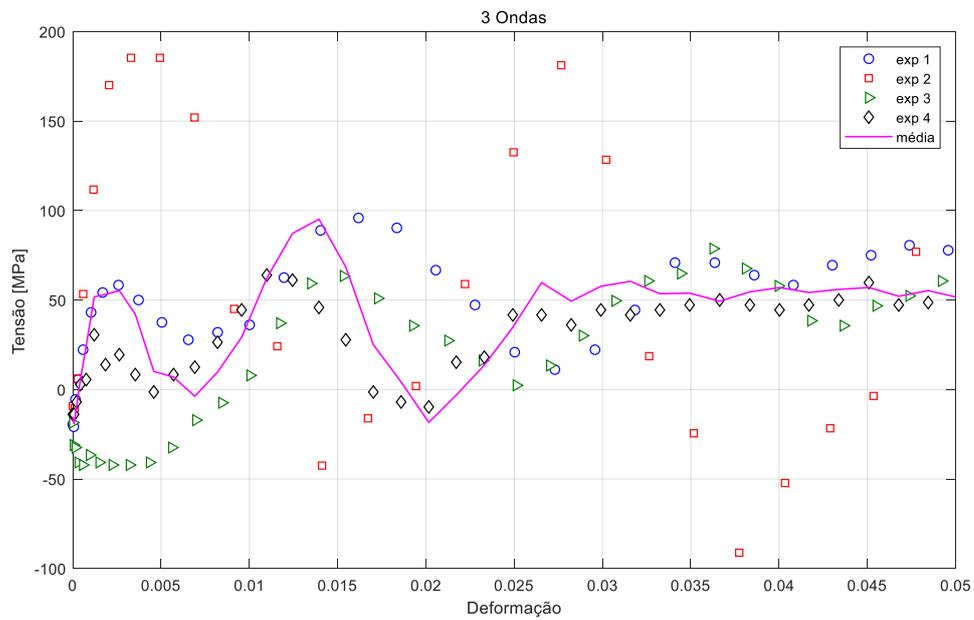


Figura A.3 - Curva tensão-deformação, análise de 3 ondas para POM

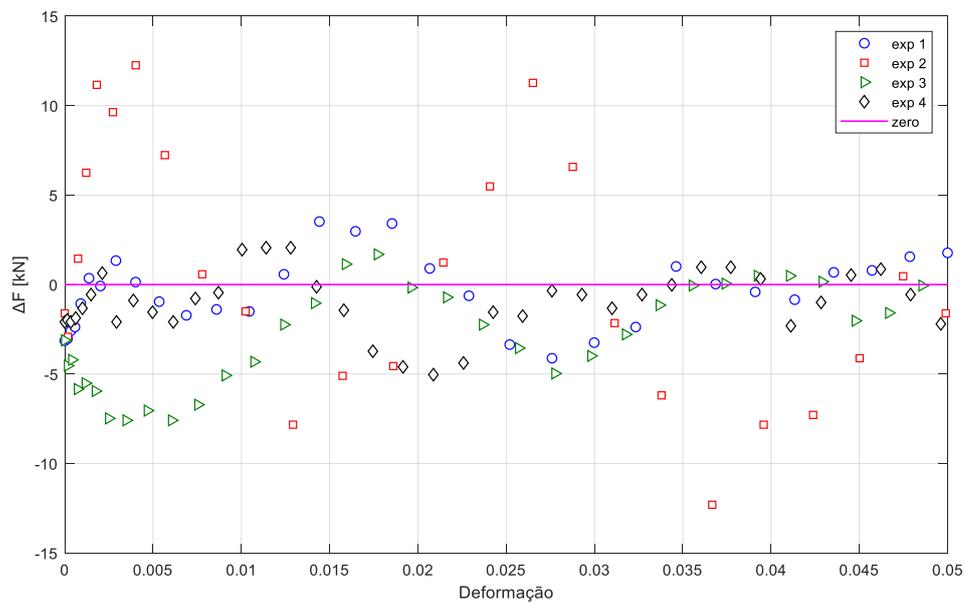


Figura A.4- Diferença de forças para POM

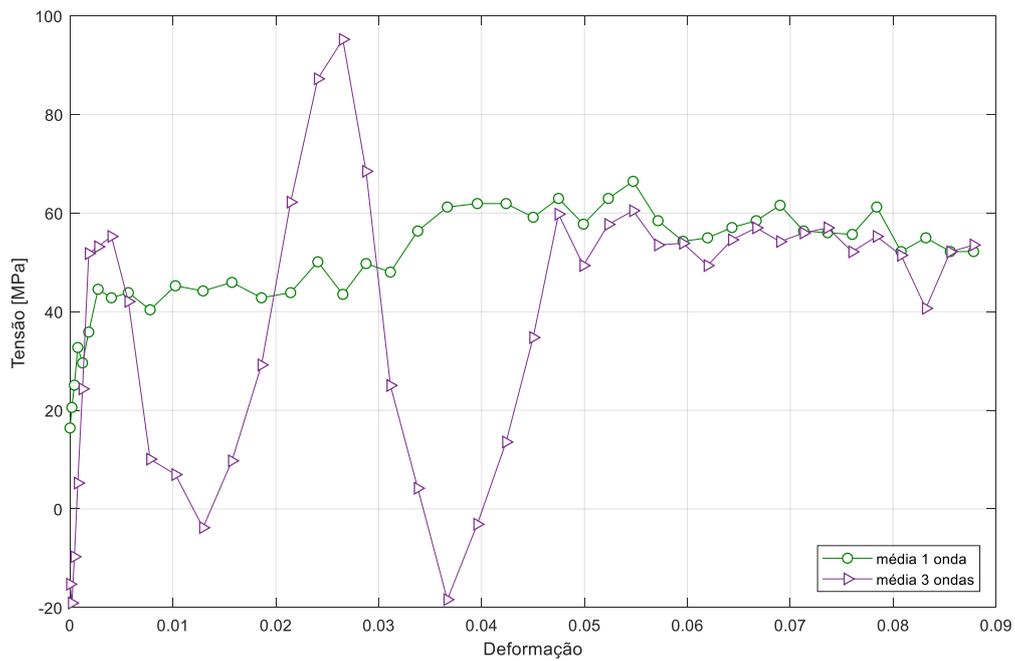


Figura A.5 – Curvas médias de 1 e 3 ondas para POM



Figura A.6 – Corpo de prova de POM (esquerda), corpo de prova de alumínio (direita) e projéteis (centro)