UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

GUSTAVO COSER MONTEIRO DIAS

Estudo dos requisitos técnicos para desenvolvimento de uma bancada de
teste com barra de pressão Split-Hopkinson

São Carlos
2014

GUSTAVO COSER MONTEIRO DIAS

**Estudo dos requisitos técnicos para desenvolvimento de uma bancada
de teste com barra de pressão Split-Hopkinson.**

Dissertação apresentada ao Departamento de
Engenharia de Produção Mecânica da Escola de
Engenharia de São Carlos para a obtenção do título
de Mestre em Processos Avançados de Fabricação.

Área de Concentração: Engenharia de
Produção Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Eraldo Jannone da Silva

São Carlos

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

C982e	<p>Coser Monteiro Dias, Gustavo</p> <p>Estudo dos requisitos técnicos para desenvolvimento de uma bancada de teste com barra de pressão Split-Hopkinson. / Gustavo Coser Monteiro Dias; orientador Eraldo Jannone da Silva, 2014.</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Área de Concentração em Processos e Gestão de Operações -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.</p> <p>1. SHB. 2. Tração rápida. 3. Taxa de deformação. 4. Simulação. I. Título.</p>
-------	--

Candidato: Engenheiro **GUSTAVO COSER MONTEIRO DIAS**

Título da dissertação: “Estudo dos requisitos técnicos para desenvolvimento de uma bancada de teste com barra de pressão Split-Hopkinson”.

Data da defesa: 22/08/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Eraldo Jannone da Silva (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Alessandro Roger Rodrigues**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Dr. **Marcelo Tadeu Milan**
(Instituto de Materiais Tecnológicos do Brasil Ltda.)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção:
Prof. Titular **Luiz Cesar Ribeiro Carpinetti**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

***À minha esposa, com amor, respeito,
consideração e gratidão pela paciência,
dedicação e pelo auxílio constante empregados a
mim durante o período de elaboração e execução
deste trabalho.***

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, à minha família que acreditou em mim e depositou toda confiança em minha formatura, auxiliando-me na formação pessoal, o que proporcionou-me a construção da pessoa que sou hoje e, financeiramente até o início deste trabalho. À Juliana Coser Sobreiro Dias, minha esposa, quem me acompanhou noites adentro nos estudos e preparação deste trabalho, contribuindo com ideias e pensamentos, além do respaldo psicológico. Aos amigos e companheiros de repúblicas que me propiciaram vários momentos filosóficos ao som do bom e velho rock n' roll, item fundamental ao meu recolhimento espiritual.

Agradeço ao MIB (Instituto de Materiais Tecnológicos do Brasil Ltda.) por proporcionar-me várias oportunidades como profissional, garantindo-me a função de estagiário durante todo o ano de 2011 e de pesquisador até julho de 2012, períodos durante os quais pude desenvolver novas ideias e aperfeiçoar o presente projeto. Agradeço aos amigos que fiz dentro do MIB por toda contribuição nos aspectos intelectuais e tecnológicos. Ao companheiro de projetos, Waldemar Neto da WT Indústria, pela troca de ideias e discussões profundas acerca de inovações. Aos amigos e ao técnico Adolfo Ferrarin Neto do LAPRAS (Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade), assim como aos professores Eraldo Jannone da Silva e Reginaldo Teixeira Coelho, pela orientação e incentivo ao trabalho.

Não posso deixar de agradecer à CAPES, por financiar parte desta pesquisa, à Equitecs Inovação e Tecnologia em Equipamentos por ter contribuído na confecção de algumas peças importantes à execução do trabalho e ao Eduardo e Rodrigo Kehl pelo fornecimento do poliuretano utilizado na confecção do amortecedor.

Finalmente, porém não menos importante, aos colegas pesquisadores Francisco Nascimento, Hugo Leão e Marcelo Castro, todos alunos de pós-graduação na Área de Termodinâmica, do departamento de Engenharia Mecânica da EESC, ao técnico de laboratório Jorge Nicolau dos Santos do grupo NETEF e aos colaboradores Cássio Ubaldino de Souza e Rafael Ferro Luzia da empresa Hidral-Mac Industrial Ltda.

“O poder nas mãos de um sábio
o torna um aprendiz, mas nas
mãos de um estulto o torna um
ditador. Se um dia tiverem muito
poder, que fantasmas sairão do
calabouço do seu inconsciente?”

Augusto Cury

Resumo

Dias, G. C. M **Estudo dos requisitos técnicos para desenvolvimento de uma bancada de teste com barra de pressão Split-Hopkinson**. 2014. 176 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

O presente trabalho teve por objetivo o desenvolvimento e aprimoramento da técnica de execução de ensaios mecânicos a altas taxas de deformação (cerca de 1000 a 5000 s⁻¹), por meio do desenvolvimento de um equipamento do tipo Split Hopkinson Bar (SHB), com corpos-de-prova no formato cilíndrico. A construção de tal equipamento fez-se necessária para a obtenção de informações acerca do comportamento dinâmico dos materiais, quando utilizados em condições de impacto, para aplicações de engenharia. Foram definidos os requisitos técnicos para a construção do equipamento SHB para a modalidade de ensaios em tração. Os elementos mecânicos foram projetados, usinados e montados, segundo a configuração de teste adotada. Determinou-se as dimensões e geometrias dos corpos-de-prova, confeccionados em aço ABNT 1020. Realizou-se ainda a instrumentação do equipamento SHB, para a determinação da resposta tensão-deformação dos corpos-de-prova. Adicionalmente, utilizou-se uma câmera de alta velocidade, com capacidade para filmar até 100.000 quadros/s, no intuito de estudar o comportamento do corpo-de-prova durante carregamento dinâmico. Os resultados dos testes realizados indicaram que, apesar da construção mecânica satisfatória do primeiro protótipo, a pressão usada no carregamento (8 kgf/cm²) foi insuficiente para assegurar que a falha do material testado ocorresse durante a propagação do primeiro pulso trativo ao longo do comprimento do corpo-de-prova, que sofreu sucessivos carregamentos até a fratura. Este comportamento é chamado “efeito sanfona”. Para que o corpo-de-prova se quebrasse após a propagação de apenas um pulso trativo foram sugeridas melhorias na vedação da câmara de gás e o aumento da pressão de trabalho. A utilização de extensômetros de menor grade também foi indicada como melhoria futura. A sincronização entre a câmera de alta velocidade e o sistema de aquisição deverá ser aprimorada, pois é fundamental para a precisão na determinação do instante da colisão entre o projétil e a barra incidente, assim como do instante da ruptura do corpo-de-prova. A continuidade dessa

pesquisa, com a busca da solução dos desafios tecnológicos oriundos da construção e teste desse primeiro protótipo, será tema de trabalhos futuros desse grupo de pesquisa.

Palavras-chave: SHB; tração rápida; taxa de deformação; simulação.

Abstract

Dias, G. C. M **Study of techniques requires for development of the testing bench for split Hopkinson tension bar**. 2014. 176 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

The present work consist in the development and improvement of execution technique of mechanical tests at high strain rates (about 1000 to 5000 s⁻¹), with an equipment tensile split Hopkinson bar (SHB) using cylindrical specimen. The construction of such equipment was necessary to obtain information about the dynamic behavior of materials, when used under impact conditions, for engineering applications. Technical requirement are defined for construction of SHB equipment for tensile type tests. The mechanical elements were designed, machined and assembled according to the test configuration adopted. Determined the dimensions and geometries the specimens, made of AISI 1020. Also realized the SHB equipment instrumentation to determine the stress-strain response of specimen. Additionally, used a high speed camera, capable of record up to 100,000 frames/s, with the aim of study the behavior of specimen during dynamic loading. The results of tests indicate that despite the satisfactory mechanical structure, of the first prototype, the pressure used in the load (8 kgf/cm²) was insufficient to ensure that the material failure occurred during the propagation of the first tensile pulse along the specimen length, which undergo successive loading until the fracture. This behavior is named “concertina effect”. For the specimen is broke after propagation of only one tensile pulse, improved in sealing the gas gun and an increase the work pressure, wave been suggested. The use of strain gages smaller grid was also suggested as a future improvement. The synchronization between high speed camera and the system of acquisition should be improved, because it is fundamental to the accuracy in determining the instant collision between the hammer and the incident bar as well as the instant failure of specimen. The continuation of this research, with the pursuit of technological solutions arising from the construction and tests this first prototype will be the subject of future work of this research group.

Keywords: SHB, stress at speed, strain rate, simulation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Esquema da barra bipartida de Hopkinson sob compressão. Fonte: Adaptado de Marais et al., 2004.....43
- Figura 2:** Adaptação com barras laterais para aumento de sensibilidade no corpo-de-prova. Fonte: Adaptado de Eskandari; Nemes, 2000.....46
- Figura 3:** Esquema de acionamento da versão lenta da barra de Hopkinson. Fonte: Adaptado de Chen; Song, 2011.49
- Figura 4:** Representação da interface entre as barras incidente (1), inserto cônico (2), corpo-de-prova (3) e barra de transmissão. Fonte: Adaptado de Abramov et al., 2006.49
- Figura 5:** Configuração da barra de Hopkinson adaptada para ensaios em tração. Fonte: Adaptado de Huh; Kang; Han, 2002.52
- Figura 6:** Esquema do equipamento desenvolvido para melhor definir a forma dos pulsos de tração gerados durante o impacto entre anteparo e projétil. Fonte: Adaptado de Gerlach et al., 2011.....53
- Figura 7:** Aspecto físico de dois corpos-de-prova após o carregamento de tração. Fonte: Adaptado de Sasso; Newaz; Amodio, 2008.54
- Figura 8:** Curvas de tensão verdadeira *versus* deformação verdadeira. Fonte: Adaptado de Sasso; Newaz; Amodio, 2008.54
- Figura 9:** Geometria do corpo-de-prova em chapa plana no formato “M” com indicação do sentido de aplicação das forças de carregamento (setas verticais) e das seções sob diferentes esforços. Fonte: Adaptado de Mohr e Gary, 2007.55
- Figura 10:** Vistas isométricas dos corpos-de-prova feitos em: **(a)** aço TRIP-800 e **(b)** Al 6061-T6511. Fonte: Adaptado de Guzman; Frew; Chen, 2011.....56
- Figura 11:** Dispositivo adaptador para fixação dos corpo-de-prova em formato de chapa à SHPB: **(a)** vista isométrica; **(b)** foto tirada do equipamento. Fonte: Adaptado de Guzman; Frew; Chen, 2011.56
- Figura 12:** Setup de experimento realizado com o apoio de **(a)** duas câmeras de alta velocidade para avaliação do comportamento dinâmico dos corpos-de-prova de alumínio, posicionados na região circulada em vermelho, **(b)**

nos formatos cilíndrico e de paralelepípedo. Fonte: Adaptado de Besnard et al., 2012.....	57
Figura 13: (a) Extremidade de uma das barras do equipamento SHPB, adaptada para receber (b) chapas curvadas, oriundas do corte de tubos de alumínio AA5754. Fonte: Adaptado de Salisbury; Worswick; Mayer, 2007.	58
Figura 14: Geometrias utilizadas para obtenção dos coeficientes JC nos formatos: (a) liso; (b) raiado; (c) liso reduzido. Fonte: Adaptado de Clausen et al., 2004.	59
Figura 15: Esquema da SHPB desenvolvida para ensaios em flexão. Fonte: Adaptado de Delvare; Hanus; Bailly, 2010.	60
Figura 16: Modelagem do corpo-de-prova como uma viga sob flexão: deflexão definida por U_e e inclinação da seção transversal dada pelo ângulo ψ . Fonte: Adaptado de Delvare; Hanus; Bailly, 2010.	60
Figura 17: Esquema do sistema de fixação de chapas de cobre às barras de ensaio no momento do setup. Fonte: Adaptado de Ramezani; Ripin; Ahmad, 2010.	61
Figura 18: Adaptadores para testes de adesão de adesivos a base de epóxi: (a) fotos dos modelos utilizados; (b) croqui com dimensões de montagem do dispositivo. Fonte: Adaptado de Sen; Tekalur; Jilek, 2011.	62
Figura 19: Etapas de preparação do corpo-de-prova: (a) hemisfério cerebral em solução; (b) fatias do cérebro, de 1 a 2 mm de espessura; (c) tecido biológico compactado em corpos-de-prova de 9 mm x 18 mm x 1-2 mm; (d) fixação dos corpos-de-prova entre chapas de alumínio por meio de cianocrilato. Fonte: Adaptado de Trexler et al. 2011.	62
Figura 20: Princípio básico de funcionamento da SHPB clássica, onde ϵ_i , ϵ_r e ϵ_t representam, respectivamente, as deformações causadas pelos pulsos de onda incidente, refletido e transmitido. Fonte: Adaptado de Micheli, 2008.	64
Figura 21: Esquema de um corpo-de-prova cilíndrico. Fonte: Adaptado de Kaiser, 1998.	65
Figura 22: Elemento infinitesimal na condição inicial, porém sob carregamento compressivo. Fonte: Adaptado de Kaiser, 2004.	66

Figura 23: Análise da deformação e inércia do movimento em corpos-de-prova lisos. (a) metade do material de testes; (b) região crítica ampliada. Fonte: Adaptado de Jeunechamps; Ponthot, 2013.	71
Figura 24: Análise dos corpos-de-prova entalhados. (a) distribuição da temperatura; (b) distribuição da deformação. Fonte: Adaptado de Jeunechamps; Ponthot, 2013.	71
Figura 25: Extensômetro. Fonte: Adaptado de Kaiser, 1998.	73
Figura 26: Aumento do comprimento da grade do sensor em função do aumento do comprimento da onda. Fonte: Adaptado de Kaiser, 1998.	73
Figura 27: (a) Método utilizado para obtenção dos coeficientes de tenacidade a fratura; (b) Curva de calibração de deslocamento no tempo. Fonte: Adaptado de Bacon; Färm; Lataillade, 1993.	75
Figura 28: Exemplo de padrão de Moirè. Fonte: Adaptado de Verleysen; Degrieck, 2004.	76
Figura 29: Método de aquisição de dados visuais de deformação do corpo-de-prova. Fonte: Adaptado de Verleysen; Degrieck, 2004.	77
Figura 30: Etapas de deformação segundo a filmagem (linha superior) e a simulação numérica (linha inferior), para corpos-de-prova entalhados com raio de 0,4 mm. Fonte: Adaptado de Børvik et al., 2011.	77
Figura 31: Comparação entre os resultados experimentais relativos ao alongamento (à esquerda) e os de simulação numérica (à direita) para corpos-de-prova cilíndricos em quatro comprimentos diferentes. Fonte: Adaptado de Besnard et al., 2012.	78
Figura 32: Diagrama de Lagrange para ensaio em tração na SHPB. Fonte: Adaptado de Besnard et al., 2012.	80
Figura 33: Adaptação da SHPB para realização dos ensaios em tração, foco deste trabalho. Fonte: Autoria própria.	81
Figura 34 (a): Dimensões das barras, incidente e de transmissão, utilizadas na versão original do equipamento (dimensões em mm) e (b) Três rolamentos posicionados sobre a superfície de uma das barras. Fonte: Autoria própria.	84
Figura 35: Corpo-de-prova utilizado nos ensaios preliminares (dimensões em mm). Fonte: Autoria própria.	85

Figura 36: Geometrias recomendadas para os corpos-de-prova para ensaios de tração de materiais metálicos Fonte: Adaptado de ASTM E8/E8M, 2011.	86
Figura 37: Geometrias recomendadas para os corpos-de-prova para ensaios de tração de materiais metálicos de dimensões reduzidas Fonte: Adaptado de ASTM E8/E8M, 2011.	87
Figura 38: Dimensões do projétil original (dimensões em mm). Fonte: Autoria própria.	87
Figura 39: Representação esquemática do projétil em contato com a câmara de pressurização, enquanto vedado. Fonte: Autoria própria.	88
Figura 40: Sistema de acionamento pneumático com travas mecânicas. Fonte: Autoria própria.	89
Figura 41: Circuito para sincronização de sinais de aquisição. Fonte: Autoria própria.	91
Figura 42: Sinal de <i>trigger</i> emitido na forma de uma onda quadrada. Fonte: Autoria própria.	92
Figura 43: Posicionamento dos extensômetros na ponte e nas barras incidente e de transmissão (dimensões em mm). Fonte: Autoria própria.	95
Figura 44: Fotografia tirada para indicar a oxidação sofrida pelas barras, os terminais de conexão para leitura dos dados de deformação dos <i>strains gages</i> e a necessidade de alinhamento com a barra guia. Fonte: Autoria própria.	96
Figura 45: Dispositivo de regulagem de altura dos rolamentos para alinhamento das barras. Fonte: Autoria própria.	97
Figura 46: Corpos-de-prova anteriormente à execução dos ensaios preliminares. Fonte: Autoria própria.	98
Figura 47: Imagens retiradas da filmagem do ensaio do CP_E_02 nos instantes: pré (imagem superior) e pós deformação (imagem inferior) do corpo-de-prova. Fonte: Autoria própria.	99
Figura 48: Sequência de imagens (de cima para baixo) que demonstra o deslocamento do projétil, desde o flange de condução (à direita) até a colisão com o anteparo (à esquerda). Fonte: Autoria própria.	100
Figura 49: Montagens realizadas para (a) filmagem do projétil em movimento e (b) dos corpos-de-prova em deformação. Fonte: Autoria própria.	100

Figura 50: Metodologia utilizada para calibração das células de carga. Fonte: Autoria própria.....	103
Figura 51: Curva de calibração obtida a partir de carregamentos sucessivos das células de carga a partir de massas calibradas. Fonte: Autoria própria.	104
Figura 52: Representação exata da ferramenta de calibração disponível no software iSPEED Suite. Fonte: Autoria própria.....	105
Figura 53: Análise de imagens, quadro a quadro, para determinação da velocidade de cruzeiro do projétil. Fonte: Autoria própria.....	107
Figura 54: Gráfico do deslocamento do projétil sobre a barra guia ao longo do tempo. Fonte: Autoria própria.....	107
Figura 55: Indicação da névoa provocada por gotículas de água. Fonte: Autoria própria.....	108
Figura 56: Diagrama de Lagrange para interpretação do comportamento dos corpos-de-prova CP_E_01 e CP_E_02. Fonte: Autoria própria.	110
Figura 57: Sequência de imagens dos corpos-de-prova em deformação (a) CP_E_02 e (b) CP_E_03. Fonte: Autoria própria.....	111
Figura 58: Taxas de deformação às quais estiveram sujeitos os corpos-de-prova CP_E_02 e CP_E_03. Fonte: Autoria própria.	113
Figura 59: Registro do alongamento sofrido pelos corpos-de-prova CP_E_02 e CP_E_03. Fonte: Autoria própria.	114
Figura 60: Deslocamento vertical das barras registrado durante o ensaio do CP_E_02. Fonte: Autoria própria.	116
Figura 61: Deslocamento vertical das barras registrado durante o ensaio do CP_E_03. Fonte: Autoria própria.	116
Figura 62: Dados de deformação do CP_E_03 obtidos da barra de transmissão. Fonte: Autoria própria.....	117
Figura 63: Curva de carga <i>versus</i> deslocamento obtida de um ensaio de tração convencional em aço ABNT 1045. Cedita por MIB.	118
Figura 64: Revisão do equipamento para atendimento das especificações do ensaio de tração em alta velocidade. Fonte: Autoria própria.	122
Figura 65: Dimensões das barras incidente e de transmissão, utilizadas na versão adaptada do equipamento (dimensões em mm) Fonte: Autoria própria.	122

Figura 66: Corpo-de-prova utilizado após revisão de projeto (dimensões em mm), com região útil de 10 mm. Fonte: Autoria própria.....	123
Figura 67: Corpo-de-prova utilizado após revisão de projeto (dimensões em mm), com região útil de 5 mm. Fonte: Autoria própria.....	124
Figura 68: Desenho técnico mecânico do projétil após revisão (dimensões em mm. Fonte: Autoria própria.....	125
Figura 69: Sinal de <i>trigger</i> por meio da interferência do sinal de acionamento do disparo do projétil. Fonte: Autoria própria.	126
Figura 70: Configuração do software Catman Easy para aquisição dos dados de deformação das barras a partir de um sinal de <i>trigger</i> . Fonte: Autoria própria.....	127
Figura 71: Circuito modificado para sincronização de sinais de aquisição. Fonte: Autoria própria.....	127
Figura 72: Parametrização do sensor ponte de Wheatstone (imagem retirada do software Catman Easy) Fonte: Autoria própria.....	131
Figura 73: Método de calibração adotado para os corpos-de-prova de geometria segundo a revisão do projeto do equipamento (imagem retirada do software i-SPEED suite). Fonte: Autoria própria.	132
Figura 74: Momento da colisão entre as barras incidente e de transmissão após a fratura do corpo-de-prova. Fonte: Autoria própria.	136
Figura 75: Fotografia dos corpos-de-prova, de 10 mm de comprimento útil, após serem fraturados. De cima para baixo: R1, R2, R3 e R4. Fonte: Autoria própria.....	137
Figura 76: Registro do alongamento sofrido pelos corpos-de-prova R1, R2, R3 e R4. Fonte: Autoria própria.....	138
Figura 77: Deformação sofrida ao longo do tempo pelos corpos-de-prova R1, R2, R3 e R4. Fonte: Autoria própria.....	139
Figura 78: Taxas de deformação às quais estiveram submetidos os corpos-de-prova R1, R2, R3 e R4. Fonte: Autoria própria.	139
Figura 79: Taxas de deformação às quais estiveram submetidos os corpos-de-prova R1, R2, R3 e R4, enquanto solicitados mecanicamente. Fonte: Autoria própria.....	140

Figura 80: Fotografia dos corpos-de-prova, de 5 mm de comprimento útil, após terem sido fraturados. De cima para baixo: R7, R8, R9, R10 e R11. Fonte: Autoria própria.....	142
Figura 81: Registro do comprimento dos corpos-de-prova em função do tempo de ensaio. Fonte: Autoria própria.	143
Figura 82: Deformação instantânea sofrida por cada corpo-de-prova durante ensaios. Fonte: Autoria própria.	144
Figura 83: Taxas de deformação reais às quais estiveram submetidos os corpos-de-prova R7, R8, R9, R10 e R11. Fonte: Autoria própria.	145
Figura 84: Taxas de deformação às quais estiveram submetidos os corpos-de-prova R7, R8, R9, R10 e R11, enquanto solicitados mecanicamente. Fonte: Autoria própria.....	145
Figura 85: Dados originais de deformação registrados em SG1 e SG2 para o corpo-de-prova R7. Fonte: Autoria própria.	147
Figura 86: Dados originais de deformação registrados em SG1 e SG2 para o corpo-de-prova R8. Fonte: Autoria própria.	147
Figura 87: Dados originais de deformação registrados em SG1 e SG2 para o corpo-de-prova R9. Fonte: Autoria própria.	148
Figura 88: Dados originais de deformação registrados em SG1 e SG2 para o corpo-de-prova R10. Fonte: Autoria própria.	148
Figura 89: Dados originais de deformação registrados em SG1 e SG2 para o corpo-de-prova R11. Fonte: Autoria própria.	149
Figura 90: Digrama de Lagrange para interpretação dos efeitos sucessivos em R7, R8, R9 e R10 e R11. Fonte: Autoria própria.....	150
Figura 91: Identificação dos sucessivos picos de deformação ocorridos em ambas as barras. Fonte: Autoria própria.....	152
Figura 92: Identificação do momento correspondente ao carregamento do corpo-de-prova dentre os dados de deformação registrados pela barra incidente, utilizando-se a transformada de Gabor. Fonte: Autoria própria.....	153
Figura 93: Identificação do momento correspondente ao carregamento do corpo-de-prova dentre os dados de deformação registrados pela barra de transmissão, utilizando-se a transformada de Gabor. Fonte: Autoria própria.	153

Figura 94: Resultado da análise de Gabor para a curva de deformação no tempo completa. Fonte: Autoria própria.	154
Figura 95: Curva tensão <i>versus</i> deformação para corpo-de-prova R7, considerando dados de SG1 apenas. Fonte: Autoria própria.	155
Figura 96: Curva tensão <i>versus</i> deformação para corpo-de-prova R7, considerando adição dos dados do pulso refletido ao pulso incidente. Fonte: Autoria própria.	156
Figura 97: Geometria utilizada para execução dos ensaios na máquina INSTRON, com variação no comprimento útil conforme tabela no canto inferior direito. Fonte: Autoria própria.	158
Figura 98: Curva tensão verdadeira <i>versus</i> deformação verdadeira para os corpos-de-prova (a) I1 e (b) I2. Fonte: Autoria própria.	159
Figura 99: Curva tensão verdadeira <i>versus</i> deformação verdadeira para os corpos-de-prova (a) I3 e (b) I4. Fonte: Autoria própria.	160

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de materiais testados e os empregados na confecção das barras de ensaio.....	47
Tabela 2 – Características técnicas i-SPEED 3.	91
Tabela 3 – Dimensões da região útil dos corpos-de-prova aferidas por paquímetro.	98
Tabela 4 – Relação de massas utilizadas na calibração das células de carga.	104
Tabela 5 – Parâmetros de ensaio.	109
Tabela 6– Dados dos ensaios dos corpos-de-prova CP_E_02 e CP_E_03.....	115
Tabela 7 – Comparação entre os dados de alongamento obtidos por ambos os métodos de análise.	115
Tabela 8 – Comparação entre os parâmetros de ensaio conseguidos para as configurações original e revisada do projétil.	134
Tabela 9 – Alongamento máximo dos corpos-de-prova registrado durante carregamento dinâmico do material.	135
Tabela 10: Dados de variação linear e quadrática para os corpos-de-prova de R1 a R4.....	137
Tabela 11 – Alongamento máximo dos corpos-de-prova registrado durante carregamento dinâmico do material.	142
Tabela 12 – Intervalos de tempo dentro dos quais cada evento ocorreu, de acordo com curvas obtidas pela ponte de Wheatstone identificada por SG1. .	146
Tabela 13 – Dados relativos aos ensaios de I1, I2 em uma máquina de ensaios de tração convencional INSTRON.	161
Tabela 14 – Dados relativos ao ensaio de I3 em uma máquina de ensaios de tração convencional INSTRON.	161
Tabela 15 – Dados de energia gasta por unidade de volume para atingimento da ruptura dos corpos-de-prova I1, I2 e I3.	161
Tabela 16 – Energia dispendida por unidade de volume dos corpos-de-prova R1 a R4.....	163
Tabela 17 – Energia dispendida por unidade de volume dos corpos-de-prova R7 a R11.....	163

NOMENCLATURA

Abreviaturas e Siglas

Símbolo	Descrição
ABAQUS	Abaqus Unified FEA
ASTM	American Society for Testing and Materials
CH1	<i>channel 1</i> (canal 1)
CH2	<i>channel 2</i> (canal 2)
CH3	<i>channel 3</i> (canal 3)
CP	Corpo-de-prova
CP_E_01	Primeiro corpo-de-prova de modelo escalonado a ser ensaiado
CP_E_02	Segundo corpo-de-prova de modelo escalonado a ser ensaiado
CP_E_03	Terceiro corpo-de-prova de modelo escalonado a ser ensaiado
CS	Cowper-Symonds
D4L2	Corpos-de-prova com 4 mm de diâmetro e 2 mm de comprimento na região útil de ensaio
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EPDM	Monômero etileno-propileno
exp	Experimentos realizados na SHPB
Ext_BI	Extremidade da barra incidente
Ext_BT	Extremidade da barra de transmissão
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> – Transformada rápida de Fourier
fps	Unidade de medida de taxa de aquisição em <i>frames/s</i>
IPEM	Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo
JC	Johnson-Cook
KC	Klopp-Clifton
LAPRAS	Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade
LIT	Litonski
MIB	<i>Materials Institute of Brazil</i> (Instituto de Materiais Tecnológicos do Brasil Ltda.)
OFHC	Corpo-de-prova em cobre
PERZY	Perzyna

P1	Pico de deformação compressiva resultante do impacto, dado por SG1
P2	Carregamento em tração registrado por SG1
P3	Reflexão do pico de deformação compressiva resultante do impacto
P4	Reflexão do carregamento em tração
P5	Pico de deformação compressiva resultante do impacto, transmitido a SG2
P6	Carregamento em tração trativa, transmitido a SG2
P7	Oscilações verticais da barra de transmissão registradas por SG2
QE	Testes a velocidades quase-estáticas
R ₁	Extensômetro sujeito a esforços de tração e colado na posição (r; 90°) em ambas as barras de ensaio
R ₂	Extensômetro sujeito a esforços de tração e colado na posição (r; 0°) em ambas as barras de ensaio
R ₃	Extensômetro sujeito a esforços de tração e colado na posição (r; 180°) em ambas as barras de ensaio
R ₄	Extensômetro sujeito a esforços de tração e colado na posição (r; 270°) em ambas as barras de ensaio
R1	Primeiro corpo-de-prova testado após revisão da SHPB
R2	Segundo corpo-de-prova testado após revisão da SHPB
R3	Terceiro corpo-de-prova testado após revisão da SHPB
R4	Quarto corpo-de-prova testado após revisão da SHPB
R7	Quinto corpo-de-prova testado após revisão da SHPB
R8	Sexto corpo-de-prova testado após revisão da SHPB
R9	Sétimo corpo-de-prova testado após revisão da SHPB
R10	Oitavo corpo-de-prova testado após revisão da SHPB
R11	Nono corpo-de-prova testado após revisão da SHPB
RTV630	Corpo-de-prova feito em borracha
SG1	Extensômetros localizados na barra incidente
SG2	Extensômetros localizados na barra de transmissão
SHPB	<i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> ou Barra particionada de Hopkinson
ZA	Zerilli-Armstrong
W ₁	Extensômetro localizado no trecho 1-2 da ponte de Wheatstone

W_2	Extensômetro localizado no trecho 2-3 da ponte de Wheatstone
W_3	Extensômetro localizado no trecho 3-4 da ponte de Wheatstone
W_4	Extensômetro localizado no trecho 4-1 da ponte de Wheatstone
x	Coordenada no eixo das abscissas
y	Coordenada no eixo das ordenadas

Escalares

Símbolo	Unidade	Descrição
δ_p	variável	Desvio padrão
ε_i	10^{-6} m	Deformação na barra incidente devido a onda incidente
ε_r	10^{-6} m	Deformação na barra incidente devido a onda refletida
ε_t	10^{-6} m	Deformação na barra de transmissão devido a onda transmitida
ε_s	10^{-6} m	Deformação do corpo-de-prova
θ	rad	Coordenada polar para ângulo de giro
$\varnothing$	mm	Diâmetros de peças de seção transversal circular
λ	mm	Comprimento de onda
μ	10^{-6}	Prefixo da unidade “micro” de valor 10^{-6}
π	-	Constante
ρ	kg/m ³	Massa específica
σ	MPa	Tensão no corpo-de-prova
σ_e	MPa	Tensão de escoamento
σ_r	MPa	Tensão limite de resistência
$\sigma_{\text{méd}}$	MPa	Tensão média
Ψ	rad	Ângulo de rotação da seção transversal do corpo-de-prova sob flexão
ΔA	mm	Variação da área transversal do corpo-de-prova
ΔL_{AI}	mm	Alongamento registrado via análise de imagens
ΔL_P	mm	Alongamento registrado via medições feitas pelo auxílio de um paquímetro
ΔL_{SG}	mm	Alongamento registrado a partir dos dados de deformação registrados pelos extensômetros
Δt	s	Intervalo de tempo necessário para fraturar o corpo-de-prova
ΔV	mm ³	Variação volumétrica durante alongamento do corpo-de-prova
a	mm	Espessura do corpo-de-prova
A_b	mm ²	Área transversal das barras
A_p	mm ²	Área da seção transversal do projétil
A_s	mm ²	Área transversal do corpo-de-prova

b	mm	Largura do corpo-de-prova
c	m/s	Velocidade de propagação da onda de choque
d	mm	Diâmetro do dispositivo de fixação, ou garra
dl	mm	Variação linear no interior do flange de condução
dx	mm	Comprimento do elemento infinitesimal
D_e	mm	Diâmetro externo do projétil
D_f	mm	Diâmetro final do corpo-de-prova
D_i	mm	Diâmetro interno do projétil
D_b	mm	Diâmetro das barras incidente e de transmissão
D_s	mm	Diâmetro do corpo-de-prova
D_0	mm	Diâmetro inicial do corpo-de-prova
$erros_G$	mm	Erro intrínseco à medição dos extensômetros
E	GPa	Módulo de elasticidade do material
E_p	J	Energia acumulada no projétil
E_s	J	Energia necessária para romper o corpo-de-prova
$\ddot{E}_s$	J/mm ²	Energia por unidade de área necessária para romper o corpo-de-prova
E'_s	J/mm ³	Energia por unidade de volume necessária para romper o corpo-de-prova
f_v	mm	Ponto de perda de contato do projétil com o componente vedante
$f(x,t)$	mm	Função do comprimento do corpo-de-prova e do tempo
F	N	Força de carregamento do projétil
$F_{méd}$	N	Força média
F_s		Força de carregamento do corpo-de-prova
F_1	N	Força na face do corpo-de-prova em contato com a barra incidente
F_2	N	Força na face do corpo-de-prova em contato com a barra de transmissão
k	-	Fator de correção de fundo de escala. Constante
L	mm	Comprimento total do corpo-de-prova
L_{ant}	mm	Comprimento do anteparo
L_b	mm	Comprimento total das barras

L_f	mm	Comprimento final do corpo-de-prova
L_p	mm	Comprimento do projétil
L_0	mm	Comprimento inicial do corpo-de-prova
N_0	N	Carga aplicada na extremidade da barra incidente
p	MPa	Pressão no interior da câmara de pressurização
P	N	Força exercida sobre o corpo-de-prova sob carregamento de flexão
Q_i	m^3/s	Vazão de gás na entrada da câmara
Q_o	m^3/s	Vazão de gás na saída da câmara
r	mm	Raio das barras incidente e de transmissão
R	mm	Raio de arredondamento
R_v	N	Força de reação no sentido vertical
t	$10^{-6} s$	Tempo
t_{ch}	$10^{-6} s$	Duração do choque entre projétil e anteparo
u_1	mm	Deslocamento da face do corpo-de-prova em contato com a barra incidente
u_2	mm	Deslocamento da face do corpo-de-prova em contato com a barra de transmissão
U	V	Tensão de excitação
U_e	mm	Deslocamento transversal do corpo-de-prova sob flexão
U_o	V	Tensão de medição
v	m/s	Velocidade das partículas
v_1	m/s	Velocidade horizontal da face do corpo-de-prova em contato com a barra incidente
v_2	m/s	Velocidade horizontal da face do corpo-de-prova em contato com a barra de transmissão
V	mm^3	Variação volumétrica no interior do flange de condução
V_I	m/s	Velocidade da barra incidente
V_{II}	m/s	Velocidade da barra de transmissão

Sumário

1. INTRODUÇÃO	33
2 OBJETIVO DO TRABALHO	37
3 MOTIVAÇÃO/JUSTIFICATIVA	39
4 REVISÃO DA LITERATURA.....	42
4.1 Conceção Original	42
4.2 Determinação do material e dimensional das barras de ensaio	45
4.3 Aplicações e vertentes da técnica de Hopkinson / Kolsky	48
4.3.1 Ensaaios em compressão	48
4.3.2 Ensaaios em tração.....	50
4.3.3 Ensaaios diversos	58
4.4 Modelo Matemático	63
4.4.1 Simplificações do modelo.....	63
4.4.2 Propagações de ondas através das barras.....	64
4.4.3 Determinação das tensões no corpo-de-prova	64
4.4.4 Determinação da equação do movimento.....	66
4.4.5 Determinação das deformações e taxas de deformação no corpo-de-prova.....	68
4.5 Geometria do corpo-de-prova e efeito de impedância acústica	70
4.6 Sistema de aquisição e instrumentação	72
4.7 Análise de Sinais.....	74
5 CONCEPÇÃO DO ENSAIO.....	81
6 VERSÃO ORIGINAL DO EQUIPAMENTO DE ENSAIOS DE TRAÇÃO EM ALTA VELOCIDADE.....	83
6.1 Materiais e Métodos	83
6.1.1 Definição da geometria dos corpos-de-prova.....	84
6.1.2 O projétil.....	87

6.1.3 Sistema de travamento e acionamento	89
6.1.4 Aquisição dos dados de deformação	90
6.1.5 Instrumentação.....	92
6.1.6 Transdutor de força e momento	94
6.1.7 Setup.....	96
6.1.8 Calibração	101
6.1.9 Métodos para análises e apresentação dos resultados	105
6.2 Resultados e Discussões	106
6.2.1 Estudo da velocidade e energia do projétil.....	106
6.2.2 Ensaios preliminares: CP_E_02 e CP_E_03	109
6.2.3 Análise dos dados de deformação dos ensaios CP_E_02 e CP_E_03	112
6.2.4 Análise energética após ensaios CP_E_02 e CP_E_03	117
6.3 Conclusões Parciais	119
6.4 Melhorias Propostas após testes preliminares	120
7 VERSÃO ADAPTADA DO EQUIPAMENTO DE ENSAIOS DE TRAÇÃO EM ALTA VELOCIDADE.....	121
7.1 Materiais e Métodos	121
7.1.1 Definição da geometria dos corpos-de-prova.....	122
7.1.2 O projétil.....	124
7.1.3 Sistema de travamento e acionamento	125
7.1.4 Aquisição dos dados de deformação	125
7.1.5 Instrumentação.....	128
7.1.6 Transdutor de força e momento	129
7.1.7 Setup.....	129
7.1.8 Calibração	131
7.1.9 Métodos para análises e apresentação dos resultados	133

7.2 Resultados e Discussões	133
7.2.1 Estudo da velocidade e energia do projétil.....	134
7.2.2 Ensaios R1 a R4	135
7.2.3 Análise dos dados de deformação dos ensaios R1 a R4	137
7.2.4 Análise energética após ensaios R1 a R4.....	140
7.2.5 Ensaios R7 a R11	141
7.2.6 Análise dos dados de deformação dos ensaios R7 a R11	142
7.2.7 Análise energética e identificação dos eventos após execução dos ensaios de R7 a R11	149
7.2.8 Determinação da energia necessária para romper o material de testes em máquina de ensaios de tração universal	157
8 CONCLUSÕES GERAIS	165
9 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	167
REFERÊNCIAS	169

1. INTRODUÇÃO

No intuito de reduzir o peso das máquinas e equipamentos em geral, além dos meios de transportes hoje existentes no mercado, como por exemplo: aeronaves, automóveis, motocicletas, trens, prensas, caldeiras, tornos, etc., e de aumentar a eficiência desses, os fabricantes buscam aperfeiçoar o funcionamento de cada componente presente em seus produtos, de modo que esses possam continuar atendendo às expectativas e especificações de projeto. Nesta realidade, torna-se estritamente necessário que os componentes mecânicos presentes em cada sistema - freio, refrigeração, turbina e compressor, motor a combustão interna, sistema de tração etc. - mantenham a funcionalidade e aplicabilidade às temperaturas elevadas, por exemplo, além de serem capazes de resistir a alguns valores de deformação, sem que haja perda relevante de resistência e sem que o componente necessite ser retirado de serviço.

A fim de tornarem os produtos cada vez mais eficientes, os desenvolvedores de projetos mecânicos têm feito uso de softwares de simulação, de modo a aperfeiçoarem o processo de fabricação, além de tornarem os projetos mais enxutos. Neste contexto o estudo de tensões e deformações a altas taxas de deformação faz-se importante, o que justifica o enfoque do presente trabalho em dados obtidos a partir de materiais que tenham sido submetidos a esforços de tração em altíssima velocidade, por meio da propagação de uma onda de choque. Além da escolha correta dos materiais, alimentar os softwares de simulação corretamente pode determinar uma modelagem precisa e um projeto de sucesso no que diz respeito à reprodução do funcionamento e ao comportamento do componente em análise (Pantalé, 2002; Lim, Teo; Shim, 2002).

O estudo do comportamento mecânico dos materiais quando solicitados dinamicamente a diversas taxas de carregamento, submetendo-os à condição de deformação plástica, permite obter os coeficientes de Johnson-Cook e de Cowper-Symonds, os quais são importantes parâmetros a serem alimentados nos softwares de análise por elementos finitos (Chen et al., 2011; Marais et al., 2004). A fidelização destes parâmetros aos ensaios proporciona uma melhor aproximação numérica da modelagem à condição real a qual o produto da análise ficará exposto. Em termos práticos, as estruturas dos veículos e das aeronaves, por exemplo, geralmente são construídas a partir da estampagem de chapas metálicas de alta resistência. O

comportamento dinâmico destas chapas é a chave para a descrição das características estruturais dos materiais utilizados durante o impacto, de modo que se consiga avaliar a taxa de absorção de energia durante o choque. Uma vez que o comportamento dinâmico de um material difere do comportamento estático, devido à inércia e ao efeito da propagação de ondas de choque (Huh; Kang; Han, 2002; Gama; Gillespie, 2004), uma avaliação experimental adequada deve ser desenvolvida para o nível correspondente à taxa de deformação empregada nos ensaios. O mesmo conceito é aplicado aos processos de forjamento (Schauffer, 2012) e usinagem. Para este, o interesse pelo estudo dá-se na realização de simulações do destacamento de cavaco, o qual influenciará na eficiência de corte (Habibzadeh et al., 2010), na introdução de tensões residuais, nas temperaturas na interface ferramenta-peça e na vida útil das ferramentas, entre outros fatores (Umbrello; Sauobi; Outeiro, 2007).

Os parâmetros de corte envolvidos nos processos de usinagem, como força de corte e tensões máximas às quais ferramenta e peça usinada estão submetidas, além das grandes deformações intrínsecas ao processo, são fortemente influenciados pelas variáveis: taxa de deformação do material e temperaturas envolvidas no processo de formação de cavacos. As simulações numéricas permitem realizar análises de grande acurácia associada, a fim de determinar uma gama de combinações dos parâmetros supracitados que melhorem a eficiência do corte e a vida útil das ferramentas. Permitem ainda o barateamento da operação, seja pela redução do consumo de fluidos refrigerantes, devido às temperaturas mais baixas na interface ferramenta/peça, ou pela remoção de cavacos, cuja geometria favoreça a dissipação de calor. As simulações numéricas permitem ainda verificar o percentual da redução da força de corte e das tensões na ponta da ferramenta, propiciada pelo aumento da taxa de deformação (Umbrello; Sauobi; Outeiro, 2008) durante a simulação.

A comunidade científica sempre procurou modelar o comportamento dos diferentes tipos de materiais existentes. Modelos de materiais elásticos e elásto-visco-plásticos foram desenvolvidos e estão sendo usados na descrição do comportamento dos metais. Todos esses modelos necessitam recorrer a parâmetros, os quais devem sempre ser avaliados experimentalmente e, portanto, equipamentos devem ser extensivamente desenvolvidos a fim de fornecerem os resultados desejados. Dentre estes equipamentos, a tradicional máquina de testes

de tração é a mais utilizada para a medição das propriedades dos materiais, quando submetidos a carregamentos quase-estáticos. Já a barra particionada de Hopkinson (SHPB) tornou-se a principal técnica experimental para a aquisição das propriedades dinâmicas dos materiais (Gallina et al. - 2004).

O equipamento supracitado foi desenvolvido por Hopkinson em 1914 e aprimorado por Kolsky em 1949, cujo projeto foi originalmente desenvolvido para a condição de carregamento compressivo (Kaiser, 1998; Eskandari; Nemes, 2000). A curva tensão versus deformação para alta taxa de deformação (podendo variar de 1000 a 10000 s⁻¹) pode ser obtida pela propagação de ondas de tração através das barras incidente e de transmissão. A modificação do equipamento para a execução de ensaios de tração com alta taxa de deformação implica em algumas dificuldades, como, por exemplo, o projeto de garras e corpos-de-prova, além da determinação de erros inerentes ao ensaio e a geração do pulso de carregamento (Eskandari; Nemes, 2000; Huh; Kang; Han, 2002).

O presente trabalho apresenta uma versão do equipamento desenvolvida para executar ensaios em tração dinâmica. O desenvolvimento dos sistemas de fixação dos corpos-de-prova e carregamento destes, juntamente da geração de ondas, além do controle das variáveis e análise dos resultados, são apresentados e discutidos no decorrer deste documento.

2 OBJETIVO DO TRABALHO

Objetiva-se com este trabalho construir e testar o equipamento do tipo barra de Hopkinson, adaptado para a execução de ensaios mecânicos, de corpos-de-prova em tração e em alta velocidade – da ordem de 1000 a 5000 s⁻¹. Busca-se provocar a ruptura dos materiais de testes durante a passagem de uma única onda de tração através do comprimento destes, a taxas de deformação constantes. Para que esta condição seja atendida, serão identificados os requisitos técnicos necessários ao desenvolvimento da SHPB, de modo a obter os valores dos coeficientes de Cowper-Symonds (CS) e de Johnson-Cook (JC), os quais podem alimentar softwares de simulação, via análises por elementos finitos. O intuito de se conseguir esses coeficientes é o de aperfeiçoar os projetos mecânicos e os processos de fabricação, principalmente naquilo que diz respeito à remoção de cavacos, vida útil de ferramentas durante os processos de usinagem e forças de corte envolvidas.

3 MOTIVAÇÃO/JUSTIFICATIVA

O presente projeto de pesquisa é motivado pela carência de dispositivos SHB por tração no Brasil que permitam a obtenção de dados do comportamento dinâmico dos materiais submetidos a elevadas taxas de deformação. Essa carência justifica-se pelo desafio tecnológico de dimensionar um equipamento que permita, para uma gama de materiais a serem testados, romper corpos-de-prova, em tração, com a transmissão de apenas uma onda. Em decorrência das taxas de deformação envolvidas, o tempo de teste é extremamente reduzido, sendo necessário o desenvolvimento de uma instrumentação que permita identificar o momento exato dessa ruptura, bem como mensurar os esforços necessários.

Instrumentações típicas apresentadas na literatura utilizam dados de deformação provenientes de extensômetros. Os dados de deformação obtidos a partir destes não garantem, com base nos estudos realizados até o presente momento, relativos única e exclusivamente à pesquisa em questão, confiabilidade de que o material de testes rompe-se durante a passagem de uma única onda de choque através das barras.

O uso de câmeras filmadoras de alta velocidade, que buscam determinar o momento exato dessa ruptura, bem como a deformação sofrida pelo corpo-de-prova, surge como alternativa. Todavia, em decorrência do levantamento bibliográfico sobre o tema dessa pesquisa, apenas seis referências utilizaram-se da integração extensômetro-câmera (Noble et al., 1999; Hopperstad et al., 2003; Verleysen e Degrieck, 2004; Song e Chen, 2005; Borvik et al. 2011; Guzman; Frew; Chen, 2011).

A sincronização entre os sinais obtidos pelos extensômetros e os resultados visuais fornecidos pelos vídeos são cruciais, uma vez que, somente assim é possível garantir o momento exato em que ocorre a ruptura dos corpos-de-prova. A proposta de construção do equipamento SBH, combinada com a utilização da técnica conjunta de aquisição de dados via amplificador de sinais e câmera de alta velocidade são incentivos à execução deste trabalho.

Sabendo-se que o comportamento observado em um corpo-de-prova de determinado material pode ser expandido para o caso geral, ou seja, generalizar o comportamento registrado para todo o material em questão, o presente projeto justifica-se por visar o aperfeiçoamento dos materiais. Todas as aplicações aqui apresentadas, direcionadas aos casos específicos, atendem o objetivo de melhorias

no projeto, sejam essas, medidas adotadas no processamento ou aplicação do produto. Algumas das soluções que eventualmente são sugeridas nos laudos técnicos podem encarecer o projeto, enquanto outras, de implementação mais fácil, ajudam a reduzir o custo do produto final, aumentando assim a eficiência do processo em questão.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Concepção Original

A ideia de romper materiais por meio de ondas compressivas, originárias do impacto entre dois materiais surgiu em 1872 com John Hopkinson, que obteve a ruptura de corpos-de-prova feitos em ferro, por meio da queda de uma massa. Em 1914, Bertram Hopkinson, filho de John Hopkinson desenvolveu o conceito da compressão de corpos-de-prova entre duas barras horizontais, porém, suspensas por um pêndulo. O conceito foi adaptado por Kolsky em 1949, de modo que o equipamento executava ensaios de compressão em corpos-de-prova cilíndricos e consistia em, basicamente: duas barras elásticas (incidente e de transmissão), simétricas e longas, feitas em aço de alta resistência, alinhadas horizontalmente por meio de rolamentos; um projétil, confeccionado no mesmo aço utilizado nas barras, o qual deslocava-se horizontalmente até colidir-se com a extremidade da barra incidente; uma câmara de pressurização de gás; instrumentação das barras por meio do uso de extensômetros (*strain gages* – SG1 e SG2), para aquisição dos dados de deformação do material e um sistema para armazenamento e posterior análise dos sinais (Figura 1) e lubrificante nos rolamentos, de modo a reduzir os efeitos causados pelo atrito dinâmico durante o deslizamento das barras (Chen; Song, 2011).

Este equipamento (Figura 1) ficou conhecido por “barra bipartida de Hopkinson” ou “barra de Kolsky”, pelo fato de ter sido desenvolvida por aquele e adaptada por este e, pela razão de existir a segmentação do ensaio em duas barras circulares.

Figura 1: Esquema da barra bipartida de Hopkinson sob compressão. Fonte: Adaptado de Marais et al., 2004.

Apesar de gerar resultados pouco relevantes e expressivos em termos da descrição do comportamento dinâmico dos materiais, os ensaios em compressão foram escolhidos para a concepção original do dispositivo de Hopkinson devido à maior facilidade em serem desenvolvidos, comparativamente aos ensaios de tração. Comparativamente aos experimentos realizados nas tradicionais máquinas de ensaios de tração, a pequena razão entre os diâmetros das barras de Hopkinson e dos corpos-de-prova garante maior sensibilidade aos resultados, uma vez que a diferença entre as rigidezes desses materiais também se faz pequena (Chen; Song, 2011).

A compressão do gás dentro de uma câmara e a consequente pressurização de um projétil que, no momento do acionamento do movimento é disparado contra a extremidade de uma das barras (incidente), não requerem o uso de qualquer dispositivo de adaptação para gerar um pulso compressivo no momento do impacto entre esses dois componentes. A onda gerada neste instante (incidente) é transmitida através do comprimento da barra incidente até que atinja a extremidade oposta desta, na qual sofrerá os efeitos da reflexão e transmissão de onda. A parcela transmitida percorre a extensão do corpo-de-prova, deformando-o a taxas da ordem de 10^2 a 10^4 s^{-1} (Micheli, 2008), como uma onda compressiva, até atingir a extremidade da segunda barra (barra de transmissão), enquanto o pulso refletido retorna pela barra incidente como uma onda de tração (Galina et al., 2003). O fato de inexistir qualquer interferência ao longo dos trajetos percorridos pelas três ondas citadas (incidente, refletida e transmitida), permite a aquisição de sinais límpidos. A vertente do ensaio adaptada para tração requer o uso de dispositivos de fixação dos

corpos-de-prova, os quais inserem distorções nos sinais devido ao aumento da impedância acústica (Guzman; Frew; Chen, 2011; Huh; Kang; Han, 2002).

A condição de alinhamento entre barras e corpo-de-prova é estritamente necessária, uma vez que, quanto menos interferente for o deslizamento sobre os rolamentos, menores serão os ruídos inseridos aos sinais de deslocamento das barras, visto que o atrito entre componentes é uma variável importante a ser avaliada (Kaiser, 1998; Gray, 2000).

4.2 Determinação do material e dimensional das barras de ensaio

Recentemente, diversos pesquisadores demonstraram que a escolha do material destinado à confecção das barras está intimamente relacionada ao material em estudo. Muito comumente são utilizados materiais de alta resistência, de modo a garantir que os efeitos de deformação causados nas barras, pela passagem das ondas de carregamento, estejam sempre dentro do regime elástico do material, além de permitirem a escolha de diâmetros menores, de modo que os efeitos de inércia são mantidos sempre os menores possíveis (Chen; Song, 2011), conforme será apresentado na seção 4.5. Materiais de menor resistência mecânica que o aço, como alumínio e polímeros, podem ser utilizados, e são recomendados, na confecção das barras quando o material em testes possui baixa resistência (Eskandari; Nemes, 2000).

Segundo Kaiser (1998) e Gray (2000), normalmente opta-se por barras feitas em aço *maraging*, ligas a base de níquel, como, por exemplo, Inconel, ligas à base de titânio, alumínio e magnésio, podendo, inclusive, serem feitas de material polimérico. A opção pelo Inconel geralmente ocorre quando ensaios a alta temperatura são realizados, isto, devido à relativa invariabilidade das propriedades mecânicas desse aço quando submetido à temperaturas acima de 800 °C (Gray, 2000). Chen et al. (2009) e Chen et al. (2011) utilizaram barras de aço para executarem ensaios em alta velocidade em ligas de alumínio, AA6060, AA6082, AA7003 e AA7108, todas tratadas de modo a obterem a condição de maior dureza segundo o tratamento T6. Clausen et al. (2011) realizaram ensaios em alta temperatura para ligas de AA6005-T6, também com barras de aço. Guzman, Frew e Chen (2011) utilizaram-se de barras feitas em aço *maraging* envelhecido para estudos do comportamento mecânico de ligas de alumínio AA6061-T6511 (corpos-de-prova cilíndricos) e aços TRIP 800 (corpos-de-prova em formato de chapa).

Para testes em materiais poliméricos e cerâmicos faz-se interessante a escolha por materiais de menor dureza e resistência mecânica para comporem as barras de ensaio, de modo a amplificarem a resolução dos sinais coletados (Gray, 2000). De acordo com a literatura recente, barras feitas em alumínio têm sido bastante exploradas na execução de ensaios com materiais de baixa resistência mecânica e ou baixa sensibilidade à propagação das ondas de choque. Eskandari e Nemes (2000) estudaram compósitos de grafite-epóxi, os quais, apesar da alta

resistência apresentada (em torno de 600 MPa), possuem baixa sensibilidade e, por esta razão, o equipamento foi adaptado (Figura 2) de modo a propiciar melhores resultados durante a aquisição dos dados de deformação. As barras de ensaio utilizadas foram feitas em alumínio 2011-T3 com limite de escoamento de aproximadamente 330 MPa, enquanto duas barras de aço trefilado (600 MPa) foram colocadas paralelamente (barras laterais) às barras principais do ensaio (incidente e de transmissão), de modo a receberem a onda de choque original, após a colisão do projétil com o conector alocado nas extremidades das barras próximas à câmara de pressurização, e transmiti-la à barra incidente por meio do flange na extremidade oposta. Na interface barras de aço e barra incidente (alumínio), por meio de um segundo conector, a onda de choque é amplificada, devido a diferença entre os módulos de elasticidade dos materiais envolvidos.

Figura 2: Adaptação com barras laterais para aumento de sensibilidade no corpo-de-prova. Fonte: Adaptado de Eskandari; Nemes, 2000.

Smerd et al. (2005) utilizaram barras feitas em liga de alumínio AA6061-T6 para avaliar a variação no alongamento dos corpos-de-prova, feitos em AA5754 e AA5182, e as respectivas microestruturas, após ensaios realizados em três diferentes taxas de deformação (600 , 1100 e 1500 s^{-1}) e temperaturas (23 , 50 , 150 e $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Ulacia et al. (2010) também utilizaram-se de barras feitas do mesmo alumínio supracitado para caracterizarem mecanicamente ligas de magnésio, AZ31B. Trexler et al. (2011) simularam o impacto recebido pelo crânio humano durante um acidente. Para realizarem esta simulação foram necessários obterem o

coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade do silicone biológico desenvolvido para este propósito. Os ensaios que forneceram os valores dessas constantes foram realizados em uma adaptação da barra de Hopkinson, na qual consistiam barras de alumínio, da liga AA7075-T651 de modo a garantirem maior sensibilidade aos corpos-de-prova.

O dimensionamento das barras também está intimamente correlacionado à sensibilidade destas à passagem das ondas de choque. A instrumentação das barras faz com que estas se tornem células de carga e, portanto, quanto menor for o diâmetro destas, menores serão a inércia e a impedância acústica e, conseqüentemente, maior a sensibilidade aos esforços decorrentes do impacto entre projétil e barra incidente, via colisão direta ou indireta. Segundo Gama, Lopatnikov e Gillespie Jr (2004) o diâmetro das barras, atualmente, têm variado entre 12,7 e 38,1 mm (0,5" a 1,5"), enquanto o comprimento, de 1,22 m a 13,41 m. Chen e Song (2011) alegam que a variação nos diâmetros das barras ocorre entre 10 e 25 mm.

Ao longo deste trabalho serão apresentadas algumas variações na escolha dos comprimentos e diâmetros das barras, as quais ocorrem, basicamente, em função das condições do material ensaiado e da configuração do experimento. A Tabela 1 traz a relação de materiais utilizados na confecção das barras, em função do tipo de material testado, de acordo com os trabalhos citados na literatura pesquisa.

Tabela 1 – Relação de materiais testados e os empregados na confecção das barras de ensaio.

Material testado	Material das barras	Número de ocorrências
Aço	Aço	10
Aço	Alumínio	7
Aço	Polímero	1
Aço	Cobre	1
Alumínio	Alumínio	2
Alumínio	Ligas de Mg	1
Alumínio	Compósito	3

Fonte: Autoria própria.

4.3 Aplicações e vertentes da técnica de Hopkinson / Kolsky

4.3.1 Ensaios em compressão

A técnica originalmente desenvolvida para a execução de ensaios de compressão abrange uma gama bastante vasta de possíveis variações, dentro do mesmo conceito de carregamento e fora deste. Nesta seção serão apresentadas algumas possibilidades que o ensaio em compressão permite estudar.

Gama, Lopatnikov e Gillespie (2004) fizeram estudos aprofundados quanto à aplicação dos ensaios em compressão para materiais moles e duros, além de terem analisado a fundo a interferência gerada pela impedância acústica associada a cada forma geométrica atribuída aos corpos-de-prova confeccionados em material cerâmico. Para os materiais moles, os quais são caracterizados por possuírem baixa impedância acústica, concluíram que, quando utilizadas barras, incidente e de transmissão, feitas em aço com alto ganho (elevada resistência mecânica), os sinais obtidos na saída, ou seja, pelos extensômetros localizados na barra de transmissão, são “pobres” e “fracos”, o que dificulta a análise posterior. Para ensaiar esses materiais, Gama, Lopatnikov e Gillespie (2004) recomendam o uso das barras de Hopkinson feitas em materiais também de baixa impedância acústica, como são os casos do titânio, do alumínio e do magnésio, por exemplo.

Chen e Song (2011) avaliaram os ensaios em compressão realizados para materiais frágeis e dúcteis; sob condições de carregamento tri-axial, sob altas e baixas temperaturas e sob taxas de carregamento intermediárias, da ordem de 5×10^1 e $5 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$. Segundo estes pesquisadores, para os corpos-de-prova feitos em vidro, gelo, concreto, rochas, entre outros materiais frágeis, a deformação sob compressão chega a 1%, ou menos, variando de maneira praticamente linear. Para o caso dos ensaios de materiais dúcteis, Chen e Song (2011) citam a dificuldade em obter resultados confiáveis com erros reduzidos, uma vez que a deformação do material (da ordem de 20 a 30%) ocorre durante um período de tempo muitíssimo curto, de alguns microssegundos apenas, o que não garante equilíbrio entre as forças atuando nas extremidades do corpo-de-prova, e, conseqüentemente, promove um estado de deformação não uniforme para o material.

Para realizarem os carregamentos a taxas intermediárias de deformação, Chen e Song (2011) adaptaram o dispositivo de Hopkinson de maneira a obterem

um acionamento feito via pressurização de óleo hidráulico, cujo intuito era simular condições de colisão em automóveis. A Figura 3 demonstra um esquema da variação lenta do dispositivo barra de Hopkinson, acionado hidraulicamente.

Figura 3: Esquema de acionamento da versão lenta da barra de Hopkinson. Fonte: Adaptado de Chen; Song, 2011.

Abramov et al. (2006) estudaram as ligas de alumínio aeronáutico, AMg-6 e D-16 (AA2024), enquanto Micheli (2008) estudou duas ligas aeronáuticas no formato de chapas circulares de 1,6 e 3,2 mm de espessura. O intuito de Micheli (2008) era avaliar o impacto causado pela penetração de uma esfera de aço nas placas de alumínio e, posteriormente, confrontar os resultados reais com os simulados em ABAQUS. Os ensaios em barra de Hopkinson foram primordiais para a obtenção dos coeficientes de JC, os quais foram utilizados para alimentar o software de simulação numérica. Os pesquisadores Abramov et al. (2006), por sua vez, utilizaram-se das barras de Hopkinson para obterem os coeficientes de CS e JC, no intuito de alimentarem o software de simulação LS DYNA e comparar os resultados de ambos os modelos de análise com o comportamento real. Para obterem os resultados desejados, Abramov et al. (2006) acrescentaram, entre as barras incidente e de transmissão, um inserto, o qual, no momento do acionamento do ensaio, colidia-se com o corpo-de-prova, causando-lhe uma indentação (Figura 4). Foram utilizados dois tipos de inserto, para identações cônica e semiesférica.

Figura 4: Representação da interface entre as barras incidente (1), inserto cônico (2), corpo-de-prova (3) e barra de transmissão. Fonte: Adaptado de Abramov et al., 2006.

Habibzadeh et al. (2010) avaliaram a usinabilidade da liga de titânio Ti6Al14V, muito utilizada na indústria aeroespacial devido à alta resistência mecânica, excelente resistência à corrosão e pela baixa densidade. Esses pesquisadores determinaram os coeficientes de JC a diferentes taxas de deformação, de 3×10^{-4} a $7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, com incrementos de $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Os valores obtidos para os coeficientes de JC foram utilizados para simular o comportamento do material estudado durante a operação de torneamento e, a posteriori, comparados com o comportamento real da liga durante a usinagem. A diferença registrada variou entre 2,75% e 5,77%, também pelo fato de haver vibrações inerentes ao processo de fabricação, os quais não foram considerados na simulação. Constatou-se a necessidade de enriquecer os resultados realizando-se experimentos a diferentes temperaturas, visto que os parâmetros: deformação, taxa de deformação e temperatura não são completamente independentes. Apesar dos erros, concluiu-se que estes estão dentro de uma tolerância aceitável.

Song e Chen (2005) investigaram o comportamento dos materiais poliméricos: RTV630 e EPDM submetidos a diferentes taxas de carregamento. Os corpos-de-prova foram confeccionados nos formatos: cilíndrico, para a borracha RTV630 e de chapa para o EPDM. Para este material os pesquisadores trabalharam com a variação da espessura dos monômeros, de 1,60 a 6,40 mm, com incrementos constantes de 1,60 mm. Por fim, Zhou, Xia e Huang (2011) estudaram o modo de falha de corpos-de-prova feitos em concreto, submetidos à taxa de deformação de 4 s^{-1} , sob carregamento compressivo gerado pela barra de Hopkinson. Os estudos foram realizados via modelos de elementos finitos desenvolvidos pelo software AUTODYN.

4.3.2 Ensaios em tração

A modalidade do ensaio para testes em tração requer algumas modificações conceituais no projeto do equipamento, originalmente desenvolvido por Hopkinson. A primeira necessidade e, conseqüentemente, a primeira dificuldade encontrada neste tipo de adaptação é quanto à fixação dos corpos-de-prova entre as duas barras (Huh; Kang; Han, 2002), além da própria geometria dos materiais utilizados nos testes, visto que não há norma específica que determine a geometria ideal para realização destes. A fim de aproximarem os experimentos das simplificações

consideradas no modelamento matemático, o qual será apresentado no capítulo 5, os pesquisadores analisaram diversas possibilidades geométricas para os corpos-de-prova, até mesmo para os componentes intrínsecos à concepção do ensaio (barras incidente e de transmissão).

Basicamente, em relação à modalidade original do experimento, a vertente em tração requer a mudança no carregamento, o qual deixa de ser compressivo e passa a ser de tração; alteração no formato do corpo-de-prova e a utilização de meios de fixação (garras adaptativas) deste no dispositivo de ensaios.

A modificação do pulso gerado na colisão foi apresentada por diversos pesquisadores em variadas formas: desde a simples inversão da posição da câmara de pressurização de gás e mudança no sentido do impacto (Huh; Kang; Hang, 2002; Guzman; Frew; Chen, 2011), até a inclusão de novas barras ao dispositivo (Eskandari; Nemes, 2000), a alteração geométrica do corpo-de-prova (Mohr; Gary, 2007) e a elaboração de garras adaptativas, simples (Huh; Kang; Hang, 2002; Salisbury; Worswick; Mayer, 2007) e complexas (Eskandari; Nemes, 2000; Acosta; Raju, 2007; Guzman; Frew; Chen, 2011; Ulacia et al., 2011)

Dentre as formas de apresentação da SHPB para ensaios em tração, a expulsão de um projétil, previamente “carregado” no interior da câmara de pressurização, contra um anteparo localizado em uma das extremidades da barra incidente, de modo a tracioná-la no momento da colisão (Figura 5), é o mais relatado na literatura recente. O presente trabalho foi desenvolvido em uma SHPB semelhante à apresentada na Figura 5, a fim de serem executados ensaios de tração em elevadas taxas de deformação, dos quais obtêm-se os valores dos coeficientes de JC e CS.

Assim como para as condições de carregamento em compressão, vários pesquisadores têm estudado o comportamento mecânico de diversos materiais quando solicitados sob esforços de tração, nos mais variados formatos geométricos. Outrossim, análises numéricas via simulações por elementos finitos e métodos para modelar os pulsos de carregamento têm sido objeto de estudos, a fim de facilitarem a interpretação do comportamento dos corpos-de-prova e dos sinais registrados pelos SG1 e SG2, enquanto o material de testes é tracionado, respectivamente.

Gerlach et al. (2011) desenvolveram uma versão da SHPB para melhor modelarem a onda de choque gerada no momento do impacto entre projétil e anteparo. A modificação, com relação à concepção original do dispositivo, consiste

basicamente da inserção e posicionamento de uma terceira barra (barra de carregamento) entre o anteparo e a barra incidente, além do uso de um segundo corpo-de-prova – chamado de “corpo-de-prova de sacrifício” - feito em material bastante dúctil como, por exemplo, cobre ou polímeros (Figura 6). Devido ao aumento considerável no tempo de *setup* dos experimentos e pelo encarecimento do mesmo, desenvolveu-se um “corpo gerador” de ondas, cuja seção transversal varia de acordo com o detalhe B-2 apresentado na Figura 6, no intuito de aumentar o tempo de duração da onda incidente. Três geometrias foram testadas.

Na Figura 6 é possível observar a existência de um “anel gerador de pulso” na região do impacto, localizada entre o anteparo e o projétil. Este anel foi utilizado na intenção de melhor definir o tipo de onda gerado na colisão (triangular, quadrada, trapezoidal ou disforme).

Figura 5: Configuração da barra de Hopkinson adaptada para ensaios em tração. Fonte: Adaptado de Huh; Kang; Han, 2002.

Figura 6: Esquema do equipamento desenvolvido para melhor definir a forma dos pulsos de tração gerados durante o impacto entre anteparo e projétil. Fonte: Adaptado de Gerlach et al., 2011.

Sasso, Newaz e Amodio (2008) estudaram o comportamento do aço AISI 1018 CR, por meio do uso de corpos-de-prova de diversos comprimentos na região útil (2, 4 e 8 mm) e diâmetro de 4 mm, a fim de proporcionarem diferentes taxas de deformação ao material de testes: condição quase-estática de carregamento; 500 s^{-1} ; 1000 s^{-1} e 1500 s^{-1} . Os corpos-de-prova testados possuíam geometria muito semelhante à utilizada nos ensaios com a primeira configuração do equipamento desenvolvido neste trabalho e que serão apresentados nas seções 6.1.1 e 7.1.1 do presente documento (Figura 7). Sasso, Newaz e Amodio (2008) obtiveram, por meio dos experimentos, os valores dos coeficientes de JC, ZA, KC, entre outros, de modo a utilizá-los para alimentarem o módulo de elementos finitos do software comercial ANSYS e compararem os resultados das simulações com os reais, obtidos experimentalmente.

A Figura 7 demonstra a ocorrência de casos em que não ocorreu a falha do material e, de um segundo, no qual o corpo-de-prova rompeu-se. Resultados também observados nos testes preliminares do presente trabalho. As curvas de tensão verdadeira *versus* deformação verdadeira para os corpos-de-prova identificados por D4L2, obtidas por meio de experimentos realizados na SHPB, pelas simulações e pelos testes quase-estáticos, estão apresentadas na Figura 8. Nota-se, por meio da observação desta, a proximidade entre os resultados obtidos experimentalmente – ensaios realizados na SHPB – e os fornecidos pelos métodos de JC, LIT, KC, PERZY e ZA, além do aumento da resistência do material, comparativamente ao teste realizado a velocidade quase-estática.

Figura 7: Aspecto físico de dois corpos-de-prova após o carregamento de tração. Fonte: Adaptado de Sasso; Newaz; Amodio, 2008.

Figura 8: Curvas de tensão verdadeira *versus* deformação verdadeira. Fonte: Adaptado de Sasso; Newaz; Amodio, 2008.

Mohr e Gary (2007) também lançaram mão do recurso matemático oferecido pelo método dos elementos finitos, porém, optaram pelo software ABAQUS. A concepção dos experimentos, apesar de desenvolvida para a realização de ensaios em tração, é exatamente a mesma, no que diz respeito ao equipamento, para ensaios em compressão, ou seja, a SHPB utilizada segue o conceito original desenvolvido por Hopkinson. A alteração realizada, de modo que os experimentos pudessem oferecer resultados em tração, deu-se a nível da geometria do corpo-de-prova empregado, o qual possuía um formato prismático, oriundo de operações de fresamento, semelhante ao da letra “M”, como indicado pela Figura 9. Devido ao formato adotado para os corpos-de-prova, há diferentes seções sob diferentes tipos

de carregamento: A-B sob compressão; B-C sob flexão; C-D sob tração; D-E sob flexão e E-F sob compressão.

Enquanto o corpo-de-prova é comprimido entre as barras incidente e de transmissão, as regiões C-D e a espelhada desta (simetria geométrica garantida pela linha E-F) são tracionadas. Este método, juntamente dos resultados por ele fornecidos, foi validado por meio das simulações numéricas do comportamento do corpo-de-prova em formato “M” para taxas de deformação acima de 4250 s^{-1} . A utilização desta técnica para ensaios em tração elimina a necessidade de adaptadores para fixação dos corpo-de-prova entre as barras de ensaio, além de proporcionar o uso da SHPB convencional.

Figura 9: Geometria do corpo-de-prova em chapa plana no formato “M” com indicação do sentido de aplicação das forças de carregamento (setas verticais) e das seções sob diferentes esforços. Fonte: Adaptado de Mohr e Gary, 2007.

Diversos pesquisadores necessitaram desenvolver dispositivos adaptadores, para a fixação dos materiais a serem tracionados, entre as barras do equipamento SHPB. Guzman, Frew e Chen (2011) estudaram dois materiais diferentes e, para cada um deles, desenvolveram um formato geométrico específico para os corpos-de-prova avaliados: chapas de aço TRIP-800 e barras roscadas em alumínio Al 6061-T6511 (Figura 10). Para a fixação das chapas entre as barras incidente e de transmissão, os pesquisadores desenvolveram um adaptador feito em aço ferramenta A2, com 48 HRC. A Figura 11 mostra um desenho isométrico do dispositivo, assim como uma foto da montagem deste no equipamento. As roscas

nas extremidades das barras são as mesmas utilizadas nas pontas dos corpos-de-prova cilíndricos.

Figura 10: Vistas isométricas dos corpos-de-prova feitos em: **(a)** aço TRIP-800 e **(b)** Al 6061-T6511. Fonte: Adaptado de Guzman; Frew; Chen, 2011.

Figura 11: Dispositivo adaptador para fixação dos corpo-de-prova em formato de chapa à SHPB: **(a)** vista isométrica; **(b)** foto tirada do equipamento. Fonte: Adaptado de Guzman; Frew; Chen, 2011.

Besnard et al. (2012) estudaram o comportamento do alumínio durante solicitações dinâmicas para diversos comprimentos de seção útil dos corpos-de-prova, os quais foram confeccionados nos formatos cilíndrico e paralelepípedo. Diferentemente dos pesquisadores Guzman, Frew e Chen (2011), Besnard et al. (2012) desenvolveram no próprio material de testes a forma adaptativa de fixação deste nas barras de ensaio, as quais, por sua vez, possuíam uma das extremidades roscadas, a fim de receberem os materiais de teste (Figura 12-b). Para a execução desse estudo, Besnard et al. (2012) utilizaram duas câmeras (Figura 12-a) da marca Photron APX, ambas de alta velocidade, e variaram a taxa de aquisição em fps conforme o comprimento dos corpos-de-prova. Além do recurso das câmeras, esses

pesquisadores lançaram mão do uso de simulação numérica para confrontar resultados empíricos com teóricos.

Figura 12: Setup de experimento realizado com o apoio de **(a)** duas câmeras de alta velocidade para avaliação do comportamento dinâmico dos corpos-de-prova de alumínio, posicionados na região circulada em vermelho, **(b)** nos formatos cilíndrico e de paralelepípedo. Fonte: Adaptado de Besnard et al., 2012.

Salisbury, Worswick e Mayer (2007) avaliaram o comportamento de tubos de alumínio AA5754, calandrados, com paredes de 3 mm, durante carregamentos de tração a diferentes taxas de deformação (quase-estática, 500 s^{-1} ; 1000 s^{-1} e 1500 s^{-1}) e temperaturas (21°C , 150°C e 300°C). Apesar de não terem precisado desenvolver nenhum tipo de dispositivo extra para fixação dos corpos-de-prova, uma adaptação na ponta das barras incidente e de transmissão foi realizada. A fim de manter a curvatura original do material proveniente do tubo e de não inserir tensões residuais a este, as extremidades dessas barras foram cortadas a eletro erosão, de modo a permitirem a fixação precisa das chapas (Figura 13). Outrossim, de modo a garantirem maior sensibilidade das barras ao pulso de tração, estas foram feitas em alumínio. Os resultados obtidos nos ensaios foram utilizados para obtenção dos coeficientes de JC e de ZA.

Figura 13: (a) Extremidade de uma das barras do equipamento SHPB, adaptada para receber **(b)** chapas curvadas, oriundas do corte de tubos de alumínio AA5754. Fonte: Adaptado de Salisbury; Worswick; Mayer, 2007.

4.3.3 Ensaios diversos

Além das variações apresentadas nas seções 4.3.1 e 4.3.2, ao menos três outras modalidades de ensaios têm sido exploradas para aplicações na SHPB: torção, flexão e cisalhamento. Outrossim, técnicas específicas para determinação de parâmetros inerentes aos materiais têm sido empregadas em algumas variações da SHPB.

Há trabalhos divulgados na literatura de experimentos que buscavam uma melhor caracterização dos materiais quando ensaiados na SHPB. Clausen et al. (2004) desenvolveram um trabalho bastante completo, naquilo que diz respeito à caracterização da liga de alumínio AA5083-H116 quando solicitada dinamicamente. A fim de obterem todos os coeficientes do modelo proposto por JC, esses pesquisadores realizaram testes com três geometrias diferentes de corpos-de-prova, de acordo com a Figura 14. A execução dos experimentos envolveu testes de anisotropia e fluência do material, para os quais, os diferentes corpos-de-prova foram empregados de acordo com capacidade de cada geometria em fornecer um coeficiente específico para determinada característica de ensaio.

Dentre os três formatos geométricos escolhidos para os corpos-de-prova utilizados por Clausen et al. (2004), apenas o determinado pela Figura 14 (c) foi empregado em testes realizados na SHPB. Estes experimentos visavam obter os dados de anisotropia do material a taxas de deformação de 122 e 1313 s⁻¹, em temperatura ambiente. As demais geometrias foram utilizadas na determinação de parâmetros obtidos a baixas taxas de deformação (menores que 10 s⁻¹), em testes realizados em uma máquina servo-hidráulica do fabricante INSTRON.

Figura 14: Geometrias utilizadas para obtenção dos coeficientes JC nos formatos: **(a)** liso; **(b)** raiado; **(c)** liso reduzido. Fonte: Adaptado de Clausen et al., 2004.

Delvare, Hanus e Bailly (2010) modificaram a SHPB de modo a realizarem experimentos em flexão, de acordo com o indicado pela Figura 15. O conceito de acionamento do experimento e, conseqüente carregamento do corpo-de-prova, mantêm-se idêntico ao empregado na versão original do equipamento, desde 1914: o lançamento de um projétil contra a extremidade da barra incidente, por meio da compressão de um gás no interior de uma câmara de pressurização. Ao ser acionada, a barra incidente colide contra a região central do corpo-de-prova (formato de chapa), o qual está apoiado em duas outras barras, as chamadas barras de transmissão. A forma construtiva do experimento remete aos ensaios de flexão três pontos, regidos pela norma ASTM E855 (2008), nos quais o material de testes permanecia bi apoiado nas extremidades (Figura 16), enquanto recebe a carga máxima no centro.

Figura 15: Esquema da SHPB desenvolvida para ensaios em flexão. Fonte: Adaptado de Delvare; Hanus; Bailly, 2010.

Figura 16: Modelagem do corpo-de-prova como uma viga sob flexão: deflexão definida por U_0 e inclinação da seção transversal dada pelo ângulo ψ . Fonte: Adaptado de Delvare; Hanus; Bailly, 2010.

Ramezani, Ripin e Ahmad (2010) estudaram o efeito dos esforços de cisalhamento a altas taxas de deformação (de 10^2 a 10^4 s^{-1}) em chapas de cobre OFHC com 50 mm de diâmetro e 1 mm de espessura. Para executarem estes ensaios, os pesquisadores desenvolveram um dispositivo para fixação e carregamento das chapas de cobre, perpendicularmente às barras incidente e de transmissão, conforme representado pela Figura 17. O dispositivo é basicamente composto por uma câmara bipartida, feita em aço, e por uma ponta de poliuretano, solidária à barra incidente, a qual atua como ferramenta, sendo responsável por solicitar mecanicamente a chapa de cobre. Na região próxima à fixação do corpo-de-prova, a metade do dispositivo responsável pelo acionamento da barra de transmissão possui os cantos raiados, de modo a eliminar as arestas e propiciarem a conformação da chapa de cobre sem comprometer o experimento.

Figura 17: Esquema do sistema de fixação de chapas de cobre às barras de ensaio no momento do setup. Fonte: Adaptado de Ramezani; Ripin; Ahmad, 2010.

Trexler et al. (2011) e Sen, Tekalur e Jilek (2011) também realizaram ensaios de cisalhamento, porém, enquanto estes avaliaram a aderência de um adesivo do tipo epóxi à liga de alumínio 7075, testada em camadas de espessura de 0,5 mm, aqueles estudaram as propriedades de um tecido biológico – desenvolvido pela compactação de material biológico retirado do cérebro de animais – quando submetido a esforços dessa natureza. Em ambas as técnicas empregadas nestes dois últimos estudos, utilizou-se a configuração da SHPB para carregamentos compressivos, havendo apenas modificações no sistema de fixação dos corpos-de-prova às barras incidente e de transmissão. As Figuras 18 e 19 trazem os esquemas dos adaptadores utilizados pelos pesquisadores Sen, Tekalur e Jilek (2011) e Trexler et al. (2011), respectivamente.

Tanto no teste de aderência do adesivo, quanto nos estudos com o gel de silicone biológico, os pesquisadores responsáveis por cada estudo notaram o aumento da resistência do material de interesse, conforme aumentava-se a taxa de carregamento.

Figura 18: Adaptadores para testes de adesão de adesivos a base de epóxi: **(a)** fotos dos modelos utilizados; **(b)** croqui com dimensões de montagem do dispositivo. Fonte: Adaptado de Sen; Tekalur; Jilek, 2011.

Figura 19: Etapas de preparação do corpo-de-prova: **(a)** hemisfério cerebral em solução; **(b)** fatias do cérebro, de 1 a 2 mm de espessura; **(c)** tecido biológico compactado em corpos-de-prova de 9 mm x 18 mm x 1-2 mm; **(d)** fixação dos corpos-de-prova entre chapas de alumínio por meio de cianocrilato. Fonte: Adaptado de Trexler et al. 2011.

Assim como para os casos de ensaios em tração, utilizando a SHPB, a primeira dificuldade dos experimentos envolvendo carregamentos em torção está em desenvolver um sistema adequado de fixação dos corpos-de-prova, de modo a garantir a transmissão precisa do esforço mecânico, acrescentando o mínimo possível de efeitos inerciais e, em impedir ou minimizar as reverberações de onda que afetam o comportamento do corpo-de-prova enquanto solicitado mecanicamente (Gilat, 2000 e Gama; Lopatnikov; Gillespie Jr., 2004).

Gilat (2000) cita o histórico de três sistemas de acionamento distintos para a obtenção de cargas torcionais no corpo-de-prova. Há neste trabalho relatos quanto ao desenvolvimento de aparatos puramente mecânicos, os quais fazem uso de energia hidráulica para promover o movimento rotativo da barra incidente, assim como há referências a um trabalho que faz uso de explosivos para garantir a torção do sistema.

4.4 Modelo Matemático

A fim de descrever adequadamente o comportamento de um sistema, a construção de modelos é necessária. A adequação destes ao sistema real ocorre de acordo com a aplicação criteriosa de leis físicas, de modo a fornecerem um conjunto de equações capazes de reproduzirem a dinâmica do sistema, levando-se em consideração algumas simplificações, as quais são julgadas pertinentes segundo o conhecimento em Engenharia (Felício, 2007).

Antes de enveredar para as equações propriamente ditas, é importante destacar as simplificações que estão envolvidas no modelo que será descrito.

4.4.1 Simplificações do modelo

As simplificações que auxiliam a modelagem do sistema definido pela SHPB, em todas as variações aqui apresentadas, no que diz respeito aos elementos, barras incidente e de transmissão, projétil e corpo-de-prova, segundo Gama, Lopatnikov e Gillespie Jr. (2004), são:

- Os materiais que os compõe são homogêneos e isotrópicos;
- A seção transversal das barras e do corpo-de-prova é uniforme ao longo do comprimento de cada elemento;
- Durante o carregamento das barras, estas se comportam dentro do regime elástico;
- Há equilíbrio dinâmico entre barras e corpo-de-prova durante o carregamento.
- Não há carregamentos atuando no sistema além daquele de interesse;
- A propagação da onda através destes ocorre de maneira uniforme e unidirecionalmente.

A fim de garantir a condição mais próxima de propagação uniaxial e uniforme da onda de choque ao longo do comprimento das barras de ensaio, o alinhamento preciso entre estas é imprescindível. Consequentemente, garante-se que o corpo-de-prova se deforma uniaxialmente.

4.4.2 Propagações de ondas através das barras

Durante o impacto entre o projétil e a barra incidente, um pulso compressivo é formado, o qual viaja através dessa até que atinja a interface com o corpo-de-prova. Neste ponto a onda original, chamada de incidente, por analogia com a barra pela qual se propaga, sofre os efeitos da reflexão e da refração, dividindo-se em duas outras: a onda refletida e a onda transmitida (Figura 20). A propagação de cada uma dessas três ondas através das barras incidente e de transmissão promovem deslocamentos em ambas as barras, por meio dos quais o equacionamento do modelo da SHPB é elaborado. As deformações, causadas devido aos três deslocamentos, são registradas pelos extensômetros SG1 e SG2 e coletadas e armazenadas por um módulo de aquisição de sinais e um computador dedicado ao ensaio, respectivamente.

A onda incidente, na situação de carregamento indicada pela Figura 20, possui características compressivas que, ao atingir a interface da barra incidente com o corpo-de-prova e dividir-se nas ondas refletida e de transmissão, apresenta comportamentos trativo e compressivo, respectivamente.

Figura 20: Princípio básico de funcionamento da SHPB clássica, onde ϵ_i , ϵ_r e ϵ_t representam, respectivamente, as deformações causadas pelos pulsos de onda incidente, refletido e transmitido.
Fonte: Adaptado de Micheli, 2008.

4.4.3 Determinação das tensões no corpo-de-prova

O modelamento matemático toma como base a versão do equipamento desenvolvida por Hopkinson, ou seja, para ensaios sob compressão, contudo, pode ser estendido e aplicado, sem perdas de validade, ao uso da SHPB em tração. A tensão média no corpo-de-prova pode ser expressada em termos das forças que atuam nas faces em contato, deste com as barras incidente e de transmissão. A

Figura 21 traz uma representação esquemática de um corpo-de-prova cilíndrico, em cujas faces estão indicadas as forças referentes aos contatos com as barras incidente e de transmissão, $F_1(t)$ e $F_2(t)$, respectivamente.

Figura 21: Esquema de um corpo-de-prova cilíndrico. Fonte: Adaptado de Kaiser, 1998.

A força média no corpo-de prova pode ser definida por

$$F_{méd}(t) = \frac{F_1(t) + F_2(t)}{2} \quad (1)$$

e, conseqüentemente, a tensão média no mesmo é dada por

$$\sigma_{méd}(t) = \frac{F_{méd}(t)}{\pi D_s^2 / 4} \quad (2)$$

onde D_s é o diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova.

Devido ao equilíbrio dinâmico entre o corpo-de-prova e as barras de ensaio, as forças $F_1(t)$ e $F_2(t)$ que atuam nas faces do corpo-de-prova são as mesmas atuantes nas extremidades das barras incidente e de transmissão, respectivamente, e podem ser expressadas em termos dos diâmetros das próprias barras.

$$F_1(t) = E[\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t)] \frac{\pi D_b^2}{4} \quad (3)$$

$$F_2(t) = E\epsilon_t(t) \frac{\pi D_b^2}{4} \quad (4)$$

Assumindo as equações (3) e (4) para a determinação da força média atuante nas barras, por meio da equação (1), e conseqüentemente, da tensão média, esta pode ser explicitada em função das deformações registradas pelos SG1 e SG2.

$$F_{méd}(t) = \frac{E\pi D_b^2[\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) + \epsilon_t(t)]}{8} \quad (5)$$

$$\sigma_{méd}(t) = \frac{F_{méd}(t)}{\pi D_s^2/4} = \frac{ED_b^2[\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) + \epsilon_t(t)]}{2D_s^2} \quad (6)$$

Assumindo a uniformidade do deslocamento sofrido pelo corpo-de-prova, pode-se considerar que as deformações sofridas por cada uma das faces externas são idênticas e, portanto,

$$\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) = \epsilon_t(t) \quad (7)$$

A partir da equação (7) pode-se expressar a tensão média no corpo-de-prova em função de $\epsilon_t(t)$ apenas:

$$\sigma_{méd}(t) = E \left(\frac{D_b}{D_s} \right)^2 \epsilon_t(t) \quad (8)$$

onde D_b é o diâmetro da seção transversal das barras.

4.4.4 Determinação da equação do movimento

A fim de determinar as deformações às quais os corpos-de-prova estão sujeitos, faz-se necessário estudar e entender o comportamento das barras de ensaio durante os carregamentos. Supõe-se um elemento infinitesimal de uma das barras, de acordo com a Figura 22.

Figura 22: Elemento infinitesimal na condição inicial, porém sob carregamento compressivo. Fonte: Adaptado de Kaiser, 2004.

Sabendo-se que,

$$\frac{\delta u_1}{\delta x} = \varepsilon_i - \varepsilon_r \quad (9)$$

$$\frac{\delta u_2}{\delta x} = \varepsilon_t \quad (10)$$

onde $\frac{\delta u}{\delta x}$ é a variação do comprimento do elemento infinitesimal em função do comprimento original dx , enquanto os índices 1 e 2 representam as faces de referência, de acordo com a aplicação das forças F_1 e F_2 e, avaliando a equação determinante da força resultante no corpo-de-prova, de acordo com a segunda lei de Newton,

$$A_s E \frac{\delta u_1}{\delta x} - A_s E \frac{\delta u_2}{\delta x} = A_s dx \rho \frac{\delta^2 u_1}{\delta t^2} \quad (11)$$

Considerando que a velocidade da onda no meio de propagação (c) é dada pela raiz quadrada da razão entre o módulo de elasticidade do material (E) e a densidade (ρ) do mesmo - de acordo com a equação (13) -, pode-se descrever a equação de movimento das barras da seguinte forma:

$$c^2 \left[\frac{\delta u_1}{\delta x} - \frac{\delta u_2}{\delta x} \right] = \frac{\delta^2 u_1}{\delta t^2} dx \quad (12)$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (13)$$

Partindo da consideração que os deslocamentos nas duas extremidades do corpo-de-prova devem ser equivalentes e, considerando uma deformação induzida na face em contato com a barra incidente,

$$u_2 = u_1 + \frac{\delta u_1}{\delta x} dx \quad (14)$$

Aplicando uma derivada em função do comprimento x percorrido,

$$\frac{\delta u_2}{\delta x} = \frac{\delta u_1}{\delta x} + \frac{\delta^2 u_1}{\delta x^2} dx \quad (15)$$

Substituindo a equação (15) na equação (12), define-se a equação do movimento descrito pelo corpo-de-prova durante o carregamento na SHPB.

$$c^2 \frac{\delta^2 u_1}{\delta x^2} = \frac{\delta^2 u_1}{\delta t^2} \quad (16)$$

4.4.5 Determinação das deformações e taxas de deformação no corpo-de-prova

Define-se a velocidade das partículas em função da velocidade de propagação da onda no meio e das deformações sofridas pelas barras:

$$v(x, t) = c\varepsilon(x, t) \quad (17)$$

A taxa média de deformação do corpo-de-prova pode ser determinada pela expressão apresentada pela equação (18).

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{v_1 - v_2}{L} \quad (18)$$

A partir da equação (17) pode-se determinar as velocidades das interfaces definidas pelo contato entre o corpo-de-prova e as barras incidente e de transmissão, v_1 e v_2 , respectivamente:

$$v_1 = c\varepsilon_i - c\varepsilon_r = c(\varepsilon_i - \varepsilon_r) \quad (19)$$

$$v_2 = c\varepsilon_t \quad (20)$$

Substituindo as equações (19) e (20) na igualdade dada pela equação (18), obtêm-se a taxa média de deformação do corpo-de-prova em função das deformações sofridas pelas barras de ensaio.

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = \frac{c(\varepsilon_t - \varepsilon_i + \varepsilon_r)}{L} \quad (21)$$

Assumindo a condição de deformação uniforme e adotando a igualdade estabelecida pela equação (7),

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = \frac{c(\varepsilon_i + \varepsilon_r - \varepsilon_i + \varepsilon_r)}{L} \quad (22)$$

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = \frac{2c\varepsilon_r}{L} \quad (23)$$

Integrando a equação (23) é possível obter a deformação registrada pelo corpo-de-prova.

$$\varepsilon_s = \frac{2c}{L} \int \varepsilon_r(t) dt \quad (24)$$

A análise de dados no conceito do ensaio em tração dá-se, essencialmente, de forma idêntica àquela utilizada em compressão, salvo considerações extras devido ao maior grau de complexidade, intrínseco ao tipo de ensaio, inclusive quando adaptado à flexão e ao cisalhamento dos corpos de prova. O ganho em complexidade para os experimentos em tração, segundo Gray (2000) e Gilat (2000) deve-se á:

- i. Modificação das barras para receber possíveis dispositivos de fixação dos corpos de prova;
- ii. Possíveis e prováveis cálculos adicionais para determinação das tensões verdadeiras;
- iii. Aumento da necessidade de reduzir efeitos inerciais;
- iv. Sistemas mais complexos de acionamento e consequente carregamento dos corpos de prova;
- v. Necessidade de reduzir ruídos e efeitos de sobreposição de ondas no sinal de interesse.
- vi. Auxílio de equipamentos alternativos para aquisição dos dados de tensão e ou deformação;
- vii. Necessidade de calibração;
- viii. Alinhamento rigoroso das barras entre si.

4.5 Geometria do corpo-de-prova e efeito de impedância acústica

Diversos pesquisadores têm buscado ao longo dos anos a definição da geometria mais apropriada para os corpos-de-prova da SHPB, a fim de reduzirem os efeitos inerciais e a impedância acústica associada. Há na literatura algumas propostas para determinação da forma geométrica dos materiais de testes, entretanto, a maioria delas para a modalidade de ensaios em compressão, cujo acervo literário é maior. Kaiser (1998), Gray (2000), Gama e Gillespie (2004) citam algumas das técnicas sugeridas, além de apontarem algumas aplicações e melhores resultados apurados.

Há consenso entre os pesquisadores ao considerarem que ambas as barras, incidente e de transmissão, devem ser confeccionadas a partir do mesmo material, enquanto para a razão entre comprimento e diâmetro do corpo-de-prova (em casos de formato cilíndrico), há os que afirmam (Gama; Gillespie, 2004) que $0,5 < L/D_s < 1,0$ seja a configuração ideal para se conseguir os melhores resultados e, aqueles (Xu et al, 2010) que promovem razões $L/D_s > 2,0$ para a obtenção de maior estabilidade no comportamento do material durante a deformação.

Jeunechamps e Ponthot (2013) estudaram o efeito das inércias de movimento e térmica, em corpos-de-prova feitos em aço no formato de chapas. Todas as análises foram realizadas via software de simulação por elementos finitos chamado Metafor. Para realizarem este trabalho os pesquisadores consideraram alguns algoritmos de análise inercial, como, por exemplo, o proposto por Chung-Hulbert. Jeunechamps e Ponthot (2013) avaliaram os efeitos inerciais aplicados a diferentes formatos geométricos: lisos (Figura 23) e entalhados (Figura 24). Estes foram analisados para três comprimentos de entalhes: 0,4 mm, 0,8 mm e 2,0 mm.

Figura 23: Análise da deformação e inércia do movimento em corpos-de-prova lisos. **(a)** metade do material de testes; **(b)** região crítica ampliada. Fonte: Adaptado de Jeunechamps; Ponthot, 2013.

Figura 24: Análise dos corpos-de-prova entalhados. **(a)** distribuição da temperatura; **(b)** distribuição da deformação. Fonte: Adaptado de Jeunechamps; Ponthot, 2013.

Além das perdas de confiabilidade nos resultados, devido à inércia e ao atrito, a escolha correta da geometria dos corpos-de-prova está intimamente relacionada à melhora dos resultados, de modo a garantir uma deformação uniforme ao longo do material de testes, a fim de validar o modelo matemático adotado para o estudo. Smerd et al. (2005) utilizaram como referência a norma ASTM E8/E8M (2013-a), entretanto, experimentalmente necessitaram alterar a geometria dos corpos-de-prova, fazendo com que a relação indicada fosse descumprida e os efeitos inerciais reduzidos. Segundo Gama e Gillespie, quando $0,01 < L/D_s < 0,1$ a condição uniaxial de tensões é mudada para o estado plano de deformação, no qual o atrito e os efeitos de inércia na direção radial do corpo-de-prova passam a ser determinantes e não podem ser negligenciados.

O formato da curva de deslocamento pelo tempo, as oscilações envolvidas, as amplitudes, o tempo de duração da onda, a região referente à rampa de carregamento do corpo-de-prova, entre outros, associam-se à geometria adotada para os materiais de testes, a qual interfere na inércia envolvida no sistema.

Especificamente acerca do comprimento do corpo-de-prova, a determinação deste está intimamente relacionada com a leitura e interpretação dos dados, além da busca pela ótima resolução dos mesmos, uma vez que existe um tempo mínimo para que o estado de tensão uniaxial e uniforme se crie no interior do corpo-de-prova. É importante que se atinja esse tempo para que a aproximação de taxa de deformação uniforme ao longo do ensaio possa ser considerada. Por outro lado, o tempo muito longo para que o corpo-de-prova se rompa, ou seja, comprimentos exageradamente longos na região útil da amostra permitem reverberações pelas barras e, portanto, a manifestação de ruídos na leitura dos sinais (Gray, 2000).

Ensaio realizados em corpos de prova no formato de chapa são exemplos típicos da necessidade do uso de dispositivos auxiliares na fixação desses entre as barras. Além de realizarem a função óbvia de fixação, devem transmitir energia com a menor quantidade de perdas, além de aumentar o mínimo possível a inércia do ensaio (Huh; Kang; Han, 2002).

4.6 Sistema de aquisição e instrumentação

A fim de registrar os dados da deformação sofrida pelos corpos-de-prova durante a propagação da onda de choque, unidirecional, ao longo do comprimento destes e, considerando a seção transversal das barras, incidente e de transmissão, constante, o uso de extensômetros faz-se recomendado. A capacidade destes sensores em registrarem as oscilações mecânicas que acometem as barras está intimamente ligada ao comprimento da grade dos extensômetros (Figura 25), às quais estão relacionadas as limitações do uso destes. A resolução espacial do pulso registrado e a quantidade de dados capaz de ser adquirida são determinadas pelo comprimento da grade do sensor, enquanto a habilidade de “ler” os sinais é estabelecida pelo fator sensibilidade (Kaiser, 1998).

Figura 25: Extensômetro. Fonte: Adaptado de Kaiser, 1998.

A Figura 26 estabelece que para os extensômetros serem funcionais, a grade destes deve ser menor que o comprimento das ondas. Por exemplo, no caso do uso do sensor 2 para a leitura dos sinais contidos na onda inferior, haverá a perda dos eventos que acontecerem no intervalo de um comprimento de onda λ , uma vez que os comprimentos da grade do sensor e o da onda são exatamente os mesmos e, portanto, a variação de sinais entre a entrada e saída do extensômetros é nula.

Figura 26: Aumento do comprimento da grade do sensor em função do aumento do comprimento da onda. Fonte: Adaptado de Kaiser, 1998.

A associação dos extensômetros na configuração de uma ponte de Wheatstone é capaz de medir, com precisão, os valores de resistência e pequenas variações de resistência elétrica, por exemplo, por meio do “método da deflexão”, o qual permite avaliar desequilíbrios na ponte (alterações da corrente ou da queda de tensão na porção medidora do circuito), que são indícios de deflexões ocorridas no sinal medido (Figliola; Beasley, 2007).

4.7 Análise de Sinais

Além das condições necessárias para que as deformações envolvidas nos experimentos sejam consideradas unicamente axiais, uniformes e equilibradas entre as extremidades do corpo-de-prova, a etapa de análise dos sinais é fundamental para que os resultados sejam interpretados corretamente. Tradicionalmente as séries de Fourier são empregadas como primeiro artifício na análise dos sinais de deformação obtidos da condição de carregamento da SHPB. Diversos métodos de análise têm sido explorados pela comunidade científica, dentre eles, as transformadas de Gabor e as Wavelets figuram entre as técnicas mais exploradas. Ambas fazem uso das FFT como ferramentas para obterem o resultado desejado.

Independentemente da técnica de análise utilizada, a calibração do equipamento de medição é fundamental para elevar a eficiência e confiabilidade dos resultados medidos. Bacon, Färm e Lataillade (1993) utilizaram massas conhecidas como método de calibração estática do sistema apresentado na Figura 27, na qual é representada uma versão da barra de Hopkinson adaptada à obtenção da tenacidade a fratura por meio da flexão três pontos e a respectiva curva dos deslocamentos registrados pelos extensômetros ao longo do tempo em comparação aos valores obtidos pela observação da extremidade livre da barra por meio do uso de um extensômetro óptico.

Figura 27: (a) Método utilizado para obtenção dos coeficientes de tenacidade a fratura; **(b)** Curva de calibração de deslocamento no tempo. Fonte: Adaptado de Bacon; Färm; Lataillade, 1993.

Lee et al. (1995) fizeram uso das transformadas de Gabor para identificar os três primeiros modos de vibração de Pochhammer – Chree, os quais auxiliaram na identificação das altas frequências relativas ao comportamento dinâmico do material sob testes e referiam-se à solução para a equação de movimento da propagação da onda de choque ao longo de uma barra cilíndrica infinitamente longa, cuja aplicação para os casos de barras de comprimento finito é aproximadamente correta. Marais et al. (2004) também lançaram mão do método desenvolvido por Pochhammer-Chree como solução para a equação de movimento. Posteriormente empregaram a FFT para corrigir a dispersão das ondas.

Verleysen e Degrieck (2004) utilizaram-se da técnica de Moirè para identificar as altas frequências envolvidas nos sinais adquiridos por meio dos SG1 e SG2

relativos ao comportamento descrito pelo aço inoxidável 301LN (Figura 28). Paralelamente ao sistema de aquisição via extensômetros, Verleysen e Degrieck (2004) fizeram uso de uma câmera de alta velocidade para o acompanhamento das deformações sofridas pelo corpo-de-prova, o qual foi marcado por linhas verticais, transversalmente ao comprimento da região útil, cuja movimentação foi acompanhada pela câmera (Figura 29).

Figura 28: Exemplo de padrão de Moirè. Fonte: Adaptado de Verleysen; Degrieck, 2004.

Noble et al. (1999), Hopperstad et al. (2003) lançaram mão do uso de câmeras de alta velocidade a fim de registrarem a deformação ocorrida nos corpos-de-prova. As filmagens foram realizadas a velocidades de aquisição de 100.000 quadros/s. Song e Chen (2005) realizaram filmagens dos corpos-de-prova de borracha a 80.808 quadros/s, a fim de conciliarem um método auxiliar de medição com a aquisição dos dados de deformação, os quais foram obtidos por meio das células de carga criadas em barras de alumínio instrumentadas por extensômetros.

Børvik et al. (2011) realizaram experimentos com corpos-de-prova semelhantes àqueles utilizados por Jeunechamps e Ponthot (2013), porém, além das simulações numéricas realizadas via software LS-DYNA, lançaram mão do uso de uma câmera de alta velocidade para o estudo do comportamento do aço Weldox

460 E, quando submetido a carregamentos dinâmicos (Figura 30). Besnard et al. (2012) também lançaram mão do uso simultâneo dos recursos visuais oferecidos por duas câmeras de alta velocidade e pela análise numérica via método dos elementos finitos. Essas ferramentas propiciaram a avaliação do fenômeno do empescoçamento sofrido por corpos-de-prova feitos em alumínio quando solicitados dinamicamente (Figura 31).

Figura 29: Método de aquisição de dados visuais de deformação do corpo-de-prova. Fonte: Adaptado de Verleysen; Degrieck, 2004.

Figura 30: Etapas de deformação segundo a filmagem (linha superior) e a simulação numérica (linha inferior), para corpos-de-prova entalhados com raio de 0,4 mm. Fonte: Adaptado de Børvik et al., 2011.

Figura 31: Comparação entre os resultados experimentais relativos ao alongamento (à esquerda) e os de simulação numérica (à direita) para corpos-de-prova cilíndricos em quatro comprimentos diferentes. Fonte: Adaptado de Besnard et al., 2012.

Um método auxiliar de análise muito utilizado nos experimentos do tipo SHPB consiste no diagrama de Lagrange, o qual permite a realização de uma interpretação gráfica do comportamento da onda durante a propagação desta ao longo das barras e do corpo-de-prova (Besnard et al., 2012; Yang; Shim, 2005; Gilat, 2000).

A Figura 32 traz um diagrama de Lagrange, no qual estão representadas as reflexões e refrações sofridas pela onda de choque inicial, assim como um desenho esquemático do equipamento SHPB utilizado para a execução de ensaios de tração. As linhas verticais presentes no diagrama correspondem às interfaces contidas na montagem do equipamento como, por exemplo, a interface projétil/barra incidente. O eixo vertical indica o tempo em frações de segundo, normalmente μs , enquanto o eixo das abscissas faz menção à posição em que o pulso da onda de choque se encontra ao longo do equipamento. As linhas inclinadas fazem a vez das frentes de

choque, ou seja, representam a onda propriamente dita após sofrer cada um dos fenômenos: reflexão e refração.

Um método de análise comportamental da onda de choque durante a propagação desta ao longo das barras de ensaio, sugerida pela literatura (Park; Zhou, 1999; Yang; Shim, 2005; Dong; Wang; Xia, 2006; Besnard et al., 2012), consiste no diagrama de Lagrange, cuja técnica permite realizar uma interpretação bastante visual da resposta do dispositivo de Hopkinson ao carregamento inicial. Este método foi adotado como recurso para demonstração do fenômeno de múltiplos carregamentos registrados pelos ensaios e será apresentado em detalhes na seção 6.2.2.

Na Figura 32 o pulso I representa a frente de onda, de característica compressiva, oriunda do choque mecânico entre o projétil e a extremidade esquerda da barra incidente. O pulso II possui característica trativa e é produto do reflexo da onda de choque na extremidade do bloco de choque posicionado na ponta da barra incidente. O pulso II, por sua vez, representa o primeiro pulso refletido na interface da barra incidente com o corpo-de-prova. Os demais pulsos, identificados de IV a IX, referem-se às sucessivas reflexões ocorridas entre as duas extremidades da barra incidente.

Figura 32:Diagrama de Lagrange para ensaio em tração na SHPB. Fonte: Adaptado de Besnard et al., 2012.

5 CONCEPÇÃO DO ENSAIO

O presente trabalho propõe a utilização de uma versão adaptada da SHPB para a execução de ensaios em tração, a fim de promover a ruptura dos materiais testados a uma taxa de deformação aproximada de 5000 s^{-1} . Busca-se estabelecer a parametrização (entendimento da influência das múltiplas variáveis, como, por exemplo, a pressão de carregamento do projétil) correta do equipamento (Figura 33) de modo a executar experimentos que visem obter os coeficientes de JC e CS. A obtenção destes coeficientes faz-se importante para a alimentação de softwares de simulação, como o ABAQUS, por exemplo, em cuja plataforma pode-se realizar a análise da usinabilidade dos mais variados materiais, assim como simular a remoção de cavacos durante as operações de usinagem, como descrito por Umbrello, Sauobi e Outeiro (2007) e Jeunechamps e Ponthot (2013).

Figura 33: Adaptação da SHPB para realização dos ensaios em tração, foco deste trabalho. Fonte: Autoria própria.

O equipamento desenvolvido e em fase de aperfeiçoamento contém as barras incidente e de transmissão (Figura 33) confeccionadas em aço ABNT 1045, tratadas superficialmente por meio de têmpera por indução e de dureza superficial entre 58 e 62 HRC.

Atualmente, o dispositivo encontra-se em sua segunda versão, tendo sido a primeira utilizada para a realização de testes preliminares, a fim de detectar possíveis ações corretivas, melhorias e aperfeiçoamentos que se fizeram necessárias. As duas versões ou configurações, pelas quais passou o equipamento, serão aqui chamadas por: versão original e versão modificada.

O projétil, antes do início do experimento, encontra-se alojado internamente ao flange de condução (detalhe B da Figura 33) e em contato com a câmara de pressurização. O gás que preenche o interior desta é o responsável por carregar mecanicamente a face do projétil, voltada para dentro da câmara. Após a estabilização da pressão no interior desta, o pistão pneumático é acionado, promovendo a liberação do projétil. Esse percorre a extensão, tanto do flange de condução, quanto da barra guia, até colidir-se com o anteparo, que encontra-se posicionado em uma das extremidades da barra incidente (detalhe B da Figura 33).

Por meio do impacto ocorrido entre anteparo e projétil, uma onda de choque é formada, a qual propaga-se ao longo da barra incidente, até atingir a interface com o corpo-de-prova, onde sofre os efeitos de refração e reflexão. A parcela da onda refratada percorre o comprimento do corpo-de-prova e, posteriormente, a extensão da barra de transmissão, enquanto a parcela refletida retorna pela barra incidente.

A modalidade do ensaio em tração requer a utilização de dispositivos de fixação, a fim de garantir o posicionamento do corpo-de-prova entre as barras incidente e de transmissão. Esta necessidade, normalmente, introduz impedâncias acústicas indesejadas, uma vez que provocam os efeitos de reflexão e refração de ondas em suas interfaces, com o equipamento em si.

6 VERSÃO ORIGINAL DO EQUIPAMENTO DE ENSAIOS DE TRAÇÃO EM ALTA VELOCIDADE

6.1 Materiais e Métodos

Na configuração original do equipamento, ambas as barras continham 2,0 m de comprimento e 25,4 mm de diâmetro, conforme indicado pela Figura 34 (a). Tanto a barra incidente quanto a barra de transmissão deslizam sobre rolamentos, dispostos em bases de nylon, de modo a minimizar o atrito durante a movimentação das barras e garantir que o alinhamento entre estas possa ser obtido por meio de regulagem do plano de trabalho. Rolamentos posicionados acima das barras, pressionando-as contra os dois rolamentos inferiores, foram empregados no intuito de reduzir os possíveis deslocamentos verticais em decorrência dos efeitos de flexão (Figura 34 (b)).

Os três rolamentos instalados nos conjuntos de rolamentos retiram quatro graus de liberdade das barras de ensaio, permitindo a estas apenas os movimentos nos dois sentidos da direção axial e rotação em torno do próprio eixo, ou seja, girar entre os três rolamentos

Cada uma das barras recebeu um ponto de instrumentação, cuja identificação deu-se por SG1 e SG2 para as barras incidente e de transmissão, respectivamente, estando posicionados a 600 mm da extremidade que recebe os corpos-de-prova (Figura 34).

Figura 34 (a): Dimensões das barras, incidente e de transmissão, utilizadas na versão original do equipamento (dimensões em mm) e **(b)** Três rolamentos posicionados sobre a superfície de uma das barras. Fonte: Autoria própria.

Após a colisão do projétil contra o anteparo, este movimenta-se em direção ao apoio final da barra incidente, no qual está localizada uma chapa de alumínio que atua como placa de choque, a fim de proteger os rolamentos que o sustentam e o mantém alinhado às barras de ensaio.

6.1.1 Definição da geometria dos corpos-de-prova

No intuito de reduzir o uso de acessórios e, consequentemente o acréscimo de impedâncias acústicas, optou-se por corpos-de-prova de geometria cilíndrica e de extremidades roscadas, de acordo com a Figura 35. O sistema de fixação incorporado ao próprio corpo-de-prova garante o mínimo acréscimo de fatores interferentes à propagação das ondas à SHBP, entretanto, o simples fato de haver

variações da seção transversal nas interfaces entre as barras e o corpo-de-prova insere oscilações ao comportamento da onda, aumentando os ruídos e dificultando a análise dos sinais. Este efeito será discutido com mais profundidade na seção 6.2.3.

Fez-se extremamente importante garantir um alinhamento preciso entre as barras e o corpo-de-prova, visto que, além da necessidade de promover a deformação unidirecional dos componentes da SHPB, as dimensões atribuídas ao material de testes (Figura 35) eram bastante diminutas, demonstrando a fragilidade da geometria escolhida. Esforços deslocados da direção axial foram potencializados pelas barras, devido ao comprimento longo destas, inserindo tensões residuais indesejadas aos corpos-de-prova, camuflando os resultados.

Figura 35: Corpo-de-prova utilizado nos ensaios preliminares (dimensões em mm). Fonte: Autoria própria.

Para a definição da geometria dos corpos-de-prova tomou-se como referência a norma ASTM, recomendada ao desenvolvimento das geometrias dos materiais de testes submetidos a ensaios de tração axial (ASTM E8/E8M, 2013a). As geometrias sugeridas pela norma estão indicadas pela Figura 36. Apesar das configurações optadas para os CPs destinados à SHPB não seguirem nenhuma das indicações apresentadas na Figura 36, buscou-se aproximá-las ao máximo das recomendações

normatizadas. As dimensões recomendadas pela norma não foram rigorosamente seguidas, pois desejava-se utilizar corpos-de-prova de comprimento menor possível, de modo que a região útil destes coubesse na resolução da lente da câmera filmadora.

As recomendações para corpos-de-prova de extremidades roscadas são dadas pelas geometrias 1 e 2, sugeridas pela Figura 36, enquanto para aqueles de dimensões reduzidas, a Figura 37 traz as recomendações. Em ambos os casos, o comprimento da seção reduzida é suficiente para a colocação de extensômetros, por meio dos quais obtêm-se o limite de escoamento do material em teste, o que não acontece no caso da SHPB. Esta limitação quanto ao uso de extensômetros no próprio corpo-de-prova é determinante na opção pela instrumentação das barras incidente e de transmissão.

Dimensões, mm [in.] Para testes utilizando corpos-de-prova de comprimento quatro vezes o diâmetro [E8]					
	Corpo-de-prova 1	Corpo-de-prova 2	Corpo-de-prova 3	Corpo-de-prova 4	Corpo-de-prova 5
G—Comprimento útil	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]
D—Diâmetro	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]
R—Raio do filete, min	10 [0.375]	10 [0.375]	2 [0.0625]	10 [0.375]	10 [0.375]
A—Comprimento da seção reduzida	56 [2.25] min	56 [2.25] min	100 [4] aproximado	56 [2.25] min	56 [2.25] min
L—Comprimento total, aproximado	145 [5]	155 [5.5]	155 [5.5]	140 [4.75]	255 [9.5]
B—Comprimento do final da seção	35 [1.375] aproximado	25 [1] aproximado	20 [0.75]	15 [0.5] aproximado	75 [3] min
C—Diâmetro do final da seção	20 [0.75]	20 [0.75]	20 [0.75]	22 [0.875]	20 [0.75]
E—Comprimento da região escalonada		15 [0.625]		20 [0.75]	15 [0.625]
F—Diâmetro da região escalonada		15 [0.625]		15 [0.625]	15 [0.625]

Dimensões, mm [in.] Para testes utilizando corpos-de-prova de comprimento cinco vezes o diâmetro [E8M]					
	Corpo-de-prova 1	Corpo-de-prova 2	Corpo-de-prova 3	Corpo-de-prova 4	Corpo-de-prova 5
G—Comprimento útil	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]
D—Diâmetro	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]
R—Raio do filete, min	10 [0.375]	10 [0.375]	2 [0.0625]	10 [0.375]	10 [0.375]
A—Comprimento da seção reduzida	75 [3] min	75 [3] min	75 [3] aproximado	75 [3] min	75 [3] min
L—Comprimento total, aproximado	145 [5]	155 [5.5]	155 [5.5]	140 [4.75]	255 [9.5]
B—Comprimento do final da seção	35 [1.375] aproximado	25 [1] aproximado	20 [0.75]	15 [0.5] aproximado	75 [3] min
C—Diâmetro do final da seção	20 [0.75]	20 [0.75]	20 [0.75]	22 [0.875]	20 [0.75]
E—Comprimento da região escalonada		15 [0.625]		20 [0.75]	15 [0.625]
F—Diâmetro da região escalonada		15 [0.625]		15 [0.625]	15 [0.625]

Figura 36: Geometrias recomendadas para os corpos-de-prova para ensaios de tração de materiais metálicos Fonte: Adaptado de ASTM E8/E8M, 2011.

Figura 37: Geometrias recomendadas para os corpos-de-prova para ensaios de tração de materiais metálicos de dimensões reduzidas Fonte: Adaptado de ASTM E8/E8M, 2011.

6.1.2 O projétil

O projétil (Figura 38), originalmente utilizado para carregar mecanicamente a barra incidente, foi confeccionado em aço ABNT 4340 e submetido aos tratamentos térmicos de têmpera (mantido à 870 °C durante uma hora e resfriado em óleo), e posterior revenimento (30 minutos a uma temperatura de 450 °C), a fim de promover o alívio de tensões.

Figura 38: Dimensões do projétil original (dimensões em mm). Fonte: Autoria própria.

No interior do flange de condução, uma das extremidades do projétil fica exposta, porém, travada pelo sistema de acionamento, acoplado à ponta do pistão pneumático. A extremidade oposta, em contato com a câmara de pressurização, recebe o carregamento mecânico por meio do gás em compressão, até que a pressão no interior na câmara se estabilize no nível desejado e, somente então, o projétil é liberado após acionamento do pistão pneumático.

Ao ser acionado o pistão pneumático, o projétil é disparado em direção ao anteparo. A força com que o projétil é expulso do interior do flange de condução pode ser calculada por meio da equação (25). A energia acumulada no projétil, por sua vez, pode ser obtida pela equação (26), a qual descreve o trabalho desenvolvido pelo gás no interior do flange de condução ao expulsar o projétil, após o sistema de travamento ter sido liberado. Entretanto, a equação (26) somente é válida para a condição em que as vazões na entrada e na saída da câmara sejam constantes e idênticas. $Q_i = Q_o$ e enquanto o projétil estiver em contato com os componentes de vedação (pequena variação volumétrica), conforme indicação na Figura 39.

$$F = (D_e^2 - D_i^2) \frac{\pi}{4} p = A_p * p \quad (25)$$

$$E_p = \int_0^V p dV = \int_0^{f_v} p * A_p dl \quad (26)$$

Figura 39: Representação esquemática do projétil em contato com a câmara de pressurização, enquanto vedado. Fonte: Autoria própria.

6.1.3 Sistema de travamento e acionamento

O sistema mecânico responsável pelo travamento e acionamento rápido do projétil é apresentado na Figura 40. Consiste, basicamente, de um pistão pneumático com uma alavanca associada à ponta da haste, dois pinos (travas mecânicas) e duas molas, além de uma estrutura mecânica, garantindo o fechamento e alinhamento desses componentes, conforme demonstrado pela Figura 40.

Figura 40: Sistema de acionamento pneumático com travas mecânicas. Fonte: Autoria própria.

As duas molas são responsáveis por garantirem o travamento do sistema de acionamento e, consequentemente, que o projétil permaneça no interior do flange, até que a pressão desejada para o ensaio seja atingida e o disparo realizado. No momento do acionamento, a haste do pistão pneumático desloca-se para cima, fazendo com que a alavanca execute um movimento de ascensão, empurrando as travas mecânicas contra as molas – devido ao perfil inclinado das laterais – e, consequentemente, liberando o projétil.

6.1.4 Aquisição dos dados de deformação

Como solução para a aquisição dos dados de deformação na versão adaptada da SHPB, o presente trabalho propôs a utilização de sensores do tipo extensômetros, para as medições das deformações sofridas pelas barras incidente e de transmissão; o módulo de aquisição Quantum X (amplificador MX410), juntamente do software Catman Easy-AP versão 3.1, ambos fabricados e comercializados pela Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM), para a aquisição dos sinais fornecidos pelos extensômetros; a câmera de alta velocidade i-SPEED 3 fabricada pela Olympus, para a aquisição das imagens do corpo-de-prova durante o processo de deformação plástica; a câmera Cam Records 600, fabricada pela Optronics para a determinação da velocidade de deslocamento do projétil; e os softwares LabView versão 2009 e Catman Easy-AP versão 3.1 para a análise dos sinais gravados.

Com base em trabalhos relatados na literatura (Sedighi; Khandaei; Shokrollahi, 2010; Yang et al., 2013; Kajberg; Sundin, 2013) pode-se adotar entre 0,2 ms e 0,4 ms como o tempo médio de duração dos carregamentos, para os materiais feitos em aço e em alumínio. Portanto, para que uma curva de deformação *versus* tempo possa ser obtida, com pelo menos 10 pontos (número de aquisições durante o alongamento do material de testes), a taxa de aquisição deve ser de, no mínimo, 50 k amostras/s. Para os experimentos aqui relatados, as taxas de aquisição envolvidas foram de 96 k amostras/s para a captação dos dados de deformação das barras e de 100.000 quadros/s para as filmagens do comportamento dos corpos-de-prova. A Tabela 2 traz a relação de taxa de aquisição por resolução gráfica conseguida por meio das filmagens realizadas com a câmera i-SPEED 3, quando feitas no modo de máxima qualidade de imagem.

Devido ao fato do tempo de resposta de ambos os sistemas de aquisição ser bastante diminuto e o interesse em sincronizar os instantes em que o amplificador de sinais e a câmera de alta velocidade começam a adquirir os dados de deformação dos corpos-de-prova, incorporou-se um circuito elétrico simples (Figura 41) ao sistema de aquisição, a fim de garantir a sincronização dos dados. Esse consiste, basicamente, de um relê que, quando acionado, envia um sinal de entrada do tipo rampa quadrada para o amplificador e para a câmera (Figura 42), de amplitude regulada por meio de um potenciômetro.

Tabela 2 – Características técnicas i-SPEED 3.

i-SPEED 3 Modo HQ (Alta Qualidade) - 4GB memória interna			
Quadros por segundo	Resolução	Capacidade de memória [quadros]	Tempo de filmagem [s]
1	1280 x 1024	2.447	2.447.000
25	1280 x 1024	2.447	97.880
100	1280 x 1024	2.447	24.470
150	1280 x 1024	2.447	16.313
200	1280 x 1024	2.447	12.235
300	1280 x 1024	2.447	8.157
400	1280 x 1024	2.447	6.118
500	1280 x 1024	2.447	4.894
1.000	1280 x 1024	2.447	2.447
1.500	1280 x 1024	2.447	1.631
2.000	1280 x 1024	2.447	1.224
3.000	1068 x 800	3.767	1.256
4.000	912 x 684	5.159	1.298
5.000	804 x 600	6.672	1.334
10.000	528 x 396	15.393	1.539
15.000	420 x 312	24.561	1.637
20.000	348 x 260	35.572	1.779
30.000	264 x 72	62.202	2.073
40.000	96 x 72	93.130	2.328
50.000	96 x 72	135.462	2.709
75.000	96 x 72	253.992	3.386
100.000	96 x 72	465.653	4.657
125.000	96 x 72	859.625	6.877
150.000	96 x 72	1.219.165	8.127

Fonte: Olympus, 2012.

Figura 41: Circuito para sincronização de sinais de aquisição. Fonte: Autoria própria.

Figura 42: Sinal de *trigger* emitido na forma de uma onda quadrada. Fonte: Autoria própria.

O amplificador MX410 possui oito canais habilitados, divididos entre quatro entradas e quatro saídas. Porém, para a execução dos ensaios aqui relatados, foram utilizadas apenas três entradas: duas para os dados de deformação registrados pelos extensômetros, para as barras incidente (CH 1) e de transmissão (CH 2) e, uma para os sinais de tensões elétricas enviados pelo *trigger* (CH3).

A oscilação apresentada pelo sinal de *trigger*, indicado pela Figura 42, deve-se à passagem da corrente elétrica pelo transformador, responsável pela redução da diferença de tensão de 220 V para 10 V, além do carregamento dos componentes indutivo e capacitivo presentes no circuito (Figura 41).

Anteriormente à utilização da câmera i-SPEED 3, foram realizados alguns testes com o auxílio de uma câmera modelo Cam Records 600, fornecida pela Optronics. Esta, por sua vez, mostrou-se incapaz de fornecer resultados satisfatórios, visto que a máxima taxa de aquisição propiciada, de modo a manter uma boa resolução, era de 4 mil quadros/s. Por esta razão, optou-se por descartar esse equipamento. Para esse fim, a Cam Records 600 foi utilizada com sucesso na obtenção das velocidades do projétil: na saída do flange e no instante imediatamente anterior ao impacto deste com o anteparo.

6.1.5 Instrumentação

Devido a existência de deformação plástica nas regiões adjacentes à área útil dos corpos-de-prova, a determinação da resposta em tensão e deformação torna-se difícil e complexa. A lei de Hooke deixa de valer e instrumentos de medição adicionais como, por exemplo, extensômetros e câmeras filmadoras de alta velocidade, passam a ser extremamente necessários.

Para a realização dos experimentos aqui demonstrados, as duas barras de ensaio (incidente e de transmissão), por serem feitas em aço e, portanto, consideradas elementos elásticos, foram transformadas em células de carga. A princípio, pensou-se em utilizar um único extensômetro, posicionado em concordância com a direção axial das barras, para cada elemento elástico em análise. Entretanto, optou-se pelo uso de duas pontes de Wheatstone completas, ou seja, quatro extensômetros (*strain gages*) por barra, pelo fato de o experimento envolver recursos de filmagem. Nesse caso, há a necessidade de iluminação massiva, o que promove um aquecimento considerável nas regiões próximas à fixação do corpo-de-prova, além do excesso de ruídos presentes na rede elétrica, detectado pelo sistema de aquisição.

A configuração adotada visa garantir a compensação da variação de temperatura causada em cada extensômetro e eliminar a influência externa ao sistema de medição. A potência dissipada na forma de calor, proveniente das lâmpadas utilizadas na iluminação dos ensaios mecânicos, é muito alta. Parte desta energia é direcionada às barras de ensaio e, conseqüentemente, aos extensômetros, os quais podem sofrer deformações devido à dilatação térmica. Todavia, a configuração inerente à ponte de Wheatstone permite que as oscilações térmicas sofridas pelos elementos de medição que a compõem sejam auto compensadas.

A busca por estabilidade durante a execução dos experimentos, seja nos próprios equipamentos que configuram a SHPB adaptada para testes em tração, ou nos sinais adquiridos das deformações sofridas pelas barras incidente e de transmissão, foi *condicio sine qua non* para a escolha das resistências de $350\ \Omega$ para os extensômetros que compunham as pontes de Wheatstone.

Para as resistências de maior valor ôhmico, as pontes tornam-se mais estáveis que aquelas compostas por baixas resistências. Optou-se por extensômetros do fabricante Kyowa, para aplicação em aço, cuja grade possuía 5 mm de comprimento – cerca de 3,5% do comprimento da onda de choque (λ), cuja obtenção é dada pelo produto entre a velocidade de propagação da onda no meio (c) e o tempo de duração do impacto entre o anteparo e o projétil (t_{ch}) (equação (27)). Esse comprimento de onda é dado pelo produto do comprimento L_p do projétil com o inverso da velocidade de propagação da onda no material, de acordo com a equação (28).

$$\lambda = c * t_{ch} \quad (27)$$

$$t_{ch} = \frac{2L_p}{c} \quad (28)$$

6.1.6 Transdutor de força e momento

A Figura 43 traz o posicionamento das pontes de Wheatstone em relação às barras incidente e de transmissão e dos extensômetros em relação à ponte em si. Dois dos extensômetros (R_1 e R_4) foram posicionados de modo que as grades destes ficassem alinhadas com o eixo principal do equipamento, ou seja, coincidentes com a direção axial das barras incidente e de transmissão. Os outros dois (R_2 e R_3) foram posicionados de maneira que as grades estivessem direcionadas perpendicularmente ao eixo principal. Analisando a seção transversal das barras, na região em que os extensômetros foram colados, nota-se que estes encontravam-se orientados à 90° um do outro, conforme indicado pela seção A-A da Figura 43.

Os extensômetros posicionados diametralmente opostos um do outro: R_1 e R_4 , R_2 e R_3 , correspondiam, respectivamente, às resistências W_1 e W_2 , W_3 e W_4 , que compunham a ponte de Wheatstone, de modo a formarem os trechos que determinavam a tensão de saída U_o . O posicionamento dos sensores nas barras ocorreu de acordo com as coordenadas polares, indicadas entre parênteses, próximas à identificação de cada *strain gage* (Figura 43). O mesmo foi escolhido de modo que a sensibilidade da ponte de Wheatstone fosse maximizada para os efeitos relativos aos esforços de tração, em detrimento àqueles decorrentes da flexão.

Pode-se facilmente determinar a tensão de saída da ponte Wheatstone em função da tensão de entrada, de acordo com o indicado pela equação (29). Esta permite medir a variação de tensão entre os pontos 2 e 4 da ponte, quando medida pelos trechos 1-2-4 e 2-3-4.

$$\frac{U_o}{U} = \frac{W_1}{W_1+W_2} - \frac{W_4}{W_3+W_4} \quad (29)$$

No intuito de maximizar os sinais emitidos pelos deslocamentos causados por esforços de tração nas grades dos sensores, optou-se por: $R_1 = W_1$; $R_2 = W_2$; $R_3 =$

W_3 e $R_4 = W_4$. Esta definição deu-se após uma avaliação dos possíveis resultados de serem obtidos pela equação (29), quando consideradas pequenas variações nas grades dos extensômetros. Para deformações da ordem de $\pm 10\%$ do comprimento total de cada resistência sob tração, a saída obtida pela equação (29) equivale a $0,05013 V$, de acordo com o desenvolvimento descrito pela equação (30).

$$\frac{U_O}{U} = \frac{R+\Delta R}{R+\Delta R+R} - \frac{R-\Delta R}{R+R-\Delta R} = \frac{1,1R}{2,1R} - \frac{0,9R}{1,9R} = 0,05013 \quad (30)$$

Figura 43: Posicionamento dos extensômetros na ponte e nas barras incidente e de transmissão (dimensões em mm). Fonte: Autoria própria.

Quando busca-se a minimização de determinados sinais, a ponte de Wheatstone é capaz de fornecer saídas da ordem de $2,5E-3 V$, considerando-se os mesmos $\pm 10\%$ de variação no comprimento das grades, de acordo com o desenvolvimento registrado na equação (31).

$$\frac{U_O}{U} = \frac{R}{R+R+\Delta R} - \frac{R-\Delta R}{R+R-\Delta R} = \frac{1R}{2,1R} - \frac{0,9R}{1,9R} = 0,00251 \quad (31)$$

6.1.7 Setup

6.1.7.1 Preparação da SHPB e montagem dos corpos-de-prova

Inicialmente, deve-se realizar a limpeza das barras incidente, de transmissão e da barra guia, devido, principalmente, à oxidação destas, uma vez que ficam expostas ao ar e recebem, constantemente, o contato com a humidade presente nas mãos de quem as manuseiam. Sequencialmente à limpeza, fez-se importante uma verificação do alinhamento das barras incidente e de transmissão, entre si, e destas com a barra guia (Figura 44). Aqui, o uso de um laser é aplicável. O alinhamento das barras foi feito por meio da regulagem da altura do plano de atuação dos rolamentos - posicionados tangencialmente às barras -, por meio do recurso de porca e contra-porca. Estas determinavam o posicionamento da placa superior em relação à placa inferior, uma vez que os parafusos estavam fixos em relação a esta última (Figura 45). A inspeção do alinhamento foi realizada por meio do uso de instrumentos de verificação de nível, imprescindíveis a esta atividade.

Figura 44: Fotografia tirada para indicar a oxidação sofrida pelas barras, os terminais de conexão para leitura dos dados de deformação dos *strains gages* e a necessidade de alinhamento com a barra guia. Fonte: Autoria própria.

Figura 45: Dispositivo de regulagem de altura dos rolamentos para alinhamento das barras. Fonte: Autoria própria.

Concluídas a verificação e a manutenção das barras, o passo seguinte consistia na colocação do projétil no interior da câmara de pressurização, através do flange de condução. Uma vez posicionado o projétil no ponto inicial, o anteparo deveria ser rosqueado na extremidade da barra incidente, de modo que pudesse receber o impacto do projétil.

A fixação do corpo-de-prova (ensaiava-se apenas um por vez) e a habilitação dos canais de entrada do amplificador MX410 eram atividades realizadas com bastante facilidade, uma vez que o material de testes era instalado por meio das roscas M16, presentes nas extremidades deste e nas barras, nas quais já estavam os terminais para encaixe dos cabos tipo manga (Figura 44), responsáveis pela transmissão dos sinais de deformação. Estes, por sua vez, deviam apenas ter as extremidades opostas plugadas no módulo Quantum X.

Antes de o corpo-de-prova ser fixado entre as barras, era importante realizar as medições da região útil ao ensaio: comprimento (L) e diâmetro (D_s). A Figura 46 traz uma fotografia de três corpos-de-prova, conforme versão original de projeto, após as medições, cujos valores aferidos estão indicados na Tabela 3. Por se tratar da fase de desenvolvimento e aperfeiçoamento do equipamento SHPB para a realização de ensaios em tração, optou-se por utilizar, neste momento, corpos-de-prova confeccionados em aço ABNT 1020, de modo a preservar os materiais de maior interesse à indústria.

Tabela 3 – Dimensões da região útil dos corpos-de-prova aferidas por paquímetro.

Corpo-de-prova	L [mm]	D _s [mm]
CP_E_01	3,00	2,55
CP_E_02	2,90	2,60
CP_E_03	2,90	2,60

Fonte: Autoria própria

Figura 46: Corpos-de-prova anteriormente à execução dos ensaios preliminares. Fonte: Autoria própria.

A determinação do alongamento total dos corpos-de-prova, por meio da análise das imagens partiu da calibração das medidas utilizadas - convertidas de pixels para milímetros –, tomando como referência o comprimento L da região útil dos materiais de testes. Paralelamente a esta técnica, após o término dos ensaios, realizou-se a aferição do comprimento final dos corpos-de-prova. Esta prática consistiu em unir as faces fraturadas do material e medir a distância entre as faces de referência. Como instrumento de medição, utilizou-se um paquímetro.

6.1.7.2 Instalação da câmera de alta velocidade e sistemas de iluminação

Por se tratar de um ensaio mecânico que visa caracterizar os materiais como um todo a partir de uma pequena amostra desse, a definição da posição em que a câmera deveria permanecer durante os ensaios era bastante minuciosa e precisa. Apesar do campo de visão ser relativamente grande (resolução de 96x72 pixels,

conforme Tabela 2), a filmagem deveria garantir que sempre houvesse, ao menos duas faces de referência visíveis, durante a deformação do material (Figura 47). Um corpo-de-prova de sacrifício foi utilizado, a fim de garantir a precisão no posicionamento da câmera em relação à região de interesse.

Por meio da observação da Figura 47, evidencia-se que a lente da câmera deveria ser capaz de focalizar o corpo-de-prova, ou parte deste, durante todo o alongamento do material. Buscou-se garantir que houvesse ao menos duas referências, cuja distância prévia fosse conhecida. O deslocamento registrado por estes pontos de referência foi o que garantiu a precisão no resultado da análise, posterior à deformação sofrida pelo material.

Figura 47: Imagens retiradas da filmagem do ensaio do CP_E_02 nos instantes: pré (imagem superior) e pós deformação (imagem inferior) do corpo-de-prova. Fonte: Autoria própria.

A resolução máxima conseguida durante as filmagens dependia diretamente da velocidade em que se desejava realizá-las. Além da limitação em resolução, conforme aumentava-se a taxa de aquisição de imagens pela câmera – relação apresentada pela Tabela 2 -, as lentes exigiam maior iluminação para que se

pudesse garantir o mínimo de visibilidade do evento que se pretendia captar. A Figura 47 indica que a iluminação utilizada (duas lâmpadas de LED de 15 W de potência) no ensaio em questão encontrava-se no limite para que se conseguisse o mínimo de nitidez nas imagens coletadas a uma taxa de 100.000 quadros/s.

Para a filmagem do projétil percorrendo a distância entre o flange de condução e o anteparo, necessitou-se de menos luz, uma vez que a taxa de aquisição utilizada foi 5 vezes menor que a necessária para a filmagem dos ensaios propriamente ditos. A Figura 48 traz uma sequência de imagens, por meio das quais é possível notar o deslocamento do projétil. A Figura 49 demonstra a utilização das duas câmeras como ferramentas auxiliares à instrumentação.

Figura 48: Sequência de imagens (de cima para baixo) que demonstra o deslocamento do projétil, desde o flange de condução (à direita) até a colisão com o anteparo (à esquerda). Fonte: Autoria própria.

(a)

(b)

Figura 49: Montagens realizadas para (a) filmagem do projétil em movimento e (b) dos corpos-de-prova em deformação. Fonte: Autoria própria.

Nota-se pela Figura 49 (a) que existe uma placa de choque posicionada atrás do projétil, cuja finalidade é de proteger o rolamento superior, posicionando-o sobre a barra, por meio de uma estrutura de nylon. A Figura 49 (b) mostra o posicionamento da câmera i-SPEED 3 diante do corpo-de-prova.

A preocupação em limitar os movimentos das barras deveu-se à necessidade de minimizar os efeitos de flexão aos quais estas podem estar sujeitas. Esses efeitos surgem pelo próprio peso das barras ou devido à eventuais não-homogeneidades durante a propagação das ondas. Ainda, surgem devido às irregularidades geométricas, como, por exemplo, a falta de concentricidade ao longo de todo o comprimento das barras.

Buscou-se ainda eliminar os ruídos elétricos oriundos de equipamentos externos ao amplificador, quando este estava conectado à rede elétrica do laboratório. Assim, optou-se pelo uso de um aparelho Nobreak, o qual tem a capacidade de manter os equipamentos eletrônicos (amplificador e o computador dedicado a este propósito) durante um curto período de tempo, apenas por meio das duas baterias de 12 V que possui internamente.

6.1.8 Calibração

Assim, como em todo e qualquer trabalho de pesquisa que envolva métodos de medição, há a necessidade da calibração dos sistemas de medição adotados, principalmente para as duas células de carga desenvolvidas especificamente para a realização dos ensaios aqui mencionados.

Em princípio, cogitou-se utilizar uma máquina para ensaios de tração convencionais, do fabricante Instron, para carregamentos de até 100.000 kgf, disponível no laboratório do departamento de estruturas da EESC. Entretanto, a dureza superficial (58 – 62 HRC) das barras foi um fator agravante que inseriu dificuldade no aspecto da fixação, visto que os dispositivos utilizados para este fim poderiam sofrer desgaste superficial.

Além da inconveniência do desgaste superficial, os carregamentos nas barras, a fim de obter uma calibração das células de carga, precisariam estar sempre abaixo do limite de escoamento das mesmas (condição de trabalho do equipamento). Considerando que a tensão máxima no corpo-de-prova pudesse chegar à 1000 MPa enquanto o material se comportasse elasticamente, as células

de carga estariam sujeitas a, no máximo, uma carga equivalente à, aproximadamente, 405 kgf. Isso corresponderia a menos de 1% da força máxima capaz de ser exercida pela máquina de ensaios supracitada. As equações (32) e (33) trazem a determinação da força máxima à qual estariam sujeitas as células de carga. Apesar da solicitação mecânica necessária ao carregamento das células de carga ser muito inferior à capacidade da máquina de ensaios, o que não causaria sobrecargas no equipamento, o erro de leitura das cargas empregadas era de 5%, para mais ou para menos, e, portanto, a calibração por meio do uso do equipamento da Instron tornou-se inviável.

$$F_s = \sigma_s \cdot A_s \cdot \frac{1}{g} \quad (32)$$

$$F_s = 1000 \cdot \frac{\pi \cdot 2,25^2}{4} \cdot \frac{1}{9,81} = 405,309 \text{ kgf} \quad (33)$$

Por essa razão, a calibração das células de carga deu-se por meio da técnica de carregar as barras com massas calibradas e avaliar os resultados por simples comparação. Para a calibração, utilizou-se de massas conhecidas e calibradas, as quais foram gentilmente cedidas pelo IPEM de São Carlos, nos valores de: 10, 20, 200 e 500 kg. Seu uso propiciou a obtenção de uma curva de carregamento linear e, conseqüentemente, a calibração do sistema para solicitações que variaram de 0 à 500 kg.

A fim de garantir a união entre as massas e de modo a formar um único conjunto, utilizou-se uma corrente, de 5 kg de massa, com ganchos nas extremidades. As Figuras 50 e 51 mostram, respectivamente, uma fotografia tirada do método de calibração adotado e a curva obtida por meio deste procedimento.

Figura 50: Metodologia utilizada para calibração das células de carga. Fonte: Autoria própria.

Na fotografia indicada pela Figura 50, a barra instrumentada estava suspensa verticalmente pelo guindaste vermelho, cujo curso máximo é de 2400 mm. Na extremidade da barra em que foram fixadas as massas, pode-se observar um conjunto totalizando 515 kg, composto pelas massas de 10, 20 e 200 kg, cujo erro máximo de medição está regido pela Minuta OIML R111 para Classe M1 (de acordo

com a Tabela 4), além de uma corrente, cuja massa de 5 kg foi confirmada em uma balança convencional.

Figura 51: Curva de calibração obtida a partir de carregamentos sucessivos das células de carga a partir de massas calibradas. Fonte: Autoria própria.

Na Figura 51, o eixo das abscissas traz a leitura em mV/V dos extensômetros, enquanto o eixo das ordenadas faz a conversão destes valores em força [kgf], de acordo com o peso exercido na extremidade inferior da barra suspensa (Figura 50). O aumento da carga em função do decremento do sinal de deformação registrada pelos extensômetros dá-se pela polarização no momento da instrumentação. Buscou-se, durante a calibração, o máximo espalhamento possível dos pontos em termos de utilização das massas conhecidas, entretanto, devido à limitação na quantidade de massas e de recursos para içamento disponíveis, obteve-se apenas 8 pontos dispersos na curva de calibração levantada.

Tabela 4 – Relação de massas utilizadas na calibração das células de carga.

Massas [kg]	Quantidade
$10,0 \pm 5E-4$	01
$20,0 \pm 1E-3$	05
$200,0 \pm 10E-3$	02
$500,0 \pm 25E-3$	01

Fonte: Autoria própria

Fez-se uso de outra técnica de calibração, além da realizada para confiabilidade dos resultados fornecidos pelas células. Essa técnica diz respeito à calibração do sistema de medição disponibilizado pelo software de análises gráficas, i-SPEED Suite do fabricante Olympus. Esse possui uma interface que permite a conversão de pixels em unidades de comprimento, como mm e polegadas, por exemplo (Figura 52).

Figura 52: Representação exata da ferramenta de calibração disponível no software iSPEED Suite.
Fonte: Autoria própria.

Os pontos 1 e 2 indicados em vermelho na imagem à esquerda da Figura 52 são os “sets points” para calibração do software de análises gráficas. A distância entre esses dois é definida no campo “*distance between points*”, enquanto a unidade de medida é indicada na sequência. Ao acionar o botão “*apply*” o software faz a conversão automática da unidade escolhida para pixels. Uma vez realizada a calibração, qualquer medição entre dois pontos quaisquer da imagem pode ser realizada. O resultado será dado de acordo com a unidade escolhida para calibrar a ferramenta de análise.

6.1.9 Métodos para análises e apresentação dos resultados

Como mencionado anteriormente, foram utilizados como recursos de análise dos resultados, um software (Catman Easy) para a aquisição dos sinais de deformação registrados pelos extensômetros incorporados às barras de ensaio – incidente e de transmissão – e, um segundo software (i-SPEED Suite) para o estudo dos vídeos feitos durante a elongação sofrida pelos corpos-de-prova, enquanto carregados mecanicamente.

6.2 Resultados e Discussões

6.2.1 Estudo da velocidade e energia do projétil

A filmagem do projétil entre os instantes em que fora disparado e o do impacto deste com o anteparo, percorrendo a barra guia, foi posteriormente avaliada por meio do software i-SPEED Suite. Este oferece uma ferramenta de análise que permite verificar a imagem quadro a quadro, conforme indicado pela Figura 53. Os pontos vermelhos em destaque indicam as posições ocupadas a cada quadro pela face mais à esquerda do projétil, conforme esse percorria a extensão da barra guia até colidir-se com o anteparo.

A Figura 54 traz o gráfico de deslocamento do projétil durante o percurso descrito acima. Logo após o projétil ter saído do interior do flange de condução a imagem do deslocamento (Figura 55) ficou prejudicada pela névoa formada pelas gotículas de água presentes na linha pneumática. A névoa é identificada na Figura 55 pela região clara no centro da imagem, sobre a barra guia.

Assim, a curva indicada pela Figura 54 foi plotada apenas a partir dos pontos que denotavam as porções inicial e final do movimento do projétil. Por meio da equação que descreve o comportamento da curva de velocidade no tempo, nota-se que o valor médio dessa para projétil em cruzeiro foi de, aproximadamente, 5 m/s enquanto a aceleração média foi de $14,3 \text{ m/s}^2$. Com relação à aceleração, o projétil apenas está sujeito a aceleração positiva enquanto ainda encontra-se no interior do flange de condução e sob carregamento constante das partículas de gás.

Após perder contato com os componentes de vedação, o projétil se afasta do interior da câmara e a pressão do gás deixa de impulsioná-lo. Por fim, o atrito com a barra guia provoca acelerações negativas. Entretanto, este efeito é muito reduzido no curto espaço em que o projétil viaja e, portanto, pode ser desprezado.

Figura 53: Análise de imagens, quadro a quadro, para determinação da velocidade de cruzeiro do projétil. Fonte: Autoria própria.

Figura 54: Gráfico do deslocamento do projétil sobre a barra guia ao longo do tempo. Fonte: Autoria própria.

Figura 55: Indicação da névoa provocada por gotículas de água. Fonte: Autoria própria.

A pressão atuante em uma das faces do projétil, associada à variação volumétrica no interior da câmara de pressurização, enquanto o projétil descola-se em direção ao meio exterior, permite a obtenção da energia máxima disponível para a realização dos ensaios, de acordo com a equação (26). Esta equação apenas é válida para o caso de a pressão interna à câmara de pressurização ser constante, ou seja, as vazões de entrada e saída de gás serem idênticas entre si em função da velocidade do projétil. Outra restrição é a de que deve haver vedação para que as vazões na entrada e na saída da câmara sejam idênticas. Portanto o resultado dado pela equação (26) é apenas qualitativo para esta aplicação.

$$E_p = \int p dV \quad (26 \text{ reescrita})$$

A Tabela 5 revela a parametrização dos ensaios dos corpos-de-prova CP_E_02 e CP_E_03 e da filmagem do projétil durante o trajeto que este percorreu até o momento do impacto com o anteparo. As equações (34) a (36) trazem os cálculos para a obtenção da energia máxima disponível à SHPB, de acordo com a parametrização referenciada.

Tabela 5 – Parâmetros de ensaio.

p [MPa]	V [m³]	A [m²]	l [m]
0,7	5,376E-5	8,671E-4	6,2E-2

Fonte: Autoria própria.

$$E_p = \int_0^V 0,7E6 \cdot dV \quad (34)$$

$$E_p = \int_0^{6,2E-2} 0,7E6 \cdot Adl \quad (35)$$

$$E_p = 37,631 J \quad (36)$$

A variação de volume dV no interior da câmara é dada pelo produto entre a área transversal da face do projétil em contato com o ar e o comprimento que este percorre desde a posição de repouso até transpor as travas mecânicas presentes no dispositivo de acionamento. A partir deste ponto há vazamento de gás para o meio ambiente, uma vez que o projétil não se encontra mais no interior do flange de condução estando fora de contato com os componentes de vedação.

6.2.2 Ensaios preliminares: CP_E_02 e CP_E_03

Para a execução dos ensaios preliminares, fez-se uso de dois corpos-de-prova fabricados em aço ABNT 1020, confeccionados de acordo com a Figura 35. Como mencionado anteriormente, na seção 6.1.1, a escolha por esta geometria deu-se no intuito de reduzir os efeitos de impedância acústica acrescidos ao dispositivo da SHPB, devido à fixação de corpos-de-prova adaptados a receberem cargas trativas.

Através das filmagens realizadas, pôde-se perceber a ocorrência de mais de um pulso de tração percorrendo o comprimento do corpo-de-prova, uma vez que este necessitou de 1,06 ms, em média, para atingir a ruptura. A Figura 56 traz um diagrama representativo das ocorrências dos pulsos de carregamento em cada um dos pontos de instrumentação, sendo denominado diagrama de Lagrange. As linhas verticais indicam, da esquerda para a direita, a extremidade da barra incidente, o ponto de instrumentação SG1, as interfaces do corpo-de-prova com as barras, o ponto de instrumentação SG2 e a extremidade da barra de transmissão.

Figura 56: Diagrama de Lagrange para interpretação do comportamento dos corpos-de-prova CP_E_01 e CP_E_02. Fonte: Autoria própria.

Pela observação da Figura 56 nota-se que até que o corpo-de-prova atinja a fratura, mais de uma onda percorre a extensão deste. O primeiro pulso (I) a percorrer o comprimento do corpo-de-prova é proveniente da colisão entre o projétil e o anteparo e, possui característica trativa. Ao atingir a interface da barra incidente com o corpo-de-prova, este primeiro pulso (pulso incidente) sofre os efeitos da reflexão (pulso refletido) e da refração (pulso transmitido). Pelo fato do material de testes não atingir a ruptura durante este primeiro carregamento, ao encontrar a interface do corpo-de-prova com a barra de transmissão, uma parcela da onda transmitida sofre reflexão e refração.

O corpo-de-prova permanece sem se romper até que um novo carregamento ocorra na forma de onda trativa, 1,059 ms após a colisão do projétil com o anteparo. O comportamento acústico demonstrado pela Figura 56 condiz com as filmagens obtidas dos corpos-de-prova (CP_E_02 e CP_E_03) deformando-se. O aprisionamento de ondas nesses configura o “efeito sanfona”, o qual ocorre devido à sucessão de pulsos compressivos e trativos no carregamento do material de testes. Este efeito favorece a ocorrência de deslocamentos verticais indesejados nas barras e, conseqüentemente, no corpo-de-prova, como será demonstrado na seção seguinte.

Caso houvesse a utilização de adaptadores para fixação dos corpos-de-prova às barras de ensaios, as impedâncias acústicas envolvidas no ensaio teriam sido muito maiores, assim como a quantidade de reverberações e interferências.

A Figura 57 mostra uma sequência de imagens retiradas da filmagem dos corpos-de-prova CP_E_02 e CP_E_03 deformando-se em função do tempo de ensaio decorrido.

Figura 57: Sequência de imagens dos corpos-de-prova em deformação **(a)** CP_E_02 e **(b)** CP_E_03.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 57 deixa bastante explícita a ocorrência do “efeito sanfona”, uma vez que os corpos-de-prova rompem-se somente após 1,23 ms (para o CP_E_02) e 1,30 ms (para o CP_E_03) do início da deformação do material, o que condiz com o indicado pelo diagrama de Lagrange (Figura 56). Naquele, fica claro a sucessão de carregamentos até a falha completa do material.

6.2.3 Análise dos dados de deformação dos ensaios CP_E_02 e CP_E_03

O pós processamento das filmagens realizadas permitiu o levantamento de algumas informações acerca do comportamento dos corpos-de-prova, inclusive no que diz respeito ao “efeito sanfona”. A verificação do alongamento dos corpos-de-prova foi realizada via análise das imagens obtidas a cada 0,01 ms (100 k quadros/s), as quais registraram o comportamento do material de testes durante o carregamento sofrido. A análise das imagens avaliou a variação da distância entre as faces de referência (Figura 47) ao longo do tempo.

Além do recurso visual oferecido pelas filmagens, após a conclusão do ensaio, realizou-se medições do comprimento final dos corpos-de-prova. As duas partes fraturadas foram unidas, sendo medida a distância entre os pontos de referência por meio de um paquímetro de resolução de 0,05 mm. A Figura 58 traz os dados de deformação temporal dos corpos-de-prova, registrados a cada 0,01 ms, por meio da análise das imagens obtidas.

Figura 58: Taxas de deformação às quais estiveram sujeitos os corpos-de-prova CP_E_02 e CP_E_03. Fonte: Autoria própria.

O registro do aumento repentino da taxa de deformação em meio à queda assinalada pelo perfil hiperbólico descrito na Figura 58 é o indicativo de que o material de testes foi submetido a um segundo carregamento. A deformação dos corpos-de-prova aconteceu de forma intermitente, o que é confirmado pelo decaimento hiperbólico detectado nas curvas das taxas de deformação, o qual indica que a deformação ocorre por efeito da inércia do movimento induzido pelos carregamentos inicial e secundário. Outra confirmação da intermitência das deformações ocorridas nos materiais de testes é apresentada pela Figura 59, a qual traz o alongamento dos corpos-de-prova ao longo do tempo. Há, nestas curvas, a presença de alguns patamares, os quais indicam a falta de alongamento durante alguns períodos de tempo.

Figura 59: Registro do alongamento sofrido pelos corpos-de-prova CP_E_02 e CP_E_03. Fonte: Autoria própria.

As duas rampas registradas na Figura 59, até 0,4 ms de ensaio condizem com as duas ocorrências de carregamento, também indicadas na Figura 58. A terceira rampa, detectada ao final dos ensaios, a partir de 0,95 ms, aparece como consequência do deslocamento da barra de transmissão, após a ruptura dos corpos-de-prova.

A Tabela 6 traz as medidas encontradas pelas medições dos corpos-de-prova após a ruptura, para a dimensão controlada L . A diferença entre as medidas encontradas pelo paquímetro e as calculadas via análise de imagens (Tabela 7), deve-se à colisão ocorrida entre as barras incidente e de transmissão após a ruptura dos corpos-de prova. Na Figura 59, o ponto pertencente ao patamar de 4 mm para o comprimento instantâneo do corpo-de-prova aos 0,9 ms, aproximadamente, representa o instante em que ocorreu a ruptura do material de testes. Após este ponto, o perfil de alongamento indica uma curva ascendente, a qual diz respeito ao deslocamento de ambas as barras após a ruptura dos corpo-de-prova.

Tabela 6– Dados dos ensaios dos corpos-de-prova CP_E_02 e CP_E_03.

Corpo-de-prova	D_s [mm]	L₀ [mm]	L_f [mm]
CP_E_02	2,60±0,05	2,90±0,05	3,80±0,05
CP_E_03	2,60±0,05	2,90±0,05	3,80±0,05

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Comparação entre os dados de alongamento obtidos por ambos os métodos de análise.

Corpo-de-prova	ΔL_{AI} (mm)	ΔL_P (mm)
CP_E_02	0,92	0,90±0,10
CP_E_03	0,91	0,90±0,10

Fonte: Autoria própria.

Uma vez fraturado o corpo-de-prova, a barra incidente deslocou-se com velocidade muito maior que a barra de transmissão, até colidir-se com a placa de choque localizada na extremidade do equipamento. Após esta colisão, a placa de alumínio impulsionou a barra incidente novamente em direção à barra de transmissão, promovendo o choque mecânico entre essas. Este novo impacto ocorreu, na prática, entre as faces fraturadas do corpo-de-prova ensaiado, as quais sofreram um amassamento e nova deformação.

Também por meio da análise da Figura 59, nota-se a ocorrência de oscilações no comprimento do CP_E_03 entre 0,3 e 0,95 ms, enquanto para o CP_E_02 o mesmo não acontece. Essas oscilações são reflexos e consequência da movimentação vertical das barras. Suas extremidades, quando realizavam movimentos de subida e descida, deslocavam os corpos-de-prova, induzindo a estes, alguma oscilação horizontal. Essas foram registradas pela Figura 59, juntamente com o deslocamento vertical.

As curvas mostradas pelas Figuras 60 e 61 demonstram o deslocamento vertical, registrado pela câmera de alta velocidade, referente às extremidades das barras incidente e de transmissão, durante os ensaios dos corpos-de-prova CP_E_02 e CP_E_03, respectivamente.

Figura 60: Deslocamento vertical das barras registrado durante o ensaio do CP_E_02. Fonte: Autoria própria.

Figura 61: Deslocamento vertical das barras registrado durante o ensaio do CP_E_03. Fonte: Autoria própria.

Nota-se, pela observação das Figuras 60 e 61, que o deslocamento vertical das extremidades de ambas as barras coincide com o segundo carregamento do corpo-de-prova e, com a ocorrência de diversos pulsos trativos e compressivos através do comprimento da região útil desse (L). As oscilações na vertical induzem variáveis ao sistema que aumentam a complexidade deste, inviabilizando o modelo matemático previsto para a solução numérica dos carregamentos mecânicos dos materiais.

A Figura 62 mostra o reflexo das oscilações indesejadas nos sinais adquiridos da barra de transmissão através da ponte de Wheatstone. Por meio da análise dessa, percebe-se a presença de picos, cujas amplitudes são exageradamente altas, indicando a presença de variáveis ao sistema, não previstas e ou indesejadas.

Figura 62: Dados de deformação do CP_E_03 obtidos da barra de transmissão. Fonte: Autoria própria.

6.2.4 Análise energética após ensaios CP_E_02 e CP_E_03

Diante da impossibilidade do levantamento preciso dos dados de deformação, via aquisição pelos extensômetros e, da obtenção, por meio da resolução do modelo matemático proposto (seção 4.4), das cargas envolvidas, buscou-se identificar a causa determinante da limitação revelada pela adaptação proposta da SHPB.

Em uma máquina convencional de ensaios mecânicos, do fabricante INSTRON, testou-se um corpo-de-prova feito em aço ABNT 1045. A Figura 63 mostra a curva de carga *versus* deslocamento obtida durante este ensaio. A área

sob a curva (equação (37)) determina a quantidade de energia dispendida durante o ensaio para que o material testado atingisse a ruptura, ou seja, 246,9 J.

$$E_s = F_s dl \quad (37)$$

A fim de obter um parâmetro de comparação com os ensaios realizados na SHPB, determinou-se a energia por unidade de área dispendida durante o teste realizado na máquina da INSTRON a uma taxa de deformação de $0,015 \pm 0,006$ mm/mm/min (ASTM E8/E8M, 2013-a). O corpo-de-prova utilizado neste experimento possuía 19 mm^2 de área transversal. As equações (38) e (39) descrevem a quantidade de energia por unidade de área necessária para romper esse material.

Figura 63: Curva de carga *versus* deslocamento obtida de um ensaio de tração convencional em aço ABNT 1045. Cedida por MIB.

$$\ddot{E}_s = \frac{E_s}{A_s} \quad (38)$$

$$\ddot{E}_s = 12,99 \text{ J/mm}^2 \quad (39)$$

Para os experimentos realizados na SHPB, considerando os corpos-de-prova CP_E_02 e CP_E_03, ao dividir a energia máxima obtida de 37,631 J pela área transversal média dos corpos-de-prova, de 5,241 mm², nota-se que a energia por unidade de área disponível na condição desses dois ensaios (equação (40)) era cerca de 1,8 vez inferior à energia por unidade de área mínima necessária para que o material de testes atingisse a ruptura.

$$\ddot{E}_s = \frac{E_s}{A_s} = \frac{37,398}{5,241} = 7,13 \frac{J}{mm^2} < 12,99 \frac{J}{mm^2} \quad (40)$$

6.3 Conclusões Parciais

A ocorrência do “efeito sanfona” impede a perfeita visualização do comportamento do material de testes durante o carregamento dinâmico, apenas pelo uso das pontes de Wheatstone, além de inviabilizar a determinação da taxa de deformação à qual o material está sujeito.

Da mesma forma, a determinação das cargas dinâmicas envolvidas nos ensaios mecânicos fica prejudicada pelo efeito sanfonado sofrido pelos corpos-de-prova, visto que as reverberações, de alta frequência, inserem ruídos aos sinais de deformação obtidos pelos extensômetros. Estes ruídos podem ser encarados como variáveis extras, as quais são inseridas ao sistema a partir do instante em que a onda transmitida percorre o corpo-de-prova e este não falha.

O *trigger* utilizado não foi suficiente para garantir a sincronização dos sistemas de aquisição dos dados de deformação. Detectou-se que o tempo que a corrente elétrica leva para percorrer o cabo de acionamento é maior que os 0,069 s necessários para que o projétil atinja o anteparo, somados aos 0,27 ms da propagação da onda de choque até a primeira ponte de Wheatstone. Portanto, o tempo de *trigger* é maior que 0,06927 s. A fim de registrar cada movimento relativo à deformação dos corpos-de-prova, necessitou-se lançar mão de tempos de pré-*trigger* e pós-*trigger* de 1 s cada.

Uma alternativa para a redução do tempo de carregamento dos equipamentos de medição, após o *trigger*, foi a troca da posição do botão de acionamento no circuito elétrico apresentado na Figura 41, o qual passou ao final deste, após a saída de sinal à 10 V.

A correção do intervalo de gravação, tanto da filmagem, quanto dos dados oriundos das pontes de Wheatstone, por meio da seleção de uma janela de 2 s não foi eficaz. Os tempos de resposta de acionamento do trigger, do amplificador MX410 e da câmera i-SPEED 3 são distintos entre si. Isto não permitiu a sincronização dos dados de deformação, por ambos os métodos de aquisição.

O equipamento mostrou-se ineficiente em romper os corpos-de-prova durante a propagação de uma única onda trativa, ao longo do comprimento L do material de testes. Assim foi necessário aumentar a pressão interna da câmara de pressurização para, no mínimo, 1,3 MPa, desconsiderando-se qualquer perda por atrito, vazamentos, etc.

6.4 Melhorias Propostas após testes preliminares

- i. Redução do diâmetro das barras incidente e de transmissão, as quais passariam a ter $\varnothing 3/4"$;
- ii. Acréscimo de um sistema de amortecimento na extremidade da barra incidente, de modo a evitar que após a ruptura do material de testes a barra impacte no suporte de rolamentos posicionado após o anteparo e inverta a direção de deslocamento e colida com a superfície fraturada do corpo-de-prova, dificultado a análise visual do material fraturado.
- iii. Aumento da pressão de trabalho no interior da câmara de pressurização por meio da colocação de um cilindro externo.
- iv. Validação da sincronização dos sistemas de aquisição de dados de deformação dos corpos-de-prova.
- v. Realização da calibração das células de carga.

7 VERSÃO ADAPTADA DO EQUIPAMENTO DE ENSAIOS DE TRAÇÃO EM ALTA VELOCIDADE

7.1 Materiais e Métodos

A revisão do equipamento (Figura 64) trouxe as seguintes melhorias construtivas:

- Duas barras (incidente e de transmissão) com diâmetros de $\frac{3}{4}$ " cada uma, sob a justificativa de tornar ambos os elementos elásticos mais sensíveis à propagação das ondas de choque. O comprimento de ambas foi mantido em 2,0 m, conforme proposta original;
- A redução dos diâmetros externo e interno, e do comprimento da barra guia, de modo a reduzir as perdas por atrito durante a travessia do projétil pela extensão da barra;
- Redução do diâmetro interno do projétil, tornando-o mais pesado e propiciando o aumento da energia cinética;
- Substituição dos componentes de vedação por itens cujo funcionamento seja garantido aos novos carregamentos nominais maiores que os anteriormente utilizados;
- Alteração da geometria dos corpos-de-prova em função da redução do diâmetro das barras;
 - Inclusão de um sistema de amortecimento do anteparo;
 - Diminuição das grades dos extensômetros;
 - Instrumentação no centro das barras (Figura 65);
 - Aumento da taxa de aquisição dos dados de deformação para 192 kHz,
 - Alteração no posicionamento do transformador no circuito do *trigger*;
 - Fixação do anteparo na barra incidente; e
 - Uso da técnica da transformada de Gabor.

Figura 64: Revisão do equipamento para atendimento das especificações do ensaio de tração em alta velocidade. Fonte: Autoria própria.

Figura 65: Dimensões das barras incidente e de transmissão, utilizadas na versão adaptada do equipamento (dimensões em mm) Fonte: Autoria própria.

7.1.1 Definição da geometria dos corpos-de-prova

A fim de tornar a confecção dos corpos-de-prova mais rápida e facilitada, permitindo a realização do maior número possível de ensaios de avaliação do equipamento, a geometria dos corpos-de-prova foi alterada, de acordo com o

apresentado na Figura 66. Esta nova configuração ainda segue as recomendações da norma ASTM E8/E8M, 2013-a (Figura 36). No entanto, algumas dimensões precisaram ser modificadas, buscando manter uma proporcionalidade com as da norma, devido à impossibilidade de segui-las fielmente (Figura 66). Apesar daquela não fazer menção ao uso de roscas, a incorporação dessas visou uma redução no tempo de setup.

Os corpos-de-prova passaram a ter roscas esquerda e direita de medidas M8x1,25 mm (Figura 66). Para as barras, usinou-se, na extremidade de uma delas, uma rosca direita e, para a extremidade da outra, uma rosca esquerda, ambas de dimensão M*x1,25 mm., conforme Figura 66. Desta forma, um único movimento de rotação passou a ser suficiente para garantir a fixação.

Figura 66: Corpo-de-prova utilizado após revisão de projeto (dimensões em mm), com região útil de 10 mm. Fonte: Autoria própria.

Visando reduzir o tempo necessário para a ruptura do material, os novos corpos-de-prova foram usinados com uma região útil menor, conforme apresentado na Figura 67.

Figura 68: Desenho técnico mecânico do projétil após revisão (dimensões em mm. Fonte: Autoria própria).

7.1.3 Sistema de travamento e acionamento

O sistema de travamento e acionamento não sofreu alterações de projeto. Seu posicionamento foi alterado devido ao ganho de 5 mm no comprimento do projétil. A utilização de calços espaçadores foi suficiente para garantir a nova posição do pistão pneumático em relação à câmara de pressurização.

7.1.4 Aquisição dos dados de deformação

Após as revisões terem sido realizadas no equipamento, optou-se por dobrar a taxa de aquisição dos sinais de deformação (192 kHz), o que somente foi possível ao abrir mão do uso do terceiro canal de entrada do módulo. Neste novo cenário eletrônico o *trigger* da câmera filmadora manteve-se conforme descrito anteriormente. Porém, para a aquisição dos dados de deformação dos extensômetros, via amplificador, o *trigger* passou a ser o sinal de interferência proveniente do botão de acionamento do movimento do pistão pneumático.

Os canais de entrada das pontes de Wheatstone eram capazes de detectar este ruído no momento exato em que o botão em questão era acionado (Figura 69). O pico em torno de 0,4 *microstrain* registrado à 0,2 s, de acordo com a Figura 69, indicava o momento preciso do acionamento do pistão pneumático.

Uma vez constatada a possibilidade de detectar o mesmo sinal emanado pelo botão de acionamento pelos dois sistemas de aquisição (amplificador e câmera), o software Catman Easy fora preparado para iniciar a aquisição a partir da identificação deste pico característico no modo de *trigger* (Figura 70). A fim de se obter a resposta no menor tempo possível, a programação do software fora feita de modo a prever o início da aquisição a partir da detecção de uma rampa crescente de amplitude de $0,01 \mu\text{m/m}$ em CH1.

Intervalos de pré-trigger e de duração da operação de registro dos sinais foram previstos nessa revisão do projeto. No caso de haver qualquer falha no sistema de acionamento e ou de aquisição, para um atraso de até 1 s ou para uma antecipação de até 0,2 s, os dados de deformação seriam preservados e armazenados na memória do computador dedicado aos ensaios mecânicos. A mesma janela para captação de dados fora criada para a aquisição com a câmera i-SPEED 3.

Figura 69: Sinal de *trigger* por meio da interferência do sinal de acionamento do disparo do projétil.
Fonte: Autoria própria.

Figura 70: Configuração do software Catman Easy para aquisição dos dados de deformação das barras a partir de um sinal de *trigger*. Fonte: Autoria própria.

O circuito elétrico desenvolvido para atuar na conversão do sinal de saída do botão de acionamento (Figura 41) foi modificado. De acordo com o apresentado na Figura 71, objetivou-se a redução do *delay* intuito de reduzir o delay existente entre a emissão do sinal de saída do botão e o início da aquisição dos dados de deformação, por ambos os sistemas utilizados.

Posicionou-se o transformador anteriormente à entrada do sinal enviado pelo botão de acionamento, podendo assim, reduzir o tempo de resposta do circuito.

Figura 71: Circuito modificado para sincronização de sinais de aquisição. Fonte: Autoria própria.

7.1.5 Instrumentação

Após a revisão do projeto, optou-se pela manutenção da ponte de Wheatstone completa com extensômetros cujas resistências internas eram de 350 Ω . Todavia, comprimentos de grade menor, de apenas 1 mm, foram utilizados.

A substituição dos sensores por modelos de menor grade, por sua vez, fez-se necessária para que a sensibilidade do sistema de medição pudesse ser aumentada, diminuindo o “fundo de escala” dos sensores. O fato de que na configuração original da ponte de Wheatstone os ruídos possuíam amplitudes muito próximas dos sinais de interesse obrigou a redução do fundo de escala, de modo a melhorar a resolução do amplificador de sinais. As equações de (41) a (44) esclarecem as limitações anteriormente existentes e as comparam com a proposta de utilização dos extensômetros KFG-1-350-C1-11 do fabricante Kyowa.

Os extensômetros utilizados anteriormente possuíam como fundo de escala uma grade de 5 mm, enquanto o erro de leitura era de 1%. Portanto, a mínima deformação possível de ser detectada era de 0,05 mm, conforme equação (41). Quando convertido para *microstrain*, observa-se que o erro era de 25 $\mu\text{m}/\text{m}$, de acordo com a equação (42).

$$\text{erro}_{SG} = 0,01 \cdot 5 = 0,05 \text{ mm} \quad (41)$$

$$\text{erro}_{SG} = \frac{0,05}{2000} = 25 \mu\text{m}/\text{m} \quad (42)$$

A equação (44) evidencia que, para uma tensão máxima no corpo-de-prova, em regime elástico, de aproximadamente 350 MPa, a deformação máxima detectada pela ponte de Wheatstone, localizada em SG1, deveria ser de aproximadamente 29 $\mu\text{m}/\text{m}$.

$$\varepsilon_i = \sigma \cdot \frac{A_s}{A_b} \cdot \frac{1}{E} \quad (43)$$

$$\varepsilon_i = 350 \cdot \frac{2,5^2}{19,05^2} \cdot \frac{1}{205E3} = 29,404 \mu\text{m}/\text{m} \quad (44)$$

O fato do maior valor medido ser da mesma ordem de grandeza do erro de medição, obrigou a troca dos extensômetros por novos sensores cuja grade

sensorial era de 1 mm, reduzindo, portanto, o fundo de escala e, conseqüentemente, o erro intrínseco à instrumentação realizada.

7.1.6 Transdutor de força e momento

Além da opção por extensômetros de menor grade, na construção da célula de carga realizou-se a mudança no sentido de aplicação das grades dos extensômetros em relação às barras. Para as novas células de carga os quatro sensores foram colados sobre a superfície das barras com as respectivas grades voltadas para a direção axial dos elementos elásticos.

A opção pela rotação do sentido de aplicação das grades de dois dos sensores, por ponte, deu-se pelo fato de que, na configuração de distribuição das resistências na ponte, os efeitos provenientes de esforços de flexão são automaticamente minimizados. A disposição física dos sensores, que anteriormente ficavam posicionados de modo a manterem suas grades paralelas à seção transversal das barras, foi outro aspecto determinante na decisão pela inversão do sentido de aplicação dos sensores, quando da diminuição dos diâmetros das barras.

A aplicação das grades de medição dos sensores sobre superfícies circulares, na forma como haviam sido colados anteriormente, insere às leituras registradas por eles, uma deformação inicial indesejada. A redução do diâmetro das barras de 1" para $\frac{3}{4}$ " somente maximizaria este efeito, caso a disposição dos sensores na superfície do aço fosse mantida conforme proposta original. Diante deste fenômeno, optou-se pelo alinhamento das grades dos quatro extensômetros utilizados na formação da ponte com o eixo principal das barras.

O espaçamento de 90° entre as resistências elétricas foi mantido, conforme Figura 43.

7.1.7 Setup

7.1.7.1 Preparação da SHPB e montagem dos corpos-de-prova

Os mesmos procedimentos de limpeza, alinhamento e instalação do projétil, anteriormente à do anteparo, supracitados, mantiveram-se após a revisão do projeto da SHPB adaptada para ensaios em tração.

7.1.7.2 Instalação da câmera de alta velocidade e sistemas de iluminação

O procedimento aqui segue exatamente o mesmo descrito na seção 6.1.7.2 a não ser por um detalhe: devido a alteração geométrica do corpo-de-prova e a supressão dos escalonamentos diametrais utilizados como referência para a análise das imagens, outro método de identificação do comprimento original e do alongamento do material em teste precisou ser aplicado.

Com o auxílio de marcador permanente, duas marcas simétricas em relação ao centro do corpo-de-prova, espaçadas uma da outra a uma distância previamente determinada (5 mm para os corpos-de-prova menores e 10 mm para os maiores), foram feitas na superfície circular do material. Durante a focalização do corpo-de-prova pela lente da câmera de alta velocidade, essas marcas ficavam em evidência, tornando-se os pontos de referência para a análise posterior das imagens do ensaio.

7.1.8 Calibração

Para os novos sensores, a calibração adotada seguiu orientações da HBM para o melhor aproveitamento do amplificador, associado ao software. Nesse caso, criou-se uma curva de calibração linear unicamente construída pelo software, sem que houvesse sequer a mínima solicitação mecânica das células de carga.

Tendo em vista a curva anteriormente obtida pela técnica de içamento de massas conhecidas (Figura 50), a técnica aqui relatada pouco difere, em termos de precisão, quando comparadas. Para o primeiro método, o resultado obtido foi uma curva de calibração linear, ou seja, de comportamento idêntico à proposta da HBM, a qual consistia exatamente na construção de uma curva linear.

De fato, a resposta durante a prática de calibração deveria ser linear, visto que, neste processo, a barra encontra-se no regime elástico de carregamento e, portanto, seu comportamento, quando solicitada mecanicamente, é regido pela lei de Hooke. A Figura 72 traz a tela de configuração dos parâmetros do sensor tipo ponte completa (*full bridge*). Nota-se que a curva é construída por apenas dois pontos: o ponto zero, livre de carregamento e o fundo de escala, ou seja, o valor nominal do sensor. O parâmetro sensibilidade do sensor é quem determina a inclinação da curva.

Figura 72: Parametrização do sensor ponte de Wheatstone (imagem retirada do software Catman Easy) Fonte: Autoria própria.

Para que o fundo de escala indicado pela calibração do sensor fosse condizente com o fundo de escala real da medição, um fator de correção de fundo de escala, k , no valor de 5, precisou ser utilizado. Quando os extensômetros estivessem 100% deformados, ou seja, com 1 mm de alongamento, esta deformação representaria, em 2000 mm de comprimento de barra, uma deformação de $5E-4$, ou $500 \mu\text{m/m}$ (*microstrain*).

Para a calibração do software i-SPEED suite da Olympus, utilizou-se exatamente o mesmo método empregado anteriormente e descrito na seção 6.1.8. A mudança na geometria adotada para os corpos-de-prova obrigou a realização de uma nova calibração que fosse representativa deste novo lote de testes. A tela de calibração do software i-SPEED suite é mostrada pela Figura 73, na qual é possível verificar na porção inferior da tela de visualização (à esquerda), a região de interesse do corpo-de-prova e, na porção superior, a colocação de uma régua. As marcações referentes aos algarismos 7 e 8 foram utilizadas como “*set points*” (entradas) para a conversão dos 10 mm existentes entre elas na quantidade de *pixels* equivalente ($4,4 \text{ pixels/mm}$).

Figura 73: Método de calibração adotado para os corpos-de-prova de geometria segundo a revisão do projeto do equipamento (imagem retirada do software i-SPEED suite). Fonte: Autoria própria.

7.1.9 Métodos para análises e apresentação dos resultados

O tratamento dos sinais após aquisição a 192 kHz foi realizado por meio de recursos oferecidos pelos softwares Catman Easy e i-SPPED Suite, além da utilização do Lab View 9.0, no qual foram desenvolvidas algumas rotinas capazes de analisar o comportamento das curvas de deformação no domínio das frequências e identifica-las no domínio do tempo. Para a identificação das frequências instantâneas fez-se uso da técnica da transformada de Gabor.

Assim como para os experimentos realizados previamente, os corpos-de-prova tiveram suas dimensões principais (comprimento e diâmetro) medidas antes e após a realização dos ensaios. Os resultados serão apresentados ao longo do texto e utilizados para comparação com os dados de deformação registrados pelos extensômetros.

7.2 Resultados e Discussões

A fim de testar o novo conceito do equipamento após a revisão do projeto, quatro corpos-de-prova foram ensaiados. O material utilizado para a confecção dos corpos-de-prova foi o aço ABNT 1020, em função do baixo limite de resistência (aproximadamente 350 MPa) e pelo fato de ter sido o mesmo material utilizado anteriormente na fabricação dos corpos-de-prova CP_E_02 e CP_E_03. Desta forma, poderia haver uma comparação direta entre os resultados obtidos em ambos os casos.

Nesta etapa de testes houve uma seleção da quantidade de corpos-de-prova usinados de modo a obter comprimentos úteis de 5 e 10 mm. A identificação dos corpos-de-prova seguiu como critério o uso da letra R do alfabeto (referência à versão revisada do equipamento de testes) seguida pelos números sequenciais de 1 a 11. Os números 5 e 6 foram descartados por motivos de falha que serão apresentados posteriormente. Para os corpos-de-prova cujo comprimento útil era de 10 mm utilizou-se os números de 1 a 4, enquanto os demais algarismos foram empregados para identificar aqueles cuja região de interesse possuía 5 mm de comprimento inicial, aproximadamente.

7.2.1 Estudo da velocidade e energia do projétil

As modificações supracitadas influenciaram diretamente no aumento da energia acumulada no projétil, com consequente aumento de velocidade linear deste ao final do percurso ao longo da barra guia. Para a determinação da velocidade do projétil nesse instante lançou-se mão do mesmo método empregado anteriormente, do qual resultou uma velocidade aproximada de 10,28 m/s.

A perda energética durante o carregamento do projétil foi consideravelmente reduzida (em cerca de 14,28%), conforme apresentado na Tabela 8. Esta traz a comparação entre a pressão máxima de trabalho e a variação volumétrica no interior do flange para as duas configurações de equipamento.

Fazendo-se uso da equação (26) e dos dados paramétricos mostrados pela Tabela 8, pôde-se estimar a energia total disponível no projétil. As equações (45) e (46) trazem o desenvolvimento deste cálculo.

Tabela 8 – Comparação entre os parâmetros de ensaio conseguidos para as configurações original e revisada do projétil.

Versão	p [MPa]	V [m ³]	A [m ²]	l [m]
Original	0,7	5,376E-5	8,671E-4	6,2E-2
Revisada	0,8	1,039E-4	1,551E-3	6,7E-2

Fonte: Autoria própria.

$$E_p = \int_0^V p \cdot dV \quad (45)$$

$$E_p = \int_0^{6,7E-2} 0,8E6 \cdot A \cdot dl \quad (46)$$

$$E_p = 83,14 J \quad (47)$$

Comparativamente ao caso anterior, o novo projétil apresentou um ganho de mais de 120% em energia mecânica disponível. Este aumento deve-se ao incremento na massa do projétil e à substituição do sistema de vedação por um mais eficiente.

7.2.2 Ensaio R1 a R4

Os ensaios realizados com os corpos-de-prova de maior comprimento demonstraram que, para estes casos, o material levou um intervalo de tempo para fraturar semelhante ao registrado para os CP_E_02 e CP_E_03. A Tabela 9 traz os tempos necessários para falha de cada corpo-de-prova, os valores de alongamento aferidos pela medição com paquímetro e pela análise de imagens.

Tabela 9 – Alongamento máximo dos corpos-de-prova registrado durante carregamento dinâmico do material.

Corpo-de-prova	Δt [ms]	ΔL_{AI} [%]	ΔL_P [%]
R1	1,07	30,23	24,44
R2	1,93	54,84	56,00
R3	0,17	24,00	28,70
R4	1,03	28,89	23,00
Média	1,05	34,49	33,04

Fonte: Autoria própria.

Por meio da observação da Tabela 9, nota-se que os dados retirados das imagens estão próximos dos medidos por um paquímetro. A incerteza de medição do paquímetro foi de 0,05 mm, enquanto para o método de análise de imagens a incerteza era equivalente a 0,5 *pixel* (metade da menor medida), o que equivaleria a 0,11 mm, tomando como base a calibração descrita na seção 7.1.8. O tempo médio para a ruptura do corpo-de-prova fosse atingida: 1,05 ms. A média de tempo que os corpos-de-prova CP_E_02 e CP_E_03 levaram para romperem-se foi de 1,265 ms.

Outra possível fonte de imprecisão na verificação do alongamento por meio do uso de um instrumento mecânico de medição está no fato de que, após a ruptura do corpo-de-prova, o anteparo colide-se com o amortecedor existente na extremidade do equipamento. Devido ao anteparo estar consolidado à barra incidente, esta, após a colisão entre anteparo e amortecedor, desenvolve velocidade contrária ao movimento original e desloca-se em direção à barra de transmissão, chocando-se contra ela.

O impacto entre as barras pode promover amassamento das superfícies de fratura e uma flexão nos pedaços rompidos do corpo-de-prova (Figura 74), podendo comprometer as medições realizadas. Este efeito evidencia a necessidade de melhorar o fator de amortecimento envolvido no equipamento.

Por meio da observação da Tabela 9 pode-se determinar o tempo médio para que a ruptura do corpo-de-prova fosse atingida: 1,05 ms.

Figura 74: Momento da colisão entre as barras incidente e de transmissão após a fratura do corpo-de-prova. Fonte: Autoria própria.

7.2.3 Análise dos dados de deformação dos ensaios R1 a R4

O tipo de fratura dúctil detectada em todos os corpos-de-prova condiz com o comportamento previamente esperado para um aço de baixo carbono ABNT 1020. A Figura 75 traz uma fotografia dos corpos-de-prova R1, R2, R3 e R4, tirada após a fratura dos mesmos. Nota-se a presença do fenômeno do “empescoçamento”, o qual pode ser confirmado pela redução de área detectada ao longo dos ensaios mecânicos. Na Figura 75 pode-se visualizar as marcas feitas pelo marcador permanente e o efeito causado pela colisão entre as partes fraturadas após o ricocheteio da barra incidente.

Figura 75: Fotografia dos corpos-de-prova, de 10 mm de comprimento útil, após serem fraturados. De cima para baixo: R1, R2, R3 e R4. Fonte: Autoria própria.

A Tabela 10 traz os resultados das variações linear e quadrática obtidas nos testes R1 a R4.

Tabela 10: Dados de variação linear e quadrática para os corpos-de-prova de R1 a R4.

Corpo-de-prova	ΔL_P [mm]	ΔL_P [%]	ΔA [mm ²]	ΔA [%]
R1	2,20	24,44	2,44	51,85%
R2	5,60	56,00	3,68	75,00%
R3	3,30	28,70	1,98	43,75%
R4	2,30	23,00	3,14	64,00%

Fonte: Autoria própria.

A Figura 76 traz a curva do alongamento sofrido pelos corpos-de-prova durante os ensaios, enquanto a Figura 77 reproduz a curva de deformação no tempo. Já a Figura 78 traz a oscilação da taxa de deformação durante carregamento mecânico dos materiais. Para os três casos apresentados, os dados foram extraídos da análise das imagens do alongamento dos corpos-de-prova, pela determinação da distância instantânea entre os dois pontos marcados na superfície de interesse de cada material.

Figura 76: Registro do alongamento sofrido pelos corpos-de-prova R1, R2, R3 e R4. Fonte: Autoria própria.

Figura 77: Deformação sofrida ao longo do tempo pelos corpos-de-prova R1, R2, R3 e R4. Fonte: Autoria própria.

Figura 78: Taxas de deformação às quais estiveram submetidos os corpos-de-prova R1, R2, R3 e R4. Fonte: Autoria própria.

Na Figura 78, os sucessivos picos, para as quatro curvas registradas, indicam a ocorrência de mais de um carregamento durante o intervalo de tempo dentro do qual ocorre o ensaio, ou seja, dos 1,05 ms, em média. O registro de taxas de

deformação nulas indica que durante alguns períodos de tempo o material de testes não esteve submetido a carregamento, ou seja, entre uma imagem e outra registradas pela câmera, o comprimento do corpo-de-prova manteve-se constante. A interpretação desta resposta será dada no capítulo 8.

A Figura 79 traz a variação da taxa de deformação em função do tempo, considerando apenas os picos registrados pela Figura 78, ressaltando a tendência dos corpos-de-prova durante o carregamento dinâmico.

Os degraus indicados nas curvas registradas pela Figura 79 representam os sucessivos carregamentos, assim como os picos registrados na Figura 78. Este fato sugere a passagem de mais de um pulso de onda trativo pelo comprimento dos corpos-de-prova.

Figura 79: Taxas de deformação às quais estiveram submetidos os corpos-de-prova R1, R2, R3 e R4, enquanto solicitados mecanicamente. Fonte: Autoria própria.

7.2.4 Análise energética após ensaios R1 a R4

De acordo com os dados trazidos pela Tabela 8 e desenvolvimento das equações (45) a (47), o corpo-de-prova possui 83,14 J disponíveis para alongar-se e romper-se, desprezando qualquer perda energética entre o momento do impacto do projétil com o anteparo e a ruptura do material de testes. Assim, a quantidade de

energia por unidade de área, considerando-se 2,5 mm de diâmetro (vide Figura 67), é de 16,94 J/mm². Esta quantidade é maior que os 12,99 J/mm² (seção 6.2.4) mínimos necessários. Entretanto, são grandezas muito próximas, quando consideradas as possíveis perdas existentes.

A ocorrência de mais de um carregamento trativo até que os corpos-de-prova R1, R2, R3 e R4 atingissem a falha indica que a energia mecânica disponível para a realização dos ensaios foi insuficiente para promover a ruptura do material durante a passagem de um único pulso de onda. O fato de o tempo médio necessário para que o material fraturasse ter sido semelhante ao registrado para os corpos-de-prova CP_E_01 e CP_E_02, já era um indício bastante forte de que a energia fornecida às barras no momento do impacto entre projétil e anteparo, teria sido insuficiente para que o comportamento desejado fosse atingido.

Apesar de as perdas terem sido minimizadas com a melhora da vedação do projétil no interior da câmara, ao manter a pressão de trabalho na mesma ordem de grandeza da anteriormente utilizada, o ganho de energia disponível aos ensaios não mostrou-se suficiente.

7.2.5 Ensaios R7 a R11

A fim de se obter respostas comportamentais diferenciadas para o mesmo lote de material, cinco exemplares dos corpos-de-prova de comprimento útil equivalente a 5 mm foram fabricados (Figura 67). Diferentemente do observado para os quatro testes anteriores, R1 a R4, esperava-se que R7 a R11 rompessem durante um único carregamento mecânico. Prevvia-se um tempo de ruptura menor que o 1,05 ms detectado e, portanto, um alongamento de 15%, aproximadamente, com redução de área em torno de 40% e limite de escoamento ligeiramente acima de 350 MPa, em concordância com os dados da literatura para o aço ABNT 1020, sob condições de carregamento estático (Matweb, 2014).

A Tabela 11 traz os tempos necessários para que cada corpo-de-prova falhasse, os resultados de alongamento medido por meio de um paquímetro (ΔL_P) e os obtidos pela análise de imagens (ΔL_{AI}). Assim como registrado para o lote anterior de ensaios, há uma pequena diferença entre os resultados de alongamento medidos por meio da análise de imagens e pelo paquímetro, resultado das diferentes técnicas utilizadas e incertezas na medição associadas

O problema registrado pelo amassamento das partes rompidas dos corpo-de-prova foi bem menos relevante que para o caso anterior, visto que a região de interesse nos corpos-de-prova de R7 a R11 era cerca de 100% menor que a existente nos corpo-de-prova para os quais este comprimento era de 16 mm. A Figura 80 traz uma fotografia tirada dos espécimes após a ruptura. Observando-se novamente a Tabela 11, determinou-se que o tempo médio para que a ruptura do corpo-de-prova fosse atingida esteve em torno de 0,18 ms.

Tabela 11 – Alongamento máximo dos corpos-de-prova registrado durante carregamento dinâmico do material.

Corpo-de-prova	Δt [ms]	ΔL_{AI} [%]	ΔL_P [%]
R7	0,09	52,63	51,43
R8	0,11	61,11	56,67
R9	0,11	62,50	53,33
R10	0,35	48,48	52,00
R11	0,23	87,50	87,14
Média	0,18	62,44	60,11

Fonte: Autoria própria.

Figura 80: Fotografia dos corpos-de-prova, de 5 mm de comprimento útil, após terem sido fraturados. De cima para baixo: R7, R8, R9, R10 e R11. Fonte: Autoria própria.

7.2.6 Análise dos dados de deformação dos ensaios R7 a R11

Os dados de comprimento instantâneo, deformação instantânea, a taxa de deformação real e taxa de deformação sob a qual o material esteve sujeito somente enquanto carregado para os testes R7 a R11 são apresentados nas Figuras 81 a 84, respectivamente. Os valores de deformação foram obtidos após a análise das imagens registradas pela câmera i-SPEED 3.

Figura 81: Registro do comprimento dos corpos-de-prova em função do tempo de ensaio. Fonte: Autoria própria.

A análise da Figura 81 permite perceber a ocorrência de mais de um carregamento durante o alongamento dos corpos-de-prova R10 e R11. Os patamares registrados para o alongamento destes CPs (a partir de 0,10 ms para R10 e, de 0,15 ms para R11) indicam que durante os curtos períodos de tempo em que estes existiram, os materiais testados mantiveram-se com o comprimento constante, ou seja, sem se deformarem.

Cada rampa que antecede um patamar confirma a ocorrência de uma solicitação mecânica e, conseqüentemente, uma elongação do material, comprovando a passagem de sucessivas ondas trativas através do comprimento dos corpos-de-prova.

Figura 82: Deformação instantânea sofrida por cada corpo-de-prova durante ensaios. Fonte: Autoria própria.

Por meio da comparação dos dados de deformação registrados para os corpos-de-prova de comprimento útil de 5 mm (Figura 82) e 10 mm (Figura 76), nota-se que, para os corpos-de-prova de menor comprimento o alongamento máximo detectado foi maior que para os corpos-de-prova de maior comprimento. Provavelmente, este efeito explica-se pelo fato de que, para os comprimentos de 5 mm de região útil (Figura 82), a dissipação de energia pelo equipamento foi menor que a dissipação que ocorre durante o carregamento dos corpos-de-prova de 10 mm de comprimento útil (Figura 76).

O maior número de ondas que atravessou o comprimento dos materiais de testes durante os ensaios do primeiro lote pode ter sido sinônimo de maior perda energética, uma vez que o pulso original (proveniente da colisão entre projétil e anteparo) necessitou de um maior número de reflexões e refrações até que os corpos-de-prova atingissem a ruptura.

O fato de os corpos-de-prova R1 a R4 terem levado mais tempo para se romper (1,05 ms, de acordo com a Tabela 9), que os do segundo lote de ensaios (0,18 ms, conforme Tabela 11), somado ao registro das menores deformações ao final dos testes –conforme supracitado –, indica uma menor eficiência energética do equipamento durante a execução desses ensaios.

Figura 83: Taxas de deformação reais às quais estiveram submetidos os corpos-de-prova R7, R8, R9, R10 e R11. Fonte: Autoria própria.

Figura 84: Taxas de deformação às quais estiveram submetidos os corpos-de-prova R7, R8, R9, R10 e R11, enquanto solicitados mecanicamente. Fonte: Autoria própria.

Na Figura 83 os sucessivos picos indicam, cada um deles, a ocorrência de um carregamento mecânico distinto e a passagem de uma onda trativa ao longo do comprimento do corpo-de-prova ensaiado. Os vales e registros de taxas de deformação nulas são indicativos de que o material em teste mantinha o comprimento constante durante o instante ou intervalo de tempo correspondente.

Na Figura 84 a confirmação da ocorrência de diversos pulsos de onda através do comprimento do material testado é dada pela existência de degraus em cada curva. O comportamento destoante dos corpos-de-prova R10 e R11 em comparação aos demais pode ser um indício de ter havido, durante a pressurização da câmara de gás, uma oscilação na pressão de carregamento. Da mesma forma, pode indicar um aumento na perda energia devido a um maior contato entre os rolamentos e as barras durante a movimentação destas, maximizando o atrito.

É possível perceber pela análise das Figuras 83 e 84 a variação da taxa de deformação à qual o material esteve sujeito durante os ensaios. Conforme o material era esticado, as ondas de tração levavam mais tempo para poder atravessar todo o comprimento dos corpos-de-prova e, conseqüentemente, a velocidade em que as partículas do material se alongavam era reduzida. As taxas de deformação variaram entre a faixa de 2000 s^{-1} a 7000 s^{-1} .

A Tabela 12 evidencia o intervalo de tempo referente a cada ensaio.

Tabela 12 – Intervalos de tempo dentro dos quais cada evento ocorreu, de acordo com curvas obtidas pela ponte de Wheatstone identificada por SG1.

Corpo-de-prova	t_{inicial} [ms]	t_{final} [ms]	Δt[ms]
R7	235,936	236,026	0,09
R8	208,965	209,075	0,11
R9	209,720	209,830	0,11
R10	211,180	211,530	0,35
R11	209,925	210,155	0,23

Fonte: Autoria própria

Para os registros oriundos de SG2, os eventos de interesse, para cada corpo-de-prova ensaiado, estariam localizados a aproximadamente 0,396 ms (tempo necessário para que a onda percorresse a distância entre SG1 e SG2) a partir do instante t_{inicial} identificado para SG1. Entretanto, o erro de leitura associado aos extensômetros utilizados era de 1% do fundo de escala. Como a configuração de sensor utilizado pelo Catman Easy considerava fundo de escala de $100 \mu\text{m/m}$, 1% representaria a medida de $1 \mu\text{m/m}$. Outrossim, qualquer ponto das curvas dadas por SG2 (Figuras de 85 a 89) que estivesse localizado a 0,396 ms de SG1 estaria dentro

da faixa de erro de leitura dos sensores. Diante desta imprecisão, os valores obtidos por SG2, para todos os casos, foram desconsiderados nas análises.

Figura 85: Dados originais de deformação registrados em SG1 e SG2 para o corpo-de-prova R7.
Fonte: Autoria própria.

Figura 86: Dados originais de deformação registrados em SG1 e SG2 para o corpo-de-prova R8.
Fonte: Autoria própria.

Figura 87: Dados originais de deformação registrados em SG1 e SG2 para o corpo-de-prova R9.
Fonte: Autoria própria.

Figura 88: Dados originais de deformação registrados em SG1 e SG2 para o corpo-de-prova R10.
Fonte: Autoria própria.

Figura 89: Dados originais de deformação registrados em SG1 e SG2 para o corpo-de-prova R11.
Fonte: Autoria própria.

7.2.7 Análise energética e identificação dos eventos após execução dos ensaios de R7 a R11

Para a identificação do intervalo correspondente à ocorrência do evento para cada corpo-de-prova (detectadas por SG1 e por SG2), lançou-se mão do diagrama de Lagrange, assim como do método da transformada de Gabor. A Figura 90 mostra um diagrama de Lagrange esquemático que representa os efeitos sofridos pela onda original no equipamento SHPB em questão. Os pulsos que atingiram o corpo-de-prova, localizado no centro do diagrama, foram identificados, com base na velocidade da frente de onda, a fim de facilitar a interpretação dos efeitos.

Figura 90: Digrama de Lagrange para interpretação dos efeitos sucessivos em R7, R8, R9 e R10 e R11. Fonte: Autoria própria.

Nota-se, por meio da observação da Figura 90, a presença de diversos pulsos consecutivos, espaçados um do outro por apenas 0,024 ms, aproximadamente. Este intervalo é determinado pela reflexão da onda nas duas extremidades do anteparo, conforme indicado pelos pulsos de I a IV. No diagrama, os pulsos que “caminham” da esquerda para a direita possuem característica trativa, enquanto os que percorrem a extensão dos componentes metálicos, da direita para a esquerda, possuem característica compressiva.

Os eixos verticais da esquerda e da direita, indicados na Figura 90, representam o tempo percorrido desde o impacto entre o projétil e o anteparo (ponto zero). As ondas de XIII a XVII atingiram a interface da barra incidente com o corpo-de-prova, 1,198 ms após a colisão entre os componentes supracitados. Estas parcelas da onda de choque original foram oriundas das reflexões dos pulsos de I a IV na interface da barra incidente com o corpo-de-prova, a 0,391 ms do choque mecânico. Somente se durante a passagem destes primeiros pelo comprimento do material de testes a ruptura não for atingida, o corpo-de-prova estaria sujeito aos novos carregamentos de XII a XVII. Para que isto ocorra, o tempo necessário à falha do material deve ser maior que 0,81 ms, aproximadamente.

Independentemente do tempo que cada corpo-de-prova necessitou para falhar, as reflexões no anteparo, indicadas pelos pulsos II, III e IV, aconteceram permanentemente, em menor amplitude conforme o número de reflexões, obviamente, porém, incessantemente. Isto significa que, o diagrama esquematizado na Figura 90 apresenta apenas quatro dos diversos pulsos refletidos que provavelmente atingiram a interface da barra incidente com o corpo-de-prova, durante os ensaios. Estes carregamentos espaçados de 0,024 ms, somados ao carregamento original (pulso I), acometeram o corpo-de-prova até que a fratura desse material fosse atingida.

A não ser que a ruptura do material de testes aconteça em no máximo 0,024 ms, ao menos um segundo pulso, proveniente da reflexão da onda original na extremidade do anteparo, atingirá o corpo-de-prova e, tantas outras o farão, até que a tensão limite de resistência do material seja atingida e o mesmo se quebre.

Para a construção das curvas de tensão *versus* deformação para os corpos-de-prova de R7 a R11, quando submetidos aos carregamentos dinâmicos aqui descritos, necessitou-se, primeiramente, identificar o momento exato da ocorrência de cada evento dentro dos dados de deformação registrados pelos extensômetros. A fim de precisar este momento lançou-se mão da transformada de Gabor, a qual possui a capacidade de localizar frequências específicas no domínio do tempo.

Na Figura 91, supõe-se que os picos P5, P6 e P7 correspondam à parcela refratada da onda original (P1, P2 e P3, respectivamente), detectadas em SG2, uma vez que o intervalo entre estes e os picos registrados por SG1 condiz com tempo de ensaio identificado pelas filmagens. Entretanto, não é possível afirmar, visto a amplitude dos ruídos inseridos nos dados de deformação obtidos pelos extensômetros. Por esta suposição P4 corresponderia à reflexão de P1.

Figura 91: Identificação dos sucessivos picos de deformação ocorridos em ambas as barras. Fonte: Autoria própria.

As análises realizadas por meio da utilização do método da transformada de Gabor permitem, conforme Figuras 92 e 93, identificar o intervalo de tempo em que, possivelmente, o ensaio mecânico ocorreu.

Os parâmetros $F_{\min}$, $F_{\max}$, F_{grid} e α , utilizados na plataforma Lab View para análise dos sinais adquiridos pelos extensômetros são, respectivamente, os valores atribuídos para frequências mínima e máxima apresentadas no eixo das ordenadas, intervalo de graduação deste mesmo eixo e uma constante de proporcionalidade gráfica entre os eixos vertical e horizontal.

É possível observar, por meio da análise das Figuras 92 e 93 que, nas regiões limitadas pelas faixas horizontais e verticais alaranjadas, os intervalos destacados abrangem faixas de frequência entre 2000 e 7000 Hz, o que condiz com a faixa de ocorrência das taxas de deformação de cada corpo-de-prova, conforme Figura 84 e, por esta razão, sugerem que o ensaio tenha ocorrido no intervalo indicado.

Figura 92: Identificação do momento correspondente ao carregamento do corpo-de-prova dentre os dados de deformação registrados pela barra incidente, utilizando-se a transformada de Gabor. Fonte: Autoria própria.

Figura 93: Identificação do momento correspondente ao carregamento do corpo-de-prova dentre os dados de deformação registrados pela barra de transmissão, utilizando-se a transformada de Gabor. Fonte: Autoria própria.

As Figuras 92 e 93 são ampliações individuais da Figura 94, na qual está indicada a aplicação da transformada de Gabor para toda a curva. Nesta análise é possível perceber a ocorrência de picos de frequência (manchas brancas) em torno da faixa de frequência desejada (de 2000 a 7000 Hz).

Apesar de haver oscilação de frequências, dentro na faixa correspondente ao registrado pelos dados de deformação, obtidos pela análise das imagens, no início da curva de deformação no tempo (Figura 94), ao longo dessa também é possível notar a presença de outros picos de frequência na mesma faixa. Este fenômeno, associado a alta amplitude dos ruídos nos dados de deformação registrados por SG1 e SG2, impede a identificação do momento preciso em que os testes ocorreram.

Figura 94: Resultado da análise de Gabor para a curva de deformação no tempo completa. Fonte: Autoria própria.

Por meio das análises realizadas e aqui relatadas, a redução, e até mesmo a eliminação dos efeitos de sobreposição de ondas, somente será possível com o aumento do comprimento do anteparo para, no mínimo, 512 mm, ou promovendo o aumento abrupto da pressão do gás no interior da câmara de pressurização. A definição do comprimento mínimo necessário para o anteparo deu-se assumindo que cada ensaio demorasse no máximo 0,2 ms (200 μ s). Este tempo é calculado desde o atingimento do pulso trativo à interface barra incidente e corpo-de-prova, até a falha do material de testes. As equações de (48) a (50) trazem a dedução do comprimento mínimo necessário para o anteparo.

$$L_{ant} = \frac{c \cdot t_{ch}}{2} \quad (48)$$

$$L_{ant} = \frac{5110,25 \cdot 0,2E-3}{2} \quad (49)$$

$$L_{ant} = 0,511 \quad (50)$$

As Figuras 95 e 96 trazem as curvas de tensão *versus* deformação extraídas dos dados de deformação obtidos para o ensaio de R7. Estas figuras demonstram a dificuldade em se obter valores coerentes para as propriedades mecânicas: módulo de elasticidade e limite de escoamento do material ensaiado sob condições de carregamento dinâmico. A impossibilidade em determinar esses parâmetros deu-se pela existência de diversos carregamentos sucessivos, os quais geraram interferências nos sinais registrados pelos extensômetros.

Figura 95: Curva tensão *versus* deformação para corpo-de-prova R7, considerando dados de SG1 apenas. Fonte: Autoria própria.

Os valores de tensão trazidos pela Figuras 95 estão, em sua maioria, acima de 1000 MPa, isto porque os dados utilizados referem-se ao pulso incidente, em cuja amplitude estava inserida a máxima energia disponível para o carregamento mecânico do material de testes. Alternativamente pode-se fazer uso da técnica de somar ao pulso incidente, o pulso refletido, entretanto, os sucessivos carregamentos que se originaram nas constantes reflexões na interface do anteparo, promoveram a sobreposição de efeitos e ondas, o que acabou por prejudicar uma correta interpretação dos sinais, por ambas as técnicas supracitadas. A Figura 96 mostra a

curva tensão *versus* deformação para o corpo-de-prova de R7 após aplicação da técnica de adição dos dados, aqui mencionada.

A aplicação da técnica da adição dos dados de deformação referentes ao pulso refletido ao pulso incidente representa, proporcionalmente, a energia disponibilizada aos corpos-de-prova durante o carregamento dinâmico.

Figura 96: Curva tensão *versus* deformação para corpo-de-prova R7, considerando adição dos dados do pulso refletido ao pulso incidente. Fonte: Autoria própria.

Mesmo após a adição das ondas a tensão de escoamento do material estaria em torno de 1000 MPa, o que não condiz com o comportamento esperado do material ensaiado: tensão de escoamento aproximadamente igual a 350 MPa. Além deste ponto importante, a inclinação da parcela referente ao comportamento elástico do material não representa um aço, para o qual é sabido que o módulo de elasticidade é de cerca de 205 GPa.

A substituição dos extensômetros para outros de grade menor, entre 0,2 ou 0,3 mm (opções disponíveis no mercado, porém, para resistências de 120 Ω), garantirá que o erro de medição estará para níveis de deformações da ordem de 2E-3 ou 3E-3 mm, dependendo da escolha do novo extensômetro. Entretanto, para movimentos da barra sem que haja deformação expressiva, mesmo a redução da grade sensorial dos extensômetros será incapaz de registrar leituras abaixo de 1 $\mu\text{m/m}$ (sem considerar fator k de correção). Uma abordagem que talvez seja mais

contundente seja a fixação da barra de transmissão pela extremidade oposta à interface com o corpo-de-prova. Desta maneira a energia transmitida a esse elemento elástico será necessariamente transformada em deformação do material.

7.2.8 Determinação da energia necessária para romper o material de testes em máquina de ensaios de tração universal

Notou-se, entre os ensaios realizados após a revisão do projeto do equipamento SHPB, uma redução em torno de 90% na duração do carregamento dos corpos-de-prova e atingimento da ruptura dos mesmos, para os R7, R8, R9, R10 e R11 em relação aos R1, R2, R3 e R4. Contudo, a fratura do material em testes, para todos os casos, ainda ocorreu após a passagem de diversos pulsos trativos através do comprimento dos corpos-de-prova. Este fato sugere que a energia disponível ainda é insuficiente ou ainda, a perda energética entre o impacto do projétil com o anteparo e o carregamento do corpo-de-prova posicionado entre as barras incidente e de transmissão é demasiada.

Diante da impossibilidade de atingir a ruptura dos corpos-de-prova testados durante a passagem de uma única onda trativa ao longo do comprimento do material de testes, novamente questionou-se qual seria a energia mínima necessária para que o material de testes, nas geometrias escolhidas fraturasse.

Para essa verificação dois corpos-de-prova para cada geometria foram confeccionados e ensaiados em uma máquina de ensaios de tração universal do fabricante INSTRON. As geometrias adotadas para a confecção destes quatro últimos CPs foram exatamente as mesmas representadas pelas Figuras 66 e 67, salvo pelas roscas nas extremidades que foram suprimidas. Extremidades lisas eram necessárias para garantir o posicionamento e permanência do material de testes entre as garras de fixação da máquina durante todo o ensaio. A Figura 97 traz a geometria dos novos corpos-de-prova.

Figura 97: Geometria utilizada para execução dos ensaios na máquina INSTRON, com variação no comprimento útil conforme tabela no canto inferior direito. Fonte: Autoria própria.

Os corpos-de-prova foram identificados como I1, I2, I3 e I4, sendo os dois primeiros relativos à geometria de menor comprimento útil (8 mm) e os dois últimos relativos à geometria de comprimento útil aproximado de 16 mm. As curvas de tensão *versus* deslocamento, obtidas durante carregamento do material na condição quase estática - velocidade de aplicação do carregamento de 6 mm/min - estão indicadas, duas a duas, pelas Figuras 98 e 99 para os corpos-de-prova I1 e I2, e I3 e I4, respectivamente. Devido as geometrias bastante diminutas, o corpo-de-prova I4 sofreu escorregamento entre as garras de fixação e, portanto, a curva apresentada pela Figura 99 não será considerada para efeito de análise energética.

(a)

(b)

Figura 98: Curva tensão verdadeira versus deformação verdadeira para os corpos-de-prova **(a)** I1 e **(b)** I2. Fonte: Autoria própria.

(a)

(b)

Figura 99: Curva tensão verdadeira *versus* deformação verdadeira para os corpos-de-prova **(a)** I3 e **(b)** I4. Fonte: Autoria própria.

Os dados dimensionais, antes e após os ensaios, assim como o alongamento e os registros de tensões de escoamento e de limite de resistência estão indicados nas Tabelas 13 e 14, para os corpos-de-prova menores (I1 e I2) e para I3, respectivamente. Tanto as medidas de diâmetro quanto de comprimento foram obtidas por meio do uso de um paquímetro digital, cuja incerteza de medição associada era de 0,005 mm.

Tabela 13 – Dados relativos aos ensaios de I1, I2 em uma máquina de ensaios de tração convencional INSTRON.

CP	D ₀ [mm]	D _f [mm]	L ₀ [mm]	L _f [mm]	ΔL %	ΔA %	σ _e [MPa]	σ _r [MPa]
I1	2,56	1,00	10,00	13,05	30,5	84,7	369,3	518,6
I2	2,65	1,00	10,00	13,15	31,5	85,8	339,6	518,8
Média	-	2,605	1,00	10,00	31,0	85,25	354,45	518,7
δ_p	-	0,000	0,00	0,00	0,071	0,707	21,001	0,141

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14 – Dados relativos ao ensaio de I3 em uma máquina de ensaios de tração convencional INSTRON.

CP	D ₀ [mm]	D _f [mm]	L ₀ [mm]	L _f [mm]	ΔL %	ΔA %	σ _e [MPa]	σ _r [MPa]
I3	2,62	1,00	15,00	19,92	32,8	85,4	307,9	513,3

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 15 traz a variação volumétrica obtida para cada um dos três corpos-de-prova testados – I1, I2 e I3 -, assim como a energia dispendida pela máquina de ensaios INSTRON até que a ruptura do material testado fosse atingida.

Tabela 15 – Dados de energia gasta por unidade de volume para atingimento da ruptura dos corpos-de-prova I1, I2 e I3.

CP	ΔV [mm ³]	E _s [J]	E' _s [J/mm ³]
I1	4,76	7,19	1,51
I2	5,20	7,88	1,52
I3	7,97	12,18	1,53
Média	5,98	9,08	1,52
δ_p	1,74	2,70	0,01

Fonte: Autoria própria.

Multiplicando-se os dados obtidos para o alongamento dos corpos-de-prova R1 a R11 pela respectiva redução de área (Tabelas 10 e 11), obtêm-se como a energia dispendida por unidade de volume os resultados divulgados pelas Tabelas 16 e 17.

Tabela 16 – Energia dispendida por unidade de volume dos corpos-de-prova R1 a R4.

	CP	ΔV [mm ³]	E_s [J]	E'_s [J/mm ³]
	R1	5,37	83,14	15,49
	R2	20,61	83,14	4,03
	R3	6,53	83,14	12,72
	R4	7,22	83,14	11,51
Média	-	9,93	83,14	10,94
δ_p	-	7,16	0,00	4,90

Fonte: Autoria própria.

Tabela 17 – Energia dispendida por unidade de volume dos corpos-de-prova R7 a R11.

	CP	ΔV [mm ³]	E_s [J]	E'_s [J/mm ³]
	R7	5,09	83,14	16,34
	R8	5,21	83,14	15,97
	R9	5,25	83,14	15,83
	R10	6,86	83,14	12,12
	R11	9,58	83,14	8,68
Média	-	6,40	83,14	13,78
δ_p	-	1,92	0,00	3,33

Fonte: Autoria própria.

A análise comparativa entre os valores de energia por unidade volumétrica obtidos pelas Tabelas 16 e 17 e aqueles determinados pelos ensaios de tração convencionais e registrados na Tabela 15 permite deduzir que, considerando perda zero na SHPB, a energia disponível aos corpos-de-prova (de 10 a 14 J/mm³) é bem superior ao mínimo necessário para que ambas as geometrias utilizadas atinjam a fratura durante carregamento trativo (1,52 J/mm³). A energia considerada como sendo aquela disponível para a realização dos ensaios na SHPB foi obtida por meio do cálculo representado pela equação (26) para pressão de trabalho equivalente a 8 bar (0,8 MPa).

Na dedução da energia total disponível de 83,14 J, todos os efeitos de perda energética por atrito e dissipação sonora e térmica durante deslocamento do projétil foram desconsiderados, assim como as perdas energéticas envolvidas no deslocamento da barra incidente. Para a geometria utilizada na confecção dos corpos-de-prova R1 a R4 e I3 a energia disponível para os ensaios de tração em alta velocidade é cerca de sete vezes superior à mínima necessária para romper o material de testes em condições estáticas. Para a geometria utilizada na confecção dos corpos-de-prova R7 a R11 e I1 e I2, por sua vez, o nível de superioridade da energia disponível em relação à obtida pelos testes na máquina INSTRON é de aproximadamente nove vezes maior.

Esses resultados permitem avaliar que, possivelmente, assim como deduzido nas seções 7.2.1, 7.2.4, 7.2.6 e 7.2.7, apesar da energia disponível ser maior que a mínima necessária para que os corpos-de-prova atinjam a ruptura durante a passagem de um único pulso trativo, a existência de uma sucessão de frentes de onda consecutivas na interface barra incidente e anteparo, promoveu diversos carregamentos mecânicos ao material, o que, independeu do nível de energia disponível.

Outrossim, aparentemente o fator limitante ao atingimento da ruptura do material de testes, durante a passagem de um único pulso trativo ao longo do comprimento deste, é o comprimento atribuído ao elemento “anteparo”. Espera-se que ao aumentá-lo para, no mínimo, 512 mm o efeito das reflexões sucessivas à frente de onda original seja minimizado e que o corpo-de-prova venha a romper-se dentro de um intervalo menor que 200 μ s.

8 CONCLUSÕES GERAIS

- i. Mudança do ponto de instrumentação das barras de 600 para 1000 mm da extremidade foi essencial para a redução de sobreposição de pulsos;
- ii. Deformação causada à barra de transmissão foi inexpressiva, impossibilitando análise via dados de deformação oriundos dos extensômetros;
- iii. Existência de grande quantidade de perda energética entre os instantes do choque mecânico entre projétil e anteparo e ruptura dos corpos-de-prova;
- iv. Erro intrínseco à leitura dos extensômetros precisa ser diminuído com, por exemplo, a utilização de sensores de grade de 0,3 mm ou 0,2 mm;
- v. O comprimento do anteparo precisa ser aumentado para 511 mm a fim de impedir a propagação de um segundo pulso de onda ao longo do comprimento do corpo-de-prova antes que a ruptura seja atingida;
- vi. Construção mecânica do equipamento mostrou-se satisfatória, assim como o novo sistema de vedação;
- vii. Para o comprimento atual do anteparo a câmera i-SPEED 3 é incapaz de registrar, com segurança e exatidão, os sucessivos pulsos que atingem o corpo-de-prova;
- viii. Transformada de Gabor propiciou identificar, dentre os dados de deformação das barras, com razoável precisão o intervalo no qual cada ensaio ocorreu;
- ix. Ampliar o número de espécimes testados, aumentando a confiabilidade e a repetitividade dos resultados;
- x. Material testado possuía comportamento muito dúctil, o que impossibilitou a ruptura dos corpos-de-prova durante a propagação de um único pulso de onda ao longo do comprimento destes.

9 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- i. Melhorar sistema de aquisição de sinais e sincronização de dados;
- ii. Realizar ensaios em materiais metálicos de comportamento conhecidamente frágeis a fim de registrar a resposta destes na condição de carregamento a altas taxas de deformação e compará-la àquela descrita por ensaios em condições estáticas. Como sugestão recomenda-se utilizar ferro fundido cinzento, visto sua baixa resistência mecânica;
- iii. Entender e controlar todas as variáveis envolvidas nos ensaios via SHPB para materiais frágeis para, somente então, ampliar a gama de materiais testados, ainda dentro dos comportadamente frágeis para, *a posteriori*, trabalhar com materiais dúcteis;
- iv. Desenvolver uma liga metálica de comportamento frágil para realização de testes na SHPB;
- v. Optar por corpos-de-prova metálicos e de geometria cilíndrica com pontas roscadas, a fim de evitar o uso de garras de fixação e, conseqüentemente, não acrescentar impedâncias acústicas ao sistema;
- vi. Realizar testes com Charpy instrumentado a fim de obter resultados semelhantes àqueles possíveis de se registrar por meio do uso da SHPB;
- vii. Tornar idênticas as vazões de entrada e de saída na câmara de pressurização.

REFERÊNCIAS

Abramov, A.V., Bragov, A.M., Lomunov, A.K., Konstantinov, A.Yu, Kruszka, L., Sergeichev, I.V. Experimental and numerical analysis of high strain rate behavior of aluminum alloys AMg-6 and D-16. **Journal de Physique IV**, v. 134, p. 487-491, 2006.

Acosta, J.F., Raju, K.S. Dispersion Effects on High Speed Tension Testing – SHPB. In: PROCEEDINGS OF THE 3TH ANNUAL GRASP SYMPOSIUM, Wichita, USA, 2007.

American Society for Testing and Materials **E855-08 Standard Test Methods for Bend Testing of Metallic Flat Materials for Spring Applications Involving Static Loading**, 2008.

American Society for Testing and Materials **E8/E8M - 11 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**, 2011.

Bacon, C., Färm, J., Lataillade, J.L. Dynamic Fracture Toughness Determined from Load-point Displacement. *Experimental Mechanics*, v. 34, n. 3, p. 217-223, 1993.

Besnard, G., Hild, F., Lagrange, J.M., Martinuzzi, P., Roux, S. Analysis of necking in high speed experiments by stereocorrelation. **International Journal of Impact Engineering**, v. 49, p. 179–191, 2012.

Børvik, T., Hopperstad, O.S., Berstad, T., Dey, S., Langseth, M. Finite Element Analysis of Ductile Failure in Structural Steel Subjected to Multiaxial Stress States and High Strain Rates. In: PROCEEDINGS OF THE 3TH EUROPEAN LS DYNA USER'S CONFERENCE, Paris, France, 2011.

Chen, Y., Clausen, A.H., Hopperstad, O.S., Langseth, M. Application of a split-Hopkinson tension bar in a mutual assessment of experimental tests and numerical predictions. **International Journal of Impact Engineering**, v. 38, p. 824-836, 2011.

Chen, Y., Clausen, A.H., Hopperstad, O.S., Langseth, M. Stress-strain behavior of aluminium alloys at a wide range of strain rates. **International Journal of Solids and Structures**, v. 46, p. 3825-3835, 2009.

Chen, W.W., Song, B. **Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications**. New York: Springer, 2011. 398 p. ISBN 978-1-4419-7982-7.

Clausen, A.H., Auestad, T., Berstad, T., Børvik, T., Langseth, M. High-temperature tests on aluminium in a split-Hopkinson bar – experimental set-up and numerical predictions. **Journal de Physique IV**, v. 134, p. 603-608, ago. 2011.

Clausen, A.H., Børvik, T., Hopperstad, O.S., Benallal, A. Flow and fracture characteristics of aluminium alloy AA5083-H116 as function of strain rate, temperature and triaxiality. **Materials Science and Engineering A**, v. 364, p. 260-272, 2004.

Delvare, F., Hanus, J.L., Bailly, P. A non-equilibrium approach to processing Hopkinson Bar bending test data: Application to quasi-brittle materials. **International Journal of Impact Engineering**, v. 37, p. 1170-1179, 2010.

Dong, S., Wang, Y., Xia, Y. A finite element analysis for using Brazilian disk in split Hopkinson pressure bar to investigate dynamic fracture behavior of brittle polymer materials. **Polymer Testing**, v. 25, p. 943-952, 2006.

Eskandari, H., Nemes, J.A. Dynamic Testing of Composite Laminates with a Tensile Split Hopkinson Bar. **Journal of Composite Materials**, v.34, p. 260-273, fev. 2000.

Felício, L.C. **Modelagem da dinâmica de sistemas e estudo da resposta**. Ed.1. São Carlos: Rima, 2007. 568 p. ISBN 978-85-7656-118-7.

Figliola, R.S., Beasley, D.E. **Teoria e Projeto para Medições Mecânicas**. Ed.4. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 482 p. ISBN 978-85-2161-572-9.

Gallina, F., Birch, R.S., Alves, M. Design of a split Hopkinson pressure bar. In: BRAZILIAN CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 2003, São Paulo, CD-Rom.

Gama, B.A., Gillespie, J.W., Jr. **Numerical Hopkinson Bar Analysis: Uni-Axial Stress and Planar Bar-Specimen Interface Conditions by Design**. Newark: University of Delaware, 2004. 58 p.

Gama, B.A., Lopatnikov, S.L., Gillespie Jr., J., W. Hopkinson bar experimental technique: A critical review. **American Society of Mechanical Engineers**, v. 57, n. 4, p. 223-250, jul. 2004.

Gerlach, R., Sathianathan, S.K., Siviour, C., Petrinic, N. A novel method for pulse shaping of Split Hopkinson tensile bar signals. **International Journal of Impact Engineering**, v. 38, p. 976-980, 2011.

Gilat, A., Torsional Kolsky Bar Testing. **Mechanical Testing and Evaluation**, ASM Handbook, v. 8, ASM International: Materials Park, OH, 2000, p. 505-515.

Gray, G.T.,III. Classic Split-Hopkinson Pressure Bar Testing. **Mechanical Testing and Evaluation**, ASM Handbook, v. 8, ASM International: Materials Park, OH, 2000, p. 462-476.

Guzman, O., Frew, D.J., Chen, W. A Kolsky tension bar technique using a hollow incident tube. **Measurement Science and Technology**, v.22, p. 1-9, mar. 2011.

Habibzadeh, A., Sadeghi, M.H., Davoodi, B., Jabbaripoor, B. Constitutive Modeling of Mechanical Behavior of a Ti-alloy, Applicable in Metal Cutting. **Advanced Materials Research**, v. 83-89, p. 661-671, 2010.

HBM, **Operating Manual QUANTUM X**. Ed. 4. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 2002. 148 p.

Hopperstad, O.S., Børvik, T., Langseth, M., Labibes, K., Albertini, C. On the influence of stress triaxiality and strain rate on the behavior of a structural steel. Part I. Experiments. **European Journal of Mechanics A/Solids**, v. 22, p. 1-13, 2003.

Huh, H., Kang, W.J., Han, S.S. A Tension Split Hopkinson Bar for Investigating the Dynamic Behavior of Sheet Metals. **Experimental Mechanics**, v.42, n. 1, p. 8-17, mar. 2002.

Jeunechamps, P.P., Ponthot, J.P. An efficient 3D implicit approach for the thermomechanical simulation of elastic-viscoplastic materials submitted to high strain rate and damage. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 94, p. 920-960, 2013.

Kaiser, M.A. **Advancements in the Split Hopkinson Bar Test**. Blacksburg: Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998. 94 p.

Kajberg, J., Sundin, K.-G. Material characterisation using high-temperature Split Hopkinson pressure bar. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 213, p. 522-531, 2013.

Lee, C.K.B., Crawford, R.C., Mann, K.A., Coleman, P., Petersen, C. Evidence of higher Pochhammer-Chree modes in an unsplit Hopkinson bar. **Measurement Science and Technology**, v.6, p. 853-859, 1995.

Lim, C.T., Teo, Y.M., Shim, V.P.W. Numerical Simulation of the Drop Impact Response of a Portable Electronic Product. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, v. 25, n. 3, p. 478-485, set. 2002.

Marais, S. T., Tait, R.B., Cloete, T.J., Nurick, G.N. Material testing at high strain rate using the split Hopkinson pressure bar. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 1, p. 319-339, jul. 2004.

MATWEB MATERIAL PROPERTY DATA. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=10b74ebc27344380ab16b1b69f1cffbb&ckck=1>. Acesso em: 23 jul. 2014.

Micheli, G.B. **Análise numérico-experimental do impacto em chapas de alumínio aeronáutico**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008. 180 p.

Mohr, D., Gary, G. M-shaped Specimen for the High-strain Rate Tensile Testing Using a Split Hopkinson Pressure Bar Apparatus. **Experimental Mechanics**, v. 47, p. 681-692, 2007.

Noble, J.P., Goldthorpe, B.D., Church, P., Harding, J. The use of the Hopkinson bar to validate constitutive relations at high rates of strain. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 47, p. 1187-1206, 1999.

Olympus. **High-Speed Video i-SPEED 3 Features & Specifications**. United Kingdom, 2012.

Pantalé, O. An object-oriented programming of an explicit dynamics code: application to impact solution. **Advances in Engineering Software**, v. 33, p. 297-306, 2002.

Park, S.W., Zhou, M. Separation of Elastic Waves in Split Hopkinson Bars Using One-point Strain Measurements. **Experimental Mechanics**, v.39, n.4, p 287-294, 1999.

Ramezani, M., Ripin, Z.M., Ahmad, R. Plastic bulging of sheet metals at high strain rates. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, v. 48, p. 847-858, 2010.

Salisbury, C.P., Worswick, M.J., Mayer, R. High rate constitutive modeling of aluminium alloy tube. **Journal de Physique IV**, v. 134, p. 43-48, 2007.

Sasso, M., Newaz, G., Amodio, D. Material characterization at high strain rate by Hopkinson bar tests and finite element optimization. **Material Science and Engineering A**, v. 487, p. 289-300, 2008.

Schaeffer, L. Treinamento em Forjamento. In: TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE FORJAMENTO, 2012, Porto Alegre. **Apostila de Treinamento em Forjamento** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. Bloco 4, p. 15.

Sedighi, M., Khandaei, M., Shokrollahi, H. An approach in parametric identification of high strain rate constitutive model using Hopkinson pressure bar test results, **Material Science and Engineering A**, v. 527, p. 3521-3528, 2010.

Sen, O., Tekalur, S.A., Jilek, C. The determination of dynamic strength of single lap joints using the split Hopkinson pressure bar. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 31, p. 541-549.

Smerd, R., Winkler, S., Salisbury, C., Worswick, M., Lloyd, D., Finn, M. High strain rate tensile testing of automotive aluminum alloy sheet. **International Journal of Impact Engineering**, v.32, p. 541-560, 2005.

Song, B., Chen, W. Split Hopkinson pressure bar techniques for characterizing soft materials. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 2, p. 113-152, 2005.

Trexler, M.M., Lennon, A.M., Wickwire, A.C., Harrigan, T.P., Luong, Q.T., Graham, J.L., Maisano, A.J., Roberts, J.C., Merkle, A.C. Verification and implementation of a modified split Hopkinson pressure bar technique for characterizing biological tissue and soft biosimulant materials under dynamic shear loading. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 4, p. 1920-1928, 2011.

Ulacia, I., Salisbury, C.P., Hurtado, I., Worswick, M.J. Tensile characterization and constitutive modeling of AZ31B magnesium alloy sheet over wide range of strain rates and temperatures. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 211, n. 5, p. 830-839, 2011.

Umbrello, D. Sauobi, R.M., Outeiro, J.C. The influence of Johnson-Cook material constants on finite element simulation of machining of AISI 316L steel. **International journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, p. 462-470, 2007.

Verleysen, P., Degrieck, J. Experimental investigation of the deformation of Hopkinson bar specimens. **International Journal of Impact Engineering**, v. 30, p. 239-253, 2004.

Xu, W., Huang, X., Hao, Z., Wang, Y., Xia, Y. Effect of the geometric shapes of specimens on impact tensile tests. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics and Engineering)**, v. 11, n. 10, p. 817-821, 2010.

Yang, B., Tang, L., Liu, Y., Liu, Z., Jiang, Z., Fang, D. Localized deformation in aluminium foam during middle speed Hopkinson bar impact tests. **Material Science and Engineering A**, v. 560, p. 734-743, 2013.

Yang, L.M., Shim, V.P.W. An analysis of stress uniformity in split Hopkinson bar test specimens. **International Journal of Impact Engineering**, v. 31, p. 129-150, 2005.

Zhou, X.Q., Xia, Y., Huang, W. Aggregate Shape Effect on Mesoscale Modeling of Concrete under High Strain Rate Tension. **Advanced Materials Research**, v. 243-249, p. 6127-6130, 2011.